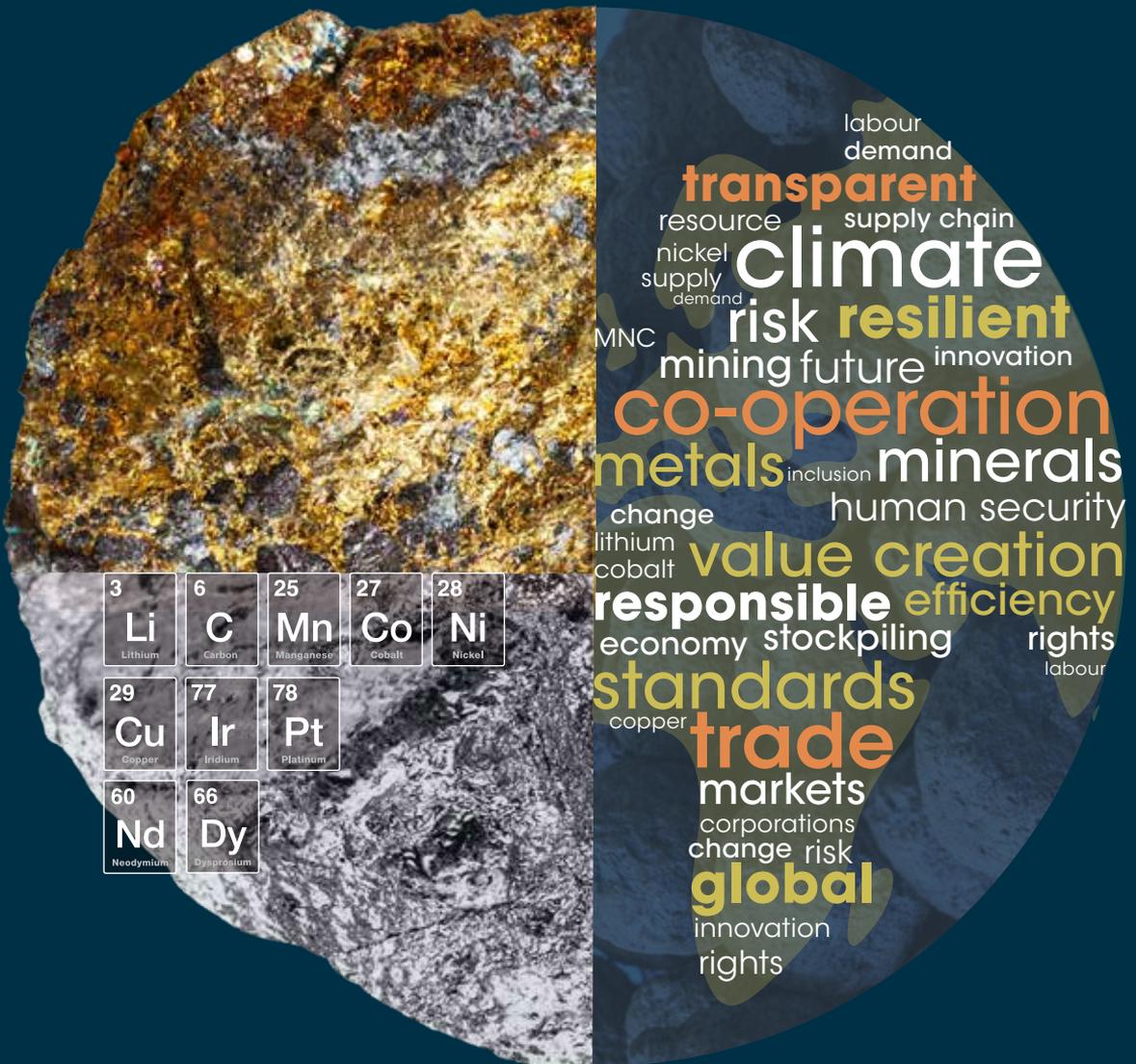


能源转型的地缘政治 关键原材料



© IRENA 2023

除非另有说明，本出版物中的材料可以自由使用、共享、复制、翻印、印刷和 / 或存储，前提是需恰当确认 IRENA 为资料来源和版权所有。本出版物中属于第三方的材料可能受单独的使用条款和限制的约束，在使用此类材料之前，可能需要获得这些第三方的相应许可。

ISBN: 978-92-9260-574-2

引文：IRENA (2023), *能源转型的地缘政治：关键原材料*，国际可再生能源署 (IRENA)，阿布扎比。

本文件为“*Geopolitics of the energy transition: Critical materials*”的译本，ISBN：978-92-9260-539-1 (2023)。如中文译本与英文原版的内容不一致，概以英文版为准。

欲了解更多信息或向我们提供反馈，请发送电子邮件至：publications@irena.org

下载地址：www.irena.org/publications

关于 IRENA

国际可再生能源署 (IRENA) 是一个政府间组织，它为各国向可持续能源未来过渡提供支持，并作为国际合作的主要平台、卓越中心以及可再生能源政策、技术、资源和金融知识的信息库。IRENA 促进各种形式可再生能源的广泛应用和可持续使用，包括生物能、地热、水力发电、海洋能、太阳能和风能，追求可持续发展、能源获取、能源安全和低碳经济的增长与繁荣。

www.irena.org

本出版物得到了荷兰和挪威政府的自愿捐助支持。

免责声明

本出版物及所使用的资料均按“原样”提供。IRENA 已经采取了所有合理的措施，以验证本出版物中资料的可靠性。然而，IRENA、其任何官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者均不提供任何明示或暗示的担保，且对使用本出版物或材料的任何后果不承担任何责任或法律责任。

本出版物中包含的信息不一定代表 IRENA 所有成员的观点。提及特定的公司或特定的项目或产品并不意味着 IRENA 认可或推荐这些公司或产品，认为其优先于未提及的类似性质的其他公司或产品。本出版物中使用的名称和出现的材料并不意味着 IRENA 对任何地区、国家、领土、城市或区域或其当局的法律地位，或对其边境或边界的划定发表任何意见。

所有未注明出处的矿物和金属照片均在 Shutterstock 许可下使用。

致谢

本报告在 Elizabeth Press (IRENA 规划与计划支持部干事) 的监督和指导下, 由 Thijs Van de Graaf (IRENA 顾问兼主要作者)、Martina Lyons、Isaac Elizondo Garcia、Ellipse Rath (IRENA 成员) 和 Benjamin Gibson (IRENA 前成员) 共同撰写。

本报告作者对以下 IRENA 同事提供的评审、意见和支持表示感谢: Roland Roesch、Rabia Ferroukhi、Anastasia Kefalidou、Claire Kiss (前 IRENA 成员)、Deepti Siddhanti、Divyam Nagpal、Francis Field、Francisco Boshell、Griffin Thompson (IRENA 顾问)、Kathleen Daniel、Kelly Rigg (IRENA 顾问)、Michael Renner、Mirjam Reiner、Paul Komor、Sophie Sauerteig (前 IRENA 成员)、Stephanie Clarke、Ute Collier 和 Zhaoyu 'Lewis' Wu。

Sara Geeraerts (IMEP)、André Månberger、Dastan Bekmuratov、Gavkharkhon Mamadzhanova、Ida Dokk Smith、Indra Overland、Julia Loginova、Mari Tønnessen、Philip Swanson、Roman Vakulchuk 和 Tatjana Stankovic (NUPI) 也提供了宝贵意见。

参与同行评审的有: Henry Sanderson (Benchmark Mineral Intelligence); Jan Morrill、Paulina Personius、Payal Sampat 和 Vuyisile Ncube (Earthworks); Sebastian Sahla (EITI); Yana Popkostova (欧洲能源与地缘政治分析中心); Irina Patrahau (HCSS); Karsten Sach (IRENA 顾问); Patrícia Alves Dias 和 Vangelis Tzimas (JRC); Hans Olav Ibrekk 和 Jonas Volden Weltan (挪威外交部); Jean-Philippe Bernier 和 Jeffrey Akomah (加拿大自然资源部); David Manley (NRGI); Clarisse Legendre、Louis Marechal、Luca Maiotti 和 Przemyslaw Kowalski (OECD); Jim Krane (莱斯大学贝克研究所); Kathryn Sturman (可持续矿产研究所); Leonardo Buizza (SYSTEMIQ 有限公司等); Ligia Noronha 和 Maria Jose Baptista (UNEP); Matthew David Wittenstein (UN ESCAP); Virginie Nachbaur (诺曼底鲁昂大学); Aaron NG、Anna Wendt、Dennis Mesina 和 Salim Bhabhrawala (美国能源部); 以及 Dolf Gielen (世界银行)。

IRENA 对来自以下国家的代表对调查做出的答复表示感谢: Nirod Chandra Mondal (孟加拉国); Robbie Frank (加拿大); Moussa Ousman (中非共和国); Jarkko Vesa (芬兰); Nicolas Leconte (法国); Stefano Raimondi (意大利); Brian Richardson (牙买加); Paul Mbuthi (肯尼亚); Harold Madriz (尼加拉瓜); Rosilena Lindo (巴拿马); Marco Antonio Santiváñez Pimentel (秘鲁); Josephine Bahr Ljungdell (瑞典); Brian Isabirye (乌干达); Mahek Mehta (联合王国); Aaron Ng (美国) 和 Sosten Ziuku (津巴布韦)。

IRENA 对以下调查受访专家的宝贵意见表示感谢: Phung Quoc Huy (亚太能源研究中心); Paul Huggins (碳信托基金); Coby van der Linde (Clingendael 国际能源计划); Sebastian Sahla (EITI); Leonardo Buizza (能源转型委员会/Systemiq 有限公司); Yana Popkostova (欧洲能源和地缘政治分析中心); Reed Blakemore (全球能源中心; 大西洋理事会); Erika Hamdi (IEEFA); Veronica Navas Ospina (IFC); Christian Breyer (LUT 大学); Sohbet karbuz (OME); Mostefa Ouki (牛津能源研究所); James Bowen (珀斯 USAsia 中心); Ramona Liberoff (加速循环经济平台); Michael Reckordt (PowerShift e.V.); Jim Krane (莱斯大学贝克研究所); Kingsmill Bond (RMI); Dirk Uwe Sauer (亚琛工业大学); Rainer Quitzow (SWP); Irina Patrahau (海牙战略研究中心); Matthew Wittenstein (UN ESCAP)、Rudiger Tscherning (卡尔加里大学); Karla Cervantes Barron (剑桥大学); Dolf Gielen (世界银行) 和 Mirza Sadaqat Huda (优索夫-伊萨克研究所)。

本报告的编辑为 Steven Kennedy, 并由 weeks.de Werbeagentur 股份有限公司设计。

缩写

APEF	铁矿石出口国协会	ITSCI	国际锡供应链倡议
ASI	铝业管理倡议	IUCN	国际自然保护联盟
ASM	手工和小规模采矿	JPY	日元
ATPC	锡生产国协会	LME	伦敦金属交易所
BRICS	巴西、俄罗斯、印度、中国和南非	LNG	液化天然气
CCS	碳捕集及存储	LPF	磷酸铁锂
CIPEC	铜出口国政府间委员会	LPG	液化石油气
CMMI	关键矿产填图计划	LME	伦敦金属交易所
DOE	美国能源部	MAC	加拿大矿业协会
EIT	欧洲理工学院	MSP	矿产安全伙伴关系
EITI	采掘业透明度倡议	MW	兆瓦
ERGI	能源资源治理倡议	NCA	镍钴铝
ERMA	欧洲原材料联盟	NMC	镍钴锰
EU	欧盟	NUPI	挪威国际事务研究所
EV	电动汽车	OECD	经合组织
FARC	哥伦比亚革命武装力量	OPEC	石油输出国组织
FDI	外国直接投资	PGM	铂族金属
GBA	全球电池联盟	PTA	初级钨砂协会
GDP	国内生产总值	RMI	负责任矿产倡议
GIS	地理信息系统	SAC	中国国家标准化管理委员会
GRI	全球报告倡议组织	SRB	中国国家物资储备局
GW	吉瓦	SQM	智利矿业化工公司
HPAL	高压酸浸	SOE	国有控股企业
IBA	国际铝矾土协会	TSM	走向可持续采矿计划
ICMM	国际采矿和金属理事会	UK	英国
IEA	国际能源署	UN	联合国
IFC	国际金融公司	UNDP	联合国开发计划署
IMF	国际货币基金组织	UNEP	联合国环境规划署
IPCC	联合国政府间气候变化专门委员会	US	美国
IRA	通货膨胀削减法案	USD	美元
IRENA	国际可再生能源署	USGS	美国地质调查局
IRMA	负责任采矿保证倡议	WETO	世界能源转型展望
ISA	国际海底管理局	WTO	世界贸易组织
ISO	国际标准组织		

前言

与任何其他部门或行业相比，能源是社会经济发展和地缘政治格局重构的核心驱动力。随着世界向更有韧性、包容和清洁的能源系统转型，可再生能源的重要性比以往任何时候都更加明显。这种转型将带来深远的变革，而近年来的情况再次证明了全球能源体系与地缘政治的紧密交织。

IRENA 对地缘政治的分析工作始于 2018 年能源转型地缘政治全球委员会的成立，并在 2019 年的报告《新世界：能源转型的地缘政治》中针对地缘政治对全球可再生能源转型的影响进行了全面概述。2020 年，IRENA 创建了能源转型地缘政治合作框架，该框架继而成为地缘政治对能源转型影响的对话论坛。针对 IRENA 成员在讨论中提出的优先事项，IRENA 在 2022 年报告《能源转型的地缘政治：氢能因素》中对氢能的未来发展进行了详细研究。

在《能源转型的地缘政治中：关键原材料》中，讨论主题的重点转为兼顾未来和过去。如今，我们非常清楚的是，能源转型需要大幅增加关键原材料的供应。原材料需求快速增长的趋势既创造了机遇，也带来了潜在的地缘政治风险。然而，对原材料和金属的抢购并不是一个新奇的现象；无论是煤、黄金还是人类历史上任何其他的采掘商品，都会遇到类似的情况。采矿业的情况通常很极端——在带来舒适生活和繁荣发展的同时，在矿山所在社区也会出现不良用工、被迫搬迁、水道污染和土地退化等后遗症。基于可再生能源的能源转型为采掘商品续写了新的篇章，并确保其价值链更具包容性、道德性和可持续性。

这份报告基于广泛的资料来源，从平衡和细微的角度对很多复杂问题进行了阐述，旨在为决策者、行业领导者、研究人员和民间团体提供参考资料，帮助其了解和应对基于可再生能源的能源转型所带来的地缘政治挑战。

我在此感谢 IRENA 各成员国对这项工作的支持，并感谢许多评审专家在报告起草过程中提供的宝贵的意见和反馈。我希望这份报告将有助于围绕关键原材料开展内容更加充实和更具建设性的对话，并帮助世界迈向更加可持续和更公平的未来。



Francesco La Camera
IRENA 总干事



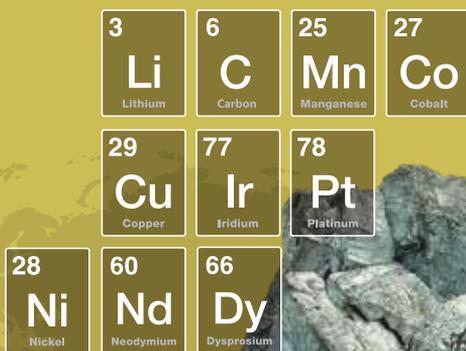
目录

致谢.....03
缩写.....04
前言.....05

研究政策摘要.....12

政策考量和前进方向.....125

参考文献.....128
附件.....147



第 1 章

引言 22

1.1 关键原材料和能源转型 23

1.2 实际限制 27

1.3 颠覆性创新 29

1.4 报告范围 33



第 2 章

贸易、安全和相互依存 34

2.1 矿物和金属贸易的主要参与者 37

2.2 供应风险和脆弱性 51

2.3 争夺关键原材料和潜在冲突 67



第 3 章

人类安全和地缘政治不稳定性 72

3.1 经济和社会矛盾 76

3.2 气候、土地和水安全 83

3.3 新的发展路径 89



第 4 章

降低风险和扩大机遇的战略 94

4.1 缓解供应链脆弱性 97

4.2 增加发展中国家的国内福利 112

4.3 促进负责任、可持续和透明的供应链 117



图片列表

图 S1	关键原材料与化石燃料有本质性区别	13
图 S2	2022 年特定矿物的主要开采国	14
图 S3	特定商品的出口值 (2021)	15
图 S4	原材料供应的主要地缘政治风险	16
图 S5	2022 年和 2030 年特定关键原材料的开采和精炼产品供应	18
图 S6	2012 年和 2022 年按国家划分的全球原材料勘探预算份额	20
图 1.1	各国和各地区确定的能源转型关键原材料 (35 份清单, 51 种材料)	24
图 1.2	特定商品的出口值 (2021)	25
图 1.3	关键原材料与化石燃料有本质性区别	26
图 1.4	影响能源转型关键原材料开发的三大动态因素	27
图 1.5	评估特定材料的当前供应与 2030 年预期需求之间的差异	28
图 1.6	2015 年至 2022 年间全球电动汽车电池化学成分的快速变化	29
图 2.1	矿物或金属相关价值链的示意图	37
图 2.2	特定矿物的主要开采国	39
图 2.3	特定矿物的主要加工国	40
图 2.4	2022 年特定关键原材料的开采和精炼产品供应	42
图 2.5	2030 年特定关键原材料的开采和精炼产品供应预测	42
图 2.6	2012 年和 2022 年按国家划分的全球特定原材料勘探预算份额	43
图 2.7	2012 年至 2022 年按投资类型划分的特定原材料全球勘探预算份额	44
图 2.8	2021 年大型矿业公司在特定原材料方面的市场份额	45
图 2.9	2022 年按特定原材料价值划分的双边贸易流量	50
图 2.10	原材料供应的主要地缘政治风险	52
图 2.11	2009-2020 年全球原材料出口受限发生率	56
图 2.12	2020 年出口受限后的全球出口份额	57
图 2.13	2007-2016 年国际稀土金属氧化物价格	60
图 2.14	2020 年矿物生产国的政治稳定性	65
图 2.15	深海采矿的三类目标矿床的地理分布	68

图 3.1	位于原住民或农村土地上或附近的重要矿产开采项目同时面临水资源风险、冲突和粮食不安全等情况.....	77
图 3.2	从事手工小规模采矿的人数（单位：百万）.....	80
图 3.3	从事手工小规模采矿的人数最多的 10 个国家（单位：百万）.....	81
图 3.4	2016 年尾矿、废石和矿石的估计产量.....	85
图 3.5	大多数采矿点面临很高的水资源风险.....	87
图 3.6	2017 年发展中国家（不包括中国）在全球矿产量和储量中的份额.....	89
图 3.7	2018-2019 年矿物出口依存度.....	90
图 3.8	到 2025 年电池矿物和电动汽车价值链的估计价值.....	93
图 4.1	2010 年至 2023 年已发布国家矿产战略的国家.....	98
图 4.2	矿产和金属在日益密切的中非贸易关系中的关键作用.....	107
图 4.3	2022 年印度尼西亚镍生产设施的外商投资（单位：10 亿美元）.....	113
图 4.4	印度尼西亚镍原料和镍产品出口情况（单位：10 亿美元，2021 年）.....	114
图 4.5	采矿与可持续发展目标.....	118
图 A1	IRENA 调查对象提出的未来十年关键原材料供应所面临的风险.....	147



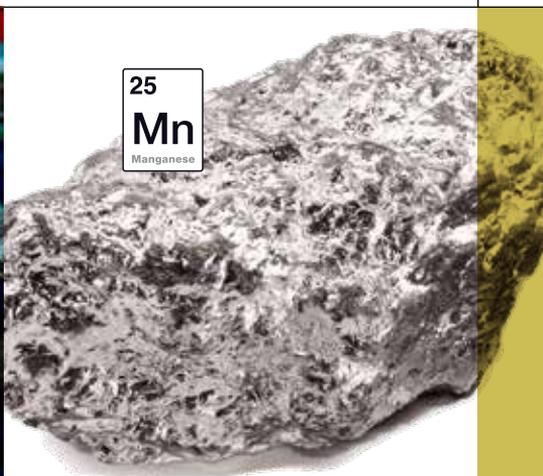
表格列表

表 1.1	2023 年与能源相关的特定技术应用	32
表 2.1	伦敦金属交易所交易的关键原材料和首次交易年份	47
表 2.2	按收入划分的前几大商品交易所	48
表 2.3	矿产部门加强外国投资审查的例证	55
表 2.4	最近世界贸易组织 (WTO) 受理的关于关键原材料出口限制的贸易争端	58
表 2.5	上世纪 70 年代至 80 年代的金属生产商俱乐部	62
表 3.1	与关键原材料相关的特定社会、环境和治理风险	74
表 4.1	确保关键原材料可靠和公平供应的战略	96
表 4.2	2023 年中国、欧盟和美国关键矿物清单对比	102
表 4.3	国际关键原材料联盟	105
表 4.4	特定多利益攸关方矿产治理倡议	122
表 A1	关键原材料当前和预计需求和供应	148



文本框列表

文本框 1.1	关键原材料供需缺口预测的不确定性：有关电动汽车电池的示例.....	30
文本框 2.1	矿产勘探预算	43
文本框 2.2	智利锂资源战略	54
文本框 2.3	2010-2011 年的稀土危机.....	59
文本框 2.4	铂、镍和锂市场形成垄断的前景	63
文本框 2.5	规范深海采矿	68
文本框 3.1	原住民的权利和对危地马拉 Fénix 镍矿的抵制	78
文本框 3.2	手工和小规模采矿	80
文本框 3.3	有争议的尾矿填海法.....	86
文本框 3.4	智利阿塔卡马沙漠的水安全、锂开采和原住民.....	88
文本框 4.1	最近更新或颁布的关键原材料战略	99
文本框 4.2	通货膨胀削减法案和关键矿物	103
文本框 4.3	2023 年七国集团提出的关键矿产安全“五点计划”	106
文本框 4.4	印度尼西亚镍出口禁令的经验教训	113



政策建议

概要



能源转型将成为若干关键矿物需求的主要驱动力。能源转型将是矿物和金属密集型的转型。目前，虽然大量需要这些材料的应用尚与能源转型无关；但随着能源转型的推进，预计对许多材料的需求都将有所增长。根据 IRENA 的 1.5°C 情景设想，实现气候稳定需要大量涉及能源转型的基础设施和关键原材料。其中包括在 2050 年实现 33,000 GW 的可再生能源发电容量和 90% 的道路交通电气化。有多种矿物已经出现了明显的供需不匹配情况，其中锂尤为严重。

出于经济、地缘政治和技术因素的影响，对原材料关键性的评估是动态的且不断发生变化。目前，对于关键原材料还没有一个公认的定义。很多国家和地区都制定了关键原材料清单，这些清单通常反映了当前的技术、全球供需动态以及开展评估的背景。因此，决定关键程度的因素仍然很主观且与特定地点相关。IRENA 对 35 份关键原材料清单进行研究后发现，有 51 种用于可再生能源主导的能源转型的原材料出现在至少一份清单中。

关键原材料供应中断对能源安全的影响极小，但对能源转型的影响极大。当前的能源安全概念围绕能源持续可获得性展开，这主要源于对化石燃料供应的担忧。相比之下，即使关键原料供应中断，已开发的可再生能源技术也能继续使用几十年。因此，与关键原材料供应中断相关的风险与其说是能源安全问题，不如说是能源转型可能放缓的问题。

关键原材料的特点和模式与化石燃料截然不同，因此在依赖性风险和供应态势方面也有着根本的不同。一个很大的担忧是，能源转型将导致从对化石燃料的依赖变成对关键材料的依赖。然而，二者在生产、贸易和使用方面的显著差异并不能证明这种假设（图 S1）。此外，对关键原材料需求和使用的预测在较长的一段时间内充满了不确定性，因此需要对相关风险进行仔细评估，以了解和积极管理这些风险。

能源转型所需矿物的储量并不稀缺，但开采和精炼这些矿物的能力有限。在中短期内，可能会出现市场限制，部分原因是上游活动投资不足。在全球范围内，任何一种矿物的短缺都不太可能阻碍能源转型的步伐。很多能源转型所需矿物的产量已经激增，有经济上可行开采方式的矿产的储量也有所增加。此外，颠覆性创新（如效率提高和材料替代）已经在重塑需求。

图 S1 关键原材料与化石燃料有本质性区别



注：[1] 2021 年数据，摘自英国石油公司 (BP) 的《世界能源统计年鉴》。石油和煤炭数据以吨为单位；天然气数据则根据 BP 的方法，使用公式 ($1 \text{ m}^3 = 0.712 \text{ kg}$) 从 10 亿立方米转换为 10 亿吨，Hannah Ritchie 也使用了这种方法：<https://hannahritchie.substack.com/p/mining-low-carbon-vs-fossil>。[2] 根据 IRENA 的计算，2022 年可再生能源相关技术所需原材料 (铜、石墨锂、镍、钴、锰、稀土元素和铂族金属) 的产量约为 1,000 万吨 (兆吨) (详见第 2 章)。[3] 2021 年，原油 (HS 2709) 出口产值为 9,510 亿美元；精炼石油 (HS 2710) 产值为 7,460 亿美元；液化天然气 (HS 27111100) 产值为 1,620 亿美元；气态天然气 (HS 271121) 产值为 1,730 亿美元。[4] 2021 年，铜矿石和精矿 (HS 2603) 出口产值为 911 亿美元；镍矿石和精矿 (HS 2604) 产值为 42.4 亿美元；钴矿石和精矿 (HS 2605) 产值为 1.18 亿美元。关于稀土金属，钐和钇 (HS 280530) 产值为 5.86 亿美元。[5] 由国际能源署的《世界能源平衡表》(2020) 计算得出，可在以下网址获取：www.iea.org/Sankey。

关键原材料的开采和加工集中在某些地区，少数几个国家发挥着主导作用。在关键原材料的开采方面，澳大利亚 (锂)、智利 (铜和锂)、中国 (石墨、稀土)、刚果民主共和国 (钴)、印度尼西亚 (镍) 和南非 (铂、铀) 占据了主导地位。这种集中度在加工阶段变得更为明显，中国目前占天然石墨和镉 (一种稀土元素) 精炼产品供应的 100%，占钴的 70%，占锂和锰的近 60% (图 S2)。

图 S2 特定矿物的主要开采国

钴 ²⁷ Co Cobalt		铈 ⁶⁶ Dy Dysprosium		锰 ²⁵ Mn Manganese		镍 ²⁸ Ni Nickel	
刚果民主共和国	70.0%	中国	48.7%	南非	35.8%	印度尼西亚	48.8%
印度尼西亚	5.4%	缅甸	23.1%	加蓬	22.9%	菲律宾	10.1%
俄罗斯联邦	4.8%	澳大利亚	7.6%	澳大利亚	16.4%	俄罗斯联邦	6.7%
澳大利亚	3.2%	美国	2.9%	中国	4.9%	法国（新喀里多尼亚）	5.8%
加拿大	2.1%	加拿大	2.7%	加纳	4.7%	澳大利亚	4.9%
古巴	2.0%	其他	15.0%	印度	2.4%	加拿大	4.0%
菲律宾	2.0%			巴西	2.0%	中国	3.3%
其他	10.5%			乌克兰	2.0%	巴西	2.5%
		石墨 ⁶ C Carbon		科特迪瓦	1.8%	其他	13.9%
		中国	64.6%	马来西亚	1.8%		
		莫桑比克	12.9%	其他	5.3%		
		马达加斯加	8.4%				
		巴西	6.6%				
		其他	7.5%				
				钕 ⁶⁰ Nd Neodymium			
铜 ²⁹ Cu Copper				中国	45.8%	铂	%
智利	23.6%			澳大利亚	23.1%	南非	73.6%
秘鲁	10.0%			格陵兰*	8.2%	俄罗斯联邦	10.5%
刚果民主共和国	10.0%	铷 ⁷⁷ Rb Rubidium		缅甸	7.4%	津巴布韦	7.8%
中国	8.6%	南非	88.9%	巴西	4.4%	加拿大	3.1%
美国	5.9%	津巴布韦	8.1%	印度	2.1%	美国	1.7%
俄罗斯联邦	4.5%	俄罗斯联邦	2.9%	其他	9.0%	其他	3.3%
印度尼西亚	4.1%	其他	0.1%				
澳大利亚	3.7%						
赞比亚	3.5%						
墨西哥	3.3%	锂 ³ Li Lithium					
哈萨克斯坦	2.6%	澳大利亚	46.9%				
加拿大	2.4%	智利	30.0%				
波兰	1.7%	中国	14.6%				
其他	16.1%	阿根廷	4.7%				
		巴西	1.6%				
		其他	2.2%				

* 丹麦王国

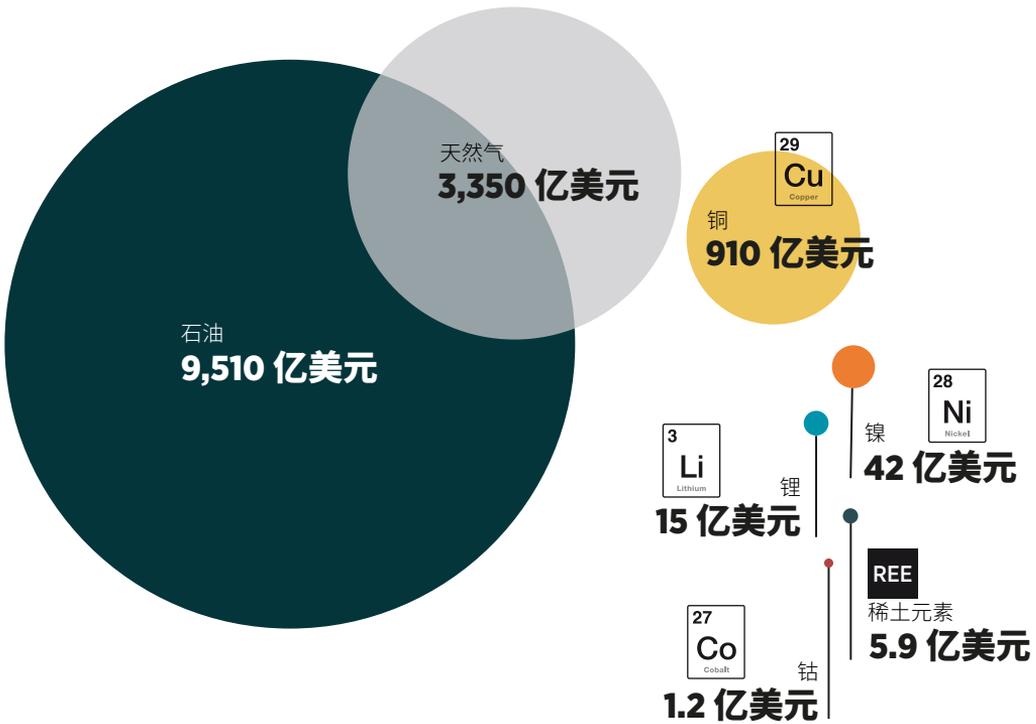
* 截至 2023 年的最新数据

来源：（US Geological Survey and US Department of the Interior, 2023; JRC, 2020; USGS, 2023b）。

采矿业由少数几家大公司主导，市场规模很小，而且往往是寡头垄断市场。这些大型跨国公司、国有企业或国有控股企业在很多国家开展业务，拥有开发复杂矿山所需的资源和技术。因此，该行业集中度很高，少数公司控制了全球生产和贸易的大部分份额。五大矿业公司控制着 61% 的锂产量和 56% 的钴产量。

就价值而言，关键原材料贸易比化石燃料贸易要小很多个数量级。与石油不同，大多数关键原材料并未在交易所广泛交易。虽然这限制了对冲价格波动的机会，但却使大宗商品交易员在为生产企业和消费者牵线搭桥方面得以发挥关键作用。

图 S3 特定商品的出口值 (2021)



来源：(联合国商品贸易数据库)。

注：相关数据仅代表未经处理的原燃料和矿石的贸易量。

完全依赖和供应中断并非总是显而易见。来自不同国家的矿产商品可能包含在进口的成品和半成品中，从而掩盖了潜在的联系和脆弱性。此外，进口交易有时只能归为最后一次装运的国家，而不是最初开采或制造原材料的国家。

每种关键原材料都有其独特的贸易地理特性，从总体上看，这使各国之间形成了一个更广泛的相互依存的网络。所有国家都依赖于正常运转的全球关键原材料和相关技术市场，因为他们要么需要进口这些商品，要么依赖于对其原材料、部件或成品的稳定需求。贸易模式因国家、工业部门和技术不同而有很大差异，这更显现出各国在矿物供求上真正相互依存的关系。

供应链目前很容易受到各种地缘政治风险的影响（图 S4）。矿产供应的中断会影响很多行业，甚至波及整体经济。由于对特定原材料需求的增加，以及采矿和加工集中度仍然很高，供应短缺和相关风险就可能会出现，特别是在中短期内。从中长期来看，关键原材料的贸易流动不太可能像石油和天然气那样容易受到地缘政治的影响。这是因为此类材料的储量丰富，地理分布广泛，可以在很多地方进行加工。

图 S4 材料供应的主要地缘政治风险





© kaskip | shutterstock.com



© Natali Nekrasova | shutterstock.com

29
Cu
Copper

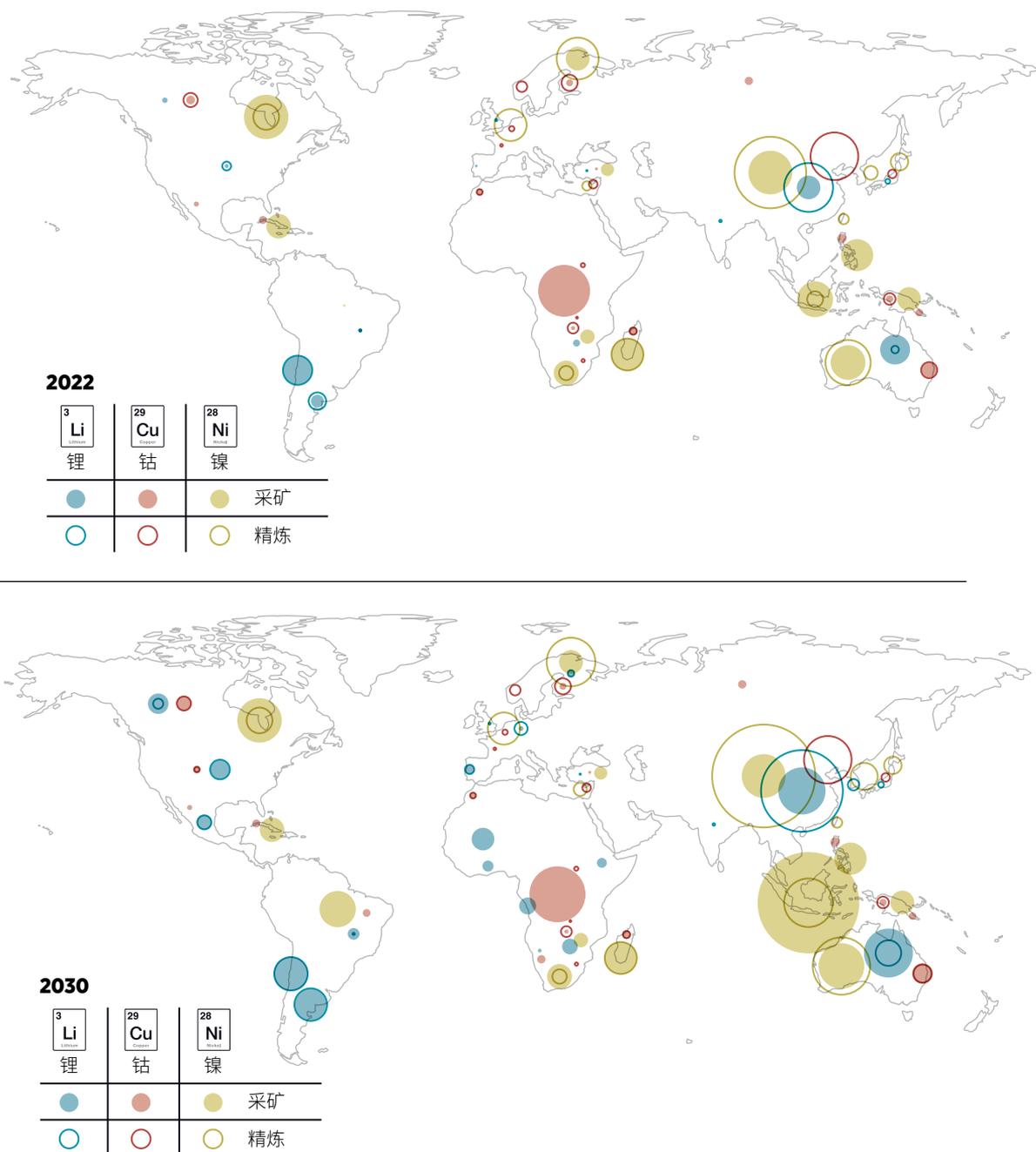
关键原材料贸易流不太可能形成垄断。 矿物供应在地理上集中度很高，在矿产价值链关键环节拥有巨大市场份额的公司控制着矿物的开采和提炼。这种生产集中度有可能导致商品垄断的形成。然而，之前的此类垄断尝试大多以失败告终，这对许多生产国构成了极大的威慑。

地缘政治因素应考虑可能对矿产商品供需产生长期影响的结构趋势。 这种趋势不仅包括采矿和加工的地理集中度，还包括矿石品位的下降、某些材料的替代可能性以及废弃物管理等。上述因素有可能放大地缘政治风险的影响，在某些情况下甚至可能提高风险概率。

在可预见的未来，很多原材料的集中式供应链可能会保持现状。 很多国家都在设法重组供应链，但新建的采矿和加工设施需要很长的生产周期，因此很难重新平衡供需关系（图 S5）。此外，调整这些供应链需要谨慎地考虑经济因素、环境影响和当地居民的福祉，以在三者之间达到平衡。



图 S5 2022 年和 2030 年特定关键原材料的开采和精炼产品供应



免责声明：这些地图仅供说明之用。地图上展示的边界和名称并不意味着 IRENA 的任何认可或接受。

来源：(BloombergNEF, 2023)。

技术创新可以通过引入替代品、提高效率、优化设计和采用新材料来影响需求。颠覆性创新增加了未来需求的不确定性。例如，在过去八年中，电动汽车电池化学成分的变化极大地改变了对特定原材料的需求。随着新技术的不断涌现，市场可能会进一步变化，并最终围绕少数主导原材料和技术进行整合。因此，对某些原材料的未来需求预测可能相当困难，尤其是长期需求。

囤积关键原材料并不是降低供应风险的可靠解决方案。关键原材料对于制造和建造能源资产而言不可或缺的材料。与国防等其他部门相比，为能源部门囤积转型矿物的效果令人怀疑。如果处理不当，囤积可能会加剧市场限制，推高价格，并导致能源转型不均衡，排斥较贫穷国家，并推迟气候行动。

关键原材料储备分布广泛，为材料开采和加工的多样化提供了机会。发展中国家目前占全球能源转型所需原材料产量的很大一部分，其储量份额甚至更大，但尚未得到充分开发（图 S6）。例如，玻利维亚拥有 2,100 万吨锂储量，超出其他任何国家，但其 2021 年的产量不到全球供应量的 1%。各国可以利用其矿产资源，吸引生产中间阶段（加工）甚至终端阶段（电池和电动汽车制造）的产业。

78

Pt

Platinum

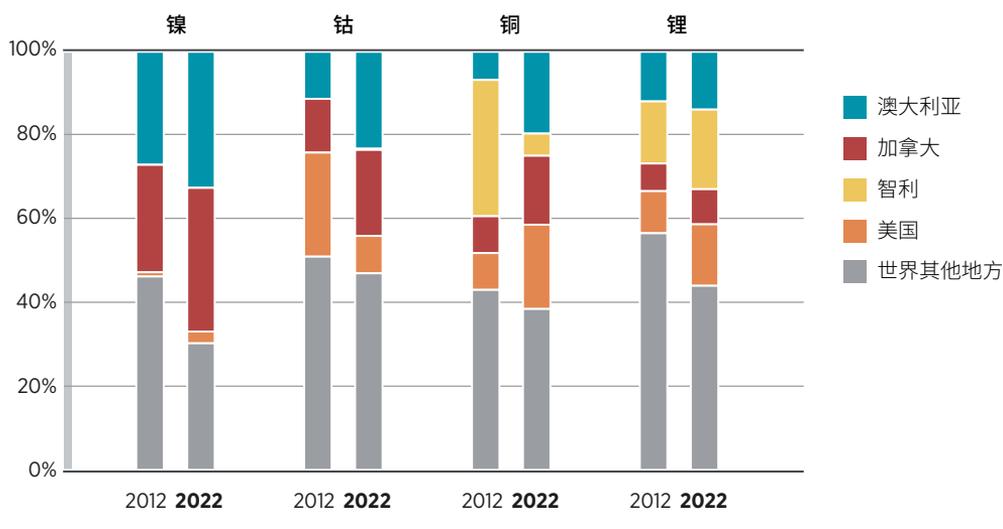


© RHJPhotos | shutterstock.com



© chuyuss | shutterstock.com

图 S6 2012 年和 2022 年按国家划分的全球原材料勘探预算份额



2022 年主要的新参与国

<ul style="list-style-type: none"> 加蓬 秘鲁 波兰 所罗门群岛 坦桑尼亚 	<ul style="list-style-type: none"> 波斯尼亚和黑塞哥维那 智利 格陵兰* 西班牙 坦桑尼亚 	<ul style="list-style-type: none"> 阿富汗 古巴 塞浦路斯 厄立特里亚 坦桑尼亚 	<ul style="list-style-type: none"> 科特迪瓦 印度 摩洛哥 瑞典 英国
---	---	--	---

28

Ni

Nickel

27

Co

Cobalt

29

Cu

Copper

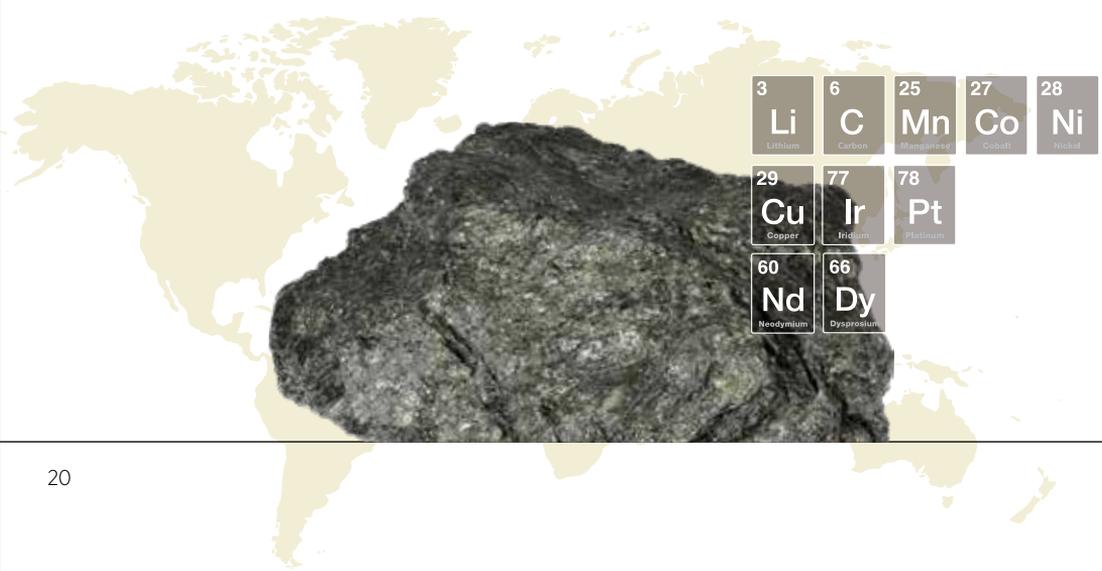
3

Li

Lithium

* 丹麦王国

基于：(S&P, 2023)。



据估计，54%的能源转型所需矿物位于或靠近原住民土地，这更表明需要与原住民社区的及早沟通和积极参与。80%以上的锂项目和一半以上的镍、铜和锌项目位于原住民的土地上。与能源转型相关的矿产项目，有三分之一以上位于或靠近原住民或农民的土地，并带来了一系列水资源风险、冲突和粮食不安全问题。例如，90%以上的铂储量和资源位于或靠近面临上述三种风险的原住民或农村土地，其次是钼（76%）和石墨（74%）。

在北极、外层空间和深海等已知蕴藏大量矿藏的地区，对关键原材料的需求可能会引发地缘政治竞争。众所周知，北极蕴藏着大量镍、锌和稀土等重要资源，该地区丰富的矿产资源使其具有重要的战略意义。鉴于陆地储量丰富，在外层空间和深海进行矿产开采需要非常谨慎，因为这会对潜在的环境影响和监管框架都带来不确定性。

帮助发展中国家抓住供应链中的新机遇，提高韧性，同时缩小全球脱碳鸿沟。一个关键问题是，能源转型是否能帮助发展中国家不仅增加原矿出口，而且还能帮助其向价值链上游移动，并吸引矿物加工等利润更高的项目。与未精炼的矿石相比，钢材和氧化铝等加工原材料不仅价格优势明显，而且还能降低基础设施和工业项目的投入成本，促进当地经济发展。

地区合作可能有助于各国从矿产价值中获取更大份额。对于矿产资源丰富的国家，与其与公司（通常是外国公司）展开一对一的交易，不如采取协调的地区合作方法，更能有效地确保外国投资的附加条件带来的利益。对于打算建设下游产业的大多数国家而言，集中矿产资源供应和跨地区协调也可以使这些国家从中受益。

零散的国际和跨国倡议需要协调一致，以实现更负责任、可持续和透明的供应链。各利益攸关方日益认识到与关键原材料供应链相关的挑战，这促使政府、企业和民间社会团体制定了一系列倡议和监管框架。其中大多数活动是自发性的。这些活动的结果是出现了各种零散的标准，这给利益攸关方带来困惑，突出了提高透明度和一致性的必要性。

基于可再生能源的能源转型，如果规划和执行得当，可以改写采掘业的篇章。正如几个世纪以来采掘业的情况一样，即使在今天的认知和标准下，采矿活动和过程也会给当地社区带来风险，如劳工和其他人权侵犯、土地退化、水资源枯竭和污染以及空气污染。为了可持续发展和获得社会认可，必须要加强国际合作，制定和执行更高标准，树立更加长远的企业愿景。

第 1 章

引言

trade flows
rare earth elements
metals processing
nickel supply
refining
risks trade
overview labour
mining dependency
regulations minerals
responsible
value creation



3 Li Lithium	6 C Carbon	25 Mn Manganese	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel
29 Cu Copper	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum		
60 Nd Neodymium	66 Dy Dysprosium			

1.1 关键原材料和能源转型

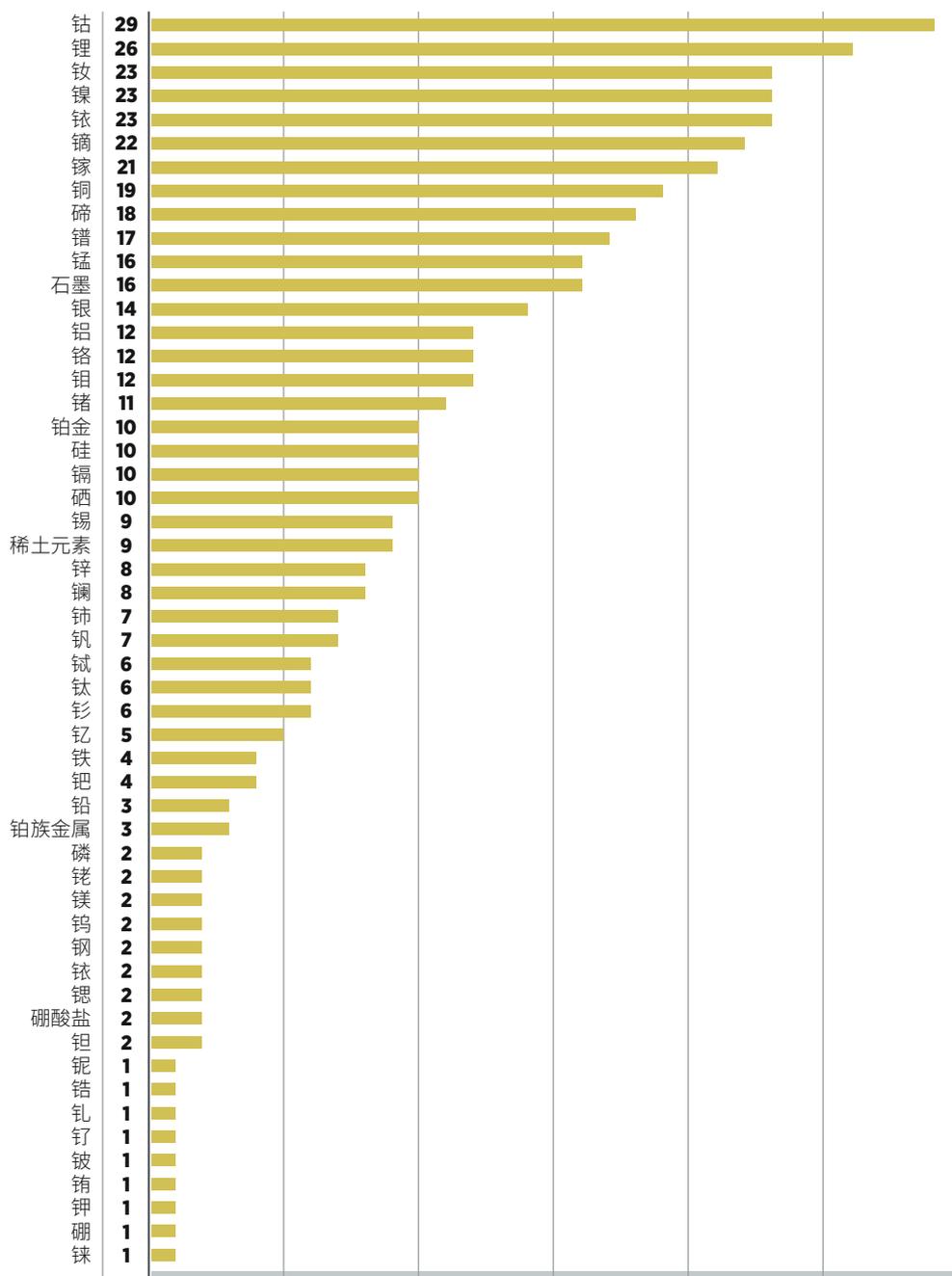
随着基于可再生能源的能源转型的推进，对关键原材料的需求预计将快速增长。根据 IRENA 的 1.5° C 情景设想，到 2050 年，可再生能源将占能源结构的 91%，这种转型将使各种可再生能源的装机容量从 2022 年的 3,300 吉瓦 (GW) 增加到 2050 年的 33,000 GW。在这种情况下，到 2050 年，路上行驶的 90% 的车辆将是电动汽车，氢能将占最终能源消耗总量的 14%。这些转变需要每年将可再生能源新增装机容量提高两倍，达到 1,000 GW 的平均部署量 (IRENA, 2022a, 2023a)。

这种清洁能源技术和基础设施的建设将大幅提高对某些矿物和金属的需求，本报告中将这些材料归类为“关键原材料”。关键原材料现已成为很多国际对话和外交策略的焦点。这些材料的生产和加工在地理上高度集中，进而带来了与资源安全和地缘政治态势相关的挑战。促进这些原材料的供应链和生产链多样化发展的战略不断涌现，侧面反映出了经济、政治和社会方面的多重考量。

目前，对于关键原材料还没有一个公认的定义(图 1.1)。决定关键程度的因素仍然很主观且与特定地点相关。核心标准通常包括经济重要性（对于相关特定经济体而言）和供应风险水平，而这些则受到供应的稀缺性和邻近性、开采和精炼过程的复杂性、价值链不同环节的供应集中度以及可行替代品缺乏度等因素的影响 (IRENA, 2022a)。

就本报告而言，“关键原材料”是指通常被视为与基于可再生能源的能源转型所必需的非常重要的矿物和金属，包括但不限于钴、铜、石墨、铍、锂、锰、镍、铂和特定稀土元素。本报告还提到了其他各种原材料，涉及现实世界的能源技术，以及与地缘政治相关的政策示例和案例研究。

图 1.1 2023 年各国和各地区确定的能源转型关键原材料（35 份清单，51 种材料）



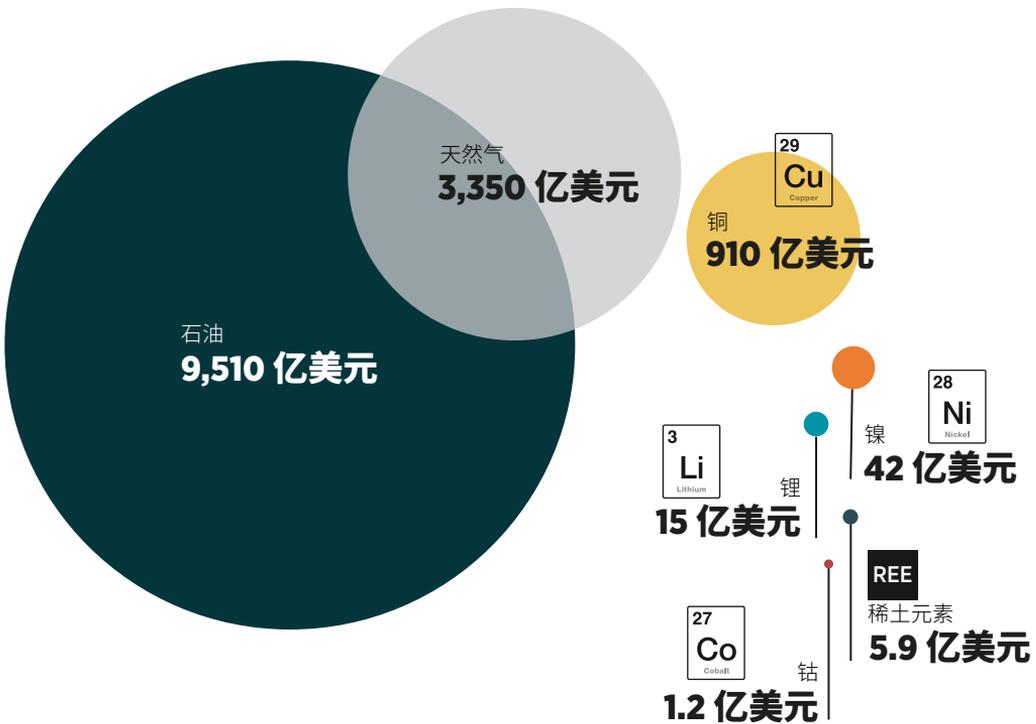
来源：（IRENA 和 NUPI，即将出版）。

注：REE = 稀土元素；PGM = 铂族金属。

关键原材料是很宝贵的商品，但其经济价值并不如化石燃料高，目前占全球 GDP 的 2% (IRENA, 2022b)。就市场规模而言，铜是最有价值的基本金属，除此之外，其他矿物和金属的贸易流量价值比石油和天然气市场小很多个数量级 (见图 1.2)。该领域将在未来几年有所增长，但其规模和价值将无法与今天的化石燃料相提并论。

由于采矿项目存在供应瓶颈风险且开发周期很长，这就就会出现一个突出的问题，那就是基于可再生能源的能源转型将需要从对进口化石燃料的依赖转向对进口关键原材料的依赖。然而，对关键原材料的依赖风险和供应情况与化石燃料有着本质上的区别。化石燃料是主要用于能源生产的消耗品，而关键原材料是对能源转型所需的部件、设备和装置的基本投入。

图 1.2 特定商品的出口值 (2021)



来源：(联合国商品贸易数据库)。

注：相关数据仅代表未经处理的原燃料和矿石的贸易量。



在供应中断的情况下，依靠煤炭、天然气或石油运行的能源基础设施和机械设备将会停止运转。这种中断将对消费者和家庭产生直接影响，进而引发一系列社会、政治和金融挑战。相比之下，关键原材料供应的中断不会对现有能源基础设施和设备带来影响，但却可能会使脱碳速度放缓并增加成本。因此，关键原材料供应中断的风险与其说是能源安全风险，不如说是能源转型可能放缓的风险（见图 1.3）。

图 1.3 关键原材料与化石燃料有本质性区别



注：[1] 2021 年数据，摘自英国石油公司 (BP) 的《世界能源统计年鉴》。石油和煤炭数据以吨为单位；天然气数据则根据 BP 的方法，使用公式 (1 m³ = 0.712 kg) 从 10 亿立方米转换为 10 亿吨，Hannah Ritchie 也使用了这种方法：<https://hannahritchie.substack.com/p/mining-low-carbon-vs-fossil>。[2] 根据 IRENA 的计算，2022 年可再生能源相关技术所需原材料（铜、石墨锂、镍、钴、锰、稀土元素和铂族金属）的产量约为 1,000 万吨（兆吨）（详见第 2 章）。[3] 2021 年，原油 (HS 2709) 出口产值为 9,510 亿美元；精炼石油 (HS 2710) 产值为 7,460 亿美元；液化天然气 (HS 27111100) 产值为 1,620 亿美元；气态天然气 (HS 271121) 产值为 1,730 亿美元。[4] 2021 年，铜矿石和精矿 (HS 2603) 出口产值为 911 亿美元；镍矿石和精矿 (HS 2604) 产值为 42.4 亿美元；钴矿石和精矿 (HS 2605) 产值为 1.18 亿美元。关于稀土金属，钐和钆 (HS 280530) 产值为 5.86 亿美元。[5] 由国际能源署的《世界能源平衡表》(2020) 计算得出，可在以下网址获取：www.iea.org/Sankey。

IRENA 预计，关键原材料的技术演变将受三种不断变化且相互重叠的动态因素所决定。第一种动态因素在中短期内最为突出，其特点是在满足对某些关键原材料不断增长的需求方面存在实际限制和挑战。第二种动态因素已大规模出现，将带来颠覆性创新，用新的理念和实验来减少原材料消耗。第三种动态因素仍处于萌芽阶段，将在循环经济中起到更大的作用，包括用更先进和更广泛采用的方法来节约、再利用和回收关键原材料。

图 1.4 影响开发能源转型关键原材料的三大动态因素



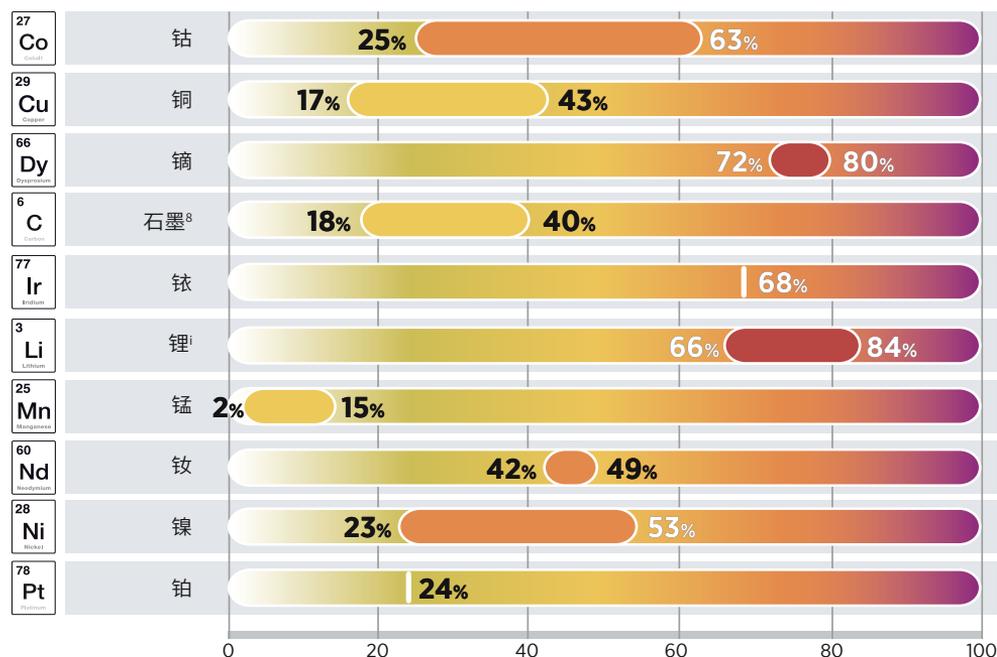
1.2 实际限制

中短期内潜在的供应不足是上游活动缺乏投资的结果。这是由多种因素造成的，包括开设新矿和加工制造厂的筹备时间过长、未来需求不确定性高、价格波动、缺乏下游透明度以及当地的反对声音等（IRENA，即将出版）。此外，关键原材料的开采和加工高度集中在少数几个国家（见第 2 章）。

2022 年对关键原材料的市场需求主要来自非能源转型用途，但锂除外。例如，超过 90% 的镍用于钢铁生产；超过 80% 的石墨用于钢、铝和陶瓷生产；80% 以上的锰用于钢铁和化学生产、铸造和焊接（IRENA，即将出版）。然而，能源转型技术对关键原材料的需求越来越高，在某些情况下可能超过非能源用途的需求（IRENA，即将出版）。这一趋势对于锂、钴、石墨和镉而言尤为明显。IRENA 的短期稀缺比率（见图 1.5）对 2022 年的原材料供应和 2030 年的预期需求进行了比较。¹

¹2022 年的供应包括仅初次供应（采矿）或初次及二次供应（回收），后者仅适用于已知回收 / 精炼率的铜、钴和铂。详见附件。

图 1.5 评估特定原材料的当前供应与 2030 年预期需求之间的差异 *



来源：(USGS, 2023a; Eurometaux, 2022; IRENA, 即将出版; McKinsey, 2023; WSJ, 2023; Mining.com, 2021; Mitchell and Deady, 2021; NVM, 2021; QYResearch, 2023; Garvey, 2021; 澳大利亚矿业委员会, 2022; Nickel Asia, 2022; Systemiq, 2023; Cobalt Blue Holdings, 2022; Darbar, 2022; Fu, 2020; Albemarle, 2023; Lazzaro, 2022; McKinsey, 2022; S&P Global IQ, 2022)。

注：*短期稀缺比率是将 2022 年特定原材料的矿产量与 2030 年的预期需求进行比较；计算方法见附件。

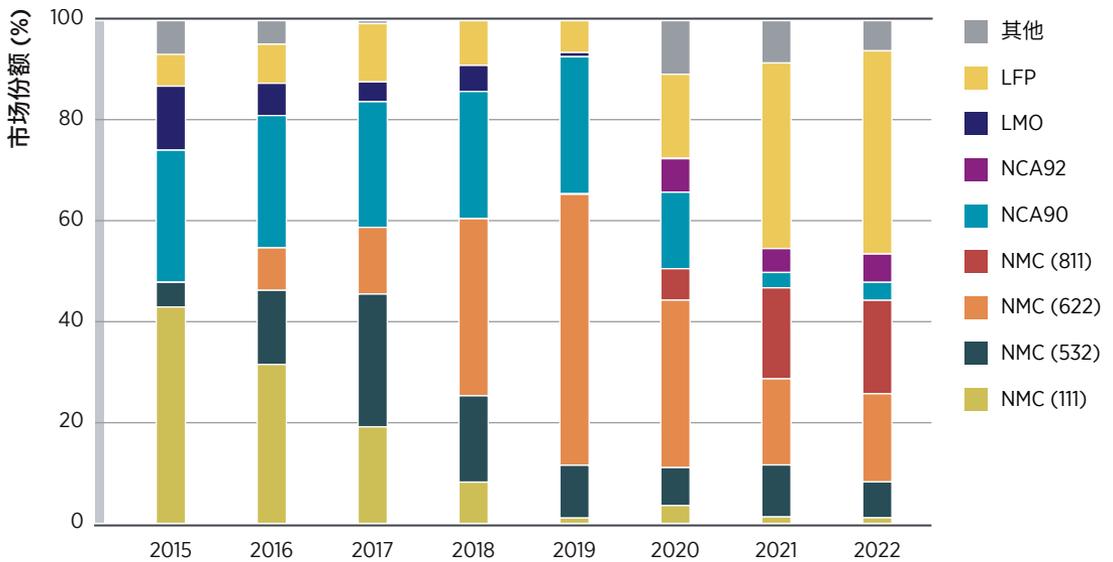
为了避免高稀缺性材料出现供需缺口，必须要提高开采和加工能力。这些原材料的地质储量并不稀缺，而且地理分布广泛。随着对关键原材料的关注度不断提高，新发现的矿藏也越来越多。例如，Norge Mining 最近宣布，在挪威发现的磷酸盐、钽和钒矿床可以满足按目前水平至少 50 年的全球需求 (The Economist, 2023 年 6 月 8 日)。

除了促进采矿和加工的发展之外，缩小供需差距还需要改进尾矿的原材料回收和再循环技术。这种改进需要政府大力投资基础设施，设计支持的法律框架 (包括通过公共政策进行授权)，并对回收技术进行研究和创新。

1.3 颠覆性创新

技术创新通过替代、提高效率、优化设计和引入新材料等因素影响着对材料的需求。在预测和评估能源转型技术中的关键原材料的供需缺口方面，存在着多种不确定性。其中一个主要的例子就是电动汽车 (EV) 电池。自 2015 年以来，电动汽车电池化学成分发生了重大变化 (图 1.6)。

图 1.6 2015 年至 2022 年间全球电动汽车电池化学成分的快速变化



来源：(BNEF, 2022b)。

注：NCA 后面的数字表示镍在 NCA 电池化学成分中的比例，而 NMC 后面的数字则表示镍在 NMC 电池化学成分中的比例；例如，NMC (622) 表示电池正极材料的镍、钴、锰比例为 6:2:2。LFP = 磷酸铁锂；LMO = 锂锰氧化物；NCA = 镍钴铝；NMC = 镍钴锰。

3 Li Lithium	6 C Carbon	25 Mn Manganese	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel
29 Cu Copper	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum		
60 Nd Neodymium	66 Dy Dysprosium			

如今，电动汽车电池行业主要使用锂离子电池，而该技术在关键部件上经历了多次改进，这对原材料需求产生了重大影响。石墨阳极化学材料因其高性能占据了 70% 的市场份额。然而，新兴的阳极化学材料（如 100% 硅基阳极、锂金属阳极、铝或铝合金阳极）有可能减少或消除对石墨的需求，具体取决于相关研发的速度（IRENA，即将出版）。对于阴极，最常用的化学材料包括镍钴锰氧化物（NMC）、镍钴铝氧化物（NCA）和磷酸铁锂（LFP）。预计 NMC 和 LFP 电池仍将是这十年中最常见的电池，但哪种技术最终会成为主导仍未有定论（见文本框 1.1）。新兴的电池技术（如钠离子电池）有可能用钠等成本较低或资源更丰富的原材料取代锂和钴等关键原材料，从而颠覆电动汽车电池市场（IRENA，即将出版）。

文本框 1.1 关键原材料供需缺口预测的不确定性：有关电动汽车电池的示例

John Goodenough 于 20 世纪 90 年代在实验室发明了磷酸铁锂（LFP）电池，并因锂离子电池而获得诺贝尔奖。有几家初创企业（如 A123 Systems）看到了取代钴和镍的机会，但 LFP 较低的能量密度没有引起特斯拉和通用汽车等汽车制造商的兴趣，最终导致 A123 Systems 等初创企业破产（McFarland，2022）。然而，后来随着钴和镍价格的大幅上涨，汽车制造商开始探索使用更少关键原材料的电池化学材料。LFP 电池已开始入门级汽车上取代镍钴锰（NMC）电池，而 NMC 仍是高性能汽车电池的首选化学材料。作为这一变化的标志，LFP 电池的市场份额从 2015 年的个位数大幅增长到 2022 年的 40%（BNEF，2022a）。

然而，LFP 的快速扩张不仅仅是技术创新的结果。中国是 LFP 电池的主要市场，超出 40% 的电动汽车使用这种电池。相比之下，欧洲只有 6%，而美国和加拿大则只有 3%（BMI，2022）。中国青睐 LFP 电池，是因为价格可承受的钴和镍的供应具有不确定性。为此，中国政府促使专利所有者（美国德克萨斯大学奥斯汀分校和麻省理工学院，以及加拿大蒙特利尔大学和法国国家科学研究中心组成的大学专利联盟）与中国的电池制造商比亚迪和 CATL 签订了一项长期协议。协议规定只要 LFP 电池仅在中国市场使用，则不收取许可费（IRENA，即将出版）。这些专利已于 2022 年到期。





稀土元素（即钕和镝）普遍用于发电机（即风力涡轮机）和电动机（即电动汽车）中的永磁体。稀土永磁体用于陆上和海上风电，并可能在涡轮机中得到更广泛的应用。然而，业界正在努力用其他稀土元素（包括镨、镱和铽）取代钕，或者开发不含稀土的永磁体（电磁体）。这可能会改变未来对钕和镝的需求（Gielen 等人，2022a）。

同理，太阳能光伏技术的创新也可能会改变对原材料的需求，促使逐渐减少对传统晶体硅和效率较低的薄膜太阳能电池技术中的硅的需求。例如，钙钛矿太阳能电池已经获得了越来越多的研发关注，因此相较于晶体硅太阳能电池而言，其效率提升速度也更快（高达 25%）（Wu 等人，2021）。其他前景光明的技术包括有机太阳能电池、铜铟镓硒电池、染料敏化太阳能电池和量子点太阳能电池。尽管上述技术拥有巨大的潜力，但却仍处于开发和商业化的过程中，其性能、耐用性和成本效益仍在研究和改进之中。

表 1.1 2023 年与能源相关的特定技术应用

		主要应用	其它应用
27 Co Cobalt	钴	<ul style="list-style-type: none"> 电动汽车电池 	<ul style="list-style-type: none"> 电池储电 生物能 电解槽
29 Cu Copper	铜	<ul style="list-style-type: none"> 电网 电动汽车电池 太阳能光伏 	<ul style="list-style-type: none"> 电池储电 生物能 聚光太阳能 电解槽 地热能 水能
66 Dy Dysprosium	镝	<ul style="list-style-type: none"> 电动汽车 风能 	
6 C Carbon	石墨	<ul style="list-style-type: none"> 电动汽车电池 	<ul style="list-style-type: none"> 电池储电
77 Ir Iridium	铱	<ul style="list-style-type: none"> PEM 电解槽 	
3 Li Lithium	锂	<ul style="list-style-type: none"> 电动汽车电池 	<ul style="list-style-type: none"> 电池储电
25 Mn Manganese	锰	<ul style="list-style-type: none"> 电动汽车电池 	<ul style="list-style-type: none"> 电池储电 聚光太阳能 电解槽 地热能 水能 风能
60 Nd Neodymium	钕	<ul style="list-style-type: none"> 电动汽车 风能 	
28 Ni Nickel	镍	<ul style="list-style-type: none"> 电解槽 电动汽车电池 	<ul style="list-style-type: none"> 电池储电 生物能 聚光太阳能 地热能 水能 太阳能光伏
78 Pt Platinum	铂	<ul style="list-style-type: none"> PEM 电解槽 	

注：CSP = 太阳热发电技术；EV = 电动汽车；PV = 光伏

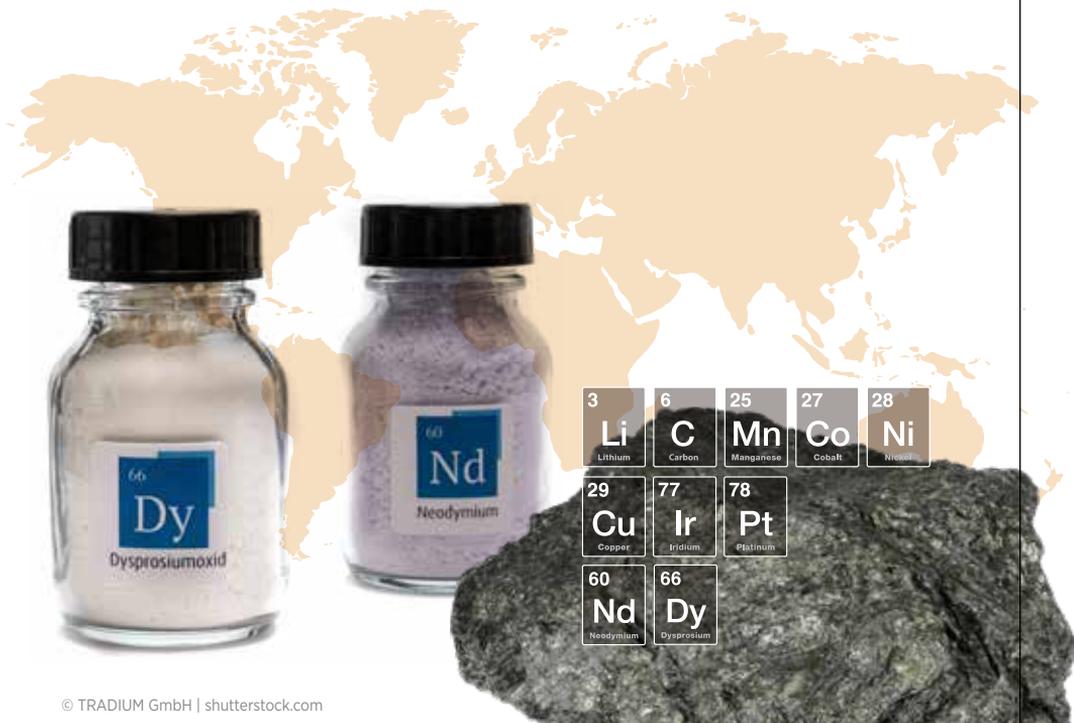
1.4 报告范围

本报告对上述内容进行了详细阐述，对地缘政治和地缘经济因素、关键原材料需求和供应预期增加的影响进行了前瞻性研究。本报告在 IRENA 现有工作的基础上，分析了供应链和贸易模式的发展变化情况，研究了围绕全球开采和加工的社会经济和可持续性考量，并就关键原材料对经济竞争力和基于可再生能源的能源转型速度的战略重要性进行了讨论。

第 2 章探讨了贸易、安全和相互依存等地缘政治主题。从广义上讲，这些主题始终与采掘业密切相关，随着对能源转型至关重要的原材料的规模不断扩大，这种关系将继续保持下去。

第 3 章重点围绕可持续性、社区和生计展开讨论，从人类安全这一更为宽泛的视角进行了审视。本章明确了采掘业与其在出口国、相关邻国乃至全世界带来的社会经济、环境和气候的影响之间的联系。

第 4 章将重点从问题诊断转向战略对策和政策考量。最后一章并没有提供一套普遍适用的建议，而是围绕能源转型所需关键原材料规模扩大所带来的挑战和机遇，评估了一些重要的应对政策和办法。



© TRADIUM GmbH | shutterstock.com

第 2 章

贸易、安全和相互依存



重点内容

- **关键原材料的开采高度集中在特定地理位置。**澳大利亚（锂）、智利（铜和锂）、中国（石墨、稀土）、刚果民主共和国（钴）、印度尼西亚（镍）和南非（铂、铱）占据了主导地位。**原材料的加工在地理位置上更为集中**，中国占了全球精炼（天然）石墨、镓（一种稀土）、钴、锂和锰供应份额的50%以上。
- **储量分布相对均匀**，从长远来看，这为供应链的多样化提供了机会。解决方案之一是增加勘探投资，特别是在非洲等勘探不足的地区。开展地质调查方面的国际合作有助于这些地区吸引勘探投资。
- **就价值而言，关键原材料贸易比化石燃料贸易要小很多数量级。**与石油不同，大多数关键原材料并未在交易所广泛交易。虽然这限制了对冲价格波动的机会，但却使大宗商品交易员在为生产商和消费者牵线搭桥方面得以发挥关键作用。
- **每种材料都有其独特的贸易地理性**，从总体上看，这使各国之间形成了一个更广泛的相互依存的网络。任何一个国家都不能完全避免与关键原材料相关的价格冲击或供应中断的风险，因为这些因素可能会对能源转型的成本和速度带来不利影响。
- **材料供应受到多个结构条件的影响**，包括采矿和加工的地理集中度、矿石品位的下降、废弃物回收程度有限、很多关键原材料对副产品生产的依赖性，以及某些材料的短期替代可能性小。
- **确定并评估中短期材料供应的六大地缘政治风险：**外部冲击（如战争）、资源民族主义（如征用）、出口限制（如出口禁令）、矿产垄断（如生产协调）、政治不稳定性（如社会动荡）和市场操纵（如短期挤压）。
- **在北极、外层空间和深海等已知蕴藏大量矿藏的地区**，对关键原材料的需求可能会引发地缘政治竞争。然而，在外层空间和深海进行矿产开采需要非常谨慎，因为会对环境影响和监管框架带来不确定性，况且陆地储备也非常丰富。

本章全面概述了关键原材料价值链中的主要参与者。为此，本章强调了关键原材料供应在地理上的高度集中性，但同时也强调了私营部门和商品交易员的关键作用。此外，本章还详细探讨了当前的贸易趋势以及相应的供应风险和脆弱性，其中包括与供应武器化或垄断化相关的潜在危险，以及非政治干扰因素（如与气候相关的危害和疫情）。本章还强调了对关键原材料日益加剧的地缘政治争夺，特别是在全球公域内，包括在深海开展的勘探和开采活动。

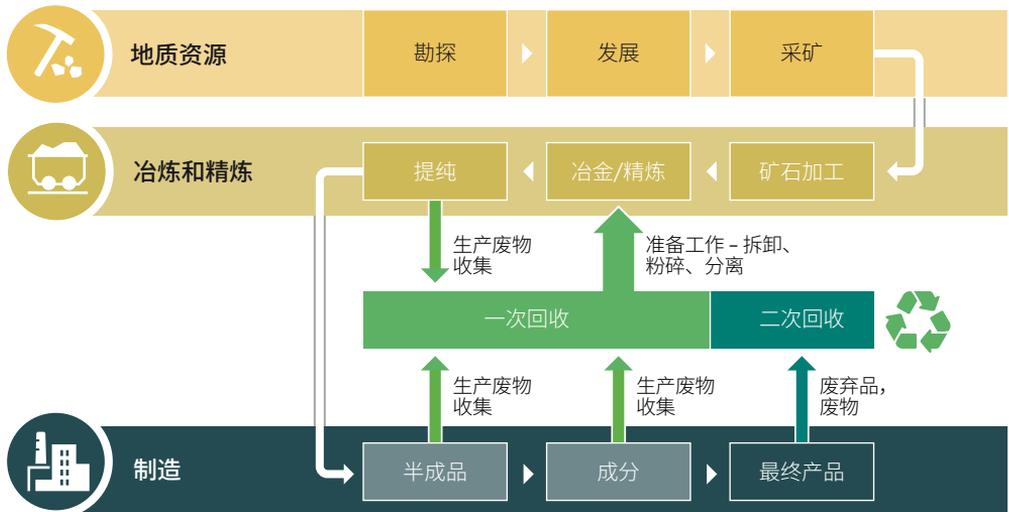


2.1 矿物和金属贸易的主要参与者

关键原材料供应链

矿物从矿山到成品的过程涉及一个由若干参与者和过程组成的复杂且透明度通常不高的网络。² 图 2.1 所示为矿物和金属行业价值链中的一些关键阶段。

图 2.1 矿物或金属相关价值链的示意图



来源：(Ayuk 等人，2020)。

² 本节内容来自国际资源委员会 (2020)。

仅拥有地质资源并不足以开展采矿项目，矿石的实际开采要经历多个阶段。这就需要满足多个必要的条件，包括遵守采矿和环境法规，以及获得必要的许可和执照。在满足法律要求后，矿业公司需要完成几个步骤后才能开采地下资源。这包括评估资源基础，开展可行性研究，在某些情况下，还需要建造示范工厂。这些过程可能需要几年时间，并会耗费大量资金。

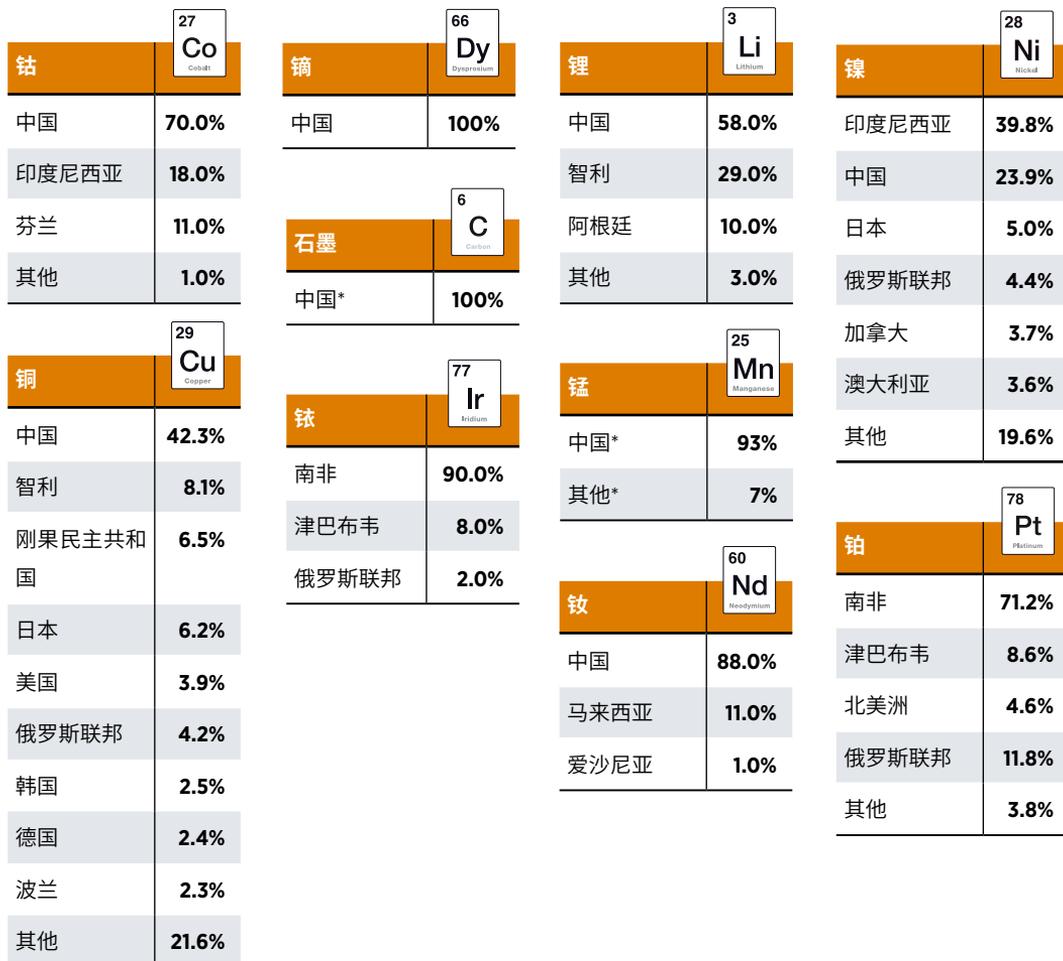
随后，采矿阶段开始，即利用钻探和/或爆破技术从露天矿或地下矿中开采矿石。然后，开采的矿石被运输（通常在输送机或卡车上）到附近的加工厂，并在此经过多个步骤被转化为可运输的产品，具体采用什么步骤因原材料而异，并且可能涉及碾碎、破碎和化学加工等过程。值得注意的是，虽然这些过程是大规模采矿作业的典型过程，但手工和小规模采矿可能采用更为初级的方法，如手工劳动和简单工具。交易员参与购买和运输精炼矿物，进一步凸显了矿物供应链的复杂性。

下一个阶段是冶金或精炼，这对于去除金属中的残留杂质以满足不同市场的纯度要求至关重要。这一过程涉及各种技术（如熔炼、焙烧和电解），会产生大量废物和排放物。精炼后的最终产品将出售给制造商，制造商将这些金属广泛应用于各个领域，包括电子产品、电池和建筑材料。回收产品的趋势日益明显，包括回收产品生命周期中产生的某些废品。

矿物开采和加工的地理性

原材料开采在特定地理区位高度集中（图 2.2）。例如，70% 以上的铂在南非开采；70% 的钴在刚果民主共和国开采；60% 以上的天然石墨在中国开采；将近 50% 的镍在印度尼西亚开采；将近 50% 的锂在澳大利亚开采，将近 50% 的镅在中国开采。矿物加工更为集中（图 2.3）。中国占据了主导地位，在全球精炼天然石墨和镅（一种稀土元素）的供应中占 100% 的份额，锰占 90% 以上，钴占 70%，锂占近 60%，铜约占 40%。

图 2.3 特定矿物的主要加工国



来源：(美国地质调查局等，2023；WPIC，2022；AngloAmerican，2022，Implats，2022；Erickson，2022；LeadLeo，2022；OEC，2023；Mining.com，2021；Mitchell and Deady，2021；NVM，2021；QYResearch，2023；IRENA，2022a；S&P，2023)。

* 截至 2023 年的最新数据；美洲 = 加拿大、墨西哥和美国；* 2021。

然而，任何国家在冶金领域占主导地位都会对资源安全和地缘政治态势构成重大挑战。预期的需求增长为提高现有价值链韧性、积极影响国家资产负债表以及支持全球向低碳经济转型提供了机遇（图 2.4 和 2.5）。矿产丰富的国家将从日益增长的关键原材料需求中获益。例如，澳大利亚政府预计，到 2027-2028 年，锂和基本金属的出口价值将与其煤炭出口价值持平（The Hon Madeleine King MP Media Releases, 2023）。在可再生能源丰富的国家促进加工多样化，可以减少碳排放足迹。智利等拥有丰富太阳能资源的国家正在探索如何利用太阳能实现铜精炼脱碳（Lyng, 2022）。西澳大利亚作为可再生能源热点地区，正在吸引对中游关键矿产项目的新投资，包括三座稀土和三座锂加工厂（见图 2.4）（Government of Western Australia, 2022）。

全球关键矿物储量的分布相较目前的矿产生产而言更加均匀。这为供应多样化提供了机会。地壳的大部分地区（主要是发展中国家）仍未得到开发。例如，占全球陆地面积约 20% 的非洲，仅吸引了约 14% 的全球矿产勘探投资（Ericsson 和 Olóf, 2019）。要解决这一问题，不仅需要增加全球勘探支出（文本框 2.1），还需要持续收集和共享各大洲的矿产资源数据。目前，大部分工作由经济合作与发展组织（OECD）成员国承担。例如，澳大利亚、加拿大和美国地质调查局联合发起了覆盖 60 多个国家的关键矿产填图计划（Calam, 2020）。非 OECD 成员国的地质工作也可能从强化区域和全球合作中受益。其中一个例子是非洲联盟于 2009 年启动的非洲矿业愿景，该愿景后因资源缺乏而未能充分发挥潜力（Ushie, 2017）。

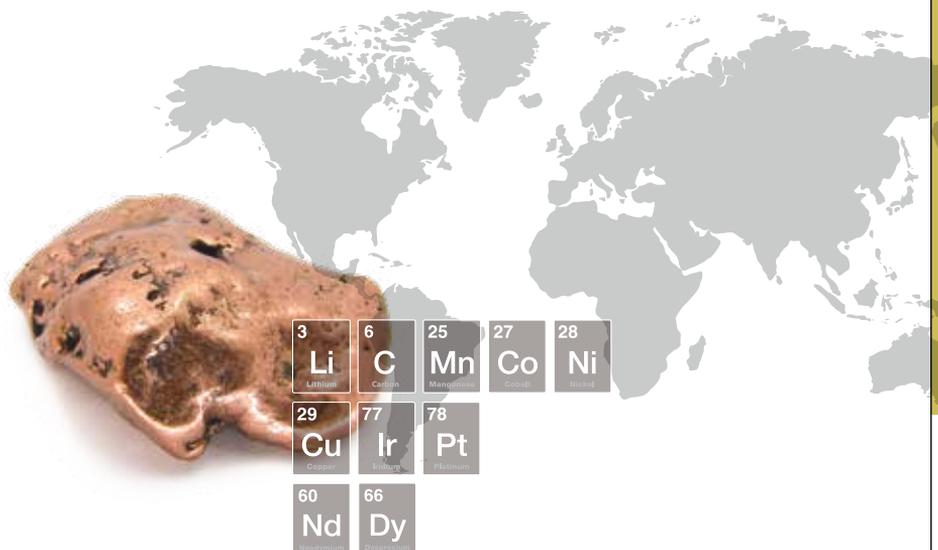


图 2.4 2022 年特定关键原材料的开采和精炼产品供应

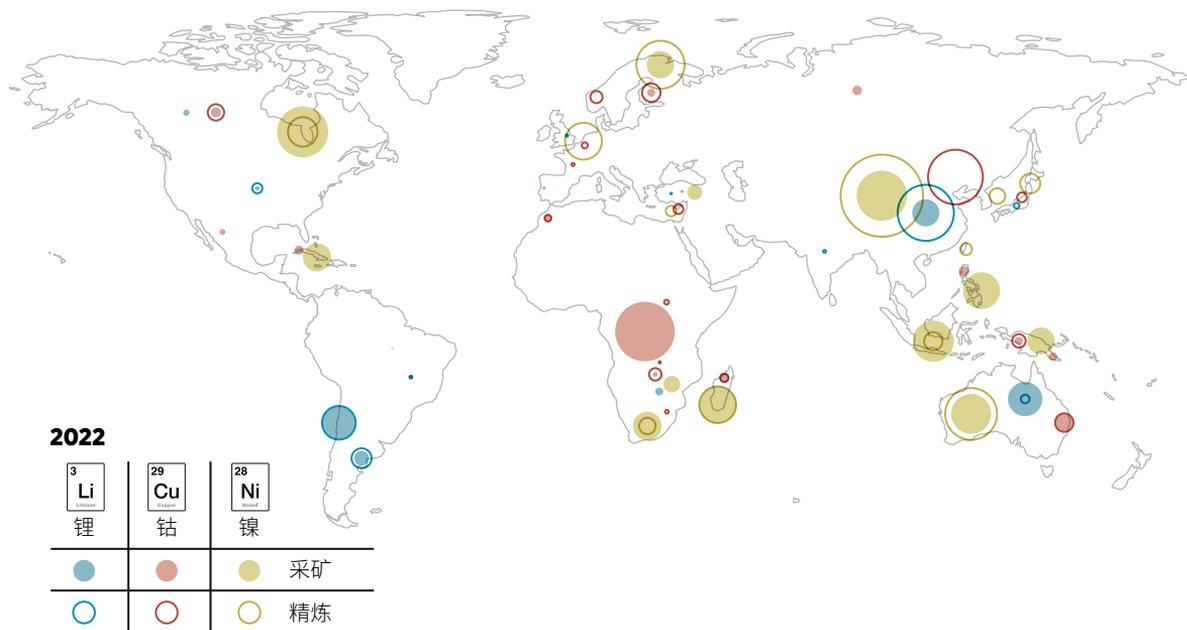
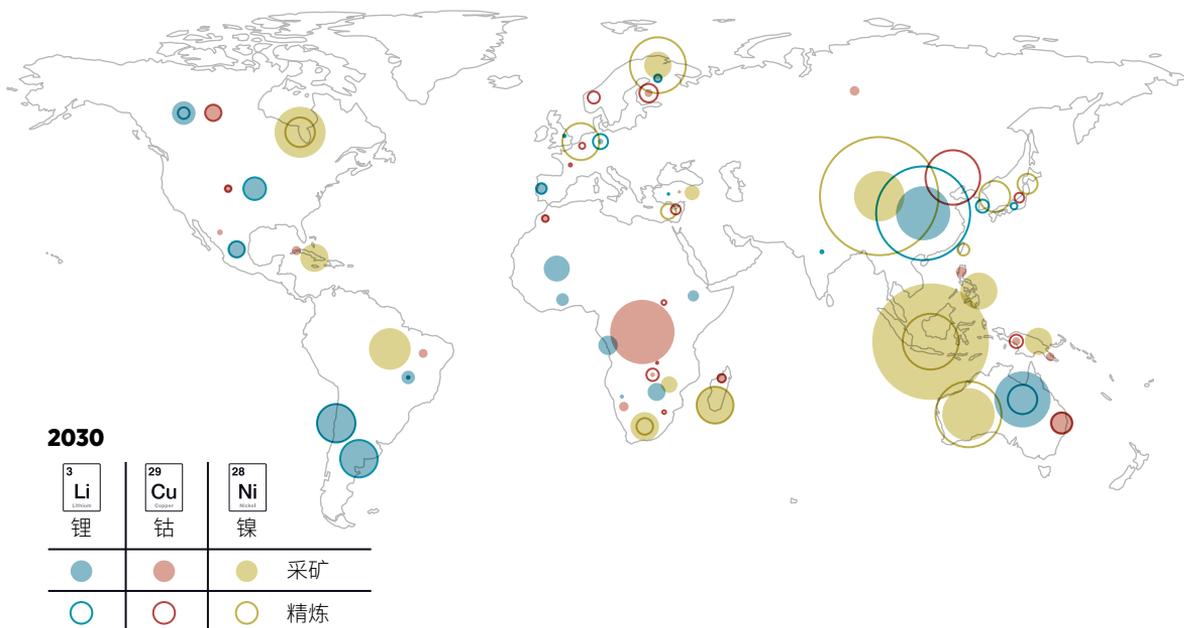


图 2.5 2030 年特定关键原材料的开采和精炼产品供应预测



免责声明：这些地图仅供说明之用。地图上展示的边界和名称并不意味着 IRENA 的任何认可或接受。

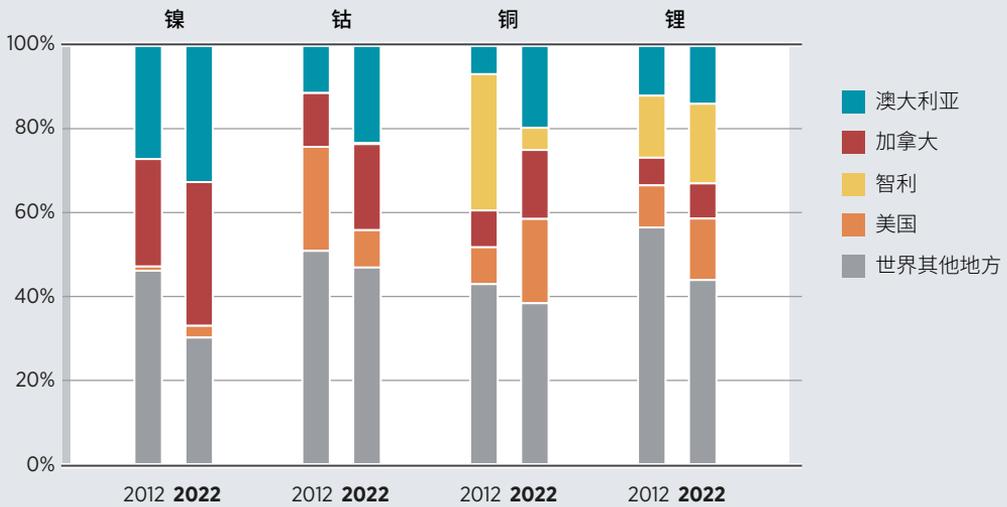
来源：(BloombergNEF, 2023)。

文本框 2.1 矿产勘探预算

勘探预算是指分配用于确定某片区域潜在矿藏的资金。并非所有勘探项目都会开采出新矿，即便开矿成功，从发现到开矿也需要数年的时间。

特定矿物的大部分勘探预算来自 OECD 成员国，主要是澳大利亚、加拿大、智利和美国，这些国家在过去十年中增加了镍、钴、锂和铜的勘探预算（图 2.6）。中国和越南增加了镍的勘探预算；刚果民主共和国、摩洛哥和赞比亚增加了钴的勘探预算；秘鲁、德国和津巴布韦增加了锂的勘探预算；刚果民主共和国和厄瓜多尔增加了铜的勘探预算。南非在铂矿勘探预算上占据主导地位，津巴布韦近年来也在增加相关预算。

图 2.6 2012 年和 2022 年按国家划分的全球特定材料勘探预算份额



**2022 年主要的
新参与国**

加蓬
秘鲁
波兰
所罗门群岛
坦桑尼亚



波斯尼亚和黑塞哥维那
智利
格陵兰*
西班牙
坦桑尼亚



阿富汗
古巴
塞浦路斯
厄立特里亚
坦桑尼亚



科特迪瓦
印度
摩洛哥
瑞典
英国



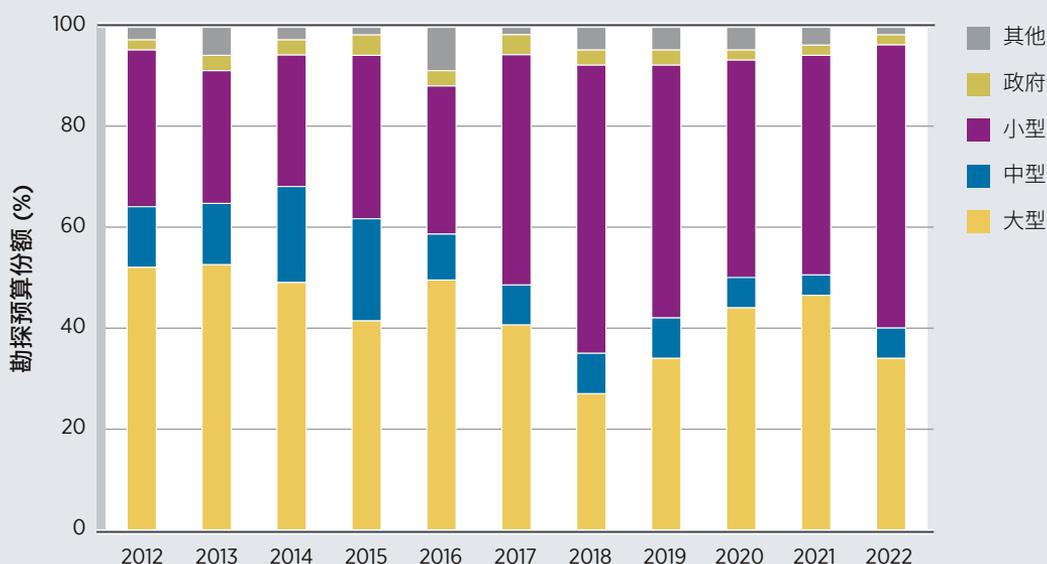
* 丹麦王国

基于：(S&P, 2023)。

文本框 2.1 矿产勘探预算 (续)

采矿业对勘探方面的投资依旧不足。2012 年至 2022 年间，小型采矿公司在电池正极材料（锂、钴和镍）全球勘探预算中所占的份额从 31% 增长到 56%，而大型采矿公司的份额同期从 52% 下降到 34%。政府在勘探预算中所占的份额保持不变，约为 6%（图 2.7）。

图 2.7 2012 至 2022 年按投资类型划分的特定材料全球勘探预算份额

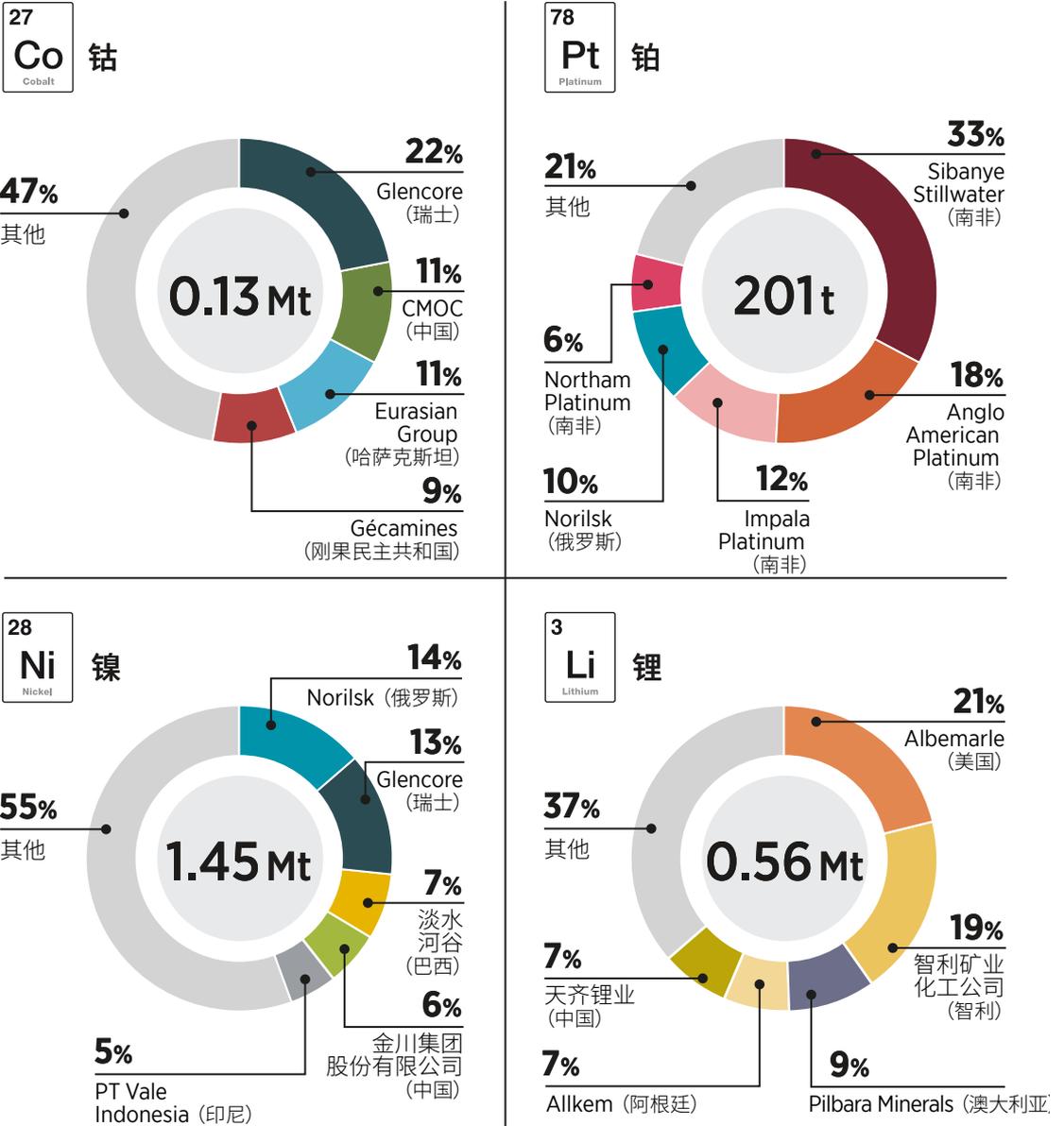


基于：(S&P data, 2012-2022)。

行业参与者

采矿业由几家大型跨国公司和国有控股企业 (SOE) 主导，这些公司和企业在多个国家开展业务并拥有开发复杂矿山所需的资源和技术。该行业集中度很高，这些公司和国有企业控制了全球生产和贸易的大部分份额。例如，五大矿业公司控制了 61% 的锂产量和 56% 的钴产量（见图 2.8）。

图 2.8 2021 年大型矿业公司在特定材料方面的市场份额



基于：(S&P, 2023)。

注：a) 以百万吨 (Mt) 和吨 (t) 为单位提供的每种矿物的全球总产量。b) AR = 阿根廷；AU = 澳大利亚；BR = 巴西；CD = 刚果民主共和国；CH = 瑞士；CL = 智利；CN = 中国；ID = 印度尼西亚；KZ = 哈萨克斯坦；RU = 俄罗斯联邦；SA = 南非；US = 美利坚合众国。

矿业公司的所有权结构会影响其风险承受能力和经营环境。国有企业可能更愿意投资于高风险环境，而其他私营上市公司很可能会回避这种风险。中国的国有企业就是一个很明显的例子，这些企业在非洲采矿业中占据重要地位，包括在那些存在真实或可感知到的风险、且可能使其他投资者望而却步的国家开展业务（Ayuk 等人，2020）。

矿产和金属行业价值链中规模最大的一些公司是垂直整合的，这意味着其业务遍及价值链的多个环节（如 BHP、Rio Tinto 和 Freeport-McMoRan）。其他公司则专注于特定环节。例如，有些公司专门从事矿物提炼，但没有加工或精炼矿物的设施。还有些公司专门将原材料精炼为金属，但没有开采或加工矿物的设施。很多回收公司专门收集和處理特定类型的废料，而不在价值链的其他环节开展业务。

然而，能源转型正在改变采矿业的企业战略和价值链。例如，全球市值最大的矿业公司必和必拓（BHP）正在剥离其石油和天然气业务，并将自己定位为专注于能源转型的矿业公司（Quiggin，2021）。日益增长的关键原材料需求也吸引了传统矿业公司以外的企业。电动汽车制造商特斯拉正在德克萨斯州建设一座锂精炼厂，并希望扩大其矿产开采和加工业务（Agatie，2023）。有些矿业公司热衷于投资与能源转型相关的新业务。例如，Fortescue Metals Group 成立了一个新部门，专门负责投资可再生能源、电制氢和电制氨。

金属交易所

与石油等大宗商品不同，很多能源转型所需的金属和矿物并没有在交易所得到广泛交易。铜是个例外，在现货和期货市场上都交易广泛。钴、锂和稀土等其他特殊商品主要通过生产商和消费者之间谈判达成的双边合同进行销售（World Bank，2022）。某些金属的低流动性和产品异质性的有效对冲工具的开发构成了挑战（Azevedo 等人，2018）。

目前已有多家特定的矿物和金属交易所开业。其中一个例子就是由商人和金融家于 1877 年创建的是伦敦金属交易所（LME），其初衷是促进国际金属交易。鉴于智利（铜）和马来西亚（锡）的金属需要三个月才能运抵目的地，三个月合约成为 LME 的主要交易期货合约（Buchan 和 Errington，2018）。

LME 目前仍是世界上最重要的金属交易平台，为铜、镍和钴等关键原材料设定全球参考价格。³ LME 平台每日促成 600 多亿美元的期货交易（Burton，2022），并且交易的金属和矿物的范围继续不断扩大（表 2.1）。例如，LME 于 1877 年开始交易铜，随后于 1979 年开始交易镍，2010 年开始交易钴，2021 年开始交易锂（表 2.2）（LME，2023）。

³ 还有很多其他交易所，包括纽约商品交易所、上海金属交易所和东京商品交易所。

表 2.1 伦敦金属交易所交易的关键原材料和首次交易年份

商品		年份
铜		1877
镍		1979
锡		1989
钴		2010
钼		2010
锂		2021



其他一些较小的交易所也会交易商品期货和衍生品，包括上海期货交易所，以及迪拜黄金和商品交易所。各金属交易所最近推出了钴和锂合约，但其尚未作为对冲工具而得到行业参与者的广泛接受。这种情况给寻求对冲这些关键金属风险的公司带来了挑战，例如，希望锁定锂价格的汽车制造商（Sanderson，2021）。

金属交易所在价格信号方面发挥着至关重要的作用。在交易所很容易获得各种交易金属的明确价格信息。相比之下，金属的实际商定价格却很难确定，因为这些金属通常在交易双方之间直接交易，而不是在交易所广泛交易。虽然有些公司专门发布了价格清单，但还是主要依赖于买家和卖家自愿披露价格，因此其发布的价格未必及时可靠。这种情况为贸易公司带来了巨大优势，因为这些公司可以获得金属的真实市场价格以及与交易相关的信息。

商品交易员

鉴于一些矿产市场比较分散且一些生产商处于偏远地区，独立交易员可以发挥关键作用（表 2.2）。除了交易实物商品的公司之外，金属市场也常常会吸引投资者的极大关注，包括对冲基金、投资银行和商品指数基金（Humphreys，2011）。这些交易员和投机者通常并不生产或使用商品，而是在市场的不同环节为生产商和消费者牵线搭桥。近年来，商品交易员面临着加强监督和监管的呼声（Blas，2022）。

表 2.2 按收入划分的前几大商品交易所

公司	创建日期	总部	收入 (2022 年, 单位为 10 亿美元)	交易的商品	企业状况
Vitol	1966	瑞士日内瓦	505	原油、燃料油、汽油、中间馏分、石脑油、甲醇、乙醇、化学品、液化石油气 (LPG)、天然气、液化天然气 (LNG)、碳排放、煤、铁矿石、电力、氧化铝、基础油、沥青	私有
Trafigura	1993	新加坡	318.5	原油、燃料油、中间馏分、汽油、石脑油、液化石油气、液化天然气、生物柴油、凝析油、化学品、煤、铁矿石、精矿和矿石 (铜、铅、锌、氧化铝、镍、锡、钴)、精炼金属 (铜、铝、锌、粗铜、镍、锡、钴)	私有
Glencore	1974	瑞士巴爾	255.9	铜、锌、铅、镍、铁合金、氧化铝、铝、铁矿石、钴、煤、石油、石油产品、小麦、玉米、油菜、大麦、大米、油籽、豆粕、食用油、生物燃料、棉花、糖	公众有限公司
Gunvor	2000	瑞士日内瓦	150	原油、重质燃料和原料、中间馏分、汽油、石脑油、液化石油气、生物燃料、天然气、液化天然气、碳排放、铜、铝、锌、铅、锡、镍、锰、钢、煤、炼焦煤、铁矿石、木材	私有
Mecuria	2004	瑞士日内瓦	174	原油、燃料油、中间馏分油、汽油、石脑油、生物燃料、石化产品、天然气、液化天然气、电力、煤、铁矿石、锰、铬、碳排放、基本金属、粮食和饲料、油料种子、植物油	私有

来源：(公司相关网站和 Trafigura, 2018 ; Buchan 等人, 2018)。

注：Glencore 的前身是 Marc Rich and Co. AG。

贸易依赖性

本节分析了与关键原材料相关的双边贸易流量。图 2.9 所示为 2022 年铜、锂、锰、镍和铂这五种关键原材料的最高双边贸易流量。数据表明铜是最有贸易价值的材料。该图还展示了各矿业国家的地理多样性，以及矿业对智利和秘鲁等几个相对较小的经济体的重要性。

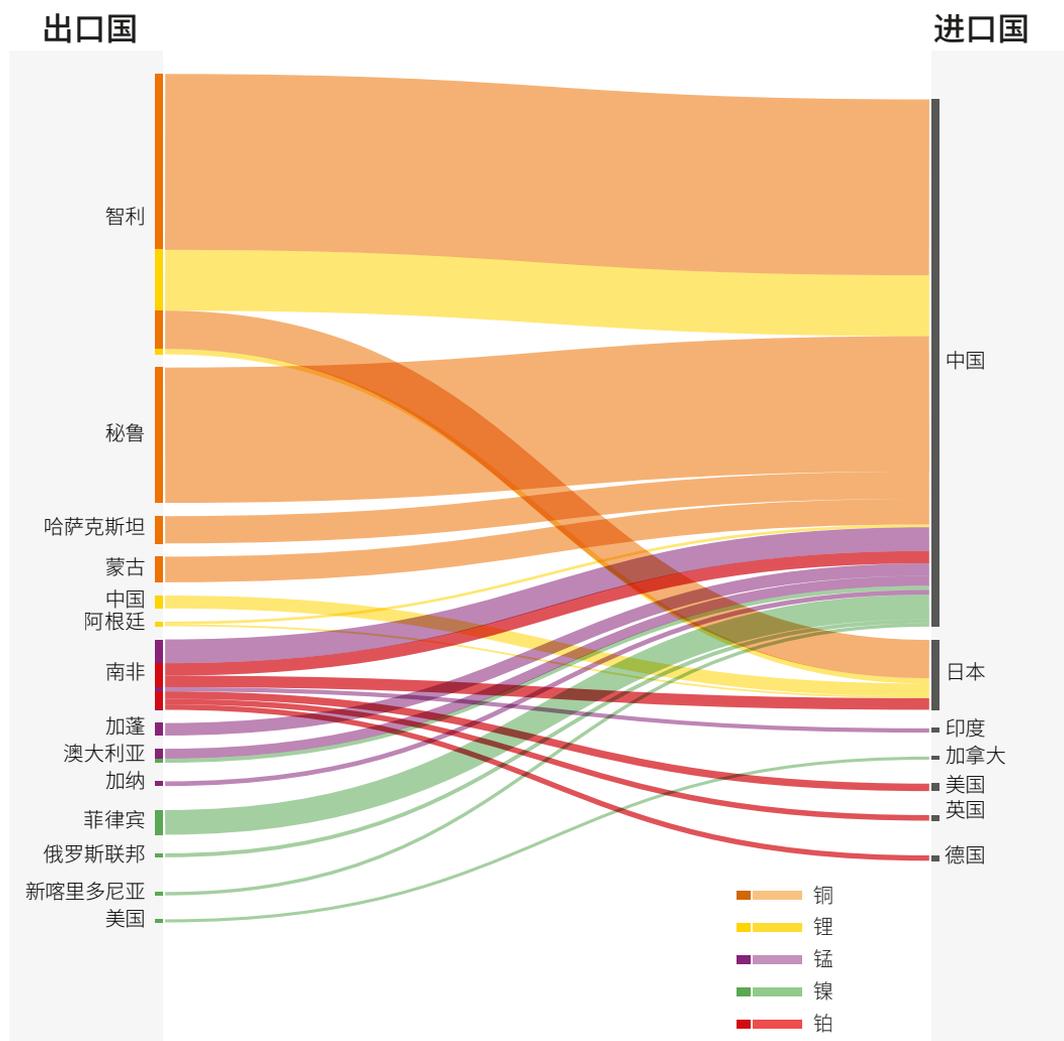
最后，尽管通常都认为中国主导着关键原材料供应链，但其也是最大的进口国之一。中国是世界上未加工的镍、铜、锂、钴和稀土原材料的最大进口国。因此，尽管该国依赖于原料的进口，但在很多关键原材料中下游产能上占据主导地位。

在研究贸易依赖性时，必须考虑三点 (Nassar 等人, 2015)。首先，在贸易统计中，进口交易有时只能归为最后一次装运的国家，而不是材料最初开采或制造的国家。第二，来自不同国家的矿产品可能包含在进口的成品和半成品中，从而掩盖了真实的进口依赖性和受国外供应中断影响的程度。例如，钕等稀有金属包含在永磁体中；任何进口这些磁体的国家仍然容易受到稀土供应中断的影响。第三，外国公司可以部分或完全拥有和控制矿产资产和业务。例如，中国公司在澳大利亚和智利的锂项目、在格陵兰的稀土矿⁴、以及在刚果民主共和国、巴布亚新几内亚和赞比亚的钴项目中均拥有股份。研究发现，如果计入中国公司的股权，则中国公司在全球钴产量中的份额会增加 2% 至 14%，在钴中间品产量中的份额会增加 11% 至 33% (Gulley, 2022)。美国、英国、加拿大、日本、韩国和其他公司也拥有外国矿产资产。

⁴ 丹麦王国



图 2.9 2022 年按特定材料价值划分的双边贸易流量



来源：(UN Comtrade, 2023)。

注：所有数据均指未加工的矿石和精矿，但锂除外，锂数据根据碳酸锂、氧化锂和氢氧化锂的数据计算得出。原本使用的是进口数据，而且只涉及个别欧盟国家。



2.2 供应风险和脆弱性

几乎所有国家都很容易受到不可预见的供应中断的影响，因为没有一个国家能在所有材料上都实现自给自足。即使是制造业基础规模较小的国家也容易受到贸易中断的影响。虽然这些国家可能不会严重依赖直接的原材料进口，但由于其仍需要进口可再生能源装置的零部件或成品（如太阳能电池板组件），因此仍然会从正常运作的全球关键原材料和技术市场中受益（Patterson，2018）。

供应链中断的风险会直接影响那些使用进口矿产或成品来制造太阳能电池板、风力涡轮机和电池的公司。而且，很多行业都可能会受到供应中断的影响，这种影响甚至可能会波及整个经济。鉴于工业、数字基础设施和农业等多个行业都依赖矿产和金属商品来进行产品生产，这种影响所波及的范围可能非常大。

供应中断的概率和易受影响程度要通过多种指标进行衡量。在某次详细分析中，就确定了不少于 30 个供应风险指标（Schrijvers 等人，2020）。风险评估也可以在不同层面进行，包括对一个或一组国家、公司、产品和经济部门进行评估。

图 2.10 展示的是关键原材料供应风险的六个来源。虽然该列表并不详尽，但它涵盖了中短期（即 5 至 10 年）内关键原材料供应所遇到的一些最常见的地缘政治风险，特别适用于严重依赖进口的国家（Nassar 等人，2020）。其他类型的风险（如环境和社会风险）将在第 3 章进行讨论。

在评估地缘政治风险时，应考虑到可能对矿产品供应产生长期影响的某些结构性趋势。这些趋势包括采矿和加工的地理集中度、矿石品位下降、废弃物回收率低、很多关键原材料对副产品生产的依赖性，以及某些材料短期替代可能性有限（Nassar 等人，2020）。这些结构性因素有可能放大上述地缘政治供应风险的影响，在某些情况下甚至可能提高风险概率。

图 2.10 材料供应的主要地缘政治风险



1 外部冲击

全球关键原材料供应链相互关联，很容易受到自然事件（如地震）、有意的人为行为（如贸易争端）或无意的人为行为（如停电）所造成的供应中断的影响。例如，近年来，全球原材料供应链受到了新冠肺炎疫情、乌克兰战争和全球能源危机等冲击的影响。

2020 年，新冠肺炎疫情导致经济陷入整体停滞，进而造成全球金属需求大幅下降。与此同时，数百家矿山、冶炼厂和炼油厂的关闭导致了供应中断。例如，占全球铜供应量 12% 的秘鲁在 2020 年 3 月至 6 月初关闭了所有矿山，这是秘鲁政府强制关闭矿山时间最长的一次（Yu 等人，2021）。南非长达 21 天的矿山停产也造成了 75% 的全球铂供应中断（Njini 和 Biesheuvel，2020）。

尽管金属市场从 2020 年 3 月的初始价格和需求崩溃中迅速复苏，但此后又面临了几次重大的供应中断。2021 至 2022 年的全球能源危机也带来了一次重大冲击。例如，在 2021 年下半年，中国在全国范围内出现能源短缺，因此关闭了部分镁厂，以应对该国的电力危机。由于中国的镁产量约占世界总量的 85%，其影响波及全球并导致价格飙升（Hume，2021）。欧洲对此感受尤为强烈，因为欧洲有 95% 的镁供应依赖于中国。欧洲工业集团发出警告，声称原材料供应即将枯竭，这会威胁到成千上万的企业及其工人（Burton，2021）。同样，南非自 2022 年以来的频繁停电也抑制了铂族金属的产量（Njini，2023）。

乌克兰战争是另一个外部冲击。这场战争影响到某些大宗商品（如镍和铝）的供应，导致其价格飙升，但金属市场受影响的程度可能不如其他大宗商品市场，尤其是食品和能源市场。2022 年之前，乌克兰是生铁的主要出口国。俄罗斯联邦是世界上最大的生铁、浓缩铀、钷和镍的出口国。该国在铂和精炼铝出口中也占据很大份额。相关制裁迄今并没有对关键金属进口进行全面限制，而是有选择地征收进口关税。⁵ 例如，俄罗斯金属巨头 Norilsk Nickel（镍和钷的主要供应商）在很大程度上并未受到制裁（MacDonald, 2022）。展望未来，限制高科技进口的制裁措施可能会阻碍采矿和加工公司，因为这些公司会依赖外国公司的设备和软件许可证（Bloomberg News, 2022）。

关键原材料价值链的部分环节也会受到气候变化带来的实际影响——从海平面上升到更频繁和严重的天气事件。有些原材料（例如镍、钴和稀土）在暴雨和洪水风险较高的地区进行开采和加工。例如，在 2020 年，中国西南部的四川省发生了“百年一遇”的洪水，导致稀土加工厂关闭，库存受损（Daly 和 Zhang, 2020）。其他采矿活动也可能会受到干旱和缺水的影响。例如，大约 50% 的锂矿位于水资源缺乏严重的地区。鉴于锂矿开采需要大量的水资源，因此很可能会围绕用水而引发冲突（IEA, 2022）。

2 资源民族主义

近年来，为了提高开采收益或应对不利影响，很多政府加强了对其矿产资源的国家控制。具体实现方法包括加强税收制度、重新商议矿区使用费、成立国有矿业公司、关键原材料行业国有化，以及限制外国投资。这一趋势在很多国家都可以看到，包括澳大利亚、加拿大、智利、蒙古、纳米比亚、秘鲁、南非和赞比亚等。

旨在修改自然资源所有权和使用权的政策可能会影响全球供应。例如，在 2022 年中期后的几个月里，特许权使用费纠纷使刚果民主共和国 Tenke Fungurume 铜钴矿的供应陷入停滞。这场纠纷影响了全球 15% 的钴供应（White 和 Hook, 2023）。智利于 2023 年 4 月宣布决定将锂产业国有化，尽管这一决定对全球供应的长期影响尚不明显（见文本框 2.2），但仍引起了一些分析师和行业团体的担忧（Dempsey 和 White, 2023）。

人们普遍使用“资源民族主义”来描述这一趋势。然而，值得注意的是，这一术语将各种不同的政策一概而论，却掩盖了推动这些政策的复杂动机（Ward, 2009）。最近采矿业监管愈发严格，这不禁令人想起了 20 世纪 70 年代，当时很多矿产丰富的国家（包括新独立的国家）采取了国家干预政策，在采矿业成立了国有自然资源公司。随着 20 世纪 80 和 90 年代大宗商品价格下跌，全球政治共识转向支持自由市场，采

⁵ 英国对俄罗斯进口的铜、铅、镍、原铝和铝合金额外征收 35% 的关税（请访问 www.lme.com/en/news/russian-sanctions）。美国对俄罗斯铝征收 200% 的进口关税（请访问 www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2023/02/24/a-proclamation-on-adjusting-imports-of-aluminum-into-the-united-states-4/）。

矿业受自由化、放松管制和国有资产私有化的浪潮所席卷 (Dietsche, 2014)。到 21 世纪初, 国有金属矿业公司所剩无几。例如, 2005 年, 全球最大的 25 家金属矿业公司中, 只有三家公司 (智利的 Codelco、俄罗斯联邦的 Alrosa 和博茨瓦纳的 Debswana) 的多数股权归国家所有。这 25 家金属采矿公司中有 18 家是完全私营的 (UNCTAD, 2007)。

文本框 2.2 智利锂资源战略

2023 年 4 月, 智利总统 Gabriel Boric 宣布决定将锂产业国有化。智利拥有世界上最大的锂储量, 锂产量排名世界第二。Boric 总统表示, 智利的锂储量代表着“短期内难得一遇的经济发展机遇”, 该产业的国有化有助于建设“一个更公正、更可持续和更民主的智利” (Sharp, 2023)。政府将设法保护生物多样性, 并与原住民和周边社区分享采矿利益。

目前, 有两家公司正在智利采矿: 智利矿业公司 (SQM) 和 Albemarle。按照计划, 智利将成立一家独立的国有公司来生产锂, 但此举需要得到国会的批准。该计划设想通过公私合营的方式来签订锂合同, 其中国家将持有多数股份 (Stott 和 Bryan, 2023)。政府也不会终止当前的合同 (Government of Chile, 2023), 但表示希望各公司在合同到期前对国家参股持开放态度。SQM 的合同将于 2030 年到期, Albemarle 的合同将于 2043 年到期。

有些分析师担心, 锂产业的国有化可能会使潜在的合作伙伴望而却步, 促使外国直接投资向其他国家转移, 进而对智利锂产业以及全球供应造成不利影响 (Innovation News network, 2023 ; Sharp, 2023)。然而, 智利政府已表示将采取渐进和务实的方法, 通过伙伴合作关系将该产业置于国家控制之下。智利国家铜业公司 Codelco 业绩记录始终良好, 该公司是 Allende 政府于 1971 年将智利铜矿国有化后成立的 (Malone 和 Bazilian, 2023)。Codelco 是世界上最大的铜矿开采公司。智利智库 Cenda 的数据表明, 与私营公司相比, 该公司每单位产量所产生的税收是私营公司的三倍以上 (Mining.com, 2022)。



很多国家还加强了对外国投资的审查，不仅是在采矿业，还涉及到其他很多行业（UNCTAD，2023）。例如，澳大利亚和加拿大最近在其采矿业实施了更为严格的外国投资法规。在澳大利亚，对采矿业的外国投资必须经过外国投资审查委员会的审查，而加拿大政府针对外国投资引入了全新的国家安全审查程序。政府加强对外国投资审查的这一趋势反映出各国政府对国家安全、环境可持续性以及当地自然资源所有权和控制权的关切。表 2.3 举例说明了对采矿业的国外投资在不同主权国家受到的更严格的审查。

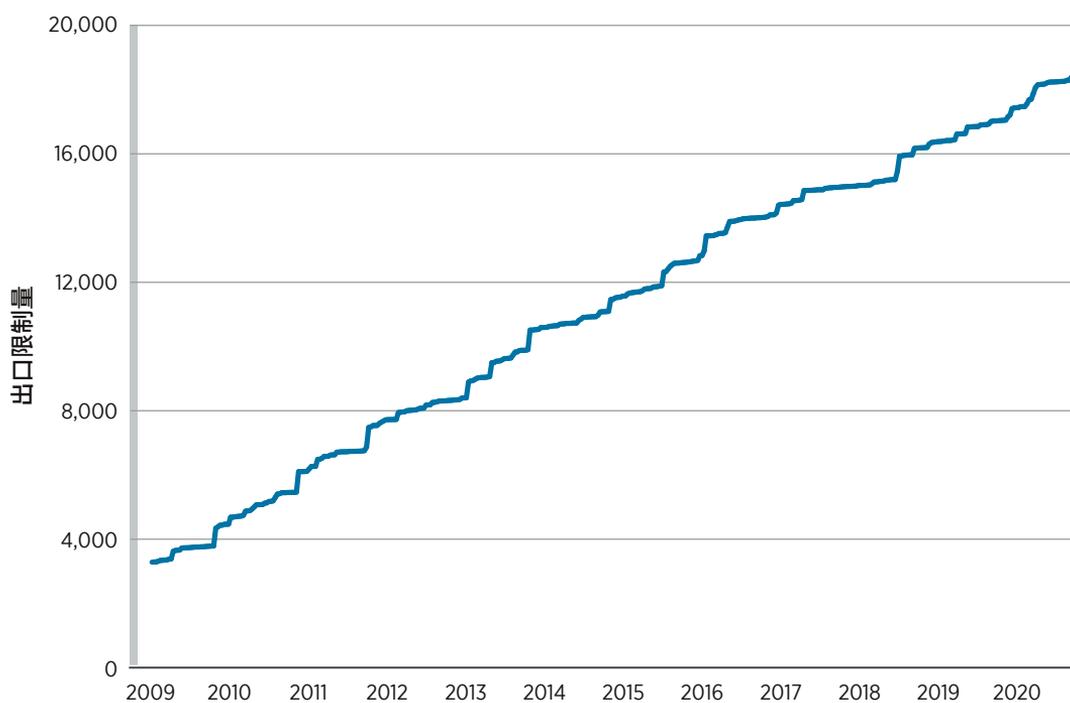
表 2.3 矿产部门加强外国投资审查的例证

国家/地区	说明
澳大利亚	2020 年，澳大利亚通过了一项管理外国投资的新法规，赋予外国投资审查委员会以国家安全为由拒绝投资的特殊权力（Federal Register of Legislation，2021）。
加拿大	2022 年 10 月，加拿大制定了一项新政策，旨在限制外国国有公司以及与外国政府关系密切的外国私人投资者对该国的关键矿产行业进行投资（Government of Canada，2022）。
印度尼西亚	2009 年，印度尼西亚通过了一项法律，要求外国采矿公司在项目投产十年后，将项目的多数股权转让给当地实体（Republic of Indonesia，2009）。
墨西哥	2022 年 4 月，墨西哥正式将其锂产业国有化，赋予国家勘探、开采和使用的专属权利（United Mexican States，2022）。
蒙古	2019 年，蒙古通过了一项法律，允许政府收购议会认为对国家有“战略”价值的矿藏，收购比例最高可达 50%。
坦桑尼亚联合共和国	2017 年，坦桑尼亚通过了多项法律，要求在其国内经营的矿业公司必须向政府出让至少 16% 的股份，并只能在当地加工矿石（Government of Tanzania，2017）。
美国	2022 年 9 月，美国总统拜登签署了一项行政命令，要求美国外国投资委员会对所有影响国家安全的关键矿产投资申请进行审查（White House，2022）。

3 关键原材料的出口限制

原材料出口限制是国际贸易中一个日益严峻的问题。在过去十年中，这种限制的发生率增长了五倍以上（图 2.11）（OECD，2023）。经济合作与发展组织（OECD）的数据表明，近年来，全球约 10% 的关键原材料出口面临至少一项出口限制措施（OECD，2023）。⁶ 出口限制的形式有很多种，包括出口配额、出口税、强制性最低出口价格或许可证制度。

图 2.11 2009-2020 年全球原材料出口受限发生率



来源：(Kowalski 和 Legendre, 2023 ; OECD Inventory of Export Restrictions on Industrial Raw Materials, 2022)。

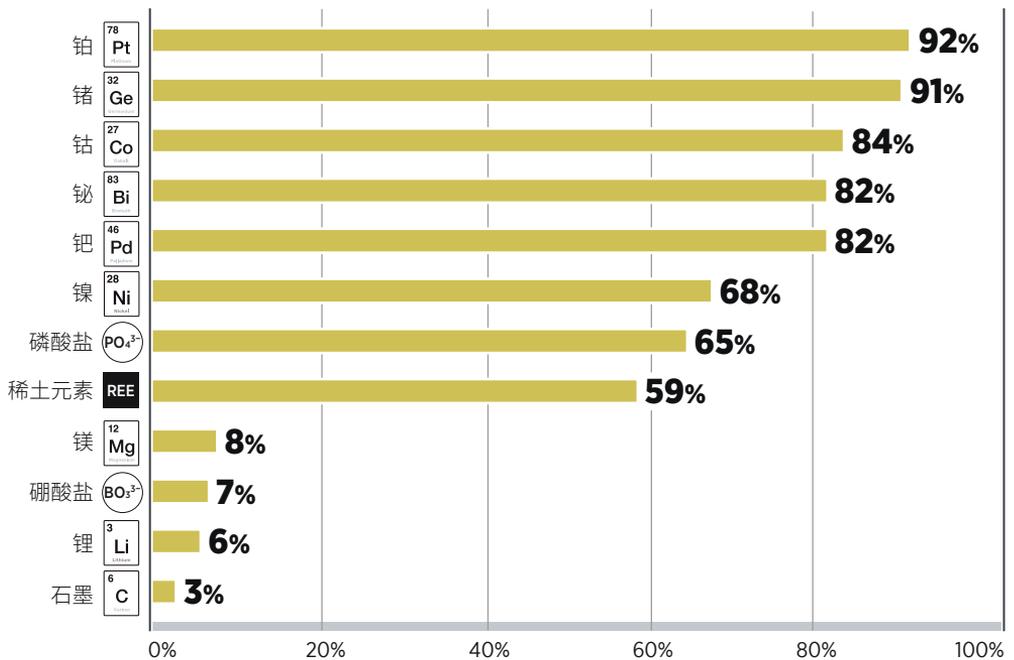
注：y 轴展示的是目前生效的出口限制规定数量。该数据库涵盖 65 种工业原材料和 80 个出口国的信息，这些国家的矿物和金属产量在 2018 年占全世界总量的 97%。相关方法说明的下载地址：www.oecd.org/trade/topics/trade-in-raw-materials/documents/methodological-note-inventory-export-restrictions-industrial-raw-materials.pdf。

⁶ 出口限制通常被归类为“资源民族主义”，上一节已对此进行了讨论。然而，出口限制通常用于不同的目的，因此本报告对此进行了单独讨论。虽然东道国政府宣称对矿产资源实行国家控制是为了优化收益（资源收入优化），但出口限制通常服务于发展下游产业（基于资源的工业化）这一更广泛的目标。

出口限制（特别是对关键原材料的出口限制）似乎有所增加，有几个国家已开始实施严格的出口禁令。津巴布韦于 2022 年 12 月禁止出口锂原料（Marawanyika 和 Ndlovu, 2022）。同样，印度尼西亚于 2023 年 6 月禁止铝土矿出口（Shofa, 2023）。大约在同一时间，纳米比亚禁止出口锂原料和其他关键原材料（Nyasha Nyaungwa 等人, 2023）。最近出台的 these 措施反映出各国采取各种行动来鼓励国内加工和吸引下游产业的趋势。

原材料出口限制并不是一种新现象。1937 年，为了评估出口限制和出口关税带来的影响，国际联盟成立了原材料问题研究委员会（国际联盟, 1937）。这些限制因原材料的不同而差别很大（图 2.12）。不只是矿产资源丰富的国家会实施这些限制，寻求减少依赖原材料进口的国家往往也会实施出口限制，以保留废物和废料等次要原材料来源（OECD, 2023）。

图 2.12 2020 年出口受限后的全球出口份额



来源：(Kowalski 等人, 2023 ; OECD Inventory of Export Restrictions on Industrial Raw Materials, 2022)。

注：为了便于阅读，标签“锗”用来表示以下一组材料组：锗、铈、钒、镓、铟和铊。

WTO 关税及贸易总协定第 11 条规定，除了少数例外情况（如环境保护、国家安全或确保原材料供应），基本上禁止对进出口量进行限制。这些例外情况必须满足特定的条件，例如，不得保护国内产业或不公平对待其他国家。这些措施也不应不公平地限制国际贸易。

关键原材料出口限制的增加趋势引发了一系列贸易冲突，世界贸易组织 (WTO) 正在着手处理其中的一些冲突（表 2.4）。所涉及的原材料在能源行业之外有着更为广泛的应用，如炼钢（钼）或化学工业（萤石），因此这些争端不能仅仅与能源转型联系在一起。最受关注的矿产贸易争端是 2010 至 2011 年的稀土危机（见文本框 2.3）。

表 2.4 最近世界贸易组织 (WTO) 受理的关于关键原材料出口限制的贸易争端

案件（简称和案件编号）	请求 WTO 磋商	投诉方	有争议的措施
中国 原材料 (DS 394、395、398)	2009	欧盟、墨西哥、美国	对铝矾土、焦炭、萤石、镁、锰、碳化硅、金属硅、黄磷和锌实施出口限制。
中国 稀土 (DS 431、432、433)	2012	欧盟、日本、美国	对几种稀土、钨和钼实施出口限制。出口限制包括出口税、出口配额和对获准出口产品的企业的某些限制。
中国 原材料 II (DS 508、509)	2016	美国、欧盟	对各种形式的锑、铬、钴、铜、石墨、铟、铅、氧化镁、滑石、钽和锡加征出口关税并实施其他据称的限制。
印度尼西亚 原材料 (DS 592)	2019	欧盟	该投诉涉及以下据称的措施：(a) 对镍出口实施限制，包括实际出口限制；(b) 对镍、铁矿石、铬和煤提出国内加工要求；(c) 对镍和煤产品规定国内销售义务；(d) 提出镍出口许可证要求；和 (e) 禁止补贴计划。

来源：(WTO 争端问题指数，可从 WTO 获得，2023a)。

现有的国际贸易框架历来侧重于减少进口限制。虽然随着时间的推移，进口关税通过多边贸易谈判有所下降，但出口税并不受 WTO 任何条例的约束。然而，有一些最近加入 WTO 的成员属于例外情况，因为这些成员已同意根据其加入世贸组织的协议减少或取消出口税。



文本框 2.3 2010-2011 年的稀土危机

稀土由 17 种化学元素组成，其特性使其在现代高科技应用中具有重要价值。如今，稀土主要用于永磁电动机（电动汽车）和发电机（如风力涡轮机）（Garcia, 2020）。在 20 世纪 90 年代前，美国一直主导着全球稀土生产，之后中国成为了最大的稀土生产国。

到 21 世纪初，中国几乎占到全球稀土元素开采总量的约 95%（美国地质调查局和美国内政部，2010）。然而，环境污染、非法采矿和资源枯竭等日益严重的问题导致中国政府决定大力发展下游产业（Wübbecke, 2013）。从 2006 年开始，该国出台了多项法规，包括出口配额、生产配额、出口税和对外国投资的限制（Shen 等人，2020）。虽然逐步引入了出口配额，但中国在 2010 年将稀土出口配额减少了 37%，因为缺乏替代性产品供应，这导致了稀土氧化物价格的飙升（见图 2.13）。

除了出口配额之外，据报道，在 2010 年 9 月至 11 月期间，中国对日本的稀土出口中断了几周，原因是一艘中国拖网渔船的船长因海上争端而被日方扣留（Wilson, 2018）。关于稀土出口延迟数量、延迟时间以及责任方的报道仍存在争议。对日本财政部海关数据的分析表明，在拖网渔船事件后，日本对中国稀土的进口并没有普遍下降（Johnston, 2013）。

2010 至 2011 年的价格飙升造成稀土供需发生重大变化，进而导致 2012 年价格走低。回收和替代使需求大幅减少，而贸易转向、库存管理、新矿开采和走私则确保了剩下的供应缺口（Gholz 和 Hughes, 2021）。

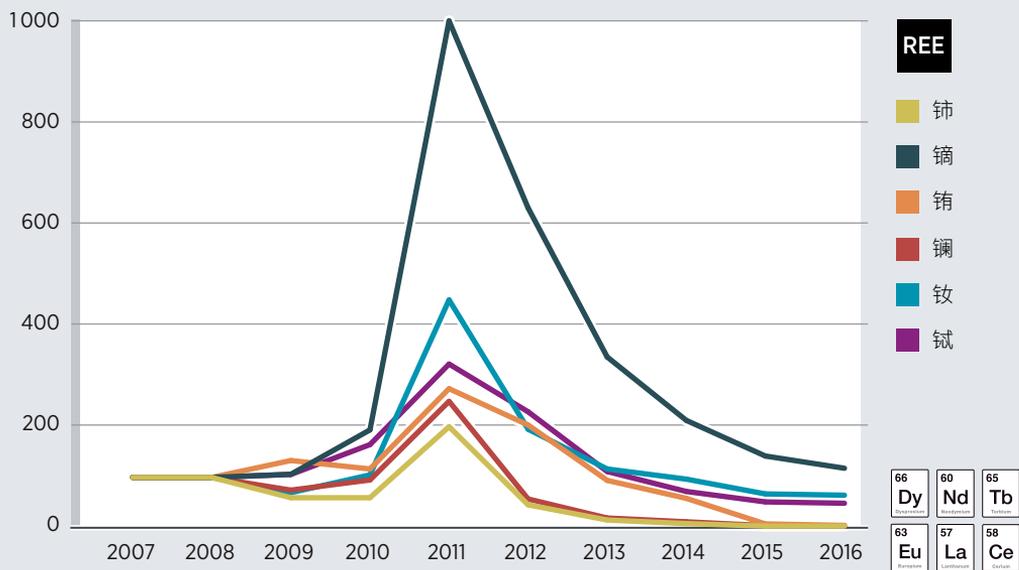
2012 年 3 月，日本、欧盟和美国请求世界贸易组织就中国稀土出口限制进行磋商。中方辩称，这些限制是保护环境的必要条件，而投诉方则反驳称，这些限制“旨在实现产业政策目标，而非保护环境”。2014 年，世界贸易组织上诉机构做出有利于投诉方的裁决，要求中国取消稀土出口限制。



文本框 2.3 2010-2011 年的稀土危机 (续)

图 2.13 2007-2016 年国际稀土金属氧化物价格

指数价格 (基准年份 2007 = 100)



基于：(Wilson, 2018；数据来自美国地质调查局国家矿产信息中心)。

注：REE = 稀土元素。



4 矿产垄断

矿物生产的高度集中引起了对市场垄断和合谋的问题。矿物供应在地理上集中度很高，在矿产价值链关键环节拥有巨大市场份额的公司控制着矿物的开采和提炼。这种生产集中度有可能导致商品垄断的形成，即主要生产商集团通过在商品生产、定价和 / 或分销方面的合作实现利润最大化。

从历史角度看，生产集团和政府曾多次试图通过合谋影响矿产市场（World Bank, 2022）。在 20 世纪初，铝、铜、镍、钢、锌和铅行业均存在过较严重的生产商垄断现象（Barbezat, 1989；Bray, 1997；Storli, 2014；Tsokhas, 2000；Walters, 1944）。20 世纪 30 年代，为了应对大萧条时期的极低价格，一些垄断者应运而生。

在去殖民化后和世界经济繁荣发展的 20 世纪 60 至 70 年代，又出现了一波垄断浪潮，当时成立了多家垄断企业和生产企业俱乐部，其目的是控制铝土、铜、铁矿石、锡、钨和铀等金属市场（见表 2.5）。然而，由于内部不和、主要生产商不参与、矿物替代或供求技术创新等问题的困扰，有很多垄断的尝试只是昙花一现⁷。

除了生产商俱乐部之外，还有一些涉及生产商和消费者的国际商品协定。例如，从 1956 年到 1985 年，有很多国际商品协定控制着锡市场，而最后一项国际锡协定于 1985 年终止（Hillman, 2010）。这些协定旨在通过建立一个缓冲库存制度来稳定锡市场，允许生产商在供应过剩时储存过剩供应，并在供应短缺时释放这些库存。虽然这一制度使锡的价格在数年内持续走高，但同时也加快了用铝代替锡的速度，特别是在饮料罐行业（World Bank, 2022）。

近年来，有些矿物生产国再次考虑使用垄断的手段，但新的矿产垄断计划和建议并不符合建立商品垄断的标准（文本框 2.4）。

⁷ 许多非燃料矿物出口国受到了第一次石油危机的沉重打击。因此，这些国家认为有必要通过成立这样的生产商俱乐部来增加出口收入。



© mykhailo pavenko | shutterstock.com

表 2.5 上世纪 70 年代至 80 年代的金属生产商俱乐部

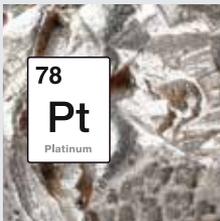
金属/协会	日期	成员	说明
铝矾土 国际铝矾土协会 (IBA) 	1974-1994	牙买加、圭亚那、苏里南、几内亚、塞拉利昂、南斯拉夫和澳大利亚为创始成员国。 阿尔及利亚、喀麦隆、加纳和马里为观察员国。	牙买加和苏里南提高了铝矾土税，预计其他国家也会跟进。最初，加勒比海地区的生产商还能够抬高价格，但由于其他生产商（特别是澳大利亚）拒绝参与，其便逐渐失去了市场份额。1994 年牙买加的正式退出标志着国际铝矾土协会的正式解散。
铜 铜出口国政府间委员会 (CIPEC) 	1967-1988	智利、秘鲁、扎伊尔和赞比亚为创始成员国。 南斯拉夫和印度尼西亚后来加入，澳大利亚和巴布亚新几内亚成为合作国。	由于铜需求的弹性相对较高，CIPEC 成员之间互不信任，以及委员会的市场份额有限（1975 年，CIPEC 仅控制了全球铜供应量的 37%），委员会无法通过减产来抬高价格。CIPEC 最终于 1988 年解散。
铁矿石 铁矿石出口国协会 (APEF) 	1975-1989	澳大利亚、阿尔及利亚、印度、利比里亚、毛里塔尼亚、秘鲁、瑞典和委内瑞拉。	APEF 试图制定出口价格，但却没有成功，因为澳大利亚和瑞典不愿意参与，巴西和加拿大这两个出口大国也置身于俱乐部之外。该协会在此后只能扮演收集市场趋势统计数据角色，直至 1989 年终止活动。
锡 锡生产国协会 (ATPC) 	1983-2001	澳大利亚、多民族玻利维亚国、印度尼西亚、马来西亚、尼日利亚、泰国和扎伊尔。	尽管在 20 世纪 80 年代中期国际锡协定最终失效后，有些锡生产商进行了干预并实施了出口配额，但在 20 世纪 90 年代初，锡价格便稳步下降，锡生产国协会于 2001 年正式解散。
钨 初级钨砂协会 (PTA) 	1975-1987	14 个成员，来自澳大利亚、多民族玻利维亚国、巴西、法国、秘鲁、葡萄牙、卢旺达、西班牙、瑞典、泰国和扎伊尔的政府和私营企业。	特惠贸易协定 (PTA) 的主要目的之一是防止美国以“毫无竞争力的价格”出售其战略储备中的过剩的钨。该协定还希望引入价格指数，以使钨的价格更为稳定和透明。然而，1987 年，在钨矿关闭的浪潮中，该协会也随之不复存在了。

来源：(Kooroshy 等人，2014；Radetzki 等人，2020；Gocht 等人，1988 年；Stewart，1981)。

文本框 2.4 铂、镍和锂市场形成垄断的前景

大多数新提议都很难以满足大宗商品成功垄断的所有条件。商品垄断要取得成功，就必须能够将那些在相关国家内拥有稳固矿产所有权和大量市场份额的主要生产商聚集在一起。必须存在很高的进入壁垒，以阻止新的生产商进入市场并与现有的生产商竞争。产品同质化是另一个重要因素，即不同生产商的商品标准化程度几乎相同。对于成功垄断商品的成员是否能有效协调生产和定价策略来说，这一属性特别重要。

需求弹性是影响商品垄断可行性的另一个关键因素。其指的是某种产品的需求随着价格高涨而变化的速度和程度。若某种产品具有很高的需求弹性，即消费者愿意在价格上涨时减少消费或迅速转向替代品，则商品垄断者对价格的控制就很有有限。相反，如果某种产品相对缺乏需求弹性，即消费者很少有或根本没有替代品，商品垄断者对价格的控制权可能就很大。



铂

俄罗斯联邦和南非在 2013 年 3 月的金砖国家（巴西、俄罗斯、印度、中国和南非）首脑会议上签署了一份关于铂族金属 (PGM) 的谅解备忘录。这两个国家共同占据了 PGM 的大部分份额（超过 80% 的全球铂供应量和超过 96% 的全球铂族金属储量），这阻碍了潜在竞争对手的进入（美国地质调查局和美国内政部，2022）。

然而，在实际操作中，建立 PGM 垄断存在着重大障碍，因为没有国家的国有公司能垄断 PGM 采矿。任何减产都需要诺里尔斯克镍业公司 (Norilsk Nickel)、英美铂金公司 (Anglo-American Platinum) 和安帕拉铂金公司 (Impala Platinum) 等几家私营公司的参与。此外，旨在抬高价格的减产可能导致劳动密集型的 PGM 行业出现失业，而该行业是南非雇佣员工最多的行业。⁸ 为了支撑价格而从生产商那里购买并储存铂金的替代方案可能会对政府财政造成压力 (Stoddard, 2013)。

最后，持续走高的价格可能会对需求产生不利影响，因为工业用户将努力减少、再利用或回收催化剂和其他应用中的 PGM (Kooroshy 等人，2014)。虽然俄罗斯联邦和南非在 2018 年重申了对 2013 年谅解备忘录的承诺，但此后并没有什么细节措施出台。



镍

世界最大的镍矿开采国印度尼西亚正在考虑针对镍、钴和锰等电池金属，创建一个类似于石油输出国组织 (OPEC) 的组织 (Dempsey 和 Ruehl, 2022)。虽然该国的镍产量几乎占全球产量的一半，其比例比 OPEC 国家的石油产量还要高，但要复制 OPEC 模式仍将遇到各种挑战。

⁸ 根据南非矿业委员会的数据，2022 年有 172,159 人直接受雇于 PGM 矿业，高于煤炭、黄金或任何其他矿业部门的就业人数 (www.mineralscouncil.org.za/downloads/send/18-facts-and-figures/1996-facts-and-figures-2022-pocketbook)。

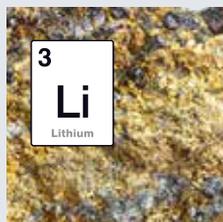
文本框 2.4 铂、镍和锂市场形成垄断的前景（续）

例如，澳大利亚、加拿大和菲律宾等主要镍生产国并不支持创建类似 OPEC 的组织的想法（Listiyorini 和 Harsono, 2022；Serapio Jr 和 Lopez, 2023）。而且，印度尼西亚境外存在的未开发储量也为供应多样化提供了机会。此外，控制印尼镍矿开采的是多家私营公司，而非单一国有实体。⁹ 因此，该国镍矿行业的国有化将面临财政和政治挑战，尤其是考虑到中国公司在其中的强势地位。

产品异质性可能是实现镍供应垄断的另一个障碍。镍矿存在于两种类型的矿床中：硫化物型矿和红土型矿。硫化物矿床主要分布在澳大利亚、加拿大和俄罗斯联邦，含有较高品位的镍，更容易加工成一级的电池级镍。印度尼西亚和菲律宾的红土镍矿床中的镍品位较低，需要额外的能源密集型加工才能转化为电池级镍（Paraskova, 2022）。低品位和高品位镍矿作为不完全替代品，在不同但相关的市场上竞争（Kooroshy 等人, 2014）。

与长期以来无可匹敌的运输燃料石油不同，镍的地位并没有那么高，有很多机会能转移对镍的需求。尽管富镍阴极电池在 2022 年占据了电动汽车市场 60% 的份额，但不需要镍的磷酸铁锂电池的份额也从 2019 年的 7% 增加到同年的 40%（BloombergNEF, 2022）。电池化学方面的创新（例如富锰阴极和回收利用）可以进一步减少对镍的需求。

锂



阿根廷、玻利维亚和智利正就创建“锂 OPEC”进行谈判。这三个国家合称为锂三角，拥有全球约 65% 的已知锂资源，占 2020 年全球锂产量的近 30%（Gielen 和 Lyons, 2022b）。然而，锂垄断的形成也面临着各种挑战。作为世界上第一大锂生产国和第二大锂储量国，澳大利亚不太可能会参与其中（Mares, 2022）。此外，许多国家通过不断勘探发现了大量未开发的锂储量和资源。而且，与铂矿和镍矿一样，大多数锂矿的开采都由私人控制，通常是由外国公司控制。

锂主要从卤水（主要在南美和中国）和硬岩矿石中开采，特别是分布更广的（澳大利亚、加拿大和其他地方）锂辉石。电动汽车电池使用从卤水中提取的碳酸锂（磷酸铁锂电池），或从硬岩矿石中提取的氢氧化锂（镍锰钴电池），或通过化学处理从碳酸锂中提取的氢氧化锂。澳大利亚生产商的优势在于该国的锂辉石矿更便宜，也更容易转化为电池制造商越来越青睐的氢氧化锂（Gielen 等人, 2022b；Mares, 2022）。最后，电池中的锂化合物可以替代，而锂的主要用途就是制造电池。钠和空气电池金属（包括锌）可以完全或部分替代锂，成为某些电动汽车的电池材料，但每一次变革都要在成本、性能和供应安全方面做出权衡（Blakemore 等人, 2022；IRENA, 即将出版）。

⁹ 例如，印度尼西亚五个最大的镍矿中有四个归私营外国公司所有，即淡水河谷（巴西）、青山控股集团（中国）和索尔维投资集团（瑞士）（www.mining-technology.com/marketdata/five-largest-nickel-mines-indonesia-2021/）。

5 政治不稳定性和社会动荡

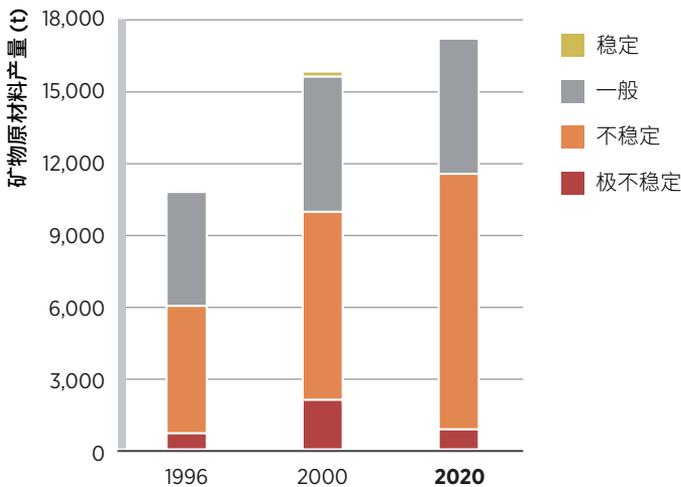
生产国的政治或社会动荡，包括政变、罢工和内战，可能会导致矿物供应中断。大多数矿物是在全球治理指标中被归类为极不稳定或不稳定的国家开采的，这些指标从六大方面衡量治理质量，包括无暴力行为、腐败控制和法治（见图 2.14）。

这种供应中断不稳定的例子数不胜数。例如，1978 年，安哥拉内战蔓延到扎伊尔的沙巴省（现为刚果民主共和国的加丹加省），对全球性钴短缺的恐慌导致钴价在两年内飙升了 7 倍（Gulley, 2022）。这场“钴危机”促使永磁体生产商将目光从钴转向稀土，这在某种程度上预示了 2010 年的“稀土危机”。

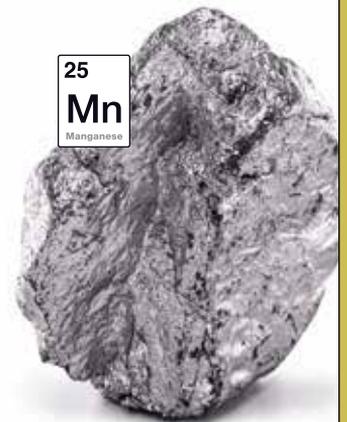
另一个例子是缅甸，2021 年 2 月缅甸发生政变后，国内采矿业爆发了抗议和罢工活动。作为主要稀土生产国，该国因上述不稳定性导致其矿产出口收入下降了 80%（Frontier, 2022）。还有一个例子是几内亚，该国是世界上最大的铝土矿生产国，2021 年国内发生的政治危机导致供应中断，给全球铝市场带来不确定性。

关键原材料供应也可能因罢工而中断。南非铂金行业的罢工严重扰乱了全球供应链，2014 年的一次大罢工持续了五个月之久，导致全球铂金产量下降 40%（Stoddard, 2014）。作为世界上最大的铜生产国，智利也曾因罢工而出现生产中断和供应短缺，其中 2017 年的一次大罢工持续了 44 天，导致全球铜产量大幅下降（Iturrieta, 2017）。在秘鲁，铜矿工人的罢工最近导致生产停工和延误，造成全球铜市场供应短缺和价格波动（Attwood, 2023）。这些罢工往往突出了工人对恶劣工作条件的合理关切（见第 3 章）。

图 2.14 2020 年矿物生产国的政治稳定性



来源：(World Mining Data, 2022)。



6 市场波动和操纵

像其他商品市场一样，关键原材料市场也会表现出周期性，呈现典型的“繁荣 - 萧条”模式。形成这种模式的部分原因是建立新矿需要较长的筹备时间，这就造成了供需缺口，尤其是在需求快速增长时期。对于新建的大型矿山来说，从资源勘探到实际生产通常需要 7 到 10 年的时间。这意味着技术进步引发资源需求的速度远远快于生产商增加供应的速度，而这种现象就会导致周期性价格飙升。

而且，关键矿物往往是开采其他基本金属的副产品，这一事实加剧了这种动态变化的复杂性。例如，钴通常是镍和铜矿开采的副产品，几乎所有铟都是锌矿开采的副产品，大多数稀土元素是铁矿开采的副产品。因此，这些稀有金属的生产会受到基本金属生产的强烈影响，而且往往会带来更多的收入。例如，对新建钴项目的投资往往更多地与铜市场动态相关，而非钴市场。换言之，钴价上涨并不一定会刺激铜矿商生产更多的钴。由于副产品生产的特殊性，钴、铟和碲等金属的供应反应会受到价格上涨的间接影响（Nassar 等人，2015）。

除了供需动态变化，矿产和金属市场也容易受到市场操纵，这很可能会加剧价格波动和供应链中断。在 2000 至 2010 年期间，反垄断官方机构至少揭露了 15 起采矿和初级金属企业企图组建国际私有垄断组织的案件，并进行了相应的处罚（Connor，2012）。

考虑到矿产市场规模很小且流动性相对较低，交易员有充足的机会来操纵市场，而这可能会限制供应并导致价格飙升（Hendrix 和 Bazilian，2022）。过去，企业企图操控市场和影响价格的情况数不胜数，这也引发了对企业操纵市场的担忧。例如，在 1985 年锡危机中，由于前所未有的价格飙升，一群企图垄断市场的交易员无法为其持有的大量锡找到买家，继而导致了锡市场崩溃（Anderson 和 Gilbert，1988）。同样，在 1996 年的住友铜事件中，住友商社的一名交易员大量买入铜期货合约，后来导致铜价大幅上涨。当该交易员的期货头寸遭到披露后，住友和其他市场参与者损失惨重，造成了市场崩盘（Kozinn，2000）。

时间较近的一个例子是，LME 于 2022 年 3 月暂停了镍交易，此前镍价在短短两天内飙升了 250% 以上。价格飙升的原因是轧空，押注镍价下跌的交易员被迫以更高的价格回购头寸，从而推升价格进一步上涨（Farchy 等人，2022；Oliver Wyman，2023）。镍市场在一年后仍然不稳定，交易量大幅下降，价格频繁出现不受控制的波动（Cang 和 Farchy，2023）。

这些事件促使金融监管机构和交易所展开调查，以加强市场监管、透明度和风险管理。例如，LME 引入了新的规则来防止轧空和其他形式的市场操纵。这包括对期货合约中的可交割镍量进行限制等规则。然而，这些举措在防止市场操纵方面的效果仍有待观察。

2.3 争夺关键原材料和潜在冲突

采矿和国际冲突

获得自然资源是许多国家战略利益的一个关键方面，并反映在其外交政策方针和行动之中。对关键原材料的需求一直是各国寻求领土扩张的主要动机。现在，全球对关键原材料的需求可能会导致竞争加剧，特别是在矿藏丰富的地区。这种趋势可能会在北极、外层空间和深海引发地缘政治紧张局势，因为各国都在争夺这些资源的开采权（Fox，2022）。

众所周知，北极拥有镍、锌和稀土等大量关键原材料（Boyd 等人，2016）。该地区的采矿活动并不罕见，目前已有几个成熟的矿山，如阿拉斯加的 Red Dog 锌矿和俄罗斯北极地区的 Polar Division 镍矿（Loginova 等人，2023）。新的矿藏正在被不断发现。2023 年 1 月，瑞典矿业公司 LKAB 宣布其发现了欧洲已知最大的稀土元素矿床。该地区的变暖速度是全球平均变暖速度的两倍，这导致北极海冰迅速融化，很多以前无法获得的资源都显露出来，继而引发了各国间的激烈竞争（IPCC，2021；Paul Taylor，2020）。¹⁰ 虽然该地区的军事存在有所增加，但大多数学者认为发生资源冲突的可能性较低（Tunsjø，2020）。尽管如此，该地区丰富的矿产资源仍使其具有重要的战略意义。

外层空间也正在成为争夺关键原材料的新领域。小行星和其他天体蕴藏着极其丰富的稀有金属，包括铂和黄金。这一因素刺激各国加大了对空间探索和采矿的投资，中国、俄罗斯联邦和美国等国家争相在该新兴产业中占据一席之地。例如，美国国家航空航天局（NASA）的 OSIRIS-REx 任务从小行星贝努收集了少量样本，并于 2023 年 9 月 24 日返回地球（NASA，2023）。然而，由于其成本效益、技术可行性、法律管理以及环境和安全影响等问题尚未解决，商业性太空采矿不可能得到迅速发展。

对矿产的争夺还可能引发大洋海底的地缘政治冲突，据估计，大洋海底蕴藏着地球上最大的矿藏。有些国家已经开始在其专属经济区或扩展大陆架内进行深海勘探。例如，挪威正计划开放一块面积接近于德国领土面积的海域，以进行深海采矿（Bryan 和 Milne，2023）。然而，这些地区经常在邻国之间重叠，进而引发了资源所有权和开采权的纠纷。国家管辖范围以外水域的深海采矿由《联合国海洋法公约》设立的国际海底管理局监管。然而，监管框架仍不完善，各成员国对如何推进监管持不同意见（见文本框 2.5）。

¹⁰ 北极的所有陆地、内水、领海和专属经济区均分别由八个北极沿海国家管辖：加拿大、丹麦、芬兰、冰岛、挪威、俄罗斯联邦、瑞典和美国。

文本框 2.5 规范深海采矿

越来越多的国家和公司对深海开采关键原材料（即从海底开采矿物资源）表现出兴趣。到目前为止，22 个国家和私营承包商共签订了 31 份采矿勘探合同，旨在寻找多金属结核、多金属硫化物和富钴结壳（图 2.15）（International Seabed Authority, 2023），因为这些物质中富含钴、铜和锰等高位矿石等贵金属。

深海采矿引起了各国对环境影响的担忧，包括海洋栖息地破坏和有毒化学品释放。深海生态系统对全球气候调节至关重要，是海洋食物网的重要组成部分（Environment Justice Foundation, 2023）。虽然深海采矿的一些支持者认为深海采矿比陆地采矿更环保，但另有人认为深海采矿不可持续，而且可能会造成不可逆转的环境损害（Levin 等人，2020）。暂停深海采矿的呼声此起彼伏。2021 年 9 月，国际自然保护联盟世界保护大会通过了一项呼吁暂停深海采矿的动议（第 122 号决议，IUCN, 2021）。

图 2.15 深海采矿所针对的三类矿床的地理分布



来源：(Miller 等人，2018)。

免责声明：本地图仅供说明之用。本地图上展示的边界和名称并不意味着 IRENA 的任何认可或接受。

文本框 2.5 规范深海采矿（续）

有几个国家还呼吁暂停或预防性暂停国际水域的深海采矿（Deep Sea Conservation Coalition, 2022）。欧盟委员会希望禁止深海采矿，直到“科学空白得到适当填补，采矿不再产生有害影响，海洋环境得到有效保护”（Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries, 2022）。

深海采矿由国际海底管理局 (ISA) 监管，该管理局是根据 1982 年《联合国海洋法公约》设立的政府间机构，由 167 个成员国和欧盟组成。ISA 拥有签发国际海底矿物勘探和开采合同的专属权利，但也需要确保海洋环境免受深海海底相关活动的潜在有害影响。虽然 ISA 已制定了很多规范矿物探矿和勘探活动的条例，但其仍在努力制定更为全面的采矿法，以此规范这些资源的商业规模开采。

2021 年 7 月，太平洋岛国瑙鲁启动了“两年规则”，给 ISA 两年时间来敲定深海采矿的规则和条例。这加快了 ISA 在瑙鲁划界案规定的最后期限（2023 年 7 月 9 日）前制定好采矿规则的速度，至此商业采矿申请有可能最早在 2023 年中期获得批准。



采矿和地方冲突

争夺矿产可能会以多种形式加剧或助长地方武装冲突。在治理薄弱和政治不稳定的国家，采矿可能会引起地方抗议、冲突和侵犯人权等事件（Church 和 Crawford, 2018）。钻石、黄金和木材等其他某些高价值资源也存在这种情况。事实上，据联合国环境规划署估计，在过去 60 年中，至少有 40% 的国内冲突与自然资源有关（UNEP, 2009）。

丰富的矿产资源可能会以多种形式助长冲突的发生（UNEP, 2009）。例如，矿产开采可能会在当地居民中引发利益和成本公平分配的冲突。矿业财富也可以用来支持地方冲突。在国家权力薄弱的地区，武装团体可通过开采绿色矿藏来获得活动资金，进而导致暴力和不稳定性加剧。这种情况在有冲突历史或存在种族或宗教紧张局势的地区尤甚。



例如，在哥伦比亚，哥伦比亚革命武装力量(FARC) 反叛军自1987年以来一直在从事叛乱活动。长期以来，他们通过在亚马逊丛林深处生产钨来为其部分活动提供资金。同样，据估刚果民主共和国内的反叛团伙也通过非法生产钨、锡、钽和黄金（也称为“3TG”）来获得大量利润。据估计，2011年全球约21%的钽供应来自冲突地区（Abraham，2017）。

与其他矿产资源相比，某些矿产资源卷入地方冲突的可能性较小。例如，铝矾土、锂和石墨等矿物只有在大规模工业开采时才有利可图。此外，铝矾土和石墨的价值重量比很低，对开采宝贵资源的非国家武装团体（如叛军和民兵）来说吸引力较小。此外，虽然手工采矿者开采了大量钴矿，但刚果民主共和国的小型钴矿尚未成为武装分子的目标，但围绕刚果东部手工开采黄金和其他冲突矿物的冲突仍然时有发生（Hendrix，2022）。



第 3 章

人类安全和地缘政治稳定性



重点内容

- **采矿业有时会对工人、原住民社区和环境造成伤害**，令人担心能源转型会加剧这些影响。
- **关键原材料的开采已经与土地流失、被迫迁徙和侵犯原住民社区人权联系在一起**。展望未来，考虑到 80% 的锂项目和一半以上的镍、铜和锌项目位于原住民领地内，采矿项目必须欢迎社区的积极参与。
- **全球采矿业的劳动条件一直很差，而且缺乏足够的社会保障和劳动法保护**。而工作条件危险、工资低和缺乏社会保障的手工和小规模采矿则进一步加剧了这些挑战。因此，公平和可持续的绿色经济转型需要应对这些挑战。
- **金属和采矿业的温室气体排放量占全球总量的 10%**，其中铝和钢铁行业的排放量最大。尽管可再生能源技术的矿物强度很高，但其温室气体排放量相对于化石燃料技术而言要少得多。增加对能源效率的投资和转向可再生能源电力可以减少采矿和加工过程中的排放。
- **采矿活动会对环境产生不利影响**，例如砍伐森林、土壤侵蚀和污染。要减轻这些影响，就需要实施强有力的环境管理措施，并采用可持续的采矿方法。
- **关键原材料开采会加剧水资源短缺**。例如，全球约一半的铜和锂生产集中在高度干旱地区。鼓励矿区节水的方式有很多，例如，增加水的再利用和再循环、使用淡化水，以及以负责任的方式确保排放水的水质。这些方式对减少给当地居民和生态系统带来的影响至关重要。
- 如果以负责任的方式进行管理，**能源转型可以增加获得低价可靠能源的机会、促进经济增长、改善社会和环境效益**，从而促进包容性和稳定性。对于确保以可持续的、基于权利的方式实现能源转型来说，国际合作发挥着重要作用，而且能惠及所有利益攸关方。
- **对于发展中国家来说，对关键原材料日益增长的需求会带来风险，但也可能会带来更大的回报**。对于尽可能确保能源成功转型来说，打击采掘业腐败和跨国避税极其重要。采掘业可以帮助发展中国家向价值链上游移动，吸引矿物加工等利润率较高的项目，并避免对初级矿石出口的依赖。

“人类安全”的概念有助于拓宽传统安全议程的思路，将气候变化、能源不安全、贫困、迁徙和污染等非传统威胁纳入其中，而这些威胁会直接或间接影响国家内部和国家之间的和平与稳定。因此，要了解与能源转型关键原材料开发相关的地缘政治风险，就必须全面了解相关的威胁和易受影响程度（表 3.1）。

表 3.1 与关键原材料相关的特定社会、环境和治理风险

风险领域		说明	解决方案
社会	原住民社区	采矿与土地流失、被迫迁徙和侵犯原住民社区人权有关。	在整个项目周期中促进社区积极主动地参与
	劳动条件	采矿业的劳动条件一直很差，而且缺乏足够的社会保障和劳动法。	实施严格的安全法规，确保工人获得公平的工资和社会保障
	手工和小规模采矿 (ASM)	ASM 会涉及到危险条件、童工、低工资和缺乏社会保障。	改善 ASM 监管，与手工和小规模采矿社区开展对话，并提供其他谋生机会
环境	气候变化	金属和采矿业的温室气体排放量占全球总量的 10%。	增加能源效率投资，转用更清洁的燃料和可再生能源，促进循环和回收利用
	生物多样性	采矿活动会通过森林砍伐、栖息地丧失和土壤侵蚀损害生物多样性。	通过可持续发展规划和资源管理，将生物多样性考虑纳入采矿实践
	废物和污染	如果管理不当，采矿废物会对当地环境和社区造成危害。	采取严格的废物减少、管理、回收和恢复方案
	水资源短缺	采矿和加工需要大量的水，并会带来污染风险。	鼓励节水、再利用和海水淡化，以负责任的方式进行排水
治理	腐败	腐败风险可能出现在采矿项目的许多阶段，包括许可证发放和税收。	改善透明度、问责制、公众参与和治理框架
	税收不足	避税和不完善的税收框架会导致东道国政府损失大量收入。	强化财政框架、行政能力和国际税收合作
	收入管理	矿产收入并不总能以最有效的方式分配，以支持经济增长和工业化。	将矿产租金直接用于工业转型和经济多样化



采掘业在过去曾导致人类安全问题（UNDP 等，2016），这难免令人担心能源转型矿物的开采可能会加剧这一趋势。在某些案例中，铜、锂、镍和钴等关键原材料的开采曾对工人、原住民社区和环境造成了严重伤害。因此，必须以负责任的态度开采和加工这些原材料，并充分考虑其对当地社区和环境的影响。

如果管理得当，能源转型可以改变游戏规则，促进包容性和稳定性。通过扩大获得低价可靠能源的机会，这种转型可以促进经济增长，减轻贫困，并提高社会和环境效益（IRENA，2023a）。扩大关键原材料供应链并使之多样化的需要也为改变传统采掘业提供了机会，同时也使矿产丰富的发展中国家有机会在本国创造价值。国际合作可以确保在可持续发展、人权和社会公正原则的指导下实现能源转型，从而使所有人都能受益。

本章讨论了与矿产开发有关的一些最突出的人类安全风险，包括这些风险对原住民社区、人权、劳动条件、气候变化、土地使用和水安全的影响。这些风险因关键原材料而异，会带来与特定矿物相关的环境和社会影响。例如，在刚果民主共和国开采的钴就涉及到严重的侵犯人权行为。镍生产（尤其是印度尼西亚和菲律宾储藏丰富的红土矿床上的镍生产）带来了有关排放和森林砍伐方面的巨大挑战。此外，在拉丁美洲，从卤水中提取锂引起了人们对水资源短缺的极大关注。



3.1 经济和社会矛盾

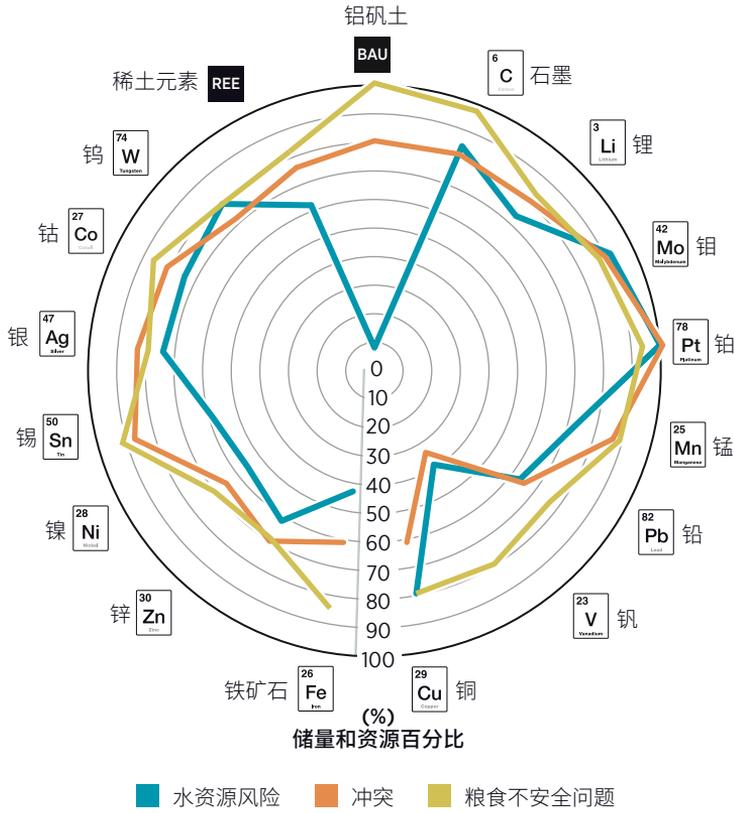
原住民社区和人权

采矿使原住民社区的居民流离失所，并可能导致其失去对生计和文化习俗至关重要的土地和自然资源。这些原住民在流离失所后无法再进入其传统领地，这很有可能破坏他们的文化习俗和社会结构，在某些案例中，还出现了整个社区被迫迁移的情况 (Ali, 2009)。

根据最近的一项调查，54% 的能源转型矿产位于或接近原住民的土地 (Owen 等人, 2022)。¹¹ 这一比例因矿物而异，超过 80% 的锂项目和超过一半的镍、铜和锌项目位于原住民的领地。此外，这些地区的采矿项目往往位于极易受到影响的环境中。超过三分之一的能源转型矿产项目位于原住民或农民土地或其附近，并会构成三种环境风险——水资源风险、冲突和粮食不安全 (图 3.1)。其中开采铂同时出现这三种风险的机率最高，其次是钼 (76%) 和石墨 (74%)。91% 的铂储量和资源位于原住民或农民土地或其附近，会构成上述三种环境风险。

¹¹ 注：该文章考虑了 30 种能源转型金属和矿物。

图 3.1 位于原住民或农村土地上或附近的重要矿产开采项目同时面临水资源风险、冲突和粮食不安全等情况



来源：(Owen 等人，2022)。



联合国大会于 2007 年通过的《联合国土著人民权利宣言》规定了保护和促进原住民权利的国际框架，其中包括原住民的自由权、事先知情权和同意权 (United Nations, 2007)。然而，尽管有这一框架，对能源转型至关重要的矿物开采仍然会面临侵犯人权的指控。

商业与人权研究中心是一个非政府组织，负责监测 103 家开采对能源转型十分重要的六种矿产的公司。根据该中心的数据，2010 至 2021 年间，共报告了 495 起侵犯人权的指控。这些指控包括未经原住民同意就在其土地上进行开发，亵渎圣地，使用暴力侵犯原住民妇女的风险攀升，以及对已经面临气候变化影响的社区的生存资源造成环境威胁 (Business & Human Rights Centre, 2022)。危地马拉原住民抗议 Fénix 镍矿的斗争说明了其中几个问题 (见文本框 3.1)。

文本框 3.1 原住民的权利和对危地马拉 Fénix 镍矿的抵制

危地马拉的 Fénix 镍矿 (由瑞士公司 Solway Investment Group 的子公司所有) 多年来一直处于社会斗争的中心。原住民运动领袖指责该矿对附近社区造成了严重的环境和社会影响。该公司因缺乏与原住民区和玛雅 Q'eqchi' 渔民协商以及不尊重其对土地和资源的权利而受到社会批评 (United Nations, 2011)。

该矿在 2014 年首次遭到抗议，当时当地社区指责该公司污染了附近的河流以及该国最大的湖泊伊萨瓦尔湖。尽管该公司否认了这些指控，但紧张局势仍持续加剧。局势最终在 2017 年升级，政府不得不派出警察和安全部队镇压抗议活动。很多人在冲突中受伤，还有一名抗议者丧生。这一事件引起了国际社会的关注，要求该公司对其行为负责的呼声此起彼伏 (Cuffe, 2022)。

2019 年，危地马拉政府暂停了 Fénix 镍矿的运营，理由是担心该公司不能遵守环境法规。该公司对这一决定提出质疑，这使矿场能在法律诉讼期间继续运营。2021 年，危地马拉最高法院裁定该矿场可以恢复运营，但当地社区和人权组织仍因担心该矿场会对环境和人权造成进一步损害而反对这一裁定 (Daniels, 2022)。Fénix 镍矿目前仍然存在争议，这更表明采矿业需要加强问责制并尊重原住民的权利。



矿物和金属开采在其他地方的原住民领地也造成了类似的情况。例如，在加拿大安大略省，关键矿产开采引起了人们对第一民族（加拿大原住民的统称）传统领地受到潜在影响的关注（Dufour, 2023）。另一个例子是在 2020 年，当时力拓 (Rio Tinto) 为了扩建铁矿而合法拆除了西澳大利亚皮尔巴拉地区朱坎峡谷的两个古老而神圣的洞穴，并因此受到了公众的强烈批评（Burton 和 Barrett, 2020）。

这些挑战突出表明，确保社区在采矿业的有效参与至关重要，这需要当地社区从最初的项目规划阶段就拥有公平的代表权和参与权，并确保在整个项目生命周期听取他们的意见，解决他们的所关心的问题。此外，矿业公司应确保当地社区和原住民能从采矿收入中受益，例如通过对当地基础设施和社区发展的投资。通过与当地社区积极建立信任并发展牢固的关系，矿业公司不仅能促进共同繁荣，还能与投资者和决策者建立坚实的信任基础（Energy Transitions Commission, 2023；ETC, 2023）。



劳动条件和就业

采矿业受到恶劣劳动条件和工作条件的困扰。很多矿产资源丰富的国家缺乏健全的社会保障和劳动法。这就导致了低工资的情况，并造成工作条件不符合标准。这种情况表明开采能源转型矿物可能会助长劳动力剥削和人权侵犯。

手工和小规模采矿 (ASM) 的普遍存在加剧了对劳动条件的威胁，这种行为通常并不正规，也不受监管，工人经常在危险的条件下工作，工资很低，而且没有基本的社会保障。ASM 常见于钴等矿物的开采，而且也与剥削性劳动力、童工、污染（及其相关的健康影响）和环境退化有关。公正和可持续的能源转型需要应对与 ASM 相关的挑战（见文本框 3.2）。

文本框 3.2 手工和小规模采矿

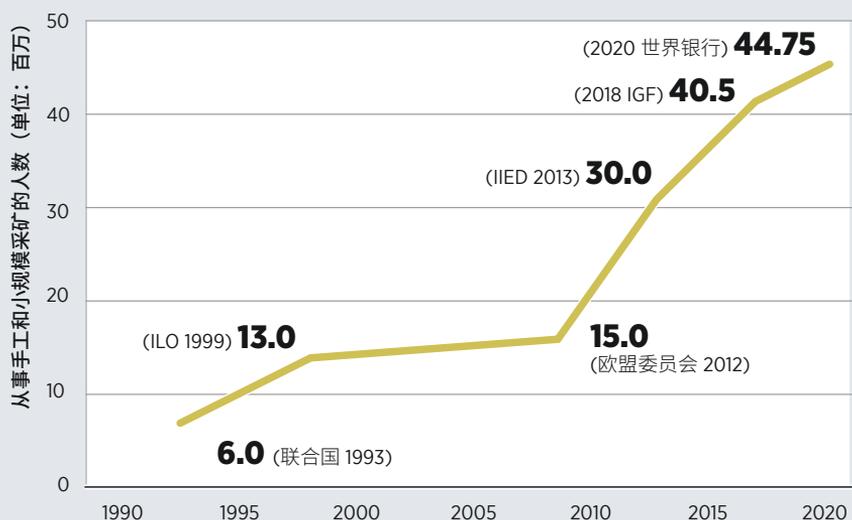
在世界范围内，有近 4,500 万人在 80 个国家直接从事手工和小规模采矿 (ASM)，¹² 另有 1.34 亿人间接参与支持该部门的行业 (World Bank, 2020a)。自 20 世纪 90 年代初以来，从事 ASM 的人数增加了 7 倍多 (图 3.2 和图 3.3)。

ASM 在过去二十年中的增长主要是由于其他谋生机会的减少，以及低碳和清洁能源技术导致的矿产需求增长 (Florence Bascom Geoscience Center, 2019 ; World Bank, 2020a)。例如，该部门生产全球 18%—30% 的钴，而钴是推动全球清洁能源转型的关键电池金属 (OECD, 2019)。通过 ASM 开采的其他与能源转型相关的矿物包括在缅甸开采的稀土元素，以及在秘鲁和刚果民主共和国开采的铜 (Awng, 2022 ; Bangkok Post, 2021)。

尽管 ASM 往往能减少贫困，增加国民收入，并有助于提高发展中国家的出口收入 (Hilson, 2002)，但这也面临着一些必须解决的挑战 (见下文)。

- **健康和安全问题**：ASM 的特点是缺乏对矿工职业健康和安全的重视。ASM 矿工暴露于身体和有毒危害，患传染病和癌症的风险更大，这使其成为最危险的职业之一 (Landrigan 等人, 2022)。
- **劳工和人权侵犯，包括童工**：ASM 行业并不正规且监管不足，这给其矿工带来了若干挑战，包括缺乏相关安全设备、机械故障 (Casey, 2019) 和日薪低 (Pattinson, 2021)。童工是这一低成本、低技术和劳动密集型行业面临的主要挑战。年仅十岁的儿童也在钴矿开采雇佣之列，日薪在 3.5 美元至 10 美元之间，从事各种危险而艰巨的任务，如地下挖掘、搬运沉重麻袋和在河中清洗开采出的钴 (Fleming, 2018)。

图 3.2 从事手工和小规模采矿的人数 (单位：百万)



来源：(DELVE, 2023)。

注：ASM = 手工和小规模采矿。

¹² 经济合作与发展组织将 ASM 定义为“以简单的勘探、开采、加工和运输形式为主的正规或非正规采矿作业”。ASM 通常需要的资本较少，但使用的技术需要大量劳动力。

继续下一页 ▶

文本框 3.2 手工和小规模采矿（续）

- **环境退化：**ASM 开采经常伴随着严重的环境退化。一般来说，如果采矿废水未经妥善处理就排放到环境中时，就会对水和土壤资源产生不利影响（Gyamfi 等人，2019）。除了加剧污染之外，ASM 活动还会导致森林砍伐，威胁当地生态系统和生态系统服务（Servir Global，2020）。
- **经济损失：**非法采矿和交易造成的税收损失仍然是 ASM 行业所面临的一个挑战（Noetstaller，1995）。此外，财政收入减少会限制政府履行监管职责的能力，并使不受监管的采矿行为得以持续（Tarras-Wahlberg，2002）。
- **武装冲突：**ASM 缺乏正规结构且地理范围广泛，可能会导致通过非官方渠道开采、交易和销售商品。这可能会导致犯罪或恐怖组织通过上述活动获得资金，进而增加国家内部冲突、暴力和恐怖主义升级的风险，也可能影响国家间的相互交流（Science for a Changing World，2022）。

近年来，一些国家的政府设法推行 ASM 改革，其中一些改革导致了矿工非法开采的意外后果。例如，在撒哈拉以南非洲，非正规小规模采矿业正规化导致获得所需许可证的程序非常繁琐，因此矿工们转而从事非法手工采矿活动（Mohammed Banchirigah，2006）。此外，手工采矿的正规化并非没有挑战，因为这需要立法变革、对手工和小规模采矿者的实践培训，以及对该行业的资本投资（Veiga 和 Marshall，2019）。因此，该行业需要一种自下而上的决策方法，为 ASM 活动营造有利的环境（Maconachie 和 Hilson，2011）。

图 3.3 从事手工和小规模采矿的人数最多的 10 个国家（单位：百万）



来源：(DELVE，2023)。

注：ASM = 手工和小规模采矿。



并非所有能源转型矿物的开采都与恶劣的劳动条件有关。在某些情况下，采矿作业可能通过提供急需的就业机会，使经济边缘化地区受益。例如，新矿山和加工设施的建设可能会给受去工业化或经济衰退影响的社区带来就业机会。2021年，美国能源部拨款1,900万美元，用于在依赖化石燃料的社区生产稀土元素和其他关键原材料，包括受到煤炭行业不景气而遭受重创的阿巴拉契亚地区（US DOE, 2021）。

向净零排放的转变给采矿业和相关社区带来了巨大挑战。尽管煤炭在产量和产值上都占据行业主导地位，但却无法掩盖其颓势。相比之下，对钴、锂和镍等能源转型矿物的需求可能会增长。虽然这些矿物可能不会完全取代煤炭收益，但却可以帮助矿业公司弥补损失，使其能够相应地调整投资组合和分配资本。然而，对于煤矿工人和社区来说，只有附近有原材料矿藏，转型才是可行的。



3.2 气候、土地和水安全

气候变化

能源转型是应对气候变化威胁的关键措施,而气候变化可能会成倍加剧对地缘政治稳定的威胁。与此同时,金属和采矿业温室气体排放量占全球总量的 10%,其中 7% 来自钢铁生产,2% 来自铝生产,其余来自其他金属的生产 (KU Leuven, 2022) ——包括采矿和关键原材料加工产生的排放量。¹⁵

对大多数金属来说,冶炼和精炼是温室气体排放的主要原因。因此,对于有冶炼厂和精炼厂的国家,电力供应结构是其总排放量的主要决定因素。今天,很大一部分矿物和金属是在中国等电网供电以煤炭为基础的国家精炼的。

不同矿物的排放规模差异很大。铝、钴、镍、硅和稀土元素每吨的能耗和温室气体排放量特别大。由于年生产量大,铝的年能耗和排放量最高。能源行业对铝的需求主要来自太阳能光伏发电 (87%) 和风能发电 (10%),而对钴、石墨、锂和镍生产的需求主要来自储能技术,特别是电池。

尽管可再生能源技术的矿物强度很高,但其温室气体排放量相对于化石燃料技术而言要少得多。矿物生产和清洁能源技术所产生的排放量是煤炭和天然气发电排放量的 6% (World Bank, 2020b)。例如,电池电动汽车在其整个生命周期中的总排放量远低于传统内燃机汽车,但却比后者需要使用更多的矿物 (IEA, 2021)。

通过增加能效投资和向清洁能源和低碳电力的转型,有可能进一步减少矿物开采和加工所产生的排放量。2022 年,加拿大矿业公司第一量子矿业公司 (First Quantum Minerals) 宣布计划为其在赞比亚的铜矿开采业务建设 430 兆瓦 (MW) 的太阳能和风能设施,其中涉及非洲最大的两个铜矿 (Hill 和 Mitimangi, 2022)。与此同时,矿业巨头英美资源集团 (Anglo American) 已成功签订可再生能源协议,以满足其智利铜矿业务 (2021 年起)、巴西铁矿石和镍业务以及秘鲁铜矿业务 (2022 年起) 的所有电力需求 (Anglo American, 2021)。该公司还在其位于南非东北部的 Mogalakwena 铂矿首次使用氢动力和电池动力混合式矿用运输卡车的原型样车,该卡车由一辆柴油动力卡车改装而来 (Anglo American, 2023)。

¹⁵ 本小节只关注采矿对排放的影响。

废弃物管理（再使用、再利用、再循环）也在减排中发挥作用。即便这种管理方法可能无法完全消除与采矿相关的排放，但也使其明显减少。例如，回收再生铝的碳足迹仅为原铝生产的 5%（European Aluminium, 2020）。¹⁴ 增加回收有助于向更可持续的能源系统转型，但仍困难重重，如确保矿物废料供应，以及为某些应用保持材料纯度。降低回收过程的排放强度也很重要（IRENA, 即将出版）。随着能源转型的推进和技术的淘汰，材料回收和再利用也将有助于减少价值链各个环节的排放。

土地使用、生物多样性和废物

采矿是一项普遍的活动，对地球表面带来广泛的影响。除了矿场本身，矿区还包括废物堆放场、水池和工业加工设施（Maus 等人，2020）。采矿活动可能对环境带来广泛的不利影响，并引发土地使用冲突。

在过去二十年里，金属采矿已经扩展到生物多样性生态系统之中（Luckeneder 等人，2021）。这直接或间接地导致了森林砍伐。在全球所有与采矿直接相关的森林砍伐中，煤炭和黄金开采占 71%（WWF, 2023）。采矿相关基础设施开发、定居点建设、定居点农业建设以及水和土壤污染造成了全球 7% 的间接毁林现象（Hund 和 Reed, 2019）。

采矿活动在广泛影响森林的同时，也可能影响其他生物多样性生态系统，如草原、湿地和水生栖息地，造成土壤侵蚀、土壤和水污染，以及濒危物种栖息地的丧失。采矿对环境造成的影响经常导致矿业公司与当地社区和保护团体之间因土地使用而发生冲突，在某些情况下还会导致法律纠纷或暴力事件。

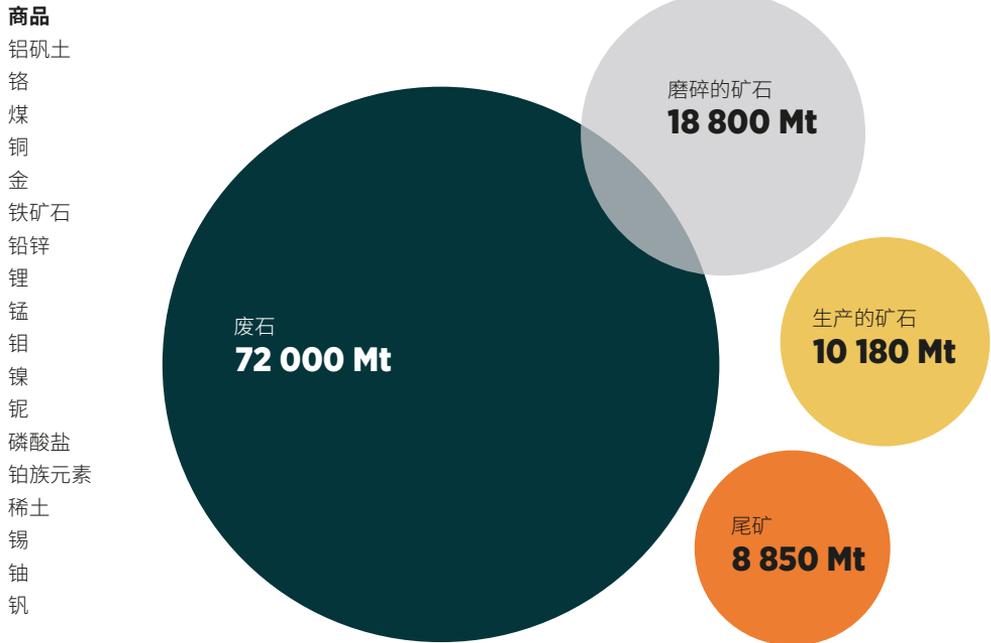
采矿产生的废物和污染也会危及土地使用安全。采矿业是全球产生废物最多的行业，废物的类型也很多，例如覆盖层（覆盖矿床的土壤或岩石）、废石（与矿石一起开采的材料）和尾矿（加工过程中产生的废物）。2016 年的一项研究预估表明，当年金属和矿物开采产生了超过 700 亿公吨的废石和超过 80 亿公吨的尾矿（图 3.4）。

矿石品位的下降已经增加了每单位矿物生产所产生的废物量（Mudd, 2010）。矿物和金属开采量的增加将进一步导致采矿废物的增加。每生产 1 公吨铜就会产生约 540 吨废石和 200 吨尾矿（Baker 等人，2020）。¹⁵ 从 2020 年到 2050 年，铜、镍、锰和锂的开采将产生近 1 亿吨的废物（Valenta 等人，2023）。

¹⁴ 该研究对欧洲原铝进口（每生产一吨原铝产生 10.6 吨 CO₂ 当量）和回收（每生产一吨原铝产生 0.5 吨 CO₂ 当量）进行了比较。

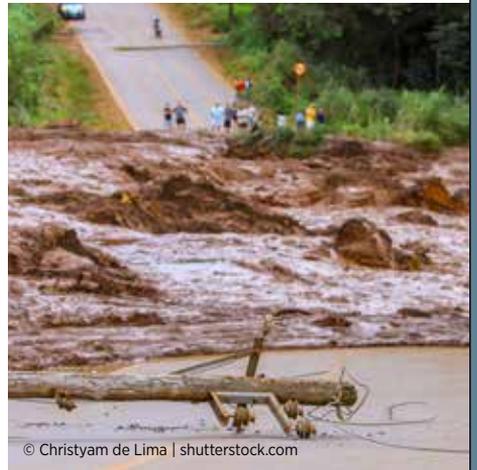
¹⁵ 根据图 5 计算得出（Baker 等人，2020）。

图 3.4 2016 年尾矿、废石和矿石的估计产量



来源：(Baker 等人，2020)。

覆盖层和废石可能存放在现场，也可能运输到指定的场外区域进行处理。相比之下，尾矿通常储存在由坝堤围成的池塘中。坝堤可能会破裂，造成大范围的生态破坏并威胁附近的社区 (Roche 等人，2017)。此外，尾矿中的有毒物质会危及环境和当地的野生动物。2019 年在巴西米纳斯吉拉斯州铁矿综合体发生的布鲁马迪尼奥大坝灾难就是一个例子，说明了此类事件可能造成的灾难性后果。溃坝导致约 1,000 万立方米的矿山废物外溢，270 人因此丧命，并对环境和当地社区造成巨大破坏 (Piciullo 等人，2022)。作为现场管理尾矿的解决方案，有些矿场将尾矿直接泵入附近的水体，如河流系统或海洋，继而造成大面积污染 (见文本框 3.3)。



© Christyam de Lima | shutterstock.com

文本框 3.3 有争议的尾矿填海法

很多国家禁止利用海洋处置尾矿，但包括印度尼西亚、挪威、巴布亚新几内亚和菲律宾等国在内的几个沿海矿区仍在使用这种技术。¹⁶

位于南太平洋的巴布亚新几内亚的 Ramu 镍钴矿将采矿废料直接倾倒入海洋。其精炼厂曾有多处管道泄漏而导致海水变成深红色，引起了当地对鱼类和其他海产品可能受到污染的担忧。作为回应，马当省政府于 2019 年 10 月实施了禁渔令，剥夺了当地居民的一个主要生计来源。2020 年，5,000 多名村民和当地政府对中资 Ramu 镍矿的经营者提起诉讼，要求其停止向海洋倾倒废物的做法 (Sanderson, 2022)。



这提起诉讼只是反对利用海洋处置尾矿的呼声日益高涨的一个例子。长期以来，环境和社区团体一直对海洋处置这种做法对海洋生态系统和人类健康的影响表示担忧。潜在的危害包括向海洋中释放有毒金属和化学物质，而这些物质可能会在海洋生物和人类食用的海产品中积聚。

这导致一些国家禁止或限制利用海洋处置尾矿，并制定了尾矿管理的国际标准，以保护人民和环境免受危害 (如国际采矿和金属理事会制定的标准)。鼓励采矿公司探索管理尾矿的替代方法，如尾矿干堆，即对废物进行过滤和干燥，以使材料更加稳定并便于在陆地上储存。

严格的废物管理政策可以减少关键原材料挖掘、运输和加工对当地带来的污染。应努力推动采用先进技术和最佳做法，优先考虑减少、再利用和回收废料，同时确保有潜在危害的副产品得到妥善处理 and 处置 (GlobalTailingsReview.org, 2020 ; ICMM, 2021, 2022a)。在实施废物管理方案的同时，还可以实施全面的复垦和恢复方案，将受干扰的矿区恢复到符合生态和社区福祉的状态。矿业公司可以对采矿后的土地恢复进行投资，包括植树造林和重建自然栖息地，以此积极促进生物多样性和生态系统服务的保护和恢复 (Prach 和 Tolvanen, 2016)。

¹⁶ 虽然印度尼西亚尚未禁止利用海洋处置尾矿，但其在 2021 年 2 月宣布，新的采矿项目若使用这种技术则无法获得许可。

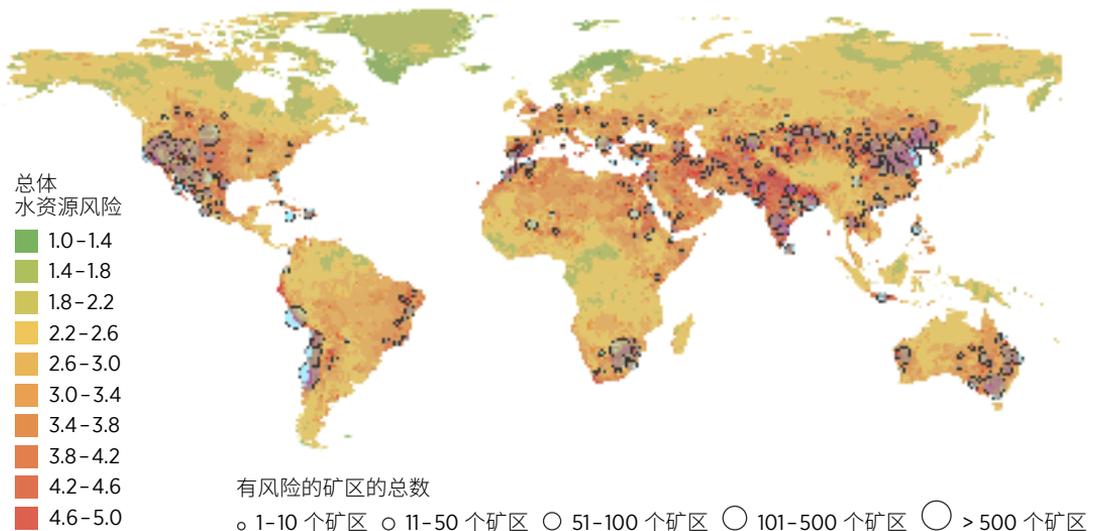
水资源短缺

关键原材料开采项目会加剧水资源短缺。例如，全球约有一半的铜和锂产量集中在水资源严重短缺的地区（Gielen 等人，2022b；IRENA，即将出版）。这包括“锂三角”，即阿根廷、玻利维亚和智利三国交界处的安第斯山脉锂资源丰富的地区（占全世界锂储量的 65%）。

在全球范围内，有七个水资源短缺的采矿热点地区：中亚、安第斯山脉地区、澳大利亚、中东、南部非洲，以及北美西部的一大片地区（图 3.5）。

矿石开采和加工需要大量的水，以用于汲取、处理、加热和冷却作业。虽然采矿活动使用的淡水总量仅占全球和各国用水量的一小部分，但仍会使水质下降，可用水量减少，严重影响当地淡水资源（Meißner，2021）。很多采矿活动（如将尾矿排入水道、酸性岩石排水和废石堆）也可能会污染地表和地下水体（AY 等人，2018）。随着矿石品位不断下降，生产一吨金属就需要更多的水。这可能会进一步加剧当地供水压力，并使已经面临水资源严重短缺的地区面临更大的水资源风险。气候变化预计会加剧水资源短缺，对采矿业构成重大挑战（Northey 等人，2017）。

图 3.5 大多数采矿点面临很高的水资源风险



来源：(Laporte-Bisquit 和 Morgan，2019)。

注：世界自然基金会的水资源风险评估框架考虑了三类流域和运营水资源风险：物理风险、监管风险和声誉风险。有关该方法的更多信息，请访问：<https://riskfilter.org/water/explore/data-and-methods>。

免责声明：本地图仅供说明之用。本地图上展示的边界和名称并不意味着 IRENA 的任何认可或接受。

文本框 3.4 智利阿塔卡马沙漠的水安全、锂开采和原住民

锂可以从硬岩矿石中开采，也可以通过蒸发从大陆卤水中提取，但蒸发过程需要大量的水。卤水蒸发技术的社会环境影响在智利的阿塔卡马盐沼最为明显，这里是世界上最大的卤水提锂生产基地。

在蒸发技术中，将卤水（含锂的盐水）从地下储层泵入大型露天池塘，然后通过日晒蒸发将锂分离出来，这个过程可能需要几个月。在蒸发过程中，卤水中 90% 的原始水含量将消耗殆尽（Vera 等人，2023）。水文学家愈发担心采矿活动可能会严重影响重要的生态系统，剥夺原住民社区的基本水源，加剧沙漠的干旱状况（Pearce，2022）。

这些担忧和其他问题导致越来越多的人呼吁水资源公正，并抗议采矿作业（Jerez 等人，2021）。当地居民（包括 Kolla、Atacameño、Lickanantay 和 Aymara 等原住民社区的居民）使用法律诉讼、路障和示威等各种方法，抗议采矿作业对其生计和水安全带来的威胁（Lunde Seefeldt，2022）。



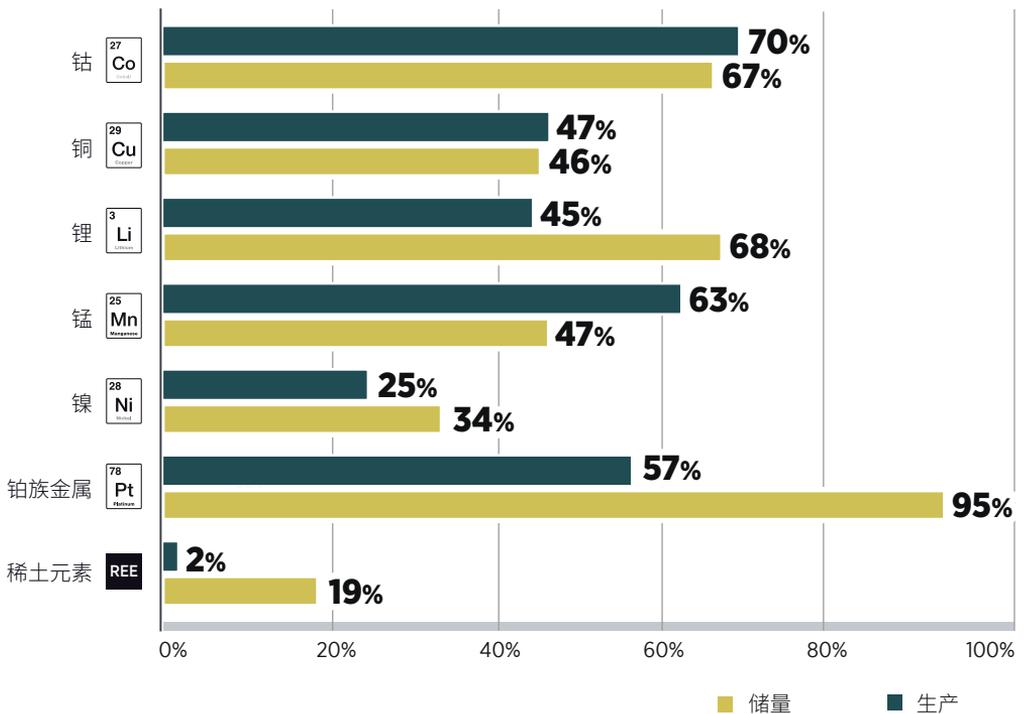
要尽可能地减少采矿对当地居民和生态系统用水的影响，就需要鼓励矿区节水，增加水的再利用和循环，使用淡化水，并以负责任的方式确保排放水的水质（Energy Transitions Commission，2023；ICMM，2014）。

3.3 新的发展道路

采矿与发展中国家

关键能源转型金属的全球生产主要集中在发展中国家（World Mining Data, 2022），但其中一些国家在全球产量中所占份额远低于储量（图 3.6）。例如，几内亚在全球铝矾土（铝生产的关键金属）开采量中所占份额仅为 6.5%，而其储量却占全球储量的 63%。多民族玻利维亚国拥有 2,100 万吨锂资源，比其他任何国家都多，但其在 2021 的产量却不到全球供应量的 1%。一个关键问题是，许多发展中地区仍然开发不足，缺乏基本的地质测绘。这对矿业公司构成了商业风险（African Minerals Development Centre, 2018）。

图 3.6 2017 年发展中国家（不包括中国）在全球矿产量和储量中的份额

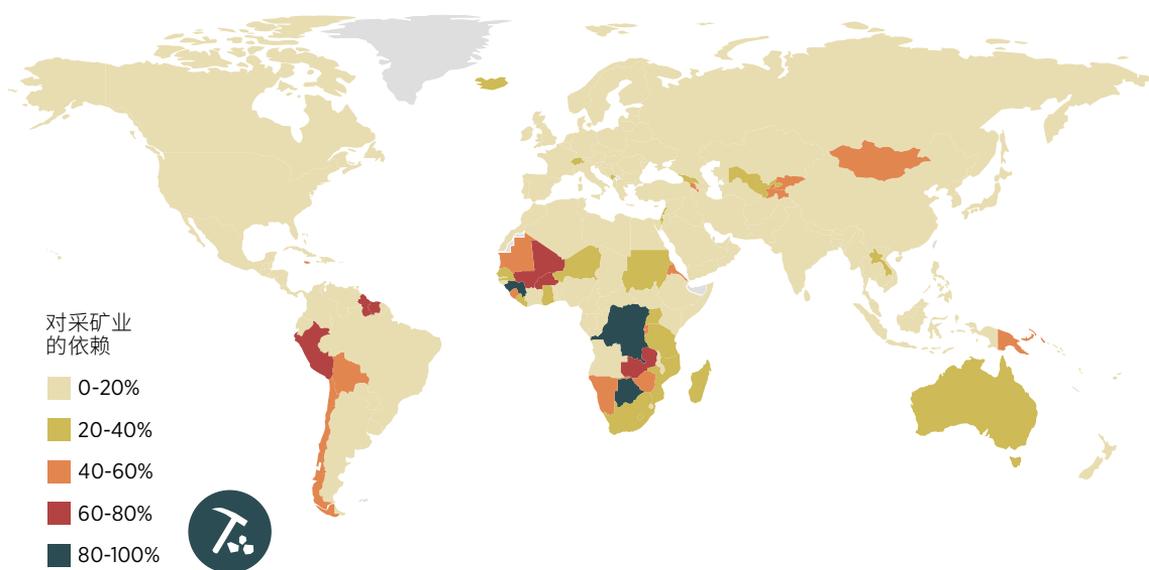


来源：(World Bank, 2017)。

注：发展中国家包括中低收入国家，但不包括中国。PGM = 铂族金属。

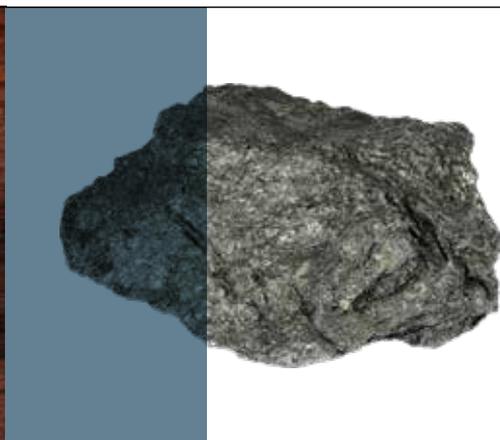
虽然基本金属在全球经济活动中可能不如石油重要，但在约三分之一的新兴市场和发展中经济体的经济活动中却非常重要（World Bank, 2021），其中有些经济体严重依赖于采矿出口收入。例如，博茨瓦纳、刚果民主共和国和几内亚有 80% 以上的出口收入来自采矿业（见图 3.7）。

图 3.7 2018-2019 年矿物出口依存度



来源：(UNCTAD, 2019)。

免责声明：本地图仅供说明之用。本地图上展示的边界和名称并不意味着 IRENA 的任何认可或接受。



打破资源诅咒

发展中国家往往难以从其宝贵的矿产资源中充分获益，这种现象被称为“资源诅咒”。这一术语指的是一种矛盾的状况，即自然资源丰富的国家往往比资源有限的国家经济增长更为缓慢，贫困水平更高，治理水平也更弱。这通常是由于过度依赖单一经济成分、寻租方式和腐败等因素造成的。

随着矿产需求的不断增长，亟待应对这些风险，这对于稳定和可持续的供应来说至关重要。矿产供应链中的腐败就是这样一种风险（National Resource Governance Institute, 2022）。采掘价值链中的任一环节都可能存在腐败，包括勘探和开采许可证的发放，以及特许权使用费、其他费用和税金的收取（OECD, 2016）。在授予采矿权方面的腐败风险特别高，矿业公司急于获得许可证，而官员可能因此面临压力，为了加快审批速度，不得不在环境和社会影响评估以及一般尽职调查方面做出妥协（Clark, 2023）。

另一个挑战在于转型矿物价值链中不透明的税收结构，因为这种结构给政府带来了巨大的收入损失（Sturman 等人, 2022）。随着跨国企业将利润转移到税率较低的司法管辖区，税基侵蚀和利润转移也给治理带来了挑战。这一问题在能源转型的矿产行业中尤其普遍，因为在该行业，一体化的业务结构和全球伙伴关系控制着价值链。生产前做出的不公平定价安排可能会给东道国政府带来巨大的收入损失。研究表明，仅在撒哈拉以南的非洲国家，跨国企业避税就导致采矿业每年损失约 6 亿美元的企业所得税（Albertin, Giorgia 等人, 2021）。

要解决腐败和逃税问题，就需要强调精心设计的政策和制度对于将矿产收入有效投资于社会经济发展的重要性。对历史事件的洞察为各国如何避免资源诅咒、实现矿产资源利益最大化提供了宝贵经验。过去的经验表明，可以通过经济多样化、促进本地内容发展、基础设施和人力资本投资、加强包容性治理结构来减轻矿物依赖带来的负面影响（The African Climate Foundation, 2022）。成功的案例可以为各国提供在促进工业发展和经济多样化方面的经验教训。





地缘经济机遇

预计能源转型和数字化会导致矿产资源需求激增，这为吸引新的投资流提供了机会。如果妥善管理，这些新的资源收入就可以带来长期的经济繁荣、新型绿色就业和可持续的地方发展。

一个关键问题是，能源转型能否使发展中国家和新兴国家向价值链上游移动，在增加初级矿石出口的同时吸引利润更高的活动。与未精炼的矿石相比，加工后的原材料价格优势明显，有可能改善贸易平衡，降低基础设施和工业项目的投入成本，促进当地经济发展（Hendrix，2022）。

虽然很多电池矿物在非洲、亚洲和拉丁美洲的发展中国家开采，但实际的增值作业（如冶炼、精炼、电池组装以及最终的电动汽车生产）往往在其他地方进行。如图 3.8 所示，镍、锂和钴开采在电动汽车总价值链中所占的份额只有 0.6%（如果包括金属冶炼和精炼，则为 1.1%）。

从政治角度和经济角度看，向价值链上游攀登都很具有吸引力，但对许多发展中国家来说却充满挑战，因为这些国家通常缺乏必要的基础设施、技术专长和其他生产要素，如熟练的劳动力和低价电力。若缺乏对这些国家国内扩张加工和精炼能力的监管，就可能会扩大采购电动汽车和其他重要能源转型技术所用原材料对环境和社会的影响（Jones 等人，2023）。



图 3.8 到 2025 年电池矿物和电动汽车价值链的估计价值（美元）



改编自：(UNECA 和 Diene 等人，2022；UNECA，2021)。

第 4 章

降低风险和开拓新机遇的战略

vulnerable

developing

minerals

regulation

trade-off

development

sustainability

security

risks

recycling

stockpiling

benefits

3 Li Lithium	6 C Carbon	25 Mn Manganese	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel
29 Cu Copper	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum		
60 Nd Neodymium	66 Dy Dysprosium			

重点内容

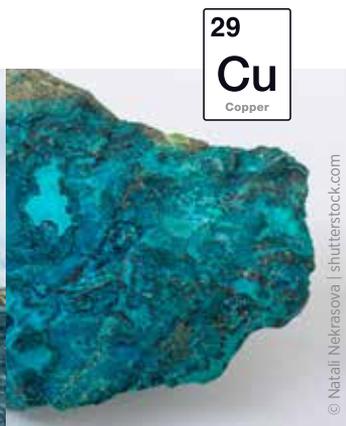
- **很多国家正在制定战略，以改善关键原材料供应链的脆弱性。**这些战略旨在确保原材料供应，促进国内生产，减少对任何单一供应商或地区的依赖。
- **有些努力通常会带来有益的结果，**包括制定国家关键原材料战略、定期评估矿物关键性，以及促进外交联盟和伙伴关系。
- **另外一些工作则可能涉及权衡利弊或降低风险。**例如，许多国家的目标是实现关键原材料供应链的本地化。欧盟的目标是到 2030 年实现 10% 的国内矿产开采和 40% 的本地加工，而《美国通胀削减法案》则鼓励国内采购，并与电动汽车用矿物供应商建立友好关系。实现这些目标需要对经济、环境和社会因素进行平衡。
- **需要慎重考虑材料的战略储备，**以防止市场紧缩和价格上涨，进而减缓全球向清洁能源转型的速度。囤积也可能阻碍供应链多样化和当地价值创造，因为并非所有国家都能保持大量储备。
- **在加快节约使用、再利用和回收材料的同时，**设法加强供应链的稳健性，通过提高能效、节约能源和改变消费者行为来减轻供应链的压力。然而，回收利用只有在中长期内才有希望实现，因为在二次供应大量出现之前，需要大量的库存周转。
- **发展中国家正在采取各种措施，以最大限度地从矿产资源中获益。**特别是出口限制，作为吸引加工和其他下游产业的手段，越来越受到重视，但这些措施并不能保证成功。各国可以通过区域合作更多地从矿产中获益。
- **虽然已经制定了若干倡议和监管框架来尽快推进负责任、可持续和透明的矿产供应链，**但即使在已制定供应链尽职调查、审计和认证标准的地方，也很难强制执行这些规则。大多数相关倡议都是自愿性的，标准需要与验证机制和过程相配套。

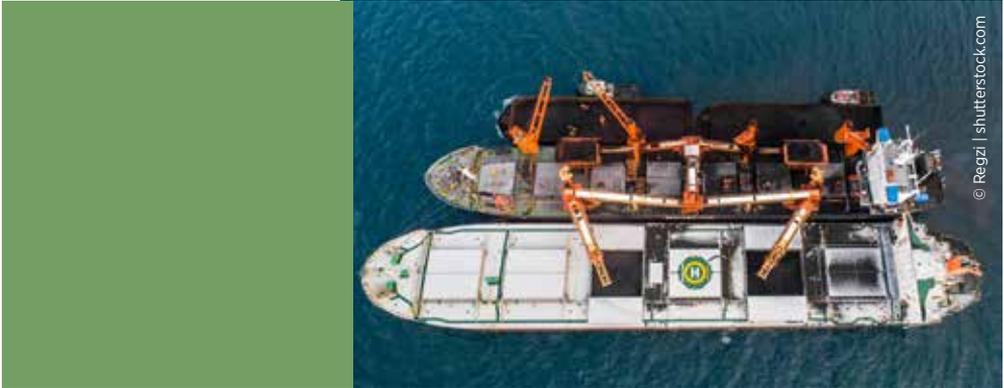


本章全面概述了全球公共和私营实体为确保可靠、公平的关键原材料供应而提出的倡议（表 4.1），旨在通过研究每种策略的优势和局限性，为决策者、行业利益攸关方和其他关键参与者提供见解。

表 4.1 确保关键原材料可靠和公平供应的战略

风险领域	国内措施	外部措施
确保关键原材料供应	<ul style="list-style-type: none"> ■ 国家关键原材料评估和战略 ■ 支持回岸、近岸和友岸的政策 ■ 减少使用、再利用和回收利用政策 ■ 战略储备 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 国际贸易与投资协定 ■ 监管合作（例如，在标准方面） ■ 海外矿业投资出口信贷 ■ 联合采购（买家俱乐部）
增加矿产资源丰富国家的国内利益	<ul style="list-style-type: none"> ■ 税收和特许权使用费重新谈判 ■ 创建国有资源公司 ■ 征用/国有化 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 出口限制和税收 ■ 国内加工要求 ■ 外国投资筛选 ■ 矿产价值链方面的区域合作





4.1 减少供应链漏洞

关键原材料的开采和加工集中在少数几个国家，这引起了人们对全球供应链可靠性的担忧，促使政府和利益攸关方制定战略来降低供应链脆弱性。这些战略旨在确保关键矿物和原材料供应，促进国内生产，减少对任何单一供应商或地区的依赖。

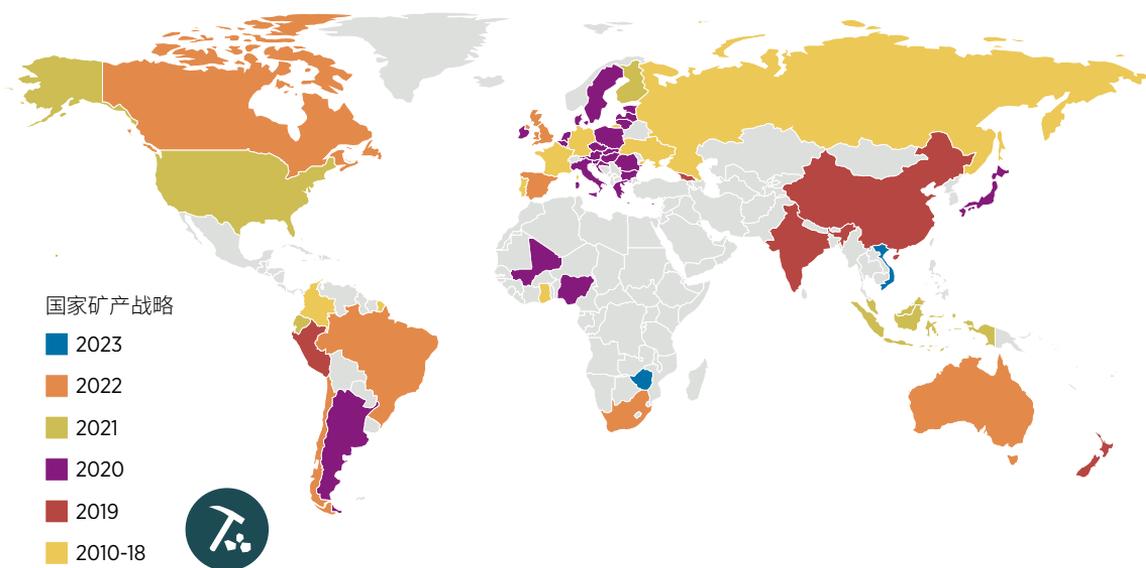
本节将探讨五种主要方法：

- 制定关键矿产战略
- 供应链的本地化和重新设计
- 关键原材料外交策略
- 战略储备
- 节约使用、再利用和回收利用。

关键矿产战略

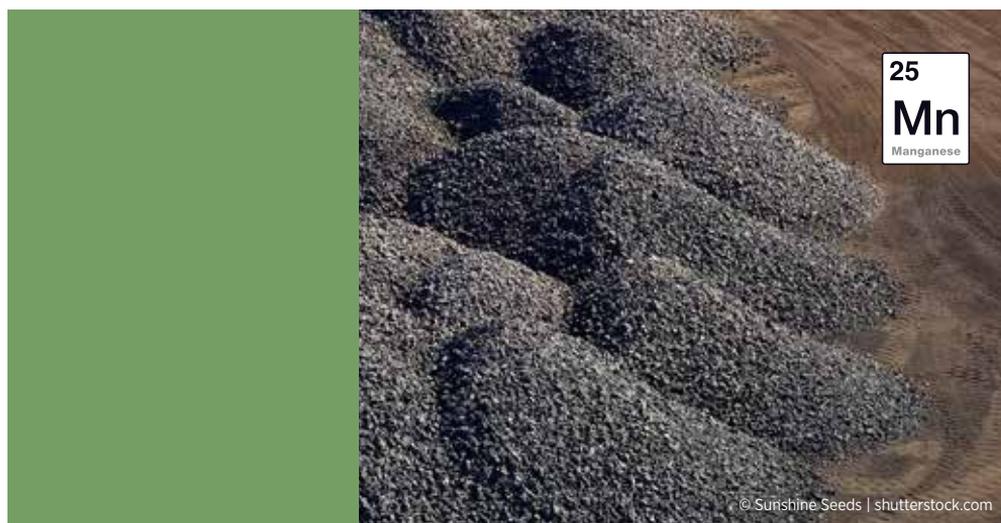
越来越多的国家认识到矿产供应链的战略重要性，并开始编制或更新国家关键原材料战略（文本框 4.1 和图 4.1）。对于依赖此类原材料进口的国家，主要目标是预判和抵消潜在的供应风险，而矿产丰富的国家则寻求提高其采矿业的竞争力并吸引投资。

图 4.1 2010-2023 年已发布国家矿产战略的国家



注：本地图展示的是国家关键原材料战略、愿景和政策文件。采矿法规或具体条例未予展示。

免责声明：本地图仅供说明之用。本地图上展示的边界和名称并不意味着 IRENA 的任何认可或接受。



文本框 4.1 最近更新或颁布的关键原材料战略

 **澳大利亚：**该国于 2019 年首次通过了一项关键矿产战略，并于 2022 年进行了修订。该战略的核心目标是在 2030 年前将澳大利亚打造成“全球关键矿产大国”，将高纯度氧化铝和硅纳入扩展的关键原材料清单中，进一步认可这些材料在锂离子电池和半导体等技术领域的重要性。该战略旨在通过繁荣矿产行业促进地区就业和发展，并帮助澳大利亚转向下游加工，生产附加值更高的产品。¹⁷

 **巴西：**2021 年，巴西推出了国家战略性支持矿产政策（Ministry of Mines and Energy, 2021），旨在优先考虑环境许可程序并实施对该国发展具有战略意义的采矿项目。巴西还设立了一个战略矿产项目分析部际委员会，并由其确定了 14 种战略矿产的清单（CTAPME 第 2/2021 号决议），包括锂、钴、镍、石墨和稀土元素。2022 年，巴西总统签署了一项法令，要求制定国家矿产政策并成立矿产政策全国委员会（第 11.108 号法令）。

 **欧盟：**2023 年，欧盟委员会在 2008 年《原材料倡议》和 2020 年《关键原材料行动计划》的基础上，提出了《关键原材料法案》。该法案规定了四个目标：(1) 加强欧盟在战略原材料价值链中所有环节的能力，包括精炼、加工和回收；(2) 实现外部供应多样化；(3) 加强欧盟监测和减轻供应风险的能力；(4) 提高欧盟消费关键原材料的循环性和可持续性。关于第一个目标，该法案设定了 2030 年战略原材料的主要目标：

- 至少 10% 在欧盟境内开采
- 至少 40% 在欧盟境内加工
- 至少 15% 在欧盟境内回收利用
- 欧盟在任何相关加工环节对来自单一第三国的每种战略原材料的年消费量不超过 65%。

该法案还提出了一个框架，用于选择和实施欧盟内外的战略项目，使这些项目从更快的许可速度和额外的资金支持中受益。欧盟设立了一个欧洲关键原材料委员会，为欧盟委员会和成员国提供咨询意见，而且还建立了一个与第三国讨论战略伙伴关系的框架。欧盟委员会将收集公共或私人实体在欧盟成员国持有的战略储备的信息。该机构还将建立一个从第三国联合购买关键原材料的系统。

继续下一页 ▶

¹⁷ www.industry.gov.au/data-and-publications/2022-critical-minerals-strategy。

文本框 4.1 最近更新或颁布的关键原材料战略（续）

 **印度**：2019 年，印度颁布了《国家矿产政策》，旨在促进国内工业发展，减少进口依赖，并为“印度制造”倡议提供支持。该国强调了环境可持续性采矿方法、利益攸关方参与和矿产财富公平分配的必要性。该政策优先支持在国内勘探对能源业至关重要或具有战略意义的矿产（Ministry of Mines, 2019）。然而，印度目前还没有制定正式的能源转型关键 / 战略材料清单。

 **日本**：2020 年 3 月，日本通过了一项新的国际资源战略，其中涉及石油和液化天然气等能源资源，并强调了储备稀有金属的重要性。日本国家石油天然气和金属公司是日本国有企业，其任务是为海外矿产开发提供贷款和其他支持，包括勘探、采矿和冶炼。日本政府通过该企业寻求加强与供应链各环节相关国家的合作（Agency for Natural Resources and Energy, 2020）。



 **南非**：2022 年 4 月，南非政府发布了采矿业勘探战略和实施计划，¹⁸ 旨在根据环境、社会和企业治理原则，吸引外国投资勘探，加快新的矿产发掘，并促进负责任地使用该国的矿产资源。其目标是在未来三到五年内将超过 5% 的全球支出用于勘探，并简化各许可部门的监管要求，以缩短处理勘探权的周转时间。南非还提供了一份对向绿色经济转型至关重要的重点关键矿物和金属清单。

继续下一页 ▶

¹⁸ 有关南非采矿业勘探战略的信息（2022 年 4 月 14 日），可访问：<https://cer.org.za/wp-content/uploads/2022/04/DMRE-Exploration-Strategy-for-the-Mining-Industry-of-South-Africa-14-April-2022.pdf>。南非勘探战略：有关 2022 实施计划的信息（2022 年 4 月 14 日），可访问：<https://cer.org.za/wp-content/uploads/2022/04/Exploration-Strategy-of-South-Africa-Exploration-Implementation-Plan-2022.pdf>。

文本框 4.1 最近更新或颁布的关键原材料战略（续）

 **英国：**2022 年 7 月，英国政府颁布了该国的《关键矿产战略》，其核心目标是通过通过对关键矿产的“加速 - 合作 - 强化方法”降低风险，提高关键矿产供应链的韧性：加快国内能力建设（在采矿、培训回收方面）、开展国际合作（主要是促进供应多样化）和强化国际市场（包括提高市场透明度和责任的供应链）。2023 年 3 月，英国政府发布了最新交付情况，回顾了进展情况，并提出了近期的发展目标。其中一个目标是成立独立的英国工业关键矿产韧性任务完成小组，该小组将于 2023 年底提交一份报告。¹⁹

 **美国：**美国长期以来一直以战略的眼光处理关键原材料，²⁰ 并在近年来颁布了多项行政命令以提供指导。2017 年，特朗普总统发布了一项命令，责成美国商务部制定一项关于关键原材料的联邦战略（Executive Office of the President, 2017），该战略后来于 2019 年 6 月发布。该战略的六项行动呼吁包括加快国内关键矿产资源开发，以及建设强大的下游制造能力（US Department of Commerce, 2019）。在 2020 年的另一项行政命令中，特朗普认定美国对外国竞争对手关键矿产的依赖构成了“非同寻常的威胁”，并宣布国家进入紧急状态以应对这一威胁（White House, 2020）。美国能源部当时计划制定一项战略，以确保关键矿物的安全可靠供应，并于 2021 年发布了该战略（US Department of Energy, 2021）。该战略依赖于三个关键支柱：供应多样化、开发替代品、加强再利用和回收循环。2021 年，拜登政府发布了第 14017 号行政命令，概述了安全供应链的重要性，并授权进行为期 100 天的跨部门审查（White House, 2021）。在发布这些行政命令的同时，立法部门通过了相关法律，如《美国矿产安全法》（2020）和《基础设施投资和就业法》（2021）。此外还为关键矿产开采加工和研究活动划拨了联邦资金。文本框 4.2 讨论了 2022 年的《美国通胀削减法案》。



¹⁹ www.gov.uk/government/publications/uk-critical-mineral-strategy/critical-minerals-refresh-delivering-resilience-in-a-changing-global-environment-published-13-march-2023.

²⁰ 例如，美国能源部 (DOE) 在 2010 年发布了一项关键矿产战略（2011 年进行了更新）。

作为国家关键矿产战略的一部分，各国正在根据其工业需求和对供应风险的战略评估来编制关键矿物清单。矿物关键性的评估因国家而异（见表 4.2）。例如，只有 9 种材料出现在美国、欧盟和中国的关键原材料清单上，包括钴、锂、石墨和稀土。铜和铂族元素仅出现在两个清单上。

表 4.2 2023 年中国、欧盟和美国关键矿物清单对比

	重叠				独有		
	 美国	 欧盟	 中国		 美国	 欧盟	 中国
铝/铝矾土	●	●	●	铯	●		
锑	●	●	●	铬	●		
钴	●	●	●	铟	●		
萤石	●	●	●	铷	●		
石墨/天然石墨	●	●	●	钪	●		
锂	●	●	●	碲	●		
镍	●	●	●	锌	●		
稀土金属	●	●	●	硼/硼酸盐		●	
钨	●	●	●	炼焦煤		●	
砷	●	●		长石		●	
重晶石	●	●		镓		●	
铍	●	●		氩		●	
铋	●	●		磷钙土		●	
锆	●	●		钪		●	
铈	●	●		硅		●	
铪	●	●		锶		●	
镁	●	●		金			●
锰	●	●		铁矿石			●
铌	●	●		钼			●
铂族金属	●	●		碳酸钾			●
钽	●	●		铀			●
钛	●	●					
钒	●	●					
锡	●		●				
锗	●		●				
铜		●	●				
磷		●	●				



关键原材料清单是动态变化的，需要随着情况的变化而更新。例如，欧盟在 2011 年发布的第一份清单中只有 14 种原材料。该清单此后更新过四次，2023 年的版本确定了 34 种关键原材料。

供应链的本地化和重新设计

最近的供应链中断促使许多国家和地区追求供应链本地化，以加强战略自主权并减少对潜在竞争对手的依赖。更具体地说，各国政府正在制定政策，鼓励战略性产业迁回本国（回岸）、在邻近地区（近岸）或值得信赖的盟国（友岸）重新运营或建立新的业务。这些工作还包括建立关键和战略性矿产供应链。

美国和欧盟最近列出了国内矿产采购的最低门槛。欧盟提出，到 2030 年，将有至少 10% 的矿物开采和 40% 的加工在本地进行。2022 年 8 月签署并生效的《美国通胀削减法案》为关键矿物生产提供税收减免，并规定电动汽车电池中使用的关键矿物的国内采购或友岸外包是获得补贴的条件（见文本框 4.2）。

文本框 4.2 通胀削减法案和关键矿物

以下是通胀削减法案 (IRA) 中关于矿产的主要条款：

- 开采关键金属的矿业公司所开采的矿物若能达到规定的纯度阈值，则可获得相当于生产成本 10% 的生产补贴。
- IRA 还为电动汽车电池的关键矿物含量设定了目标。在 2023 年（该计划的第一年），若使电动汽车有资格获得税收抵免，其电池中 40% 的关键原材料必须来自美国国内、当地的自由贸易伙伴，²¹ 或来自北美的回收材料。²² 到 2027 年及以后，这一比例将逐渐增加到 80%（US Government Publishing Office, 2022）。
- IRA 进一步规定，电动汽车的电池若含有来自所谓“外国敏感实体”的“任何”关键矿物，则没有资格获得税收抵免。

²¹ 美国目前与 20 个国家签署了自由贸易协定。其中包括：澳大利亚、巴林、加拿大、智利、哥伦比亚、哥斯达黎加、多米尼加共和国、萨尔瓦多、危地马拉、洪都拉斯、以色列、约旦、韩国、墨西哥、摩洛哥、尼加拉瓜、阿曼、巴拿马、秘鲁、新加坡和美国管理认证协会（美国 - 墨西哥 - 加拿大协定）（www.ustr.gov/trade-agreements/free-trade-agreements）。

²² 美国正在与欧盟商讨使欧洲矿产有资格获得美国税收抵免（www.reuters.com/markets/eu-us-working-free-trade-agreement-like-status-2023-03-03/）。

各国可利用各种政策工具鼓励国内采矿、精炼和回收，以简化行政流程，加快规划和许可程序，并增加公共资金，以支持国内对关键原材料价值链的投资。这些工具也可以通过国际伙伴关系应用于值得信赖的国际盟友（见下一小节）。

这种政策能够加强供应链稳定性，降低地缘政治风险，增加国家和地区战略自主权。然而，这些政策也带来了巨大的风险，如成本增加、规模经济减少，以及受影响国家可能采取的报复措施。回岸和近岸采购可能意味着成本高于从遥远的低成本供应商处采购的成本。美国矿业公司 Molycorp 就是遇到这种风险的一个例子。该公司于 2012 年重新开放了其在加州的稀土矿，但在 2015 年因全球稀土价格低迷，无法支撑其高昂的成本而申请破产。²³ 鼓励国内采矿的政策还可能需要设置贸易壁垒，这可能会影响贸易关系，并引发对保护主义的担忧。采取回岸、近岸、友岸和相关政策需要仔细评估利弊和成本，以在经济考量、贸易目标和能源转型优先级之间取得平衡。

此外，要重新打通这些供应链，就需要在经济考量、环境问题和当地社区福利之间做出微妙的平衡。几十年来，开采和加工锂和稀土等矿物给环境和人类带来的代价在很大程度上被掩盖，很多国家（包括工业化经济体）的公民都不知道真相。各国在寻求供应链多元化时，将不得不面对利弊权衡。例如，目前关于《欧盟关键原材料法案》的讨论中的一个关键问题是，是否应将战略性开采、精炼和回收项目列为凌驾于公共利益的项目，即其可以凌驾于环境法之上（Zimmermann, 2023a）。尽管各国正努力重组和扩大重要的矿产供应链，但其也面临着各种突出挑战，如邻避（别在我家后院）抗议、环境问题以及新的采矿、精炼和加工能力投产所需的漫长准备时间。

例如，在塞尔维亚，Jadar 锂矿（世界上最大的锂矿之一）的开发一直遭到反对，甚至愈演愈烈，当地社区对该矿可能造成的环境影响表示担忧，特别是水污染和当地社区被迫迁移的问题。2022 年初，矿业巨头力拓在公众抗议声中被迫吊销营业执照（Sekularac, 2022）。塞尔维亚等国的抗议活动也重创了欧洲的其他锂项目，包括葡萄牙、西班牙和德国的项目（Caceres, 2023；Zimmermann, 2023b）。2023 年 1 月在瑞典北极地区发现的一个大型稀土矿床引起了当地萨米人对驯鹿放牧区遭到潜在影响的担忧（Frost, 2023）。

遭到当地反对的不仅仅是采矿项目。2012 年，澳大利亚公司 Lynas 在马来西亚遭到了当地民众的强烈反对，原因是该公司在马来西亚拟建的稀土加工设施可能会造成放射性废物泄漏，从而带来健康和环境风险。为了阻止该项目，抗议者走上街头游行，发起法律诉讼，有些人甚至绝食抗议（Feffer, 2023）。尽管该设施于 2013 年开始运营，但抗议极大地延迟了项目的进度。尽管如此，抗议活动仍在继续，马来西亚政府希望 Lynas 在 2023 年中期之前停止裂解和浸出作业。这些例子突出了当地社区早期积极参与的重要性，这样才能确保获得支持和长期利益。

²³ Mountain Pass 稀土矿破产后被一个财团收购，而该财团中有一家中国公司 ([mining.com/mountain-pass-sells-20-5-million/](https://www.mining.com/mountain-pass-sells-20-5-million/))。

关键原材料外交策略

关键原材料在国际外交策略中变得越来越重要，促使各国建立新的联盟和伙伴关系，以确保获得这些重要资源（见表 4.3）。

表 4.3 国际关键原材料联盟

联盟	年份	国家	目标
加美关键矿产合作联合行动计划	2019	加拿大、美国	促进联合倡议，包括研发合作、供应链建模和增加行业支持（Ministry of Commerce and Industry, Government of India, 2020）
能源资源治理倡议 (ERGI)	2019	澳大利亚、博茨瓦纳、加拿大、秘鲁、美国	分享和强化矿产开发最佳实践，从矿产资源测绘到矿山关闭和复垦 (ERGI, 2019)
关键矿物测绘倡议 (CMMI)	2019	澳大利亚、加拿大、美国	加拿大地质调查局、澳大利亚地球科学局和美国地质调查局展开研究合作，利用这些组织的综合地质专业知识来解决全球自然资源脆弱性问题 (Emsbo 等人, 2021)
欧洲原材料联盟 (ERMA)	2020	欧盟	应对获取可持续原材料、先进材料和工业加工技术的各种挑战 (ERMA, 2020)
增加供应链韧性倡议	2021	澳大利亚、印度、日本	分享供应链韧性的最佳实践，举办投资促进活动和买卖双方配对活动，为利益攸关方提供各种探索供应链多样化可能性的机会 (Ministry of Commerce and Industry, Government of India, 2021)
矿产安全伙伴关系 (MSP)	2022	澳大利亚、加拿大、欧盟委员会、芬兰、法国、德国、意大利、日本、挪威、韩国、瑞典、英国、美国	确保关键矿物的生产、加工和回收利用方式能够使各国充分实现其地质禀赋所带来的经济发展效益。MSP 将有助于促进政府和私营部门投资，进而抓住整个价值链中的战略机遇，并遵守最高的环境、社会和治理标准 (US Department of State, 2022)。
可持续关键原材料联盟	2022	澳大利亚、加拿大、法国、德国、日本、英国、美国	推动全球采用环境可持续的、具有社会包容性和负责任的采矿、加工和循环利用做法，以及负责任的关键矿物供应链 (Government of Canada, 2022)

除了本表中所列的联盟，七国集团 (G7) 成员也在寻求建立一个关键矿产买家俱乐部。²⁴ 该俱乐部将侧重于确保关键矿产的获取，同时防止 G7 经济体之间对这些矿产展开竞标战 (Duehren, 2023)。在日本举行的 G7 气候、能源和环境部长会议上，这一观点得到了重申，会议上还制定了“关键矿产安全五点计划”，见文本框 4.3 (G7 Hiroshima Summit, 2023)。

为了减轻原材料短缺的风险，有些国家已经开始支持海外采矿项目。例如，美国通过“矿产安全伙伴关系”为约十几个海外矿产项目提供资金，其中可能涉及采矿、矿物加工和回收利用 (Holzman, 2022)。同样，日本政府也正在寻求通过鼓励公司收购海外采矿权益来实现关键矿产供应链多样化，并已根据 2022 年 5 月通过的《经济安全保护法》拨款 1.03 万亿日元 (78 亿美元)，用于提供援助费用 (Asamina, 2022)。

作为关键矿产供应链的主导者，中国也一直在寻求与多个非洲国家建立战略联盟，以确保其资源供应链的安全。这促进了撒哈拉以南非洲与中国的双边贸易，而中国从非洲进口的主要商品就是矿物和金属 (见图 4.2)。中国在 1999 年制定的“走出去”战略鼓励中国企业发展全球竞争力，中国也能因此成功扩大其在关键矿产供应链中的影响力。

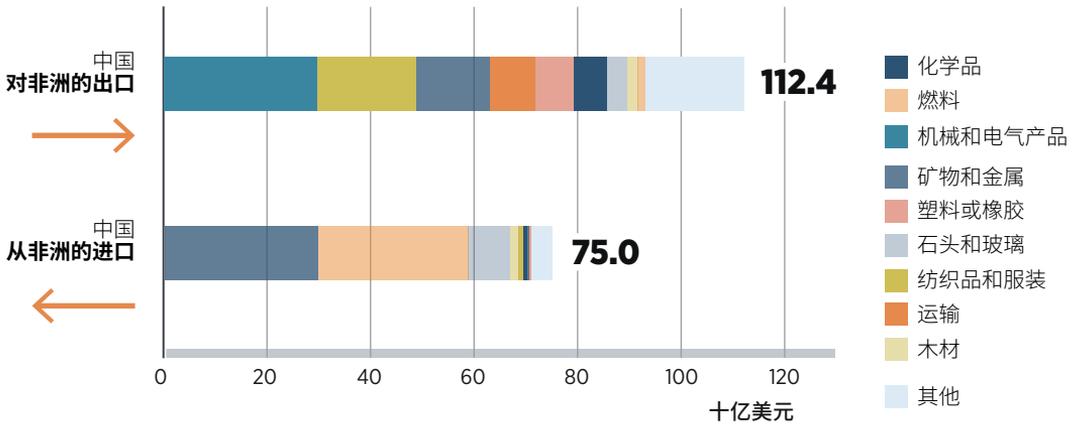
文本框 4.3 2023 年七国集团提出的关键矿产安全“五点计划”

1. 预测长期供需情况
2. 负责任地开发资源和供应链
3. 提高回收利用率和共享能力
4. 促进资源节约和替代技术的创新
5. 为短期供应中断做好准备。



²⁴ 欧盟拟议的《关键原材料法》还包括联合采购关键原材料的计划。

图 4.2 矿产和金属在中国与非洲日益增长的贸易关系中的关键作用



来源：(World Bank, 2020c)。

注：使用的是 2020 年的数据。

自 2011 年实施原材料战略以来，欧盟也一直在推行原材料外交。欧盟致力于与非欧盟国家建立战略伙伴关系，并就促进人权、改善治理、解决冲突和区域稳定等更为广泛的议题展开政策对话 (European Commission, 2011)。欧盟已与阿根廷、巴西、加拿大、智利、中国、哥伦比亚、埃及、格陵兰 (丹麦王国)、日本、墨西哥、摩洛哥、秘鲁、突尼斯、美国、乌拉圭和非洲联盟等国签订了原材料政治协议 (欧盟委员会内部市场、工业、创业和中小企业总局，未注明日期)。

要在外交政策接触中采取平衡和合作的方法，就需要履行进口国支持可持续发展的义务，并超越关键原材料供应链中的开采模式。这需要培养伙伴关系，倡导负责任的采购方式，支持生产国的能力建设，改善透明度和问责制，并投资于可持续发展的倡议。这些具体步骤可以帮助进口国促进公平的可持续性发展，确保以更包容和互利的方式采购关键原材料。





战略储备

战略储备是政府应对关键燃料和商品潜在短缺的应急工具。中国、日本、韩国和美国等工业化国家都建立了具有重要战略意义的进口商品储备。²⁵ 私营公司、贸易商和金属交易所也持有储备，用于价格对冲和供应链管理。然而，目前还没有关于这些库存的规模、位置及其利用率的可靠数据（Wilburn 等人，2016）。

在公开辩论中，石油战略储备经常被用来类比，但值得注意的是，为清洁能源制造储备原材料不同于囤积燃料，更类似于为建造石油钻井平台而囤积钢材。例如，如果某个国家面临镓限制，则意味着其薄膜太阳能电池板制造商将受到影响，就像钢铁限制将影响钻机制造商一样。然而，镓供应短缺不会阻止现有太阳能电池板的运行，即便有些公司将面临重大影响（Krane 和 Idel，2022）。

囤积也会限制能源转型的速度和规模。虽然能源资产的制造和建设需要关键原材料，但并非所有国家都拥有维持战略储备的财政资源或其他资源。因此，囤积可能会产生意想不到的影响，阻碍供应链多样化，并妨碍各国发挥其创造当地价值的潜力。这就会出现一个疑问，即与其他行业的材料储备相比，储备能源转型矿物是否有用。

²⁵ 据报道，俄罗斯还拥有各种金属的战略储备，但有关种类和数量的数据尚未公布。

迄今为止，公共储备量最大的美国政府并没有出于国防以外的目的来储备这些商品。根据《战略矿产法》的规定，美国于1939年开始储备重要矿产。美国建立了对国防至关重要的42种商品的储备，并在20世纪50年代初将这些储备进一步扩大，以应对因朝鲜战争造成的商品短缺担忧（National Research Council, 2008）。一些储备已达到极限水平。例如，到20世纪70年代初，美国的战略锡储备量相当于全年的全球消费量（Radetzki 等人，2020）。从1945年到2008年，储备原材料仅释放过十次（National Research Council, 2008）。近年来，尤其是自20世纪90年代以来，美国国防储备主要出售过剩材料。

在中国，金属的战略储备属于中国国家储备局（SRB）的职权范围，该政府机构成立于1993年。SRB的运作情况并未公开披露，但众所周知的是该机构在价格低的时候大量购买和储存矿产，在价格上涨的时候将其投放到市场。正因为如此，该机构已经成为国际市场上一支有影响力的力量。例如，2020年，SRB购买了大量精炼铜，这使其能够在新冠肺炎疫情引发经济放缓期间抬高精炼铜的价格（Home, 2021）。

考虑到矿产的战略重要性，很多国家最近强化了储备政策。2020年，日本新的《国际资源战略》将普通储备目标天数提高到60天，将地缘政治风险较高的矿物储备目标天数提高到180天（Agency for Natural Resources and Energy, 2020）。此外，2021年，韩国宣布将提高钴、镍和稀土等35种关键金属的储备，从之前满足56.8天的消费量，提高到满足100天的消费量（Byung-wook, 2021）。

值得注意的是，并非所有主要工业地区都实施了战略储备政策。例如，欧盟最近提出的《关键原材料法案》并没有强制要求储备。相反，该法案鼓励采取自愿储备措施，同时也要求成员国提交关于各自政策的报告。强制储备的想法面临一些公司的抵制，这些公司认为这种行为可能会给已经紧张的供应链带来更多压力（Burton, 2023）。



建立战略储备的确会面临很多挑战。如果考虑不周，可能会加剧市场紧缩并抬高价格。其中一个示例是，2010年，很多日本公司在经济危机时期开始储备稀土，并在贸易禁运结束后立即扩大了储备量。这助长了价格泡沫的形成，并一直持续到2011年底（Sprecher 等人，2015）。公司采取不必要的预防措施可能会导致其面临严重的市场后果。美国福特汽车公司就是一个例子，该公司对钽价格上涨的担忧促使其在2000年囤积了大量的钽。不久后钽价格大幅下跌，对该公司造成了10亿美元的损失（White，2002）。储备时也会遇到更多的实际问题。例如，镁等高活性金属容易腐蚀和降解，而锂等碱金属在暴露于空气或水中时会燃烧或爆炸。因此，任何储备战略都应仔细评估可能的影响，并定期对相关情况和进展进行评估。



节约使用、再利用和循环利用

节约使用、再利用和循环利用关键原材料的努力势头高涨，成为提高供应链稳健性、支持向循环经济转型并减少原材料的环境影响的解决方案（Gielen，2021b）。

能效、节能和行为改变可以有效缓解关键原材料供应链的压力。例如，电动汽车电池化学成分的优化的同时可以配合另一个战略，其重点是减少电动汽车需求（例如，通过更好的公共交通，鼓励骑自行车、步行或远程工作）并优化现有车队（例如，通过拼车共享计划或减少车辆的质量和空气阻力）（Lovins，2022）。此外，政府可以实施相关法规，减少一次性产品的生产和消费，从而降低对关键原材料的需求。对于在确保关键原材料可持续生产和使用的同时减轻其开采和加工对环境的影响来说，这些行为的改变具有重要意义。

通过改进产品设计、开发关键程度较低的新材料，以及实施优先考虑具有耐用性和可再利用的循环商业模式，也可以减少对关键原材料的需求（Babbitt 等人，2021）。例如，向低钴电池设计的转型可以降低与钴供应链相关的地缘政治、社会和环境风险以及成本。然而，这种替代通常伴随着新的资源依赖性（例如改用镍）或电池性能损失方面的权衡。

关键原材料的回收和再利用还可以缓解对初次供应来源的压力，防止相关的环境破坏，因为这些方法比初次开采消耗的能源更少，产生的排放也更少（Gregoir 和 van Acker, 2022）。与化石燃料和其他一次性原材料相反，金属具有稳定的物理特性，理论上可以无限循环利用。就某些材料而言，回收资源已占全球供应的很大一部分。约有 40% 的铜和钢由回收材料制成。就铝、铅和锌等其他常见材料而言，目前有超过 30% 的生产使用回收材料（Bureau of International Recycling (BIR), 2021）。

然而，其他金属的回收率要低得多。例如，在欧盟，只有约 20% 的铂和钴从二次（再循环）来源获得；就大多数其他关键原材料而言，这一比率为 5% 或更低，而对于镓、铟和稀土来说，这一比率接近于零（European Economic and Social Committee, European Commission, 2020）。通过低碳技术提高关键原材料的废弃回收比例往往会遇到技术挑战、收集问题 and 经济障碍（IRENA, 即将出版；Karali 和 Shah, 2022）。

如果考虑将回收利用作为供应风险的潜在解决方案，则必须研究整个库存周转时间。只有当大量正在使用的原材料接近其使用寿命时，才有可能进行大量的二次供应。然而，这些条件在 21 世纪 30 年代中期左右前不太可能实现，特别就电池电动汽车及其相关矿物而言（Zeng 等人，2022）。因此，应将回收视为加强供应安全的中长期战略。



© Vladyslav Horoshevych | shutterstock.com

4.2 增加矿产丰富的发展中国家的国内利益

优化资源所在国价值存留的策略

发展中国家正在采取措施优化其矿产资源的利益，并经常利用其议价能力来获得更好的矿产开采条件。其中一个示例是，2018年，刚果民主共和国就外国获取钴储备问题展开重新谈判，以确保达成一项更有利的协议。此外，秘鲁在2021年改革了其铜矿区特许权使用费制度，以增加政府从采矿业获得的收入。此外，智利政府计划建立一家国有锂公司“Lithium for Chile”，以确保智利对国内锂储量拥有更大的控制权，并能公平分享其资源所产生的价值。

有些发展中国家也渴望从其矿产资源中获取更大的价值。例如，印度尼西亚禁止出口未加工的镍，以鼓励在其境内开展增值活动（见文本框 4.4），而津巴布韦则禁止出口粗锂，以遏制手工采矿并吸引下游产业（Banya, 2022）。越来越多的发展中国家开始实施出口税和非自动化许可程序。

然而，对于任何国家来说，出口限制并不能保证为下游加工产业提供支持。有一项研究调查了四个非洲国家使用矿物和金属出口限制措施的情况，结果发现这些限制并没有给下游产业带来任何好处（Fliessi 等人，2017）。其中一种解释是，矿物加工通常要消耗大量能源，而在发展中国家，尤其是那些电网不发达、大部分人口用不上电的国家，能源供应往往不足或不可靠。与采掘业相比，这些高附加值活动所雇用的劳动力技能要求更高，所需的资本也更多。对发展中国家来说，通常很难吸引足够的投资和资本来建立更复杂的本地供应链。

矿产丰富的发展中国家在开采方面有天然优势，但在加工方面却不一定。采矿活动集中在特定的地点，而这是由地质情况决定的。然而，下游产业在选址方面有更大的灵活性。散货运输使精炼和加工业务有可能设在远离矿区数千英里以外的地区，而这些地区有更有利的能源供应、更好的环境条件、更高的政治稳定性和更低廉的资本获取成本（Hendrix, 2022）。其中一些优势源于历史差异，而面向包容性发展的方法仍将寻求扩大发展中国家的加工能力。

文本框 4.4 印度尼西亚镍出口禁令的经验教训

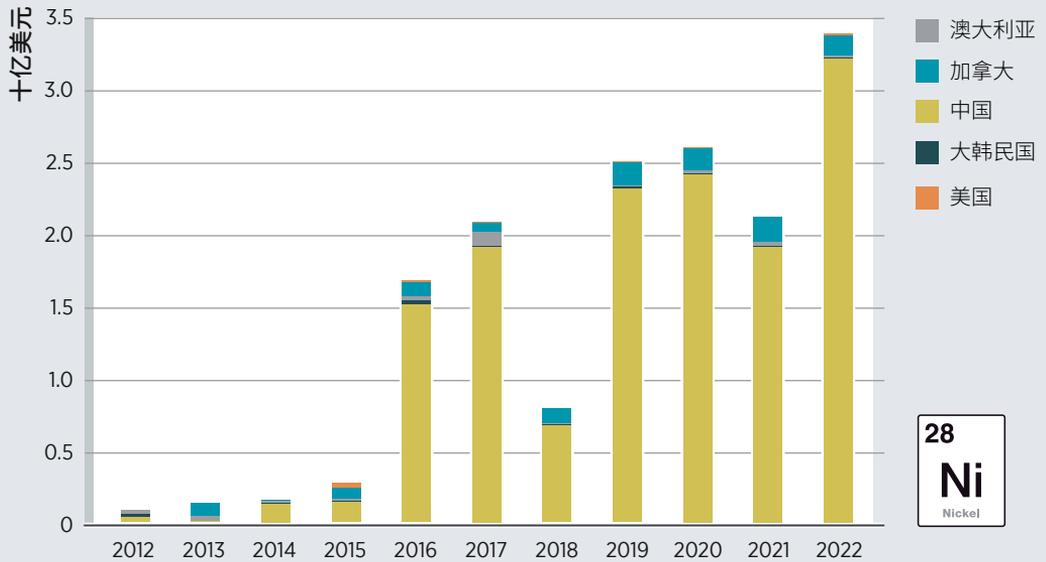
印度尼西亚拥有世界上最大的镍储量，并利用这一优势来吸引电池和电动汽车供应链上的投资。

2014 年 1 月，该国禁止出口未加工的镍和铝土矿，强制要求在国内加工。根据法律，只有承诺建设冶炼厂的公司才能获得出口许可证。矿产出口禁令并没有具体限制，外国公司或国内公司都可以通过在该国建设冶炼厂获得相关资格 (Terauds, 2017)。

该禁令导致国际镍价在 2014 年上半年短暂大幅上涨，但在大宗商品普遍暴跌的背景下，其价格又迅速回落。在 2016 年出现预算赤字后，该禁令遭到搁置，并于 2020 年 1 月重新推出。

尽管该禁令意味着出口收入、采矿工作和政府收入的短期损失，但其在吸引新的镍加工投资和培育下游产业长期目标方面取得了相当大的成功。在出台出口禁令之前，印度尼西亚只有两家运营的镍冶炼厂。到 2020 年，这一数字上升到 13 家，而且正在计划建设更多的冶炼厂 (Huber, 2021)。该国在镍加工领域吸引了超过 150 亿美元的外国投资 (见图 4.3 和 4.4)。

图 4.3 2022 年印度尼西亚镍生产设施的外商投资 (单位：10 亿美元)

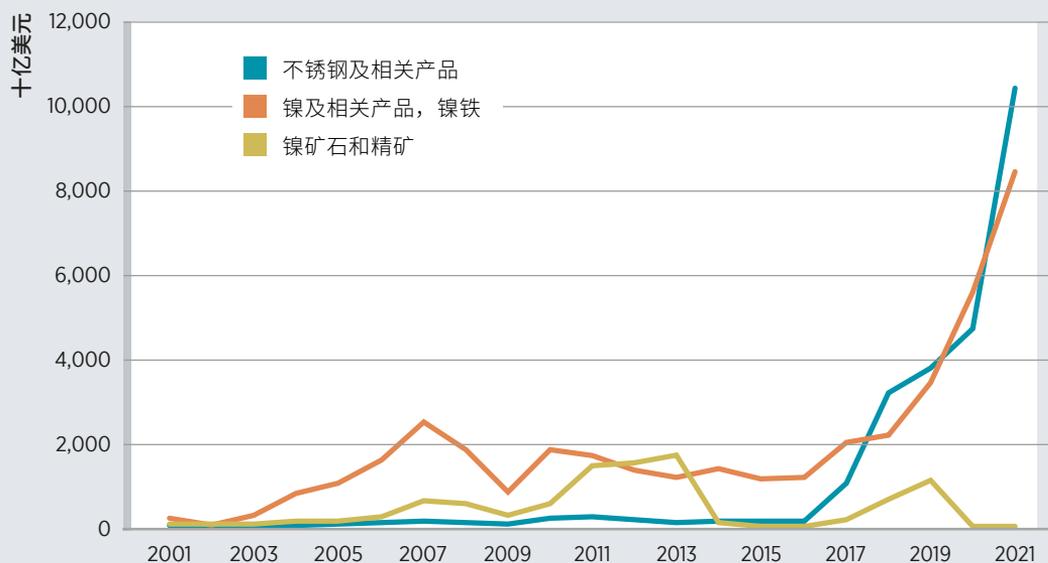


来源：(Ho 和 Listiyorini, 2022)。

继续下一页 ▶

文本框 4.4 印度尼西亚镍出口禁令的经验教训（续）

图 4.4 2021 年印度尼西亚镍原料和镍产品出口情况（单位：10 亿美元）



来源：(UN Statistics Division, 2022 ; Kim, 2023)。

在印度尼西亚的金属行业投资重点是将该国的镍矿转化为镍生铁，然后用于不锈钢生产。然而，政府寻求进一步提升镍价值链，其长期目标是开发完整的电动汽车供应链，包括阴极、电池和电动汽车的生产 (Kim, 2023)，而且目前已经取得了一些初步成功。例如，韩国的 LG 能源解决方案正着手建设一家价值 11 亿美元的电池厂，而汽车制造商现代公司也开设了一家电动汽车组装工厂。世界上最大的电池制造商，中国的 CATL 也已在印尼投资，而特斯拉和比亚迪已经签署或正在敲定投资协议 (Maulia 和 Damayanti, 2023 ; Ruehl, 2023)。

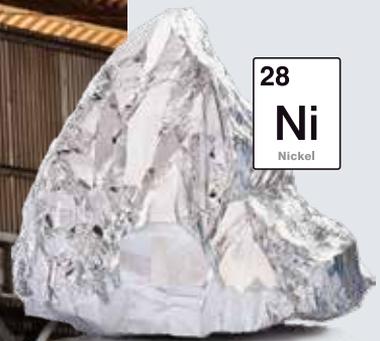


继续下一页 ▶

文本框 4.4 印度尼西亚镍出口禁令的经验教训（续）

虽然其他依赖大宗商品的发展中国家可能会从印尼的镍出口禁令中得到启发，但也应该谨慎行事，原因至少有四点：

- 该禁令之所以相对成功，主要是因为印尼红土镍矿在镍生铁工艺中具有不可替代性。相比之下，铝土矿出口禁令并未吸引到新的冶炼活动，只是将矿石开采转移到了马来西亚等其他国家。从这个角度来看，印尼的例子表明，最好避免对有现成替代品的商品实行全面出口禁令（Terauds, 2017）。
- 镍在印尼经济中所占份额相对较小；因此，与铜等更具战略性的资源相比，对镍实施出口禁令的风险也更小。对于主要商品出口在其经济中占较大份额的国家来说，实施出口禁令的风险也会大很多（Terauds, 2017）。
- 镍出口禁令带来了一定的代价。据估计，在实施禁令后的前三年中，该国出口收入损失了 45 亿美元，采矿工作岗位损失了 30,000 个，政府收入损失了 2.7 亿美元（Terauds, 2017）。虽然这些损失需要与随后的收益（如对镍精炼能力的新投资）相抵消，但在考虑政策选择时，必须要考虑到这些成本。
- 印尼在成功吸引镍精炼活动的同时，也付出了环境和社会代价。越来越多的项目依赖所谓的高压酸浸（HPAL）技术，而这种技术与传统冶炼技术相比，会产生大量废物（Tan, Sijabat 和 Irwandi, 2023）。
- 此外，还存在法律风险。世界贸易组织专家组最近做出了有利于欧盟对印尼镍矿石出口禁令提出抗议的裁决（WTO, 2022），但印尼现在将对对该裁决提起上诉（Strangio, 2022）。



28
Ni
Nickel

矿产资源丰富的发展中国家要向矿产价值链上游攀登，就可能面临贸易壁垒。发达国家对制成品征收的关税通常比原材料高（这一过程被称为“关税升级”）。未来的进口关税可能会与排放挂钩，如欧盟的碳边境调节机制对金属的进口关税最初仅涉及钢和铝，但其产品范围可能扩大到涵盖铜、锌、镍和硅等。现在，这些矿物的生产必须遵守欧盟排放交易计划规定的碳价格，因为其也面临着碳泄漏的巨大风险，就像铝或钢一样（European Commission, 2020）。

构建电动汽车电池矿物的区域价值链

地区合作有助于各国从矿产中获取更大价值。矿产资源丰富的国家可以从协调一致的区域协议中受益，确保满足外国投资的条件，而不是通常寻求与外国公司进行一对一的交易。

在吸引下游产业方面，区域协调也很重要。只有少数几个国家拥有生产电动汽车电池的所有矿产。这意味着，如果大多数国家要建设下游产业，那么集中矿产供应将使其受益。此外，发展中国家也可以创造更大的市场。靠近下游消费市场是吸引电池电动汽车价值链中高利润活动的一个重要成功因素——可能比靠近矿产资源还要重要。“电池前体材料”是制造电池阴极的前体化学品，如果其生产地靠近其他化工厂集群，则将更具可行性。电池阴极生产是价值链的下一环节，其生产地最好位于电池制造商附近，因为阴极很难运输（Diene 等人，2022）。

联合国非洲经济委员会已确定了一些发展地区电池矿产和电动汽车价值链的机会，这些价值链横跨中部非洲，并延伸到东部和南部非洲（Pedro, 2021）。南部非洲发展共同体 2015-2063 年工业化战略和路线图就是区域价值链发展的一个具体例子。此外，刚果民主共和国和赞比亚也签署了一项协议，以促进电动汽车电池和清洁能源行业的价值链发展（UNECA, 2022）。亚洲和拉丁美洲也在矿产价值链方面展开了区域合作。





4.3 促进负责任、可持续和透明的供应链

各界日益认识到与矿产供应链相关的可持续发展挑战，特别是与电动汽车电池材料生产相关的挑战。这促使全球政府、企业和民间社会团体制定了大量倡议和监管框架，力求解决紧迫的可持续性风险，包括与人权、劳动实践、腐败和环境影响等相关的风险。

虽然这些倡议的内容有明显重叠，但其在适用的行为者和组织、倡议内容范围（例如，仅适用于特定矿址或整个价值链）、所涉及的矿物和合规机制方面却各不相同。这些倡议大多限于自愿遵守，导致供应链管理标准非常零散，有可能给利益攸关方带来困惑（Elkind 等人，2020）。虽然全面概述促进负责任、可持续和透明的矿产供应链的所有方法已超出本报告的范围，但下文仍讨论了一些与转型矿物最相关的公共、多方利益攸关方和私人倡议。

公共部门标准和立法

联合国的《联合国工商业与人权指导原则》（United Nations Human Rights Office of the High Commissioner, 2011）尤其值得注意。该原则指导企业如何在业务和供应链的各个环节中尊重人权，侧重介绍尽职调查、风险评估和对侵犯人权行为的补救方法。国际劳工组织等联合国机构已经制定了可持续采矿标准。最后，如图 4.5 所示，可持续发展目标也在多个方面与采矿业相关。

图 4.5 采矿与可持续发展目标



来源：(哥伦比亚可持续发展中心等, 2016)。

注：AIDS = 获得性免疫缺陷综合征；C = 碳；HIV = 人类免疫缺陷病毒；OSH = 职业安全和健康；TB = 肺结核。



最广泛参照的国际标准可能是经济合作与发展组织 (OECD, 2016b) 的《受冲突影响和高风险区域矿产负责任供应链的尽职调查指南》(以下简称“OECD 矿产指南”)。该指南为公司提供了从受冲突影响和高风险地区采购矿产品的供应链尽职调查框架。该指南是自愿遵守的并涉及多个问题, 包括供应链可追溯性、风险评估和利益攸关方参与, 而且 46 个签署国 (代表 85% 的外国投资) 必须采用同一个政府投诉机制 (Whitmore, 2021)。

OECD 矿产指南已被纳入多个监管框架 (特别是在美国和欧盟, 以及刚果民主共和国、卢旺达和阿拉伯联合酋长国等生产国和贸易国)、行业准则和市场要求。例如, 中国五矿化工进出口商会 (与商务部关系密切, 有 6,000 多个会员, 其年进出口值约占中国进出口总值的 30%) 将 OECD 标准纳入了中国标准。此外, 在 2022 年, 伦敦金属交易所交易的所有金属, 包括铝、钴、铜、锡、镍、锌和铅 (其中大多数对绿色和数字化转型至关重要), 都已纳入 OECD 矿产指南的强制尽职调查范围。²⁶

考虑到国际标准为贸易提供了全球参考点, 值得一提的是, 作为一家独立的非政府国际组织, 国际标准化组织 (ISO) 拥有 167 个国家标准化机构成员。自 1955 年以来, 该组织就设立了一个采矿技术委员会, 负责为采矿活动制定标准。自 2015 年以来, 应 SAC (中国标准化管理委员会; 中国稀土和锂标准化机构) 的要求, 该组织成立了两个新的金属和材料 ISO 委员会。这些技术委员会目前由 SAC 领导, 负责制定这些材料的分类、可追溯性 (从矿场到最终产品)、包装和化学分析方法的标准。该委员会已经公布了 7 项稀土标准, 还有 9 项稀土标准和 14 项锂标准正在制定中 (ISO, 2023a, 2023b)。此外, 法国标准机构法国标准化协会 (Association Française de Normalization) 最近提议为另外 14 种关键原材料 (包括钴、石墨和钨) 成立一个技术委员会 (ANSI, 2023)。

²⁶ 鉴于跨国公司在矿业中的重要性, 这里还需要提及正在修订的《OECD 跨国企业准则》(OECD, 2011)。这些准则规定了环境和社会尽职调查以及报告等行为的原則。



各国积极参与国际标准的制定对其参与贸易并从中获益来说至关重要。虽然国际标准化组织锂技术委员会的成员包括所有主要的锂开采国和精炼国，但还有几个从事稀土开采和精炼的国家尚未加入，其中包括主要精炼国家爱沙尼亚、主要采矿国家坦桑尼亚联合共和国和缅甸（非国际标准化组织正式成员）。

除了这些国际倡议之外，矿产供应链还受到许多国家和地区制度的监管。其中包括于 2021 年生效的《欧盟冲突矿产法规》，该法规要求企业在冲突地区和高风险地区采购矿物时，需对其供应链展开尽职调查，并有效识别和降低风险 (Directorate-General for Trade, European Commission, 2017)。该条例仅适用于 3TG (锡、钽、钨和金) 矿物，不适用于其他能源转型矿物，如钴、石墨、镍和锂。其他例子包括《美国多德 - 弗兰克法案》第 1502 条（要求在美国证券交易所上市的公司披露其产品是否含有冲突矿物 [3TG 矿物]）、英国于 2015 年通过的《现代奴役法案》，以及荷兰于 2019 年通过《童工尽职调查法案》。

欧盟即将出台的电池法规旨在使电池原材料符合严格的可持续发展标准，进而确保其在从采购到收集、回收和再利用的整个生命周期内的可持续性。该法规涉及碳强度、回收配额和尽职调查，并将确保电池在其生命周期结束后可以再利用、再制造或循环利用 (Ministry of Mines, 2022)。



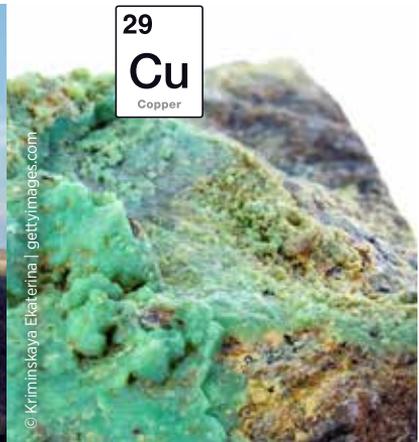
多利益攸关方倡议

在全球范围内，为了促进负责的采购、可持续生产和关键原材料供应链的透明度，多利益攸关方联合发起了越来越多的倡议。这方面的一个例子是广泛使用的全球报告倡议 (GRI) 为大公司制定的可持续性报告标准 (UNEP, 2020)。除了一般标准之外，GRI 还制定了一份特别指导文件，为采矿和金属行业的信息披露设定了绩效指标 (GRI, 2023)。

另一个突出的例子是负责任矿产倡议 (RMI)，该倡议旨在通过为公司和供应商制定和实施标准、工具和方案，来推进负责的矿物采购。虽然 RMI 最初侧重于往往与侵犯人权和冲突有关的 3TG 矿物，但现在其范围涉及所有矿物供应链 (RMI, 2021)。RMI 包括审计和认证方案、供应链尽职调查工具和供应商能力建设计划。

全球电池联盟 (GBA) 是世界经济论坛于 2017 年发起的一项多利益攸关方倡议。该倡议提出了另外一个框架，以确保负责的矿物采购和生产，内容涉及人权、劳工实践、环境管理和社区参与等领域。GBA 旨在通过优先减轻与电池材料开采、加工和处置相关的社会和环境影响，创建一个可持续和负责的电池价值链。为实现这一目标，该倡议还制定了一套指导原则。该倡议还致力于促进供应链中的透明度和可追溯性，并鼓励利益攸关方合作推动系统性变革 (GBA, 2017)。

《采掘业透明度倡议》(EITI) 为自然资源透明度和问责管理制定了全球标准。EITI 旨在提高透明度，力求减少腐败，鼓励政府、公司和民间社会组织共同努力，披露矿产和其他资源开采收入的相关信息。EITI 逐步将环境问题纳入其工作范围，并于 2019 年修订了标准，以鼓励倡议执行国披露有关管理和监测采掘活动对环境的影响的信息。目前已有 50 多个国家采用 EITI 的标准。



上述这些倡议仅仅是冰山一角。表 4.4 展示了其他一些多利益攸关方治理转型矿物的倡议。

表 4.4 特定多利益攸关方矿产治理倡议

涉及内容	创始组织	标准/指南
所有矿产资源	国际采矿和金属理事会 (ICMM)	采矿原则 / 绩效预期 / 可持续发展框架 (ICMM, 2022b)
	负责任采矿保证倡议 (IRMA)	负责任采矿标准 (IRMA, 2006)
	加拿大矿业协会 (MAC)	走向可持续采矿计划 (TSM) 协议和框架 (MAC, 2004)
	DMT 和 EIT 原材料	CERA 4in1 绩效标准 (CERA 4in1, 2017)
	国际金融公司 (IFC)/世界银行集团	环境和社会可持续性绩效标准 (IFC, 2012)
	负责任矿产倡议 (RMI)	负责任矿产保证程序 (RMI, 2018)
	伦敦金属交易所 (LME)	LME 的负责任采购要求 (LME, 2019)
铜 (+ 铅、镍、锌、钼)	国际铜协会	Copper Mark (The Copper Mark, 2019)
铝 (+ 铝矾土、氧化铝)	14 家创始公司	铝业管理倡议 (ASI) (ASI, 2023)
钢 (+ 铁)	各利益攸关方	Responsible Steel (ResponsibleSteel, 2018)
锡	国际锡协会和钨钼国际研究中心	国际锡供应链倡议 (ITSCI) (ITSCI, 2010)
钴	Impact Facility (一家英国非政府组织) 和多家公司	公平钴联盟 (Fair Cobalt Alliance, 2020)
	中国五矿化工进出口商会和经济合作与发展组织	负责任钴倡议 (RESPECT International, 2016)
	钴研究所	钴工业责任评估框架 (Cobalt Institute, 2021)

私人、企业行动

除了多边和多方利益攸关方倡议之外，许多公司都有以负责任的方式采购关键原材料的计划。其中一些示例是：

- **特斯拉**将只从符合其环境和社会标准的供应商那里采购钴和其他关键矿物。该公司还在开发新的电池化学成分，以减少电池对钴的依赖。
- **苹果**制定了一项负责的采购计划，要求其供应商遵循严格的环境和社会标准，并涉及多种关键矿物，包括钴、钨、锡、钨和金。苹果致力于通过参与 RMI 来促进负责的采矿实践。
- **福特**制定了一项可持续材料战略，重点关注钴、锂和稀土等关键矿物。该公司正在努力确定并解决其供应链中存在的环境和社会风险，并与供应商合作，以促进负责的采购实践。
- **力拓集团**制定了一项负责的采购计划，其中涉及多种矿物（包括铜、铝和钻石），并重点关注人权、环境可持续性和社区参与。该计划包括与供应商合作解决风险并改进实践。
- **宝马**制定了一项可持续发展计划，重点关注负责任地采购关键矿物，如钴和锂。宝马与供应商合作促进可持续实践，并承诺到 2030 年在其产品中仅使用经认证的可持续原材料。
- **大众**制定了一项全面的可持续发展计划，重点关注负责任地采购关键矿物，如锂和钴。大众与供应商合作，以确保供应商遵守大众的环境和社会标准，并投资于新技术，以减少其对产品中关键矿物的依赖。
- **优美科**通过包含交易和物流系统、质量检查、化学指纹和利益攸关方参与的框架，确保电池材料（钴、锂、镍）的可持续采购。



整体方法

负责任采购关键原材料的现有方法，特别是可追溯性计划都存在局限性。这些计划若要行之有效，则必须建立信任、确保真实性并最大限度地减少潜在的系统漏洞（Sovacool 等人，2020）。目前，这些计划往往是自愿参与的，因此缺乏凝聚力和强有力的执行机制。

要使可追溯性计划更为有效，可加入针对违规行为的适当制裁、惩罚、赔偿和补救机制。这可能需要公共机构和政府的更多参与。然而，即使政府加强参与和执行力度，追溯系统本身也有其固有的局限性。这种系统往往侧重于减轻企业在关键物质价值链中的声誉风险，而不是社会变革（Kügerl 等人，2023；Sovacool 等人，2020 年），因此不能作为解决当前根本问题的全面解决方案。

例如，负责任的采购倡议中的一个重要考虑因素是对供应链中弱势参与者（如手工和小规模采矿者）的意外影响，因为他们往往面临经济不确定性、工作不稳定，并承受着过度侵犯人权和环境损害的责任。仅仅保障他们的生计不足以解决系统性问题，这就需要展开包容性对话，包括公平分配风险、投入、创造性贡献和由此产生的价值。

虽然关于如何应对各种供应链挑战的地区、国家和行业主导的各种倡议层出不穷，但仍然没有一个总体性的政府间框架来解决关键原材料的全球采购、生产和贸易问题。随着这些原材料对能源转型及其他领域的重要性与日俱增，协调一致的政策行动也变得越来越重要。在确保关键原材料价值链的公平、公正和透明方面，联合国主持下的全球合作可发挥关键作用。



政策考量和前进方向

IRENA 的能源转型地缘政治全球委员会在其 2019 年的报告中指出，关键原材料的瓶颈已引起决策者的关注（GCGET，2019）。关键原材料之所以被认为是稀缺材料，部分原因是这种材料的市场和其他所有商品市场一样，都具有周期性。当需求上升时，供应需要时间才能做出反应，新的采矿项目更是需要较长的筹备时间。该委员会注意到这些资源的地质储量丰富且分布广泛，同时也认识到开采和生产的成本通常很高且会造成污染。

本报告与该委员会的初步意见不谋而合。随着按照 1.5°C 路径加快能源转型的压力越来越大，到 2030 年需要大量部署能源转型技术。IRENA 的《世界能源转型展望》(WETO) 估计，全球必须平均每年增加 1,000 吉瓦可再生能源装机容量。WETO 还强调，对于满足高比例太阳能和风能发电需求、跨境电力贸易、运输等终端用途的电气化以及电制氢生产和贸易，配套的基础设施起到了至关重要的作用。这些技术结合在一起，极大地增加了对关键原材料的需求。

人们普遍认识到，很多关键原材料的供应链都集中在少数几个国家和几家公司手中。这种集中性给消费国和生产国都带来了脆弱性和不确定性，可能会影响能源转型技术的部署、成本和可持续性。然而，供应安全只是其中的一个问题。IRENA 一直敦促采取整体方法来处理能源转型的各方面问题，以积极主动地落实成果并管理风险。鉴于采矿作业所在社区存在劳动力标准低、被迫迁徙、水道污染和土地退化等遗留问题，这一点对于开采关键原材料来说尤为重要。此外，对关键原材料日益增长的需求为资源丰富的发展中国家带来了新的机遇，特别是让这些国家能够获取更大的经济价值。随着关键原材料市场的不断扩大，还可能出现其他经济、社会、环境和地缘政治影响。因此，必须要快速而谨慎地实现关键原材料供应链的多样化。下文概述了决策者需要考虑的一些关键因素。



© Sunshine Seeds | shutterstock.com

6
C
Carbon

若要识别潜在风险和避免行业间竞争，则必须对关键原材料需求进行全面的经济评估。

各国应根据其净零排放战略，认真评估各经济部门对关键原材料需求激增所带来的影响。目前，对这些材料的大部分需求来自于与能源转型无关的行业，包括电子、航空、国防、医疗保健以及钢铁和铝生产行业。然而，随着可再生能源技术、电池和电动汽车的推出，需求格局正在迅速演变。此外，电网的现代化和扩张也导致材料用量的增加。在中短期内，必须要始终了解不断增长的能源材料需求将如何影响总体需求，以便评估可能的权衡和战略，并避免部门和行业之间的竞争。

任何一个国家都不能单独满足其对所有关键原材料的需求，因此需要制定和实施有利于所有相关方的合作战略。

鉴于新建矿场和加工厂需要大量的筹备时间，预计在不久的将来，集中的供应链将持续存在。各国应致力于制定双重战略，在合作保持市场正常运转的同时努力实现供应链的长期多元化。很多双边、区域和行业主导的倡议都聚焦于供应链挑战，可以利用这些倡议来协调政策行动。在全球层面，IRENA 的关键原材料合作框架是一个交流知识和最佳实践的平台，可以用于协调行动，以确保矿物和材料继续支持能源转型的加速发展。

应对每种矿物进行全面的原材料评估，以充分掌握可能影响供需的依赖性、风险和创新。

尽管已确定的关键原材料清单很长，但并非所有材料对能源转型都同等重要，对其关键程度的评估也不尽相同。例如，由于创新，钷、铜和锂等成为了关键原材料的替代材料，并因此得到了更多使用。决策者应继续促进创新，以减少对特定材料的依赖，并应对与整个供需链中各种材料相关的具体挑战。由于生产中的快速创新，必须定期对关键原材料清单进行修订和评估。



© Phawat | shutterstock.com



地缘政治风险可以通过增加研发投入来缓解，研发投入将加快替代方案的产生、提高效率、扩大回收利用和再利用选择。

为防止在 2050 年前发生的重大供应挑战，可采取若干战略，但重点是这十年。其中最关键的是产品设计策略，这种策略能最大限度地减少关键原材料的使用，并对产品进行回收利用和再利用，以实现稀缺原材料的回收。最近趋势越来越好，例如电池制造商尽量减少对关键原材料供应的依赖。为了确保长期的原材料安全，决策者应该支持降低需求和促进循环经济的创新。

为了减少供需预测的不确定性，需要更高的数据透明度和对某些关键原材料的监督。

首先应收集关于储量、产量、投资和定价等因素的更详细的信息和数据，以跟踪当前供应情况并提高市场透明度。对涉及关键原材料的关键产品采用国际质量标准和认证也可以促进市场的形成。在开展这项工作的同时，还应制定并定期更新需求方案，以更清楚地了解潜在的差距和创新的影响。应对任何短期政策行动（如储备）进行仔细评估，以避免对气候行动产生意想不到的影响。

发展中国家可以开发其矿产资源并获得更多的经济价值，形成多样化战略的基石，这也有助于全球公平和稳定。

要实现供应链多样化，除了出台能够确保国内附加值和促进绿色工业化的政策之外，还必须促进发达国家和发展中国家之间的贸易和合作战略。要在外交政策接触中采取平衡和合作的方法，就需要进口国支持发展中国家的工业发展，超越关键原材料供应链中的开采模式。这需要促进伙伴关系，包括与私营部门的伙伴关系，倡导负责任的采购方式，支持生产国的能力建设，改善透明度和问责制，并投资于可持续发展的倡议。这些具体步骤可以帮助进口国促进公平的可持续性发展，确保以更包容和互利的方式采购关键原材料，同时确保材料供应链的长期韧性。

国际合作对于创建透明的市场至关重要，这些市场应具有以人权、环境管理和社区参与为基础的统一标准和规范。

能源驱动的矿业繁荣为改写传统采掘业提供了机会。各国家和企业需要积极应对围绕采矿实践已出现的问题。进口国和出口国必须合作发展供应链，在人权、环境问题和社区参与方面坚持明确的标准。这些标准对人类安全至关重要，缺乏这些标准是地缘政治不稳定的根源之一。在这方面，采矿公司应以负责任的态度管理开采过程。这就需要展开包容性对话，内容包括公平分配风险、投入、创造性贡献和由此产生的价值。在确保关键原材料价值链的公平、公正和透明方面，联合国主持下的全球合作可发挥重要作用。

参考资料

Abraham, D.S. (2017), *The elements of power: gadgets, guns, and the struggle for a sustainable future in the rare metal age* (权力的元素：稀有金属时代可持续未来的工具、武器和斗争), Yale University Press, New Haven.

African Climate Foundation (2022), *Geopolitics of Critical Minerals in Renewable Energy Supply Chains* (可再生能源供应链中关键矿物的地缘政治), The African Climate Foundation, Cape Town, https://africanclimatefoundation.org/wp-content/uploads/2022/09/800644-ACF-03_Geopolitics-of-critical-minerals-R_WEB.pdf (accessed 17 May 2023).

African Minerals Development Centre (2018), *Desktop Review of African Geological Survey Organisation Capacities and Gaps* (非洲地质调查组织能力和差距桌面审查), Economic Commission for Africa, Addis Ababa, Ethiopia, https://archive.uneca.org/sites/default/files/PublicationFiles/desktop_review_of_african_geological_survey_organisation_capacities_and_gaps_2018.pdf (accessed 15 May 2023).

Agatie, C. (2023), "Tesla Might Enter Mining Business After All, As It Mulls Sigma Lithium Buyout" (特斯拉准备收购西格玛锂业公司, 或将进军采矿业), <https://www.autoevolution.com/news/tesla-might-enter-the-mining-business-after-all-as-it-mulls-sigma-lithium-buyout-210540.html> (accessed 6 April 2023).

Agency for Natural Resources and Energy (2020), *Japan's new international resource strategy to secure rare metals* (日本保护稀有金属新国际资源战略), Agency for Natural Resources and Energy, Tokyo, https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_158.html (accessed 31 March 2023).

Albemarle (2023), *2023 Strategic Update* (2023 战略更新), https://s201.q4cdn.com/960975307/files/doc_events/2023/Jan/24/2023_01_ALB_Strategic_Update_PPT_Web.pdf

Albertin, Giorgia., et al. (2021), *Tax Avoidance in Sub-Saharan Africa's Mining Sector* (撒哈拉以南非洲采矿部门的避税行为), IMF, Washington, D.C., <https://www.imf.org/en/Publications/%20Departmental-Papers-Policy-Papers/Issues/2021/09/27/Tax-Avoidance-in-Sub-Saharan-Africas-Mining-Sector-464850>. (accessed 15 May 2023).

Ali, S.H. (2009), *Mining, the environment, and the indigenous development conflicts* (采矿、环境和土著发展冲突), University of Arizona Press, Tucson.

Anderson, R.W., and Gilbert, C. L. (1988), "Commodity Agreements and Commodity Markets: Lessons From Tin" (商品协议与商品市场：来自锡的教训), *The Economic Journal*, vol. 98/389, pp. 1, <https://doi.org/10.2307/2233509>

Anglo American (2021), *Anglo American secures 100% renewables across South American operations* (英美资源集团在南美业务中实现 100% 可再生能源), Anglo American, London, <https://www.angloamerican.com/media/press-releases/2021/15-04-2021> (accessed 12 May 2023).

Anglo American (2023), "nuGen™", <https://southafrica.angloamerican.com/our-difference/futuresmart-mining/nugen>

AngloAmerican (2022), *Integrated report 2022*, <https://www.angloamericanplatinum.com/-/media/Files/A/Anglo-American-Group/Platinum/report-archive/2022/integrated-annual-report-2022.pdf>

Asamina, H. (2022), "Japan seeks to release rare earths, 10 other critical items from China's grip" (日本希望中国能释放稀土和其他 10 种关键矿产), *Nikkei Asia*, <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Supply-Chain/Japan-seeks-to-release-rare-earths-10-other-critical-items-from-China-s-grip> (accessed 3 April 2023).

ASI (2023), "Aluminium Stewardship Initiative" (铝业管理倡议), <https://aluminium-stewardship.org/> (accessed 5 April 2023).

Attwood, J. (2023), "Peru's Violent Protests Imperil 30% of Its Copper Output" (秘鲁的暴力抗议危及其 30% 的铜产量), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-01-27/protest-surge-imperils-30-of-copper-supply-in-no-2-miner-peru#xj4y7vzk> (accessed 29 March 2023).

Awng, M. H. A. (2022), "Myanmar's environment hit by rare earth mining boom" (缅甸环境受到稀土开采热潮的冲击), *Earth Journalism Network*, <https://earthjournalism.net/stories/myanmars-environment-hit-by-rare-earth-mining-boom> (accessed 11 May 2023).

AY, U., et al. (2018), "Water Pollution Resulting From Mining Activity: An Overview" (采矿活动造成的水污染：概述), *Conference: Proceedings of the 2018 Annual Conference of the School of Engineering & Engineering Technology (SEET)* (尼日利亚阿库雷联邦理工大学工程与工程技术学院 2018 年度会议论文集), The Federal University of Technology, Akure, Nigeria, vol. 3, https://www.researchgate.net/publication/326925600_Water_Pollution_Resulting_From_Mining_Activity_An_Overview (accessed 12 May 2023).

- Ayuk, E. T., et al. (2020)**, *Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing Extractive Industries to Sustainable Development* (21 世纪的矿产资源治理: 使采掘业适应可持续发展), UNEP, Nairobi, Kenya, <https://www.resourcepanel.org/reports/mineral-resource-governance-21st-century> (accessed 13 April 2023).
- Azevedo, M., et al. (2018)**, *Lithium and cobalt – a tale of two commodities* (锂和钴——两种商品的故事), McKinsey&Company, <https://www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/industries/metals%20and%20mining/our%20insights/lithium%20and%20cobalt%20a%20tale%20of%20two%20commodities/lithium-and-cobalt-a-tale-of-two-commodities.pdf> (accessed 6 April 2023).
- Babbitt, C. W., et al. (2021)**, "The role of design in circular economy solutions for critical materials" (设计在关键材料循环经济解决方案中的作用), *One Earth*, vol. 4/3, pp. 353–62, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.02.014>
- Baker, E., et al. (2020)**, "Chapter II: Mine Tailings Facilities: Overview and Industry Trends", *Towards Zero Harm: A Compendium of Papers Prepared for the Global Tailings Review*, Global Tailings Review (《实现零伤害: 为全球尾矿审查编写的文件汇编》第 2 章: 矿山尾矿设施: 概述和行业趋势), London, <https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/towards-zero-harm.pdf> (accessed 12 May 2023).
- Bangkok Post (2021)**, "Illegal rare-earth mining surges in Myanmar" (缅甸非法稀土开采激增), *Bangkok Post*, <https://www.bangkokpost.com/world/2112407/illegal-rare-earth-mining-surges-in-myanmar> (accessed 11 May 2023).
- Banya, N. (2022)**, "Zimbabwe bans raw lithium exports to curb artisanal mining" (津巴布韦禁止出口生锂以遏制手工采矿), *Reuters*, <https://www.reuters.com/world/africa/zimbabwe-bans-raw-lithium-exports-curb-artisanal-mining-2022-12-21/> (accessed 4 April 2023).
- Barbezat, D. (1989)**, "Cooperation and Rivalry in the International Steel Cartel, 1926–1933" (1926–1933 年国际钢铁垄断合作与竞争), *The Journal of Economic History*, vol. 49/2, pp. 435–47, <https://doi.org/10.1017/S0022050700008044>
- Basquill, J. (2020)**, *South African ports reopen but lockdown confusion hits mining sector* (南非港口重新开放, 但封锁带来的混乱冲击采矿业), *Global Trade Review*, London, <https://www.gtreview.com/news/africa/south-african-ports-reopen-but-lockdown-confusion-hits-mining-sector/> (accessed 27 March 2023).
- Blakemore, R., et al. (2022)**, *Alternative Battery Chemistries and Diversifying Clean Energy Supply Chains* (替代电池化学成分和清洁能源供应链多样化), Atlantic Council Global Energy Centre, Washington, DC, <https://www.atlanticcouncil.org/wp-content/uploads/2022/09/Alternative-Battery-Chemistries-and-Diversifying-Clean-Energy-Supply-Chains.pdf> (accessed 31 March 2023).
- Blas, J. (2022)**, "Commodity Traders Can't Go 'Unregulated' Anymore" (商品交易员不能继续不受监管了), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2022-04-25/russia-s-ukraine-war-puts-spotlight-on-unregulated-opaque-commodity-trading?leadSource=uverify+wall> (accessed 6 April 2023).
- Bloomberg News (2022)**, "Russian Metal Exports Slide as Sanctions Hit Commodity Financing" (制裁打击商品融资, 俄罗斯金属出口下滑), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-02-28/russian-metal-exports-slide-as-sanctions-hit-commodity-financing#xj4y7vzkg> (accessed 27 March 2023).
- BMI (2019)**, "Manganese: The Black Art" (锰: 黑色艺术), *Benchmark Minerals*, https://www.element25.com.au/site/PDF/1771_0/BenchmarkMineralIntelligenceManganeseTheBlackArt
- BMI (2022b)**, "Lithium has to scale twenty times by 2050 as automakers face generational challenge" (汽车制造商面临世代交替的挑战, 到 2050 年锂电池规模必须扩大 20 倍), *Benchmark Minerals*, <https://source.benchmarkminerals.com/article/lithium-has-to-scale-twenty-times-by-2050-as-automakers-face-generational-challenge/>
- BNamericas (2022)**, "Brazil's Vale looking to ramp up copper, nickel output" (巴西淡水河谷希望提高铜、镍产量), <https://www.bnamericas.com/en/analysis/brazils-vale-looking-to-ramp-up-copper-nickel-output>
- BNEF (2022a)**, "2H 2022 Battery Metals Outlook: Short-Term Risks To Growth" (2022 年下半年电池金属展望: 短期风险加剧), *BloombergNEF*, <https://www.bnef.com/login?r=%2Finsights%2F30441> (accessed 28 March 2023).
- BNEF (2022b)**, "Interactive Datasets" (交互式数据集), *Bloomberg New Energy Finance*, www.bnef.com/interactive-datasets/2d5d59acd9000014
- BNEF (2023)**, *Metals: Mine supply forecast and refinery supply forecast* (金属: 矿场供应预测和精炼厂供应预测), *BloombergNEF*, London, <https://www.bnef.com/interactive-datasets/2d5d7ea4a2000001?data-hub=61> (accessed 16 June 2023).

- Boyd, R. et al. (eds.) (2016)**, "Mineral resources in the Arctic" (北极的矿产资源), Geological Survey of Norway, Trondheim, Norway, https://www.ngu.no/upload/Aktuelt/CircumArctic/Mineral_Resources_Arctic_Mainbook.pdf (accessed 24 May 2023).
- Bray, M. (1997)**, "Meddelanden från Ekonomisk-historiska institutionen vid Göteborgs universitet (Eliminating the Competition: Price-fixing and Market-sharing in the Nickel Industry 1895-1929)" (消除竞争：镍工业 1895-1929 年的价格垄断和市场份额), in European Business History Association and Göteborgs universitet (eds.), *Business and European integration since 1800: regional, national, and international perspectives*, Graphic Systems, Göteborg.
- Bryan, K., and Milne, R. (2023)**, "Norway seeks to open vast ocean area to deep-sea mining" (挪威寻求为深海采矿开放广阔海域), Financial Times, <https://www.ft.com/content/44855d32-82c2-4f4c-b77c-1c21d3c1279f> (accessed 15 June 2023).
- Buchan, D., and Errington, C. (2018)**, *Commodities Demystified: A guide to trading and the global supply chain - second edition* (商品解密：贸易和全球供应链指南 - 第二版), Trafigura Group, Singapore, <https://www.trafigura.com/brochure/commodities-demystified-a-guide-to-trading-and-the-global-supply-chain-second-edition> (accessed 6 April 2023).
- Bureau of International Recycling (BIR) (2021)**, "Non-Ferrous metals" (有色金属) (extract from Annual Report 2021), BIR, Brussels, <https://www.bir.org/the-industry/non-ferrous-metals> (accessed 4 April 2023).
- Burton, M. (2021)**, "Magnesium Buyers Warn Crunch Threatens Millions of European Jobs" (镁买家警告材料紧缩将威胁欧洲数百万就业岗位), Bloomberg, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-10-22/magnesium-buyers-warn-crunch-threatens-millions-of-european-jobs#xj4y7vzkg> (accessed 27 March 2023).
- Burton, M. (2022)**, "London Metal Exchange Trading Resumes After Five-Hour Outage" (伦敦金属交易所在五小时停电后恢复交易), Bloomberg, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-01-11/world-s-top-metals-trading-bourse-says-power-issues-cause-outage?leadSource=uverify+wall> (accessed 6 April 2023).
- Burton, M. (2023)**, "Europe Balks at Strategic Stockpile for Critical Green Metals" (欧洲在关键绿色金属的战略储备问题上犹豫不决), Bloomberg, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-03-13/europe-balks-at-strategic-stockpile-for-critical-green-metals#xj4y7vzkg> (accessed 4 April 2023).
- Burton, M., and Barrett, J. (2020)**, "Mining Australia's sacred sites" (开采澳大利亚圣地), Reuters, <https://www.reuters.com/graphics/AUSTRALIA-MINING/INDIGENOUS/oakpearaepr/> (accessed 10 May 2023).
- Business & Human Rights Centre (2022)**, "Transition Minerals Tracker" (转型矿物跟踪者), <https://www.business-humanrights.org/en/from-us/transition-minerals-tracker/> (accessed 10 May 2023).
- Byung-wook, K. (2021)**, "S. Korea to beef up critical metals stockpile" (韩国增加关键金属储备), *The Korea Herald*, <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20210805000737> (accessed 4 April 2023).
- Caceres, E. J. (2023)**, "EU green-tech homeshoring plans face resistance in Spain" (欧盟绿色技术外包计划在西班牙面临阻力), DW, <https://www.dw.com/en/spanish-lithium-eus-green-tech-homeshoring-plans-face-resistance-on-the-ground/a-64996771> (accessed 31 March 2023).
- Calam, C. (2020)**, "USGS Forms Alliance with Australia and Canada to Mine Critical Minerals" (美国地质勘探局与澳大利亚和加拿大结成关键矿物开采联盟), <https://www.thermofisher.com/blog/mining/usgs-forms-alliance-with-australia-and-canada-to-mine-critical-minerals/>
- Cang, A., and Farchy, J. (2023)**, "Chinese Group Heads to LME With Plan to Draw a Line Under Nickel Crisis" (中国集团前往伦敦金属交易所, 计划在镍危机下划清界限), Bloomberg, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-02-24/nickel-crisis-chinese-group-heads-to-lme-one-year-after-squeeze#xj4y7vzkg> (accessed 30 March 2023).
- Casey, J. (2019)**, "Artisanal mining: the dangers that come with the job" (手工采矿：工作带来的危险), *Mining Technology*, <https://www.mining-technology.com/features/artisanal-mining-the-dangers-that-come-with-the-job/> (accessed 11 May 2023).
- CERA4in1 (2017)**, "The Certification of Raw Materials" (原材料认证), <https://www.cera4in1.org/> (accessed 5 April 2023).
- Church, C., and Crawford, A. (2018)**, *Green Conflict Minerals: The fuels of conflict in the transition to a low-carbon economy* (绿色冲突矿物：向低碳经济转型中的冲突燃料), IISD, Canada, <https://www.iisd.org/system/files/publications/green-conflict-minerals.pdf> (accessed 30 March 2023).

- Clark, H. (2023)**, *Does the potential for corruption in the mining sector threaten a just energy transition?* (采矿业潜在的腐败现象是否威胁到公正的能源转型?) , World Economic Forum, <https://www.weforum.org/agenda/2023/04/corruption-in-the-mining-sector-threatens-a-just-energy-transition/> (accessed 15 May 2023).
- CNBC (2021)**, "The new U.S. plan to rival China and end cornering of market in rare earth metals" (美国与中国竞争并结束稀土金属市场垄断的新计划) , <https://www.cnbc.com/2021/04/17/the-new-us-plan-to-rival-chinas-dominance-in-rare-earth-metals.html>
- Cobalt Blue Holdings (2022)**, *The Cobalt Market* (钴业市场) , https://cobaltblueholdings.com/assets/resources/The-Cobalt-Market_Apr-22.pdf
- Cobalt institute (2021)**, "Cobalt Industry Responsible Assessment Framework (CIRAF)" (钴工业责任评估框架 (CIRAF)) , <https://www.cobaltinstitute.org/responsible-sourcing/industry-responsible-assessment-framework-ciraf/> (accessed 5 April 2023).
- Columbia Centre on Sustainable Development, et al. (2016)**, *Mapping Mining to the Sustainable Empowered lives. Resilient nations. Development Goals: An Atlas, Columbia Centre on Sustainable Development* (规划采矿业, 实现可持续的美好生活。有韧性的国家。发展目标: 哥伦比亚可持续发展中心地图集) , UNDP; UN Sustainable Development Solutions Network; World Economic Forum, Geneva, https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_Executive_Summary_FINAL.pdf (accessed 5 April 2023).
- Connor, J. (2012)**, *Price Effects of International Cartels in Markets for Primary Products* (初级产品市场国际垄断的价格效应) , Centre for Economic Policy Research (CEPR) and Consumer Unity & Trust Society (CUTS International), London, https://www.cuts-ccier.org/pdf/Trade_Competition_and_the_Pricing_of_Commodities.pdf#page=73 (accessed 29 March 2023).
- Cuffe, S. (2022)**, "The Hidden Story of a Notorious Guatemalan Nickel Mine" (危地马拉一家臭名昭著的镍矿的不为人知的故事) , *The Intercept*, <https://theintercept.com/2022/03/27/solway-guatemala-nickel-mine/> (accessed 10 May 2023).
- Daly, T., and Zhang, M. (2020)**, "China rare earths firm Shenghe hit by 'once-in-a-century' flooding" (中国稀土企业盛和公司遭遇百年一遇的洪灾) , *Reuters*, <https://www.nasdaq.com/articles/china-rare-earths-firm-shenghe-hit-by-once-in-a-century-flooding-2020-08-19> (accessed 29 March 2023).
- Daniels, J.P. (2022)**, "Consent was never given: indigenous groups oppose restarting Guatemala nickel mine" (从未同意: 土著群体反对重启危地马拉镍矿) , *The Guardian*, <https://www.theguardian.com/global-development/2022/mar/06/indigenous-groups-oppose-restarting-guatemala-nickel-mine> (accessed 10 May 2023).
- Darbar, D. (2022)**, *An overview of cobalt-free, nickel-containing cathodes for Li-ion batteries* (无钴镍阴极锂离子电池概述) , <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468606922002313>
- Deep Sea Conservation Coalition (2022)**, "Resistance to Deep-Sea Mining: Governments and Parliamentarians" (深海采矿的阻力: 政府和议员) , <https://savethehighseas.org/voices-calling-for-a-moratorium-governments-and-parliamentarians/> (accessed 17 May 2023).
- DELVE (2023)**, "A Global Platform for Artisanal & Small Scale Mining Data" (手工和小规模采矿数据的全球平台) , <https://delvedatabase.org/> (accessed 11 May 2023).
- Dempsey, H., and Ruehl, M. (2022)**, "Indonesia considers Opec-style cartel for battery metals" (印度尼西亚考虑建立 Opec 式的电池金属垄断组织) , *Financial Times*, <https://www.ft.com/content/0990f663-19ae-4744-828f-1bd659697468> (accessed 28 March 2023).
- Dempsey, H., and White, E. (2023)**, "Chile's move to control Lithium allows industry" (智利着手对锂行业实行国家控制) , *Financial Times*, <https://www.ft.com/content/6cbc4d6f-fc7f-4039-93fc-bf64421984bc> (accessed 15 June 2023).
- Diene, P.D., et al. (2022)**, *Triple Win: How Mining Can Benefit Africa's Citizens, Their Environment and the Energy Transition* (三赢: 采矿如何惠及非洲公民、其环境和能源转型) , Natural Resource Governance Institute, New York, <https://resourcegovernance.org/analysis-tools/publications/triple-win-how-mining-can-benefit-africa-citizens-their-environment-energy-transition> (accessed 5 April 2023).
- Dietsche, E. (2014)**, "Diversifying mineral economies: conceptualizing the debate on building linkages" (矿产经济多样化: 将建立联系的辩论概念化) , *Mineral Economics*, vol. 27/2-3, pp. 89-102, <https://doi.org/10.1007/s13563-014-0058-4>
- Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, European Commission (n.d.)**, "Raw Materials Diplomacy" (原材料外交) , *Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, European Commission*,

https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/raw-materials-diplomacy_en (accessed 3 April 2023).

Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries (2022), *Setting the course for a sustainable blue planet – Joint Communication on the EU's International Ocean Governance agenda* (为可持续发展的蓝色星球设定路线 – 关于欧盟国际海洋治理议程的联合通报), European Commission, Brussels, https://oceans-and-fisheries.ec.europa.eu/publications/setting-course-sustainable-blue-planet-joint-communication-eus-international-ocean-governance-agenda_en (accessed 5 April 2023).

Directorate-General for Trade, European Commission (2017), "Conflict Minerals Regulation" (欧盟冲突矿产法规), https://policy.trade.ec.europa.eu/development-and-sustainability/conflict-minerals-regulation_en (accessed 5 April 2023).

Dufour, A. (2023), "Changes to Mining Act expose cracks in Ontario's duty to consult with First Nations" (采矿法的修改暴露了安大略省与第一民族协商义务的漏洞), *CBC*, <https://www.cbc.ca/news/canada/sudbury/bill-71-build-more-mines-faster-industry-consent-1.6823647> (accessed 10 May 2023).

Elkind, E. N., et al. (2021), *Sustainable Drive Sustainable Supply: Priorities to Improve the Electric Vehicle Battery Supply Chain* (可持续驱动可持续供应: 改善电动汽车电池供应链的优先事项), Centre for Law, Energy, & the Environment and Natural Resource Governance Institute, <https://resourcegovernance.org/sites/default/files/documents/sustainable-drive-sustainable-supply-priorities-to-improve-the-electric-vehicle-battery-supply-chain.pdf> (accessed 5 April 2023).

Els, F. (2022), "Graphite poised to do a lithium" (石墨公司准备好生产锂产品), <https://www.mining.com/graphite-poised-to-do-a-lithium/>

Emsbo, P., et al. (2021), "Geological Surveys Unite to Improve Critical Mineral Security" (地质调查联合改善关键矿产安全), *EoS*, <https://eos.org/science-updates/geological-surveys-unite-to-improve-critical-mineral-security> (accessed 4 March 2023).

Energy Transitions Commission (2023), *Material and resource requirements for the energy transition* (能源转型的材料和资源要求), Energy Transitions Commission

Environment Justice Foundation (2023), *Towards the abyss: how the rush to deep-sea mining threatens people and our planet* (走向深渊: 深海采矿热潮如何威胁人类和我们的星球), Environment Justice Foundation, London, <https://ejfoundation.org/resources/downloads/towards-the-abyss-ejf-deep-sea-mining-report.pdf> (accessed 5 April 2023).

ERGI (2019), "Energy Resource Governance Initiative Toolkit" (能源资源治理倡议工具包), <https://ergi.tools>, <https://ergi.tools/> (accessed 2 April 2023).

Erickson, C. (2022), "Graphite emissions fuel search for solutions along EV supply chain" (石墨排放助推电动汽车供应链寻找解决方案), <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/graphite-emissions-fuel-search-for-solutions-along-ev-supply-chain-69599516>

Ericsson, M., and Olöf, O. (2019), "Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016" (1996年至2016年矿业对国民经济的贡献), *Mineral Economics*, vol. 32/2, pp. 223–50, <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00191-6>

ERMA (2020), "European Raw Materials Alliance" (欧洲原材料联盟), <https://erma.eu>, <https://erma.eu/> (accessed 3 April 2023).

Euro Manganese (2022), "EMN Announces Positive Feasibility Study Base Case Results for the Chvaletice Manganese Project" (EMN 宣布 Chvaletice 锰矿项目可行性研究基本案例结果乐观), <https://www.mn25.ca/post/emn-announces-positive-feasibility-study-base-case-results-for-the-chvaletice-manganese-project#:~:text=The%20total%20Mn%20market%20in,of%20the%20global%20manganese%20market>

Eurometaux (2022), *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge* (用于清洁能源的金属: 解决欧洲原材料挑战的途径), <https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf>

European Aluminium (2020), *Circular Aluminium Action Plan: A Strategy for Achieving Aluminium's Full Potential for Circular Economy by 2030* (循环经济铝行动计划: 到2030年充分发挥铝在循环经济中潜力的战略), European Aluminium, Brussels, https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/08/2020-05-13_european-aluminium_circular-aluminium-action-plan_executive-summary.pdf (accessed 12 May 2023).

European Commission (2011), *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials* (欧盟委员会至欧洲议会、理事会、欧洲经济和社会委员会以及地区委员会的信

函：应对商品市场和原材料方面的挑战），European Commission, Brussels, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0025&from=EN> (accessed 3 April 2023).

European Commission (2020), "Communication from the Commission Guidelines on certain State aid measures in the context of the system for greenhouse gas emission allowance trading post-2021 2020/C 317/04" (欧盟委员会关于 2021 年后温室气体排放配额交易体系中某些国家援助措施的准则的通报-2020/C 317/04), *Official Journal of the European Union*, vol. C 317/5, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020XC0925%2801%29> (accessed 6 February 2023).

European Commission (2022), *Green Deal: EU agrees new law on more sustainable and circular batteries to support EU's energy transition and competitive industry* (绿色交易：欧盟同意关于更可持续和循环电池的新法律，以支持欧盟的能源转型和竞争性行业)，European Commission, Brussels, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_7588 (accessed 17 May 2023).

European Economic and Social Committee, European Commission (2020), "Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability" (关键原材料韧性：为实现更高的安全性和可持续性指明道路)，<https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions/critical-raw-materials-resilience-charting-path-towards-greater-security-and-sustainability> (accessed 4 April 2023).

Executive Office of the President (2017), "Executive Order 13817 of December 20, 2017: A Federal Strategy To Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals" (2017 年 12 月 20 日第 13817 号行政命令：确保关键矿物安全可靠供应的联邦战略)，Federal Register, <https://www.federalregister.gov/documents/2017/12/26/2017-27899/a-federal-strategy-to-ensure-secure-and-reliable-supplies-of-critical-minerals> (accessed 31 March 2023).

Fair Cobalt Alliance (2020), "Fair Cobalt Alliance Website" (公平钴联盟网站)，<https://www.faircobaltalliance.org/> (accessed 5 April 2023).

Farchy, J., et al. (2022), "The 18 Minutes of Trading Chaos That Broke the Nickel Market" (破坏镍市场的 18 分钟混乱交易)，*Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-03-14/inside-nickel-s-short-squeeze-how-price-surges-halted-lme-trading#xj4y7vzkg> (accessed 30 March 2023).

Fastmarkets (2023), *Synthetic versus natural graphite debate rages on: 2023 preview* (合成石墨与天然石墨之争仍在继续：2023——预览版)，<https://www.fastmarkets.com/insights/synthetic-versus-natural-graphite-debate#:~:text=Total%20apparent%20demand%20for%20natural,1.25%20million%20tonnes%20in%202022>

Federal Register of Legislation (2021), "Foreign Investment Reform (Protecting Australia's National Security) Act 2020" (2020 年外国投资改革 (保护澳大利亚国家安全) 法案)，<https://www.legislation.gov.au/Details/C2021C00358> (accessed 29 March 2023).

Feffer, J. (2023), "Battling a Mining Goliath on Two Continents" (两大洲与矿业巨头的抗争)，*Foreign Policy in Focus (FPiF)*, <https://fpif.org/battling-a-mining-goliath-on-two-continents/> (accessed 2 April 2023).

Fleming, S. (2018), "The hidden cost of the electric car boom – child labour" (电动汽车热潮的隐藏成本——童工)，<https://www.weforum.org/agenda/2018/09/the-hidden-cost-of-the-electric-car-boom-child-labour/> (accessed 11 May 2023).

Fliessi, B., et al. (2017), *Export controls and competitiveness in African mining and minerals processing industries* (非洲采矿和矿物加工业的出口管制和竞争力)，OECD Trade Policy Papers, No. 204 (Volume 204), <https://doi.org/10.1787/1fd8828-en>

Florence Bascom Geoscience Center (2019), *Special Geologic Studies: Artisanal and small-scale mining of conflict minerals* (特殊地质研究：冲突矿物的手工和小规模开采)，United States, <https://www.usgs.gov/centers/florence-bascom-geoscience-center/science/special-geologic-studies-artisanal-and-small#overview> (accessed 10 May 2023).

Fox, S.J. (2022), "'Exploiting – land, sea and space: Mineral superpower' In the name of peace: A critical race to protect the depths and heights" ("开发——陆地、海洋和太空：矿物超级大国" 以和平之名：一场保护深海和高地的关键竞赛)，*Resources Policy*, vol. 79, pp. 103066, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103066>

Frontier (2022), "Collapse in minerals exports robs junta of key revenue" (矿产出口的崩溃剥夺了军政府的主要收入)，Frontier Myanmar, <https://www.frontiermyanmar.net/en/collapse-in-minerals-exports-robs-junta-of-key-revenue/> (accessed 29 March 2023).

- Frost, R. (2023)**, "Mining Europe's biggest rare earth deposit could make life 'impossible' for Sámi communities" (开采欧洲最大的稀土矿藏可能使萨米社区的生活难上加难), *Euronews*, <https://www.euronews.com/green/2023/02/11/mining-europes-biggest-rare-earth-deposit-could-make-life-impossible-for-sami-communities> (accessed 2 April 2023).
- Fu, X. (2020)**, *Perspectives on Cobalt Supply through 2030 in the Face of Changing Demand* (面对不断变化的需求, 展望 2030 年之前的钴供应情况), https://ceder.berkeley.edu/publications/2020_cobalt_resource_review.pdf
- G7 Hiroshima Summit (2023)**, "Annex to the Climate, Energy and Environment Ministers' Communiqué Five-Point Plan for Critical Minerals Security" (气候、能源和环境部长公报附件: 关键矿产安全五点计划), G7 Hiroshima Summit 2023, <https://www.meti.go.jp/information/g7hirosima/energy/pdf/Annex005.pdf> (accessed 25 May 2023).
- Garcia, D. M. (2020)**, *Rare-Earth Demand in Clean Energy* (清洁能源中的稀土需求), BloombergNEF, London, <https://www.bnef.com/insights/24159> (accessed 27 March 2023).
- Garvey, M. (2021)**, "Commodities Outlook" (商品展望), *Macquarie*, <https://content.macquarie.com/macquarie-capital/asia/2021/events/indo-mining-mar/Global%20metal%20outlook.pdf>
- GBA (2017)**, "Establishing a Sustainable and Responsible Battery Value Chain" (建立可持续和负责任的电池价值链), <https://www.globalbattery.org/about/> (accessed 5 April 2023).
- GCGET (2019)**, *A new world: The geopolitics of the energy transformation* (新世界: 能源转型的地缘政治), Global Commission on the Geopolitics of Energy Transformation and International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, <https://www.irena.org/Publications/2019/Jan/A-New-World-The-Geopolitics-of-the-Energy-Transformation>
- Gholz, E., and Hughes, L. (2021)**, "Market structure and economic sanctions: the 2010 rare earth elements episode as a pathway case of market adjustment" (市场结构和经济制裁: 作为市场调整途径案例的 2010 年稀土元素事件), *Review of International Political Economy*, vol. 28/3, pp. 611–34, <https://doi.org/10.1080/09692290.2019.1693411>
- Gielen, D. (2021a)**, *Critical Materials For The Energy Transition* (能源转型的关键原材料), International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, <https://irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition>
- Gielen, D., and Lyons, M. (2022a)**, *Critical Materials for the Energy Transition: Rare Earth Elements* (能源转型的关键原材料: 稀土元素), International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab Emirates, www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition-Rare-Earth-elements
- Gielen, D., and Lyons, M. (2022b)**, *Critical Materials for the Energy Transition: Lithium* (能源转型的关键原材料: 锂), International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition-Lithium
- Giese, E. C. (2022)**, "Strategic minerals: Global challenges post-COVID-19" (战略矿产: 新冠肺炎疫情后的全球挑战), *The Extractive Industries and Society*, vol. 12, pp. 101113, <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101113>
- GlobalTailingsReview.org (2020)**, *Global Industry Standard on Tailings Management* (全球尾矿管理行业标准), GlobalTailingsReview.org, https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_EN.pdf (accessed 16 June 2023).
- GlobalX Research Team (2016)**, "What to Know: 5 Facts about Lithium" (必备知识: 关于锂的 5 个事实), *Global X Insights*, <https://www.globalxetfs.com/what-to-know-5-facts-about-lithium/> (accessed 14 April 2023).
- Gocht, W.R. et al. (1988)**, *International Mineral Economics: Mineral Exploration, Mine Valuation, Mineral Markets, International Mineral Policies* (国际矿产经济学: 矿产勘探、矿山估价、矿产市场、国际矿产政策), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Government of Canada (2022)**, "Graphite facts" (石墨事实), <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/graphite-facts/24027>
- Government of Canada (2022)**, "Sustainable Critical Minerals Alliance Statement" (可持续关键矿产联盟声明), <https://www.canada.ca/en/campaign/critical-minerals-in-canada/our-critical-minerals-strategic-partnerships.html> (accessed 3 April 2023).
- Government of Chile (2023)**, "National Lithium Strategy" (国家锂战略), <https://www.gob.cl/litioporchile/en/> (accessed 16 May 2023).
- Government of Western Australia (2022)**, *Western Australia A Global Battery and Critical Minerals Hub* (西澳大利亚全球电池和关键矿产中心), Department of Jobs, Tourism, Science and Innovation, Perth, https://www.wa.gov.au/system/files/2022-07/220630_Battery%20and%20Critical%20Minerals_Prospectus-Web.pdf (accessed 6 April 2023).
- Gregoir, L., and van Acker, K. (2022)**, *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge* (用于清洁能源的金属: 解决欧洲原材料挑战的途径), KU Leuven, Belgium, <https://euagenda.eu/>

publications/metals-for-clean-energy-pathways-to-solving-europe-s-raw-materials-challenge (accessed 4 April 2023).

Gregory L. White (2002), "A Mismanaged Palladium Stockpile Was Catalyst for Ford's Write-Off" (管理不善钯库存是福特摆脱债务的催化剂), *Wall Street Journal*, <https://www.wsj.com/articles/SBI012944717336886240> (accessed 4 April 2023).

GRI (Global Reporting Initiative) (2023), "The global leader for impact reporting: Services and support" (影响报告的全局领导者: 服务和支持), <https://www.globalreporting.org/about-gri/> (accessed 5 April 2023).

Gulley, A. L. (2022), "One hundred years of cobalt production in the Democratic Republic of the Congo" (刚果民主共和国钴生产的百年历史), *Resources Policy*, vol. 79, pp. 103007, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103007>

Gyamfi, E., et al. (2019), "Potential heavy metal pollution of soil and water resources from artisanal mining in Kokoteasua, Ghana" (加纳 Kokoteasua 手工采矿对土壤和水资源造成的潜在重金属污染), *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 8, pp. 450–6, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.01.007>

Hendrix, C. S. (2022), *22-16 Building Downstream Capacity for Critical Minerals in Africa: Challenges and Opportunities* (22-16 建设非洲关键矿产的下游能力: 挑战和机遇), Peterson Institute for International Economics, Washington, DC, <https://www.piie.com/sites/default/files/2022-12/pb22-16.pdf> (accessed 30 March 2023).

Hendrix, C., and Bazilian, M. (2022), "Markets for Critical Minerals Are Too Prone to Failure" (关键矿场市场极易失败), *Barron's*, <https://www.barrons.com/articles/markets-critical-minerals-lithium-cobalt-copper-51671227168> (accessed 29 March 2023).

Hill, M., and Mitimngi, T. C. (2022), "Zambia Plans Mine-Tax Concessions While Trimming Budget Deficit" (赞比亚计划在削减预算赤字的同时减免矿税), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-09-30/zambia-plans-mine-tax-concessions-while-trimming-budget-deficit?leadSource=verify%20wall> (accessed 12 May 2023).

Hillman, J. (2010), *The International Tin Cartel* (1st edition.) (国际锡垄断: 第1版), Routledge, London, <https://www.routledge.com/The-International-Tin-Cartel/Hillman/p/book/9781138989474#> (accessed 28 March 2023).

Hilson, G. (2002), "Small-scale mining and its socio-economic impact in developing countries" (小规模采矿及其对发展中国家的社会经济影响), *Natural Resources Forum*, vol. 26/1, pp. 3–13, <https://doi.org/10.1111/1477-8947.00002>

Ho, Y., and Listiyorini, E. (2022), "Chinese Companies Are Flocking to Indonesia for Its Nickel" (中国企业纷纷涌入印尼获取镍), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-12-15/chinese-companies-are-flocking-to-indonesia-for-its-nickel?leadSource=verify+wall> (accessed 4 April 2023).

Holzman, J. (2022), "Exclusive: Behind Biden's overseas mining funding" (独家报道: 拜登资助海外采矿的背后), *AXIOS*, <https://www.axios.com/2022/12/12/biden-overseas-mining-funding> (accessed 3 April 2023).

Home, A. (2021), "Column: China's super-charged buying reshapes the copper market" (专栏: 中国超强购买力重塑铜市场), *Reuters*, <https://www.reuters.com/article/us-metals-copper-ahome-column-idUSKBN2CM1G5> (accessed 3 April 2023).

Huber, I. (2021), *Indonesia's Nickel Industrial Strategy* (印尼镍工业战略), CSIS, Washington, DC, <https://www.csis.org/analysis/indonesias-nickel-industrial-strategy> (accessed 4 April 2023).

Hume, N. (2021), "China's magnesium shortage threatens global car industry" (中国镁短缺威胁全球汽车工业), *Financial Times*, <https://www.ft.com/content/1611e936-08a5-4654-987e-664f50133a4b> (accessed 27 March 2023).

Humphreys, D. (2011), "Pricing and trading in metals and minerals" (金属和矿物的定价和交易), *SME Mining Engineering Handbook* (Third.), US, <https://www.smenet.org/productdetail?ProductID=2824786> (accessed 6 April 2023).

Hund, K., and Reed, E. (2019), "A low-carbon future must protect the world's forests" (低碳未来必须保护世界森林), *World Bank Blogs*, <https://blogs.worldbank.org/voices/low-carbon-future-must-protect-worlds-forests> (accessed 12 May 2023).

- ICMM (2014)**, *Water Stewardship Framework* (水资源管理框架), ICMM, London, <https://www.icmm.com/en-gb/guidance/environmental-stewardship/2014/water-stewardship> (accessed 16 June 2023).
- ICMM (2021)**, *Tailings Management: Good Practice Guide* (尾矿管理: 良好实践指南), ICMM, London, <https://www.icmm.com/en-gb/guidance/innovation/2021/tailings-management-good-practice> (accessed 16 June 2023).
- ICMM (2022a)**, *Tailings Reduction Roadmap* (尾矿减少路线图), ICMM, London, https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/innovation/2022/roadmap_tailings-reduction.pdf?cb=20771 (accessed 16 June 2023).
- ICMM (2022b)**, "Mining principles" (采矿原则), <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/mining-principles/principle-1> (accessed 5 April 2023).
- IEA (2021)**, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions* (关键矿产在清洁能源转型中的作用), IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (accessed 6 April 2023).
- IEA (2022)**, *Climate Resilience for Energy Security* (气候适应力促进能源安全), IEA, Paris, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/10229b31-fd82-4371-b92c-a554f95369ea/ClimateResilienceforEnergySecurity.pdf> (accessed 29 March 2023).
- IFC (2012)**, *IFC Performance Standards on Environmental and Social Sustainability – Effective January 1, 2012* (国际金融公司环境和社会可持续性绩效标准 – 2012年1月1日生效), (p. 72), IFC, Washington, D.C., https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/publications_handbook_pps (accessed 5 April 2023).
- IHS Markit (2022)**, "The Future of Copper: Will the looming supply gap short-circuit the energy transition?" (铜的未来: 迫在眉睫的供应缺口是否会导致能源转型), S&P, https://cdn.ihsmarkit.com/www/pdf/0722/The-Future-of-Copper_Full-Report_14July2022.pdf
- Implats (2022)**, "Mineral Resource and Mineral Reserve Statement as at 30 June 2022" (截至2022年6月30日的矿产资源和矿产储量报表), <https://www.implats.co.za/pdf/mrr-2022/Implats-Mineral-Resources-and-Mineral-Reserves-Report-2022.pdf>
- Innovation News network (2023)**, "How will Chile nationalise its huge lithium industry?" (智利将如何将其庞大的锂产业国有化?), *Innovation News network*, <https://www.innovationnewsnetwork.com/how-will-chile-nationalise-huge-lithium-industry/32088/> (accessed 16 May 2023).
- International Seabed Authority (2023)**, "Exploration Contracts" (勘探合同), <https://www.isa.org/jm/exploration-contracts/> (accessed 5 April 2023).
- IPCC (2021)**, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (2021年气候变化: 物理科学基础. 第一工作组为政府间气候变化专门委员会第六次评估报告提供的资料), Cambridge University Press, Cambridge, and New York, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (accessed 24 May 2023).
- IRENA (2022a)**, *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway* (世界能源转型展望 2022: 1.5°C 路径), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf?rev=6ff451981b0948c6894546661c6658a1
- IRENA (2022b)**, *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor* (能源转型的地缘政治: 氢因素), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf?rev=1cfe49eee979409686f101ce24ffd71a
- IRENA (2023)**, *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway - Preview* (世界能源转型展望 2023: 1.5°C 路径——预览版), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2023> (accessed 16 May 2023).
- IRENA (forthcoming)**, *Critical Materials for the Energy Transition: EV batteries* (能源转型关键原材料: 电动汽车电池), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- IRENA and NUPI (forthcoming)**, *Constructing a Global List of Critical Materials for the Energy Transition* (构建能源转型关键原材料全球清单), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, and Norwegian Institute of International Affairs.
- IRMA (2006)**, "Initiative for Responsible Mining assurance" (负责任采矿保证倡议), <https://responsiblemining.net/> (accessed 5 April 2023).
- ISO (2023a)**, "ISO/TC 298 – Rare earth" (ISO/TC 298 – 稀土), <https://www.iso.org/committee/5902483.html>
- ISO (2023b)**, "ISO/TC 333 – Lithium" (ISO/TC 333 – 锂), <https://www.iso.org/committee/8031128.html>

ITSCI (2010), "ITSCI website" (ITSCI 网站), <https://www.itsci.org/> (accessed 5 April 2023).

Iturrieta, F. (2017), "Tired but satisfied, Escondida miners pack up after historic strike" (疲惫但很满足, 埃斯孔迪达矿工历史性罢工告一段落), *Reuters*, <https://www.reuters.com/article/uk-chile-copper-escondida-idUKKBN16V2TA> (accessed 29 March 2023).

Jerez, B., et al. (2021), "Lithium extractivism and water injustices in the Salar de Atacama, Chile: The colonial shadow of green electromobility" (智利阿塔卡马盐湖的锂开采和水资源不公平现象: 绿色电动汽车的殖民阴影), *Political Geography*, vol. 87, pp. 102382, <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2021.102382>

Johnson Matthey (2022), "PGM market report" (PGM 市场报告), <https://matthey.com/documents/161599/509428/PGM-market-report-May-2022.pdf/542bcada-f4ac-a673-5f95-ad1bbfca5106?t=1655877358676>

Jones, B., et al. (2023), "The electric vehicle revolution: Critical material supply chains, trade and development" (电动汽车革命: 关键原材料供应链、贸易和发展), *The World Economy*, vol. 46/1, pp. 2-26, <https://doi.org/10.1111/twec.13345>

JRC (2020), "Forecast of rare earths supply and demand - wind energy and e-mobility" (稀土供需预测 - 风能和电动汽车), <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/aalfc9e1-360d-478e-a6da-51b092f30d32>

Junne et al. (2020), "Critical materials in global low-carbon energy scenarios: The case for neodymium, dysprosium, lithium, and cobalt" (全球低碳能源方案中的关键原材料: 钕、镝、锂和钴的案例), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544220316406>

Jupiter Mines (2023), *Company Strategy Update* (公司战略更新), <https://www.jupitermines.com/cproot/1144/3/20230331%20Company%20Strategy%20Update.pdf>

Karali, N., and Shah, N. (2022), "Bolstering supplies of critical raw materials for low-carbon technologies through circular economy strategies" (通过循环经济战略促进低碳技术关键原材料的供应), *Energy Research & Social Science*, vol. 88, pp. 102534, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102534>

Kim, K. (2023), "Indonesia's uncertain climb up the nickel value chain" (印度尼西亚在镍价值链上的不确定攀升), *The Interpreter published daily by The Lowy Institute*, <https://www.loyyinstitute.org/the-interpreter/indonesia-s-uncertain-climb-nickel-value-chain> (accessed 15 May 2023).

King, The Hon. Madeleine, MP (2023), "Strong demand for minerals for low-emissions technology" (低排放技术对矿物的强烈需求), Ministry for the Department of Industry, Science and Resources, Government of Australia, <https://www.minister.industry.gov.au/ministers/king/media-releases/strong-demand-minerals-low-emissions-technology> (accessed 6 April 2023).

Kooroshy, J., et al. (2014), *Cartels and Competition in Minerals Markets: Challenges for Global Governance* (矿产市场中的垄断和竞争: 全球治理的挑战), Chatham House, London, https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/field/field_document/20141219CartelsCompetitionMineralsMarketsKooroshyPrestonBradleyFinal.pdf (accessed 28 March 2023).

Kowalski, P., and Legendre, C. (2023), *Raw materials critical for the green transition: Production, international trade and export restrictions* (绿色转型关键原材料: 生产、国际贸易和出口限制), OECD Trade Policy Papers (Volume 273), OECD, Paris, <https://doi.org/10.1787/11889f2a-en>

Kozinn, B. E. (2000), "The great copper caper: Is market manipulation really a problem in the wake of the sumitomo debacle" (铜业巨大变化: 在住友商事破产之后, 市场操纵真会成为一个问题吗), *Fordham L. Review*, vol. 69, https://fordhamlawreview.org/wp-content/uploads/assets/pdfs/Vol_69/Kozinn_October.pdf (accessed 30 March 2023).

Krane, J., and Idel, R. (2021), "More transitions, less risk: How renewable energy reduces risks from mining, trade and political dependence" (更多转型, 更少风险: 可再生能源如何降低采矿、贸易和政治依赖的风险), *Energy Research & Social Science*, Vol. 82, 102311.

KU Leuven (2022), *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge* (用于清洁能源的金属: 解决欧洲原材料挑战的路径), KU Leuven, Leuven, Belgium, <https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf> (accessed 12 May 2023).

Kügerl, M.-T., et al. (2023), "Responsible sourcing for energy transitions: Discussing academic narratives of responsible sourcing through the lens of natural resources justice" (负责的能源转型采购: 从自然资源公正的角度讨论负责任采购的学术叙述), *Journal of Environmental Management*, vol. 326, pp. 116711, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116711>

Landrigan, P., et al. (2022), "Reducing disease and death from Artisanal and Small-Scale Mining (ASM) – the urgent need for responsible mining in the context of growing global demand for minerals and metals for climate change mitigation" (减少手工和小规模采矿 (ASM) 造成的疾病和死亡——在全球对减缓气候变化所需矿物和金属需求不断增长的背景下, 迫切需要负责任的采矿), *Environmental Health*, vol. 21/1, pp. 78, <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00877-5>

Laporte-Bisquit, A., and Morgan, A. (2019), "Digging Deeper: How WWF's Water Risk Filter is unearthing new insights in the mining sector" (深挖: WWF 的水风险评估工具如何挖掘采矿业的新见解), WWF, <https://wwf.medium.com/digging-deeper-how-wwfs-water-risk-filter-is-unearting-new-insights-in-the-mining-sector-9494760746a> (accessed 12 May 2023).

Lazzaro, N. (2022), "UBS raises LFP global battery market share outlook to 40% by 2030" (瑞银集团将 LFP 全球电池市场份额展望提高到 2030 年的 40%), *spglobal*, <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/081622-ubs-raises-lfp-global-battery-market-share-outlook-to-40-by-2030>

LeadLeo (2022), "2022 China Graphite Industry Analysis" (2022 年中国石墨行业分析), https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202209211578571379_1.pdf?1663789973000.pdf

League of Nations (1937), *Report of the Committee for the Study of the problem of Raw Materials* (研究原材料问题委员会的报告), League of Nations, Geneva, <https://archives.ungeneva.org/report-of-the-committee-for-the-study-of-the-problem-of-raw-materials> (accessed 27 March 2023).

Listiyorini, E., and Harsono, N. (2022), "Indonesia Wants an 'OPEC-like' Organization for Nickel" (印尼希望建立一个类似 OPEC 的镍业组织), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-11-16/indonesia-wants-an-opec-like-organization-for-nickel#xj4y7vzkg> (accessed 28 March 2023).

LME (2019), "Responsible Sourcing" (负责任的采购), <https://www.lme.com/en/About/Responsibility/Responsible-sourcing> (accessed 5 April 2023).

LME (2023), "Non-ferrous metals" (有色金属), <https://www.lme.com/en/metals/> (accessed 6 April 2023).

Loginova, J., et al. (2023), *The Changing Arctic and Just Energy Transitions: Exploring Patterns of Community Consultation and Consent* (不断变化的北极和公正的能源转型: 探索社区协商和同意的模式), Centre for Social Responsibility in Mining (CSRMI), St Lucia, Queensland, <https://storymaps.arcgis.com/collections/2b89511600db49dd90a96c3cdaf7be35?item=1> (accessed 24 May 2023).

Lovins, A. (2022), *Six Solutions to Battery Mineral Challenges* (电池矿物挑战的六种解决方案), RMI, Boulder, CO, <https://rmi.org/insight/six-solutions-to-battery-mineral-challenges/> (accessed 4 April 2023).

Luckeneder, S., et al. (2021), "Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems" (全球金属开采激增威胁脆弱的生态系统), *Global Environmental Change*, vol. 69, pp. 102303, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102303>

Lunde Seefeldt, J. (2022), "Water as property: Contention between indigenous communities and the lithium industry for water rights in Chile" (水作为财产: 智利原住民社区和锂工业之间对水权的争夺), *Latin American Policy*, vol. 13/2, pp. 328–53, <https://doi.org/10.1111/lamp.12265>

Lyng, G. (2022), "AZO Mining", *Integrating Solar Energy into Copper Mining* (将太阳能用于铜矿开采), <https://www.azominer.com/Article.aspx?ArticleID=1640> (accessed 6 April 2023).

MacDonald, A. (2022), "This Russian Metals Giant Might Be Too Big to Sanction" (这个俄罗斯金属巨头可能过于庞大, 以至于无法制裁), *Wall Street Journal*, <https://www.wsj.com/articles/this-russian-metals-giant-might-be-too-big-to-sanction-11646559751> (accessed 27 March 2023).

Maconachie, R., and Hilson, G. (2011), "Safeguarding livelihoods or exacerbating poverty? Artisanal mining and formalization in West Africa" (保障生计还是加剧贫困? 西非的手工采矿和正规化), *Natural Resources Forum*, vol. 35/4, pp. 293–303, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-8947.2011.01407.x>

Malone, A., and Bazilian, M. (2023), "Chile Is Nationalizing Lithium. It May Not Go How Nervous Investors Expect", *Barrons* (智利正在促进锂产业国有化。投资者可能不会如预期般焦虑), <https://www.barrons.com/articles/chile-is-nationalizing-lithium-investors-batteries-markets-95f2ca69> (accessed 16 May 2023).

Marawanyika, G., and Ndlovu, R. (2022), "Raw Lithium Exports Banned in Zimbabwe as Demand and Prices Soar" (随着需求和价格飙升, 津巴布韦禁止原锂出口), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-12-20/zimbabwe-bans-raw-lithium-exports-with-immediate-effect?leadSource=uverify%20wall> (accessed 15 June 2023).

- Mares, D. R. (2022)**, "Understanding Cartel Viability: Implications for a Latin American Lithium Suppliers Agreement" (了解垄断的可行性: 拉丁美洲锂供应商协议的影响), *Energies*, vol. 15/15, pp. 5569, <https://doi.org/10.3390/en15155569>
- Maulia, E., and Damayanti, I. (2023)**, "Indonesia's nickel riches spur local company EV, battery ambition" (印尼丰富的镍资源激发了当地公司生产电动汽车和电池的雄心壮志), *Financial Times*, <https://www.ft.com/content/004fdfa6-dbd1-4af8-9777-8c2df4d51d79> (accessed 4 April 2023).
- Maus, V., et al. (2020)**, "A global-scale data set of mining areas" (全球规模的矿区数据集), *Scientific Data*, vol. 7/1, pp. 289, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00624-w>
- McFarland, M. (2022)**, *The next holy grail for EVs: Batteries free of nickel and cobalt* (电动汽车的下一个圣杯: 不含镍和钴的电池), CNN, <https://edition.cnn.com/2022/06/01/cars/tesla-lfp-battery/index.html>
- McKinsey (2022)**, *Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular* (电池 2030: 韧性、可持续性和循环性), <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>
- McKinsey (2023)**, *Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular* (电池 2030: 韧性、可持续性和循环性), <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>
- McVeigh, K. (2021)**, "Conservationists call for urgent ban on deep-sea mining" (自然资源保护主义者呼吁紧急禁止深海采矿), *The Guardian*, <https://www.theguardian.com/environment/2021/sep/09/marseille-biodiversity-summit-adopts-motion-to-ban-deep-sea-mining> (accessed 5 April 2023).
- Meißner, S. (2021)**, "The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities – A GIS-Based Water Impact Assessment" (金属采矿对全球水资源压力和区域承载能力的影响——基于 GIS 的水资源影响评估), *Resources*, vol. 10/12, pp. 120, <https://doi.org/10.3390/resources10120120>
- Miller, K. A., et al. (2018)**, "An Overview of Seabed Mining Including the Current State of Development, Environmental Impacts, and Knowledge Gaps" (海底采矿概述, 包括发展现状、环境影响和知识差距), *Frontiers in Marine Science*, vol. 4, <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418>
- Minerals Council of Australia (2022)**, "Commodity Demand Outlook 2030" (2030 年商品需求展望), <https://minerals.org.au/wp-content/uploads/2022/12/Commodity-Outlook-2030.pdf>
- Mining.com (2021)**, "Top 14 UBS battery metals forecasts after VW teardown" (瑞银在大众转型后对电池金属的 14 大预测), <https://www.mining.com/top-14-ubs-battery-metals-forecasts-after-vw-teardown/>
- Mining.com (2022)**, "Chilean think-tank says Codelco pays more taxes but extracts less copper than private companies" (智利智囊团称, Codelco 缴税多, 但开采的铜矿却比私营公司少), *Mining.com*, <https://www.mining.com/chilean-think-tank-says-codelco-pays-more-taxes-but-extracts-less-copper-than-private-companies/> (accessed 16 May 2023).
- Ministry of Commerce & Industry, Government of India (2021)**, *Australia-India-Japan Trade Ministers' Joint Statement on Launch of Supply Chain Resilience initiative* (澳大利亚、印度、日本贸易部长有关启动增加供应链韧性倡议的联合声明), PIB, Delhi, <https://pib.gov.in/PressReleaselframePage.aspx?PRID=1714362> (accessed 3 April 2023).
- Mitchell, C., and Deady, E. (2021)**, "Graphite resources, and their potential to support battery supply chains, in Africa" (非洲的石墨资源及其支持电池供应链的潜力), *British Geological Survey*, https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/531119/1/Graphite%20supply%20chains%20in%20Africa_Report.pdf
- Mohammed Banchirigah, S. (2006)**, "How have reforms fuelled the expansion of artisanal mining? Evidence from sub-Saharan Africa" (改革如何助长了手工采矿的扩张? 撒哈拉以南非洲的实例), *Resources Policy*, vol. 31/3, pp. 165–71, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2006.12.001>
- Moore Finance (2022)**, "CITIC Securities: It is estimated that the demand for manganese will reach more than 1.4 million tons in 2030, an increase of 11 times" (中信证券: 预计到 2030 年, 锰的需求量将达到 140 多万吨, 增长 11 倍), <https://www.jiemian.com/article/7918288.html>
- Mudd, G.M. (2010)**, "The Environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints" (澳大利亚矿业的环境可持续性: 主要大趋势和迫在眉睫的制约因素), *Resources Policy*, vol. 35/2, pp. 98–115, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.12.001>
- NASA (2023)**, "NASA OSIRIS-REx", <https://www.nasa.gov/osiris-rex> (accessed 17 May 2023).

- Nassar, N. T., et al. (2015)**, "By-product metals are technologically essential but have problematic supply" (副产品金属在技术上必不可少,但在供应方面却存在问题), *Science Advances*, vol. 1/3, pp. e1400180, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180>
- Nassar, N. T., et al. (2020)**, "Evaluating the mineral commodity supply risk of the U.S. manufacturing sector" (评估美国制造业的矿产品供应风险), *Science Advances*, vol. 6/8, pp. eaay8647, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay8647>
- National Minerals Information Centre, U.S. Geological Survey (n.d.)**, "Rare Earths Statistics and Information" (稀土统计和信息), <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earths-statistics-and-information> (accessed 27 March 2023).
- National Research Council (2008)**, "Managing Materials for a Twenty-first Century Military" (二十一世纪军队材料管理) (p. 12028), *National Academies Press*, Washington, D.C., <https://doi.org/10.17226/12028>
- National Resource Governance Institute (2022)**, *Preventing Corruption in Energy Transition Mineral Supply Chains* (防止能源转型矿产供应链中的腐败), National Resource Governance Institute, New York, <https://resourcegovernance.org/analysis-tools/publications/preventing-corruption-energy-transition-mineral-supply-chains> (accessed 15 May 2023).
- Natural Resources Canada (2020)**, *Canada and U.S. Finalize Joint Action Plan on Critical Minerals Collaboration* (加拿大和美国最终确定关键矿物合作联合行动计划), Natural Resources Canada, <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2020/01/canada-and-us-finalize-joint-action-plan-on-critical-minerals-collaboration.html> (accessed 2 April 2023).
- Nickel Asia (2022)**, *NIKL and EPI 9M2022 Highlights* (NIKL 和 EPI 9M2022 亮点), <https://nickelasia.com/assets/documents/NAC-9M2022-Briefing-NOV-2022.pdf>
- Njini, F. (2023)**, "South Africa's Blackouts Threaten Platinum Supply in Top Miner" (南非的停电威胁到 Top Miner 的铂供应), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-01-26/south-africa-s-blackouts-threaten-platinum-mine-supplies#xj4y7vzkg> (accessed 27 March 2023).
- Njini, F., and Biesheuvel, T. (2020)**, "South Africa's Mining Industry Is About to Come to a Standstill" (南非的采矿业即将陷入停顿), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-03-23/south-africa-orders-mines-to-close-in-21-day-virus-lockdown#xj4y7vzkg> (accessed 27 March 2023).
- Noetstaller, R. (1995)**, *Historical Perspectives and Key Issues of Artisanal Mining* (手工采矿的历史视角和关键问题), World Bank, Washington, D.C., <https://delvedatabase.org/uploads/resources/Noetstaller-WB-1995-Historical-perspectives.pdf> (accessed 11 May 2023).
- Northey, S. A., et al. (2017)**, "The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change" (全球基本金属资源面临水资源危急、稀缺性和气候变化), *Global Environmental Change*, vol. 44, pp. 109-24, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.004>
- NVM (2021)**, "Graphite 101: Powering the Energy Transition" (石墨 101: 为能源转型提供动力), <https://nmg.com/wp-content/uploads/2021/06/NMG-Graphite-101.pdf>
- Nyasha Nyaungwa, et al. (2023)**, "Namibia bans export of unprocessed critical minerals" (纳米比亚禁止出口未加工的关键矿物), *Reuters*, <https://www.reuters.com/markets/commodities/namibia-bans-export-unprocessed-critical-minerals-2023-06-08/> (accessed 15 June 2023).
- OECD (2023)**, "Manganese" (锰), <https://oec.world/en/profile/sitc/manganese-512877>
- OECD (2016)**, *Corruption in the Extractive Value Chain: Typology of risks, mitigation measures and incentives* (采掘价值链中的腐败: 风险类型、缓解措施和激励措施), OECD, Paris, <https://www.oecd.org/dev/Corruption-in-the-extractive-value-chain.pdf> (accessed 15 May 2023).
- OECD (2019)**, *Interconnected supply chains: a comprehensive look at due diligence challenges and opportunities sourcing cobalt and copper from the Democratic Republic of the Congo* (互联供应链: 全面审视从刚果民主共和国采购钴和铜的尽职调查挑战和机遇), OECD, Paris, <https://mneguidelines.oecd.org/Interconnected-supply-chains-a-comprehensive-look-at-due-diligence-challenges-and-opportunities-sourcing-cobalt-and-copper-from-the-DRC.pdf> (accessed 10 May 2023).
- OECD (2023)**, *Raw materials critical for the green transition: Production, international trade and export restrictions* (绿色转型的关键原材料: 生产、国际贸易和出口限制), Organisation for Economic Co-operation and Development TAD Working Party of the Trade Committee, OECD, Paris, [https://one.oecd.org/document/TAD/TC/WP\(2022\)12/FINAL/en/pdf](https://one.oecd.org/document/TAD/TC/WP(2022)12/FINAL/en/pdf) (accessed 27 March 2023).

- OECD Inventory of Export Restrictions on Industrial Raw Materials (2022)**, "OECD Inventory of Export Restrictions on Industrial Raw Materials" (OECD 工业原材料出口限制清单), https://qdd.oecd.org/subject.aspx?Subject=ExportRestrictions_IndustrialRawMaterials (accessed 12 May 2023).
- Oliver Wyman (2023)**, *Independent nickel market review* (独立镍市场评论), London Metal exchange, London, <https://www.lme.com/en/Trading/Initiatives/Nickel-market-independent-review> (accessed 30 March 2023).
- Owen, J. R., et al. (2022)**, "Energy transition minerals and their intersection with land-connected peoples" (能源转型矿产及其与土地相关民族的交集), *Nature Sustainability*, vol. 6/2, pp. 203–11, <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00994-6>
- Paraskova, T. (2022)**, "The Next OPEC-Like Cartel Could Be In Battery Metals" (下一个类似 OPEC 的垄断组织可能出现在电池金属行业), *Oilprice.com*, <https://oilprice.com/Energy/Energy-General/The-Next-OPEC-Like-Cartel-Could-Be-In-Battery-Metals.html> (accessed 28 March 2023).
- Patterson, W. (2018)**, *Non-tradable resources and the global electricity transition* (非贸易资源和全球电力转型), Chatham House, London, <https://resourcetrade.earth/publications/non-tradable-resources-and-the-global-electricity-transition> (accessed 27 March 2023).
- Pattinson, P. (2021)**, "Like slave and master': DRC miners toil for 30p an hour to fuel electric cars" (就像奴隶和主人一样: 刚果民主共和国矿工为每小时 30 便士的工资辛勤开采电动汽车原材料), *The Guardian*, <https://www.theguardian.com/global-development/2021/nov/08/cobalt-drc-miners-toil-for-30p-an-hour-to-fuel-electric-cars> (accessed 11 May 2023).
- Paul Taylor (2020)**, *After the ice: The Arctic and European security* (冰冻期之后: 北极和欧洲安全), Friends of Europe, Brussels, <https://www.friendsofeurope.org/wp/wp-content/uploads/2020/08/Arctic-study-Executive-Summary.pdf> (accessed 24 May 2023).
- Pearce, F. (2022)**, "Why the Rush to Mine Lithium Could Dry Up the High Andes" (为什么开采锂的热潮会掏空安第斯山脉), *Yale Environment 360*, <https://e360.yale.edu/features/lithium-mining-water-andes-argentina> (accessed 15 May 2023).
- Pedro, A.M.A. (2021)**, "Critical materials and sustainable development in Africa: Antonio M.A. Pedro", (非洲的关键材料和可持续发展: Antonio M.A. Pedro) *One Earth*, vol. 4/3, pp. 346–9, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.02.018>
- Picullo, L., et al. (2022)**, "A new look at the statistics of tailings dam failures" (重新审视尾矿坝溃坝的统计数据), *Engineering Geology*, vol. 303, pp. 106657, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106657>
- Prach, K., and Tolvanen, A. (2016)**, "How can we restore biodiversity and ecosystem services in mining and industrial sites?" (我们如何恢复采矿和工业场地的生物多样性和生态系统服务?), *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23/14, pp. 13587–90, <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7113-3>
- Quiggin, J. (2021)**, "BHP's offloading of oil and gas assets shows the global market has turned on fossil fuels" (必和必拓转售石油和天然气资产表明全球市场已开启化石燃料转型), *The Conversation*, <https://theconversation.com/bhps-offloading-of-oil-and-gas-assets-shows-the-global-market-has-turned-on-fossil-fuels-166336> (accessed 6 April 2023).
- QYResearch (2023)**, "Global synthetic graphite market research report 2023" (2023 年全球合成石墨市场研究报告) .
- Radetzki, M. and Wärell, L. (2020)**, *A Handbook of Primary Commodities in the Global Economy* (全球经济中的初级商品手册) (3rd edition), Cambridge University Press, Cambridge, <https://doi.org/10.1017/9781108886529>
- Republic of Indonesia (2009)**, "Law of the Republic of Indonesia Number 4 of 2009 on Mineral and Coal Mining (印度尼西亚共和国 2009 年第 4 号矿产和煤炭开采法)", Article 112", http://www.apbi-icma.org/uploads/files/old/2013/11/uu_no_4_2009_en.pdf (accessed 29 March 2023).
- RESPECT International (2016)**, "Responsible Cobalt Initiative (RCI)" (负责任钴倡议 (RCI)), <https://respect.international/responsible-cobalt-initiative-rci/> (accessed 5 April 2023).
- ResponsibleSteel (2018)**, "Arcelormittal VEGA Earns ResponsibleSteel Certification" (阿塞洛米塔尔钢铁集团获得负责任钢铁认证), <https://www.responsiblesteel.org/> (accessed 5 April 2023).
- RMI (2018)**, "RMAP Assessment Introduction" (RMAP 评估介绍), *Responsible Minerals Institute*, <https://www.responsiblemineralsinitiative.org/responsible-minerals-assurance-process/> (accessed 5 April 2023).
- RMI (2021)**, "Responsible Minerals Initiative Releases New Global Standard for All-Minerals Due Diligence" (责任矿产倡议发布所有矿产尽职调查新全球标准), *Responsible Minerals Institute*, [https://www.responsiblemineralsinitiative.org.](https://www.responsiblemineralsinitiative.org/)

[org/news/responsible-minerals-initiative-releases-new-global-standard-for-all-minerals-due-diligence/](https://www.unglobalmine.org/news/responsible-minerals-initiative-releases-new-global-standard-for-all-minerals-due-diligence/) (accessed 25 May 2023).

Roche, C., et al. (2017), *Mine Tailings Storage: Safety Is no Accident* (矿场尾矿储存: 安全不是偶然), UN Environment Programme, GRID-Arendal, Nairobi and Arendal, <https://www.grida.no/publications/383> (accessed 12 May 2023).

Ruehl, M. (2023), "Nickel IPOs test Indonesia's vision of global role in electric vehicles" (镍 IPO 考验印度尼西亚在电动汽车领域发挥全球作用的愿景), *Financial Times*, <https://www.ft.com/content/4e13eb91-1db9-4b27-a58b-dc7109337349> (accessed 4 April 2023).

S&P Global IQ (2022), *S&P Capital IQ Pro database* (S&P Capital IQ Pro 数据库), <https://www.capitaliq.spglobal.com/web/client?auth=inherit#dashboard/metalsAndMining>

Sanderson, H. (2021), "Goldman Sachs ramps up cobalt trading" (高盛加大钴交易力度), *Financial Times*, <https://www.ft.com/content/12ea44c7-d940-4b75-bd94-4fd2116c1c76> (accessed 6 April 2023).

Sanderson, H. (2022), "Volt rush: the winners and losers in the race to go green" (电力转型热潮: 绿色竞赛中的赢家和输家), Oneworld, London.

Schrijvers, D., et al. (2020), "A review of methods and data to determine raw material criticality" (确定原材料临界状态的方法和数据回顾), *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 155, pp. 104617, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617>

Science for a Changing World (2022), "USGS scientists Help Address Conflict Mining" (美国地质勘探局科学家帮助解决采矿冲突), *U.S. Geological Survey*, <https://www.usgs.gov/news/featured-story/usgs-scientists-help-address-conflict-mining> (accessed 24 May 2023).

Sekularac, I. (2022), "Serbia revokes Rio Tinto lithium mine permits following protests" (塞尔维亚在抗议后撤销力拓锂矿许可), *BBC*, <https://www.bbc.com/news/world-europe-60081853> (accessed 31 March 2023).

Serapio Jr., M., and Lopez, D.B. (2023), "Philippine Miners Not Keen on Indonesia Nickel Alliance Plan" (菲律宾矿工不热衷于印度尼西亚镍联盟计划), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-03-14/philippine-miners-aren-t-keen-on-indonesian-nickel-alliance-plan#xj4y7vzkg> (accessed 28 March 2023).

Servir Global (2020), "Reducing illegal gold mining in the tropical forests of Ghana and Peru: A forthcoming collaboration across the Atlantic" (减少加纳和秘鲁热带森林的非法金矿开采: 即将开展的跨大西洋合作), *Servir Global*, <https://servirglobal.net/Global/Articles/Article/2725/reducing-illegal-gold-mining-in-the-tropical-forests-of-ghana-and-peru-a-forthc> (accessed 11 May 2023).

Sharp, A. (2023), "Chile's White Gold Rush" (智利的白色淘金热), *Foreign Policy*, <https://foreignpolicy.com/2023/04/21/chile-lithium-reserves-albemarle-sqm-nationalize-boric-santiago/> (accessed 16 May 2023).

Shen, Y., et al. (2020), "China's public policies toward rare earths, 1975–2018" (中国对稀土的公共政策, 1975–2018), *Mineral Economics*, vol. 33/1–2, pp. 127–51, <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00214-2>

Shofa, J.N. (2023), "Miners Were Given Window of 3 Years before Bauxite Export Ban: Gov't" (矿工在铝矾土出口禁令前有 3 年的窗口期: 政府), *Jakarta Globe*, <https://jakartaglobe.id/business/miners-were-given-window-of-3-years-before-bauxite-export-ban-govt#:~:text=The%20government%20on%20Monday%20said%20that%20the%20recent,came%20into%20effect%20three%20years%20after%20its%20issuance.> (accessed 15 June 2023).

Sovacool, B.K., et al. (2020), "Sustainable minerals and metals for a low-carbon future" (低碳未来的可持续矿物和金属), *Science*, vol. 367/6473, pp. 30–3, <https://doi.org/10.1126/science.aaz6003>

Sprecher, B., et al. (2015), "Framework for Resilience in Material Supply Chains, With a Case Study from the 2010 Rare Earth Crisis" (材料供应链强韧性框架, 2010 年稀土危机案例研究), *Environmental Science & Technology*, vol. 49/11, pp. 6740–50, <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00206>

Stewart, L.R. (1981), "Canada's role in the international uranium cartel" (加拿大在国际铀垄断组织中的作用), *International Organization*, vol. 35/4, pp. 657–89, <https://doi.org/10.1017/S0020818300034275>

Stoddard, E. (2013), "OPEC-style platinum cartel a pipe-dream" (OPEC 式的铂垄断是白日做梦), *Reuters*, <https://www.reuters.com/article/africa-investment-idUKL6NODX1PS20130516> (accessed 28 March 2023).

Stoddard, E. (2014), "South Africa miners return to work after longest platinum strike" (南非矿工在历时最长的铂矿罢工后重返工作岗位), *Reuters*, <https://www.reuters.com/article/us-safrica-mining-idUSKBN0F00DC20140625> (accessed 29 March 2023).

- Storli, E. (2014)**, "Cartel Theory and Cartel Practice: The Case of the International Aluminum Cartels, 1901-1940" (垄断理论和实践: 国际铝垄断案例, 1901-1940年), *Business History Review*, vol. 88/3, pp. 445-67, <https://doi.org/10.1017/S0007680514000385>
- Stott, M., and Bryan, K. (2023)**, "Chile's president moves to bring lithium under state control" (智利总统将锂产业置于国家控制之下), *Financial Times*, <https://www.ft.com/content/ebd48bbc-1390-4679-99fe-682975bbdba8> (accessed 16 May 2023).
- Strangio, S. (2022)**, "Indonesia to Appeal WTO Ruling on Nickel Export Ban" (印度尼西亚将对 WTO 关于镍出口禁令的裁决提出上诉), *The Diplomat*, <https://thediplomat.com/2022/12/indonesia-to-appeal-wto-ruling-on-nickel-export-ban/> (accessed 4 April 2023).
- Sturman, K., et al. (2022)**, *Mission critical Strengthening governance of mineral value chains for the energy transition* (加强矿产价值链治理促进能源转型的关键任务), Extractive Industries Transparency Initiative (EITI), Oslo, Norway, <https://eiti.org/sites/default/files/2022-10/EIT1%20Mission%20Critical%20Report%202022.pdf> (accessed 13 April 2023).
- Systemiq (2023)**, "Material and resource requirements for the energy transition" (能源转型的材料和资源要求), <https://www.systemiq.earth/>
- Tan, R., Sijabat, D.M., and Irwandi, J. (2023)**, "To meet EV demand, industry turns to technology long deemed hazardous" (为满足电动汽车需求, 相关工业转为使用长期以来被认为有害的技术), *Washington Post*, 10 May (accessed 30 June 2023).
- Tarras-Wahlberg, N.H. (2002)**, "Environmental management of small-scale and artisanal mining: the Portovelo-Zaruma goldmining area, southern Ecuador" (小规模和手工采矿的环境管理: 厄瓜多尔南部的 Portovelo-Zaruma 金矿区), *Journal of Environmental Management*, vol. 65/2, pp. 165-79, <https://doi.org/10.1006/jema.2002.0542>
- Terauds, K. (2017)**, *Using trade policy to drive value addition: Lessons from Indonesia's ban on nickel exports* (利用贸易政策推动附加值: 印度尼西亚镍出口禁令的经验教训). *Background document to the Commodities and Development Report 2017*, UNCTAD, Geneva, <https://static1.squarespace.com/static/60a5714c0fd0954ac36a6129/t/61476743b06d7e297ff60000/1632069444412/Using+trade+policy+to+drive+value+addition.pdf> (accessed 4 April 2023).
- The Copper Mark (2019)**, "The Copper Mark: About Us" (The Copper Mark: 关于我们), <https://coppermark.org/> (accessed 5 April 2023).
- The Economist (2023)**, "A huge Norwegian phosphate rock find is a boon for Europe" (挪威磷酸盐岩的巨大发现是欧洲的福音), 8 June, <https://www.economist.com/europe/2023/06/08/a-huge-norwegian-phosphate-rock-find-is-a-boon-for-europe>
- Tsockhas, K. (2000)**, "The Rise and Decline of an International Zinc and Lead Cartel, 1945-75" (1945-75 年国际锌铅垄断组织的兴衰), *Australian Economic History Review*, vol. 40/3, pp. 263-86, <https://doi.org/10.1111/1467-8446.00068>
- Tunnsjø, Ø. (2020)**, "The Great Hype: False Visions of Conflict and Opportunity in the Arctic" (大炒作: 北极地区冲突与机遇的假象), *Survival*, vol. 62/5, pp. 139-56, <https://doi.org/10.1080/00396338.2020.1819649>
- UN Statistics Division (2022)**, "UN Comtrade Database" (联合国商品贸易数据库), <https://comtradeplus.un.org/TradeFlow?Frequency=A&Flows=X&CommodityCodes=TOTAL&Partners=0&Reporters=all&period=2022&AggregateBy=none&BreakdownMode=plus> (accessed 19 April 2023).
- UNCTAD (2007)**, *World Investment Report: Transnational corporations, extractive industries, and development* (世界投资报告: 跨国公司、采掘业和发展), (p. 109), UNCTAD, New York and Geneva, <https://unctad.org/publication/world-investment-report-2007> (accessed 29 March 2023).
- UNCTAD (2019)**, *The state of commodity dependence* (商品依赖状况), UNCTAD, Geneva, <https://unctad.org/topic/commodities/state-of-commodity-dependence> (accessed 4 April 2023).
- UNCTAD (2023)**, *The Evolution of FDI Screening Mechanisms - key trends and features* (外国直接投资筛选机制的演变——主要趋势和特点), UNCTAD, Geneva, https://unctad.org/system/files/official-document/diaepcbinf2023d2_en.pdf (accessed 29 March 2023).
- UNDP, et al. (2016)**, *Mapping Mining to the Sustainable Development Goals: An Atlas, United Nations Development Programme* (将采矿与可持续发展目标相结合: 联合国开发计划署地图集), World Economic Forum, Columbia Center on Sustainable Investments and Sustainable Development Solutions Network, Geneva, https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_Executive_Summary_FINAL.pdf (accessed 10 May 2023).

UNECA (2021), *Facts & Figures: on cobalt, battery minerals and electric cars value chains* (事实与数字:钴、电池矿物和电动汽车价值链), UNECA, Addis Ababa, <https://www.uneca.org/sites/default/files/Africa-Business-Forum/4/Cobalt.pdf> (accessed 4 April 2023).

UNECA (2022), "Trade ties: Zambia and DRC sign cooperation Agreement to manufacture electric batteries, create jobs" (贸易关系: 赞比亚和刚果民主共和国签署电池制造合作协议, 创造就业机会), *Africa Renewal*, <https://www.un.org/africarenewal/magazine/may-2022/trade-ties-zambia-and-drc-sign-cooperation-agreement-manufacture-electric> (accessed 7 February 2023).

UNEP (2020), *Sustainability Reporting in the Mining Sector: Current Status and Future Trends* (矿业可持续性报告: 现状和未来趋势), UNEP, Nairobi, Kenya, <https://stg-wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33924/SRMS.pdf> (accessed 5 April 2023).

UNEP (ed.) (2009), "From conflict to peacebuilding: the role of natural resources and the environment" (从冲突到建设和平: 自然资源和环境的作用) (Policy paper), *United Nations Environment Programme*, Nairobi, <https://digitallibrary.un.org/record/649896> (accessed 30 March 2023).

United Mexican States (2022), "Amendment of the Mining Law" (采矿法修正案), https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5649533&fecha=20/04/2022#gsc.tab=0 (accessed 29 March 2023).

United Nations (2007), *United Nations Declaration on the Rights of Indigenous Peoples* (联合国土著人民权利宣言), General Assembly, New York, https://www.un.org/development/desa/indigenouspeoples/wp-content/uploads/sites/19/2018/11/UNDRIP_E_web.pdf (accessed 10 May 2023).

United Nations (2011), *Report of the Special Rapporteur on the situation of human rights and fundamental freedoms of indigenous people* (土著人民人权和基本自由情况特别报告员的报告), James Anaya, General Assembly, New York, https://www2.ohchr.org/english/bodies/hrcouncil/docs/18session/A-HRC-18-35-Add3_en.pdf (accessed 10 May 2023).

United Nations Human Rights Office of the High Commissioner (2011), *Guiding Principles on Business and Human Rights* (工商业与人权指导原则), United Nations Human Rights Office of the High Commissioner, New York and Geneva, https://www.ohchr.org/sites/default/files/documents/publications/guidingprinciplesbusinesshr_en.pdf (accessed 5 April 2023).

US Department of Commerce (2019), *A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals* (确保关键矿物安全可靠供应的联邦战略), U.S. Department of Commerce, US, <https://www.commerce.gov/data-and-reports/reports/2019/06/federal-strategy-ensure-secure-and-reliable-supplies-critical-minerals> (accessed 31 March 2023).

US Department of Energy (2021), "Production of Critical Materials Essential for Clean Energy Projects Can Create Jobs in Coal and Power Plant Communities" (生产清洁能源项目所需的关键原材料可为煤炭和发电厂社区创造就业机会), *energy.gov*, <https://www.energy.gov/articles/doe-awards-19-million-initiatives-produce-rare-earth-elements-and-critical-minerals> (accessed 15 June 2023).

US Department of Energy (2021), *Critical Minerals and Materials: U.S. Department of Energy's Strategy to Support Domestic Critical Mineral and Material Supply Chains* (关键矿物和材料: 美国能源部支持国内关键矿物和材料供应链的战略) (FY 2021-FY 2031), U.S. Department of Energy, US, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/DOE%20Critical%20Minerals%20and%20Materials%20Strategy_0.pdf (accessed 31 March 2023).

US Department of State (2022), *Minerals Security Partnership* (矿产安全伙伴关系), U.S. Department of State, US, <https://www.state.gov/minerals-security-partnership/> (accessed 3 April 2023).

US Government Publishing Office (2022), "H.R.5376 - Inflation Reduction Act of 2022. 17th Congress (2021-2022)" (H.R.5376 - 2022年通胀削减法案)。第17届国会, <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text> (accessed 31 March 2023).

USGS (2018), "Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply" (美国的关键矿产资源——经济和环境地质及未来供应前景), *United States Geological Survey*, <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/l/pp1802l.pdf>

USGS (2023a), "Mineral Commodity Summary 2023" (2023年矿产商品汇总), *United States Geological Survey*, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>

USGS (2023b), "Platinum-Group Metals Statistics and Information" (铂族金属统计和信息), *United States Geological Survey*, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/platinum-group-metals-statistics-and-information>

- USGS and US Department of the Interior (2010)**, *Mineral Commodity Summaries 2010* (2010 年矿产商品摘要), United States Department of the Interior, United States Geological Survey, Washington, <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2010.pdf> (accessed 27 March 2023).
- USGS and US Department of the Interior (2022)**, *Mineral Commodity Summaries 2022* (2022 年矿产商品摘要), United States Department of the Interior, United States Geological Survey, Reston, Virginia, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf> (accessed 28 March 2023).
- Ushie, V. (2017)**, *From aspiration to reality. Unpacking the Africa Mining Vision* (从渴望到现实: 解读非洲矿业愿景), Oxfam Briefing Paper, Oxfam, <https://www-cdn.oxfam.org/s3fs-public/bp-africa-mining-vision-090317-en.pdf>
- Valenta, R.K., et al. (2023)**, "Decarbonisation to drive dramatic increase in mining waste—Options for reduction" (去碳化导致采矿废物急剧增加——减少废物的方案), *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 190, pp. 106859, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106859>
- Veiga, M.M., and Marshall, B. G. (2019)**, "The Colombian artisanal mining sector: Formalization is a heavy burden" (哥伦比亚手工采矿业: 正规化是一个沉重的负担), *The Extractive Industries and Society*, vol. 6/1, pp. 223–8, <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.001>
- Vera, M.L., et al. (2023)**, "Environmental impact of direct lithium extraction from brines" (从卤水中直接提取锂的环境影响), *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 4/3, pp. 149–65, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5>
- Walters, A. (1944)**, "The International Copper Cartel" (国际铜垄断), *Southern Economic Journal*, vol. 11/2, pp. 133, <https://doi.org/10.2307/1052847>
- Ward, H. (2009)**, *Resource nationalism and sustainable development: a primer and key issues* (资源民族主义和可持续发展: 入门和关键问题), International Institute for Environment and Development, London, <https://www.iied.org/g02507> (accessed 29 March 2023).
- White House (2020)**, "Executive Order on Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries" (关于解决依赖外国竞争对手关键矿产对国内供应链造成的威胁的行政命令), <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/executive-order-addressing-threat-domestic-supply-chain-reliance-critical-minerals-foreign-adversaries/> (accessed 29 March 2023).
- White House (2021)**, "Executive Order on America's Supply Chains" (关于美国供应链的行政命令), *White House*, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/02/24/executive-order-on-americas-supply-chains/> (accessed 31 March 2023).
- White House (2022)**, "Executive Order on Ensuring Robust Consideration of Evolving National Security Risks by the Committee on Foreign Investment in the United States" (关于确保美国外国投资委员会充分考虑不断变化的国家安全风险的行政命令), <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/09/15/executive-order-on-ensuring-robust-consideration-of-evolving-national-security-risks-by-the-committee-on-foreign-investment-in-the-united-states/> (accessed 29 March 2023).
- White, E., and Hook, L. (2023)**, "Shares in China metals miner CMOC surge as Congo impasse clears" (刚果僵局打破, 中国金属矿业公司中国五矿股价大涨), *Financial Times*, <https://www.ft.com/content/3d33eed1-4358-40ed-a399-58480bbb7601> (accessed 15 June 2023).
- Whitmore, A. (2021)**, 《材料转型: Exploring supply and demand solutions for renewable energy minerals》(材料转型: 探索可再生能源矿物的供求解决方案), War on Want, London, https://waronwant.org/sites/default/files/2021-03/A%20Material%20Transition_report_War%20on%20Want.pdf (accessed 5 April 2023).
- Wilburn, D.R., et al. (2016)**, *Scientific Investigations Report: Global stocks of selected mineral-based commodities* (科学调查报告: 特定与矿物相关的商品的全球库存), Scientific Investigations Report, United States Geological Survey, Reston, VA, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/sir20165152> (accessed 3 April 2023).
- Wilson, J.D. (2018)**, "Whatever happened to the rare earths weapon? Critical materials and international security in Asia" (稀土武器到底怎么了? 亚洲的关键原材料和国际安全), *Asian Security*, vol. 14/3, pp. 358–73, <https://doi.org/10.1080/14799855.2017.1397977>
- World Bank (2017)**, *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future* (矿物和金属在低碳未来中日益增长的作用), World Bank, Washington, D.C., <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/207371500386458722/the-growing-role-of-minerals-and-metals-for-a-low-carbon-future> (accessed 15 May 2023).
- World Bank (2020a)**, *2020 State of the Artisanal and Small-Scale Mining Sector* (2020 年手工和小规模采矿业状况), World Bank, Washington, D.C., <https://delvedatabase.org/uploads/resources/Delve-2020-State-of-the-Sector-Report-0504.pdf> (accessed 11 May 2023).

World Bank (2020b), "WITS Database" (WITS 数据库), <https://wits.worldbank.org/> (accessed 16 May 2023).

World Bank (2021), Special Focus: Causes and consequences of metal price shocks (特别关注: 金属价格冲击的原因和后果), World Bank, Washington, DC, <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/c5delea3b3276cf54e7a1dff4e95362b-0350012021/related/CMO-April-2021-special-focus.pdf> (accessed 4 April 2023).

World Bank (2022), *Commodity Markets: Evolution, Challenges and Policies* (商品市场: 演变、挑战和政策), World Bank, Washington, DC, <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/4304a058-a917-5ef6-b24a-88d0458d4bed> (accessed 28 March 2023).

World Mining Data (2022), *World Mining Data 2022* (2022 年世界采矿数据), Federal Ministry of Agriculture, Regions and Tourism, Vienna, <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf> (accessed 29 March 2023).

WPIC (2022), "Metals Focus 2019 to 2022" (2019 年至 2022 年的金属焦点), <https://platinuminvestment.com/supply-and-demand/historic-data>

WSJ (2023), "Shift to Mined vs. Man-Made Graphite Raises Shortage Risk for EVs" (转向开采与人造石墨引发电动汽车短缺风险), Wall Street Journal, <https://www.wsj.com/articles/shift-to-mined-vs-man-made-graphite-raises-shortage-risk-for-evs-11674603067>

WTO (2022), *Indonesia - Measures Relating to Raw Materials* (印度尼西亚——与原材料有关的措施), World Trade Organization, Geneva, <https://docs.wto.org/dol2fe/Pages/SS/directdoc.aspx?filename=q:/WT/DS/592R.pdf&Open=True> (accessed 4 April 2023).

WTO (2023), "Index of Dispute Issues" (争端问题索引), World Trade Organization, Geneva, https://www.wto.org/english/tratop_e/dispu_e/dispu_subjects_index_e.htm (accessed 17 May 2023).

Wu, T., et al. (2021), "The Main Progress of Perovskite Solar Cells in 2020–2021" (2020–2021 年钙钛矿太阳能电池的主要进展), Nano-Micro Letters, vol. 13/152, <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00672-w>

Wübbecke, J. (2013), "Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry" (中国的稀土元素: 重塑工业的政策和叙述), *Resources Policy*, vol. 38/3, pp. 384–94, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.05.005>

WWF (2023), *Extracted Forests: Unearthing the role of mining-related deforestation as a driver of global deforestation* (被开采的森林: 揭示与采矿相关的森林砍伐作为全球森林砍伐驱动因素的作用), WWF, Berlin, <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Wald/WWF-Studie-Extracted-Forests.pdf> (accessed 15 June 2023).

Yao, T., et al. (2021), *Dynamic neodymium stocks and flows analysis in China* (中国钕存量和流量动态分析), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134492100361X>

Yu, A., et al. (2021), *Impact of COVID-19 pandemic on industrial metals markets - one year on* (新冠肺炎疫情对工业金属市场的影响——一年过后), S&P Global Market Intelligence, New York City, <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/research/impact-of-covid-19-pandemic-on-industrial-metals-markets-one-year-on> (accessed 27 March 2023).

Zeng, A., et al. (2022), "Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages" (仅靠电池技术和回收利用无法使电动汽车转型摆脱未来钴短缺的问题), *Nature Communications*, vol. 13/1, pp. 1341, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29022-z>

Zimmermann, A. (2023a), "Europe's green dilemma: Mining key minerals without destroying nature" (欧洲的绿色困境: 在不破坏自然的情况下开采关键矿物), *Politico*, <https://www.politico.eu/article/europes-green-dilemma-mining-key-minerals-without-destroying-nature/> (accessed 16 June 2023).

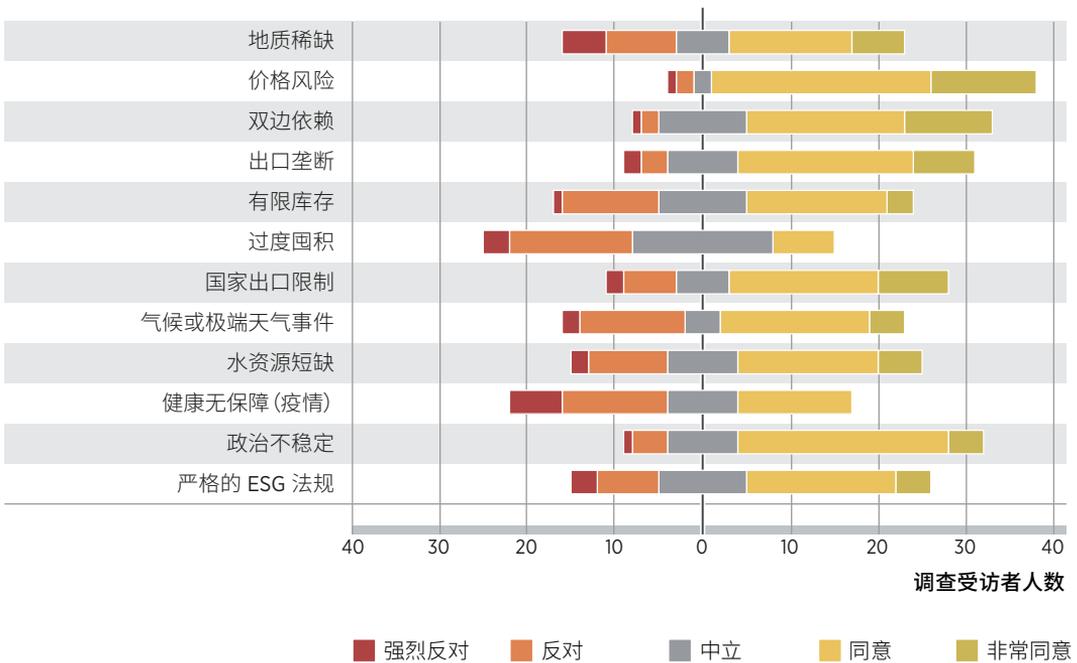
Zimmermann, A. (2023b), "Tremor fears lay down hurdles for Germany's lithium mining plans" (对地震的恐惧为德国的锂矿开采计划设置了障碍), *Politico*, <https://www.politico.eu/article/germanys-lithium-extraction-earthquake-mining/> (accessed 2 April 2023).

附件

关键原材料供应风险调查结果

为了编写本报告，IRENA 成员和相关专家接受了一系列与能源转型关键原材料相关的问题的调查。我们共收到 41 份回复，答复率为 16%。以下是调查结果的汇总概览（图 A1）。IRENA 成员和专家的观点基本一致。例如，IRENA 成员和专家将关键原材料的供应安全问题列为首要关切。两组答复均表明，价格风险、政治不稳定、出口垄断和双边依赖将成为未来十年关键原材料供应安全的重大风险。几乎所有受访者都强调了国际合作的重要性，并认为双边合作的重要性略胜于地区或全球合作。

图 A1 IRENA 调查对象提出的未来十年关键原材料供应所面临的



IRENA 关键原材料稀缺率：计算方法

图 1.5 展示的是 IRENA 计算的一些关键原材料的稀缺率，即铜、石墨、镍、钴、锂、锰、钕、镓、铱和铂。这些比率可有效表明上述材料在当前供应和未来需求之间的差距。这些计算基于从可靠外部来源获得的数据，包括这些材料在 2022 年的供应量，以及 2030 年的预计能源和非能源需求量。此外，IRENA 正在为其即将发布的电动汽车电池报告进行全面的供需缺口分析。表 A1 全面概述了当前和预计的需求和供应数据，并详细介绍了关键原材料的现有储备和资源。

表 A1 关键原材料当前和预计需求量和供应量

原材料	2022 年的需求量/供应量 [百万吨/年]	2022 年能源行业需求量 (%)	2030 年的需求量 [百万吨/年] ¹	2030 年能源行业需求量 (%)	2030 年的供应量 [百万吨/年]	2022 年的当前储量 [百万吨]	2022 年的现有资源 [百万吨]
钴 	0.18 ^c [5]	33% ^a [5]	0.24-0.48 ^o [21]	48%-56% [7]	0.24-0.46 ^t [8]	8.30 [1]	25 ^x [1]
铜 	25.70 ^b [6]	32% ^d [10]	31-45 ⁱ	36% [10]	30.34-39.50 ^r [9]	890 [1]	2100 ^y [1]
镓 	0.0014 [17]	36% ^k (2018) [14]	0.005-0.007 [7]	46%-57% [7]	0.0040-0.0041 [7]	0.32-1.30 [4]	3 [4]
石墨 	天然	1.25 [5]	4.3-5.9 ^m [19]	79% [23] ²	2.94 [15]	330 [1]	800 [1]
	合成	2.28 [19]			21% ^e [12]	3.48 [19]	不适用
铱 	7.9 吨 [16]	4.3% [8]	24.95 ^q [8]	46.3% [8]	13.7 吨 [8]	700 吨	1,000 吨
锂 ^a 	0.69 [5]	66% ^h [5]	2.0-4.4 ^p [22]	95%-99% [7]	1.30-2.90 ^u [8]	138 [1]	522 [1]
锰 	22.00 [13]	0.60% ⁱ [11]	22.50-26.0 [9]	6% [24]	21.00-24 [9] [25]	1,700 [1]	>17,200 ^y [2]
钕 	0.038 [17]	18.9% ⁱ [18]	0.065-0.075 [7]	28%-40% [7]	0.055-0.071 [7]	11.60-13.60 [3]	17-74 [4]
镍 	2.91 [5]	8.6% ^f [5]	3.8-6.2 ⁿ [20]	26%-38% [7]	3.00-4.90 ^s [8]	100 [1]	300 ^w [1]
铂 	161 吨 [16]	9% [27]	213.15 吨 [8]	6% [8]	232.4 吨 [8]	32,200 吨	46,000 吨

- 1 对 2030 年关键原材料需求的预测参考了来自外部来源的预测。
- 2 虽然用于电池生产的石墨大部分是天然石墨，但由于各种因素（包括价格、可获得性和每种类型的固有优势），天然石墨和合成石墨在电池中的所占的比例有所不同。

来源：[1] USGS, 2023; [2] USGS, 2018; [3] Yao 等人, 2021; [4] Junne 等人, 2020; [5] Fastmarkets, 2023; [6] S&P Global IQ, 2022; [7] Eurometaux, 2022; [8] IRENA analysis; [9] McKinsey, 2023; [10] BNamericas, 2022; Eurometaux, 2022; IHS Markit, 2022; Minerals Council of Australia, 2022; S&P Global IQ, 2022; Systemiq, 2023; [11] Benchmark Minerals, 2019; [12] Government of Canada, 2022; [13] Euro Manganese, 2022; [14] JRC, 2020; [15] WSJ, 2023; [16] Johnson Matthey, 2022; [17] The Institute of Energy Economics, Japan, 2022; [18] OEC, 2023; [19] Mining.com, 2021; Mitchell and Deady, 2021; NVM, 2021; QYResearch, 2023; [20] Eurometaux, 2022; Garvey, 2021; McKinsey, 2023; Minerals Council of Australia, 2022; Mining.com, 2021; Nickel Asia, 2022; Systemiq, 2023; Vale, 2022; [21] Cobalt Blue Holdings, 2022; Darbar, 2022; Eurometaux, 2022; Fu, 2020; McKinsey, 2022; Mining.com, 2021; NVM, 2021; Systemiq, 2023; [22] Albemarle, 2023; Eurometaux, 2022; Lazzaro, 2022; McKinsey, 2022; NVM, 2021; S&P Global IQ, 2022; Systemiq, 2023; [23] Els, 2022; [24] Moore Finance, 2022; [25]: Jupiter Mines, 2023。

注：CSP = 集中式太阳能发电技术；EV = 电动汽车；PV = 光伏；Mt = 兆吨。

- a 指碳酸锂当量 (LCE)。
- b 指精炼铜需求。
- c 指精炼钴需求。
- d 2021 年，全球精炼铜消费的 32% 与能源转型终端用途有关，如测试与开发、风能、太阳能光伏、电动汽车和充电以及储能。能源转型最终用途对铜的需求预计将在 2035 年达到峰值，占 42%。
- e 指所有电池类型，不仅仅是电动汽车和储能电池。
- f 指与能源转型相关的最终用途，如电动汽车 (8.11%) 和储能电池 (0.40%)。
- g 指与能源转型相关的最终用途，如电动汽车 (33.00%)。
- h 指与能源转型相关的最终用途，如电动汽车 (60.40%) 和储能电池 (5.30%)。
- i 指用于锂离子电池和碱性电池的电解二氧化锰 (EMD)。该数据为 2019 年的数据。
- j 电池需求占 4%，钕铁硼永磁体需求占 80%，其中约 6% 来自风能应用，约 12% 来自电动汽车电机。
- k 用于风能和电机应用的镝属于此类材料。
- l 基于 6 种不同的预测。平均预测表明，到 2030 年，铜需求量将达到 3,870 万吨。
- m 基于 3 种不同的预测。平均预测表明，到 2030 年，天然石墨需求量将达到 460 万吨。
- n 基于 9 种不同的预测。平均预测表明，到 2030 年，镍需求量将达到 480 万吨。
- o 基于 10 种不同的预测。平均预测表明，到 2030 年钴需求量将达到 35 万吨。
- p 基于 10 种不同的预测。平均预测表明，到 2030 年，锂 LCE 需求量将达到 319 万吨。
- q IRENA 估计，到 2030 年，电解产能每年将增加 100 GW。假设有 40% 的电解槽是 PEM 电解槽，每 1 GW 的 PEM 电解槽的处理能力为 400kg，则除其他行业的需求外，这些电解槽将代表 16 吨的钕年需求量。
- r 基于 5 种不同的预测。平均预测表明，到 2030 年，铜供应量将达到 3,454 万吨。
- s 基于 7 种不同的预测。平均预测表明，到 2030 年，镍供应量将达到 414 万吨。
- t 基于 11 种不同的预测。平均预测表明，到 2030 年钴供应量将达到 31 万吨。
- u 基于 8 种不同的预测。平均预测表明，到 2030 年，锂 (LCE) 供应量将达到 314 万吨。
- v 2,100.00 (已查明资源) 3500.00 (未发现资源)
- w 已查明的陆地资源平均含镍量约为 0.5% 或更多，储量至少有 3 亿吨，其中约 60% 存在于红土型矿，40% 存在于硫化物型矿。在海底的锰结壳和结核中，也发现有大量的镍资源。
- x 在海底多金属结核和结壳中，已发现有超过 1.2 亿吨的钴资源。
- y 全球已确定的资源总量超过 170 亿公吨的含锰材料。海底还有大量的锰资源，大部分位于国际水域和深海。

