

通过集成方法实现技术材料的可持续提取

Robert Pell^{1,2}, Laurens Tijsseling², Kathryn Goodenough³, Frances Wall¹, Quentin Dehaine⁴, Alex Grant²,
David Deak², Xiaoyu Yan⁵ and Phoebe Whattoff²

摘要 | 向低碳经济过渡将会耗费大量材料。由于地质学、矿物学、提取路线、产品类型、产品纯度、背景系统或制造基础设施的差异，材料生产（从采矿到制造）付出环境成本各不相同。了解低碳型经济对原材料的影响有利于协调原材料与可再生技术之间的关系。本篇综述提出了生命周期评估-地质冶金集成方法，以优化技术性能，减少原材料提取对环境的影响。与材料生产相关的全系统影响包括从地下矿产开采到精细化工产品（如用于高新技术的电池等），生命周期便是了解该总影响的有效方法。在地质冶金方法中，地质学家在勘探和开发过程中考量各种因素，选择具有较低环境影响的特色资源地作为勘探目标。基于原地矿石性质和工艺模拟，该集成方法能更准确、更动态地优化技术材料资源使用效率。通过在项目开发阶段应用这些方法，各要素环境影响维持在低水平，未来才有望实现低碳经济。

向可再生能源的过渡，特别是运输系统的电气化^{1,2}，将需要大量的技术金属和材料。三大脱碳技术包括：从内燃机车辆向电动汽车（Electric Vehicles，简称为EVs）的转型，以及太阳能光伏和风能的部署³。对实现这些技术的原材料（这里称为“技术材料”）的获取对实现能源过渡至关重要。然而，制备这些工程材料也为当地和全球的环境带来了压力，因而需对这些影响进行量化并尽可能地减轻对环境的影响⁴。此外，降低开采、加工、精炼以及将这些原材料应用于低碳经济对环境的影响，也不应仅局限于技术本身，也应关注对其他区域或影响类别的实质性地转移影响。生产这些原材料的社会治理问题也可能很重要，而且可能难以解决^{4,5}。

至2020年，能源转型所需的技术材料需求将大幅度增加。例如，2015年至2050年间，全球电动汽车现货预计将从120万辆增加到9.65亿辆乘用车，电池存储容量将从0.5千兆瓦时增加到12380千兆瓦时⁶。有人声称面对高速增长的需求，采掘业即将迎来挑战⁷⁻¹¹。因此，随着未来几十年新项目的推进，了解矿床特征如何影响环境是至关重要的¹²。

锂离子电池（Lithium-ion Batteries，简称为LIB）是目前电动汽车中储能的关键技术¹³。阴极包含锂、钴、锰、铝、铁和镍；阳极包含石墨；其它组装部件包含铝和铜（图1a）。这一系列电池化学反应决定了所需材料的比例和形式。目前估算表明，锂离子电池需求量不断上涨，从2020年到2050年，对锂、钴、镍及大多数其它技术材料的需求将分别增长18-20倍、17-19倍、28-31倍和15-20倍¹⁴。

电池占据了制造EV生命周期中碳足迹的三分之二以上。在NMC111化学电池每千瓦时33.9 kg CO₂当量下，提取、加工和精炼阴极和阳极原材料的影响占电池影响的46%^{15,16}。然而，生命周期评估（Life Cycle Assessment，简称为LCA）中使用的某些数据（如石墨和锂的数据）可能低估了电池材料生产的影响。具有不同材料需求的其它电池类型也有可能在未来得到更广泛的应用，例如全钒液流储能电池¹⁷。

稀土元素（Rare-earth elements，简称为REEs）在海上风力涡轮机和电动汽车（图1）中大型Nd-Fe-B磁铁、催化剂、陶瓷、发光材料和医学上具有广泛应用¹⁸。稀土永磁材料的磁能积高于铁氧体和Al-Ni-Co永磁材料，因此更适合应用于此^{19,20}。随着电动汽车和风力涡轮机的普及，预计2016-2026年对氧化氮和氧化钆的需求将每年增加4.7%^{21,22}。

铜、镍和铝等主要金属市场已经非常庞大（每年数百万吨和数十亿吨），因此电动汽车需求量的增长对它的影响较小²³⁻²⁵。然而，电池阴阳极制备所需专业原材料目前市场相对较小（数千吨），它们将受到电动车需求增大的显著影响。

本篇综述介绍了量化技术材料生产对环境影响的方法，讨论了REE、Li、Co、Ni、Mn、V和石墨矿床的主要特征和定性环境认证，展示了如何从勘探到采矿、加工、精炼和制造进行定量地质冶金-生命周期评价，以便评估对环境的影响。虽然本文只阐述了部分技术材料（REEs、Li、Co、Ni、Mn、石墨、V），但应当指出

技术的快速发展和材料替代意味着今后更多的材料将符合技术材料的标准。本次讨论不涉及相关的社会治理问题，但这也是值得继续深入研究的主题。

要点:

- 向可再生能源的过渡，2020 年代对锂、钴、镍、石墨、稀土元素、锰、钒等其它材料的需求将大幅增长。
- 生产电池级或同等纯度的技术金属产品会对气候变化和环境产生巨大影响。
- 技术材料生产的影响植根于地质学。考虑地质学和矿物学有助于更好地了解技术回收（包括脉石和矿石）的主要驱动因素，这会影响制造技术材料所需的工艺路线。
- 不同的工艺路线具有不同的环境影响，可采用生命周期环境影响方法进行量化和比较。
- 生命周期评估可用于在开发阶段发现热点，以便在开工之前就降低环境影响。

技术和资源

本节概述了技术材料如何从矿山走进低碳技术。

生产阶段

从地下开采到电动汽车制造，从原材料提取、加工到电池或 Nd-Fe-B 磁铁等所需规格的化工品制备需要采取多个步骤。不同阶段可在世界不同地区进行，并产生不同的影响。材料采用的具体路线可根据相关原材料的矿物学和所需输出产品确定。然而，所有材料生产都经过勘探、提取（通常是采矿）、选矿和矿物加工、生产或精炼（图 2）以及部件制造。

纯度和化学

低碳经济中所使用的技术需要具有特定化学性质的高纯度材料。然而，生产这些高纯度材料需要更多的能量输入以及对矿床特征的深入了解，而这些会改变产品的环境影响。

电动汽车的性能和安全要求动力系统和锂离子电池技术材料必须具有足够的纯度^{16,26}。例如，在动力传输系统中，稀土金属中的高氧浓度会降低稀土永磁体的固有磁力，从而影响性能。用稀土金属制作永磁材料，其纯度应超过 99.95%^{28,29}。

电动汽车的锂离子电池包含阴极、阳极、分离器、电解液、电流收集器、外壳等组件。电池中使用的锂、镍、钴和其它材料需要特定的物理和化学特性，以确保高能量和高能量密度（表 1）。最重要的是，电池制造商通常需要比其他行业更高纯度的化学品。电池级材料在加工中通常需要额外的步骤，这些能源密集型、材料密集型步骤增加与该处理方法直接和具体相关的环境影响。除绝对纯度外，杂质浓度的上限（如磁性杂质）对于确保电池在多次充电和再充电循环中的高性能至关重要。不同化学原料的粒度分布和形态也很关键，不同电池制造商要求也大相径庭。此外，随着替代电池化学制剂的开发和部署，电池制造所需材料清单也在不断更新中。

地质矿床

不同类型矿床可生产同一种技术材料（图 3），它们具有显著不同的直接或间接环境影响。例如，一水合物氢氧化锂可以从南美洲锂三角的卤水资源或澳大利亚的硬岩矿床中生产。每种资源都需要不同的生产工艺来提取和转化为电池级一水合物氢氧化锂。相同资源也可有几种方法制造出相同终极产品³⁴。本节简要介绍了不同类型的技术材料矿床。此外，还讨论了某些技术对并非自行直接开采而是在提取（通常是熔炼）其他金属过程中回收的元素的依赖性。

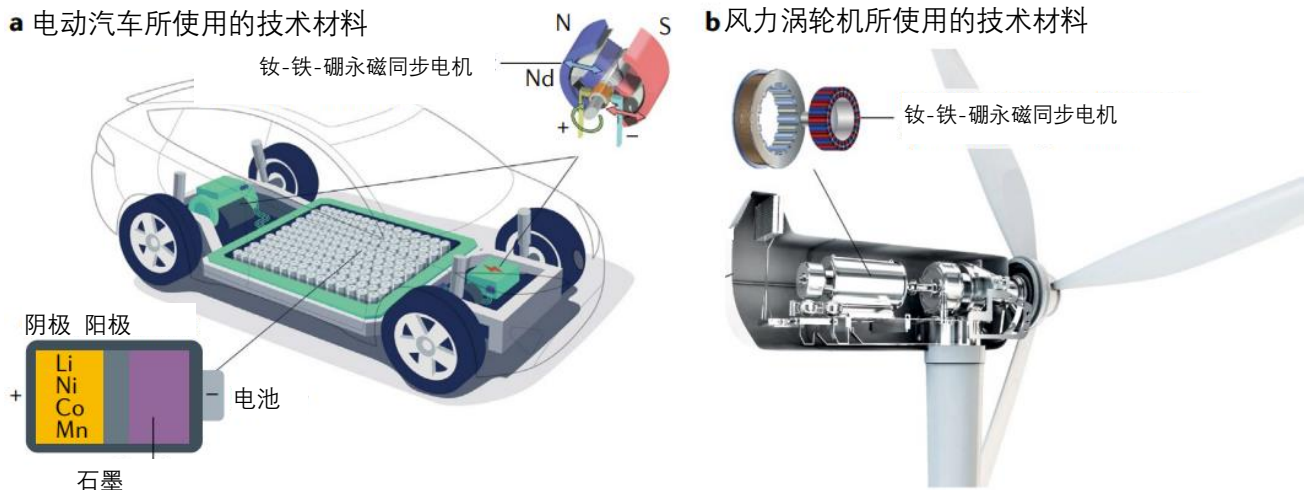


图 1 |含过渡材料的低碳技术的例子

a|钕的应用——在电动汽车直驱电机中应用钕-铁-硼电机。锂、镍、钴和锰用于电池的阴极，石墨常用于电动汽车的阳极^{16, 173}。b|钕的应用——风力涡轮机的永磁同步电机。电动车改编自 Peter Varga/Shutterstock.com。电机改编自 Fouad A. Saad/Shutterstock.com。涡轮机改编自 Andrea Crisante/Shutterstock.com。

稀土元素

稀土矿床具有不同的地质特征（图 3）^{21,35}。大部分正在运营的轻稀土元素(La, Ce, Nd, Pr) 矿山位于火成碳酸岩矿床中，如中国的白云鄂博和牯牛坪、美国的山口 (Mountain Pass) 和澳大利亚的韦尔德山 (Mount Weld)。不常见的富集稀土元素的碳酸岩 (次火山岩) 常经历了热液和/或风化过程得以进一步富集。这些矿床通过常规的露天开采方法直接开采，但它们的矿物往往共生在一起，难以分离。碱性岩 (如霞石正长岩) 中稀土元素具有较大规模、中-高品位，但很少开采，部分原因是它们矿物学特征极其复杂。在俄罗斯科拉半岛的一个霞石正长岩地下开采铈铟钙钛矿。尽管澳大利亚布朗山脉矿床已勘查许久，一些热液成因的稀土矿床广为人知，但也鲜少被开采。

稀土元素也会赋存于低温矿床中 (如风化、侵蚀和沉积物运输所形成)。在印度、马达加斯加和澳大利亚，独居石作为稀土矿物，是砂矿床的副产品，因而可采用价格低廉、涉及较少化学过程的物理提取技术。然而，精矿需要酸进行溶解 (破裂)。此外，由于独居石中的 Th 含量很高，其放射性问题也引起了关注。

世界上重稀土 (例如 Dy、Tb、Y) 主要形成于离子吸附型稀土矿床，其中稀土元素吸附在粘土表面。中国已开采离子吸附型稀土矿床多年，缅甸、泰国⁴⁴ 和马达加斯加⁴⁵ 等其他国家也有类似的矿床。原地或堆浸是首选的提取方法，因为它不需要矿物加工或裂解。

大多数稀土矿在开采后，需要进行选矿和裂解。这些加工产品随后进入化学精炼阶段，包括多阶段溶剂萃取，以分离和提纯单个稀土元素，将其转化为氧化物和金属，然后进行销售，成为供应链的一部分。回收稀土元素还可通过铝土矿浸出获取，也可作为磷灰石生产磷肥的副产品。

锂

锂赋存于卤水、伟晶岩和沉积物中 (图 3)。卤水是锂、钠、钾和其他盐高总溶解固体的溶液。大多数具有经济价值的卤水坐落在南美洲、北美和亚洲的高海拔盆地 (盐水) 中；锂还可以赋存在世界各地更深的油田和地热盐水中。来自盐湖的卤水通常含有 300 到 2000 mg_l⁻¹，而来自油田和地热盐水田的卤水通常含有 10 到 400 mg_l⁻¹。世界上一些最著名的卤水矿床包括阿塔卡马盐湖 (智利)、霍姆布雷·穆尔托盐湖 (阿根廷)、克莱顿谷 (美国) 和乌尤尼盐湖 (玻利维亚)。

伟晶岩矿床属于硬岩矿床，其天然锂浓度通常在 0.5-3% Li₂O (按质量计算) 范围内。在伟晶岩中，锂存

在于某些矿物中，最常见的是硅酸盐或磷酸盐矿物（如锂辉石、锂云母、铁锂云母、锂磷铝石和透锂长石）。这些含锂矿物与脉石矿物（如石英和长石）以及其他钽、铯、锡等其他矿石矿物相伴。矿化伟晶岩以席状侵入体的形式出现，通常厚数十至数百米，长数百米至数公里。世界上一些最著名的伟晶岩矿床，包括澳大利亚的格林布什矿、加拿大的坦科伟晶岩和津巴布韦的比基塔伟晶岩。

沉积型锂矿床主要有两种类型：粘土型和硼酸盐型。锂粘土矿床如内华达州塔克山口的锂粘土矿床，最初沉积在水下（如湖泊）的粘土中，后来受到热液作用的影响。硼酸锂矿床产于湖泊环境中沉积物中，富锂卤水的蒸发与热液蚀变有利于矿床形成。已知最著名的硼酸锂矿床是塞尔维亚的贾达尔矿床。

溶解在溶液中的锂，可采用不同方式处理卤水。在蒸发处理过程中，盐水经地下泵流出并聚集在大型蒸发池中，经风吹日晒 6-24 个月，盐水蒸发，杂质盐按顺序结晶，直到产生锂精矿（通常是 LiCl），这时可进一步加工成锂化学品⁵⁶。直接萃取锂可去除卤水中的锂，无需蒸发水或去除大量杂质。使用的介质包含如吸附剂、离子交换器或溶剂等特殊装置。蒸发和直接锂提取过程可以结合在一起进行操作，例如阿根廷霍姆布雷穆尔托盐湖的 Fenix 公司。

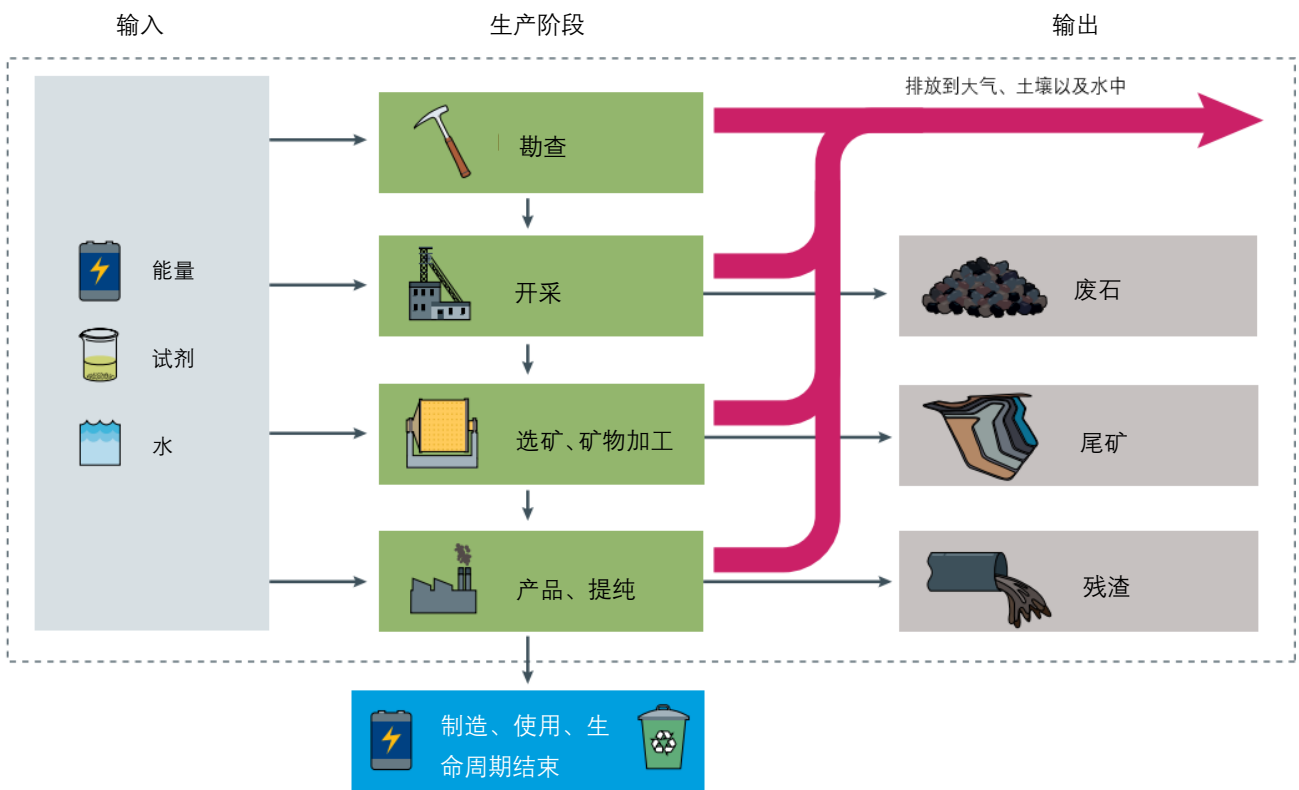


图 2 技术材料生产阶段

该图阐述了与电动汽车生产相关的投入、生产阶段和产出。排放包括温室气体排放、污染物和有毒物质¹⁷⁴。图改编自参考文献 174。

卤水中的锂与伟晶岩、沉积物中的锂加工差异很大。首先是矿物开采，伟晶岩需粉碎以减小颗粒尺寸。矿物选矿工艺（如泡沫浮选）可用于沉积物锂提取，以产生 4%至 8%Li₂O 之间的浓缩物。精矿（如锂辉石）通常需要在高温下处理，以改变晶体相借此来释放锂。沉积矿床中可以不采取焙烤方法。以上两种情况下，锂都是使用化学品从矿石中渗出。水锂精矿可通过化学或（预期）电化学过程转化为锂化学品，一般采用硫酸进行。

钴

钴主要来源于沉积物容矿的层状铜矿床、岩浆铜镍矿床或红土型镍矿床、多金属矿脉以及海底铁锰结核

和结壳（图 3）。目前，钴总是作为镍或铜生产的副产品或相关产物，然而摩洛哥蛇绿岩型布阿泽矿山（the BouAzzer Mine）是个特例。全球大多钴矿业来自中非铜带的沉积层状矿床。

电池级硫酸钴由硫酸和精炼钴之间的化学反应制成，也可通过精炼氢氧化钴和氧化物来获取。沉积型铜钴矿床含氧化矿和硫化矿，它们在露天或地下开采后都经过粉碎。浸出氧化矿，多次净化，钴作为钴氢氧化物沉淀。硫化矿通过泡沫浮选集中，烘烤精矿，之后采用湿法冶金制备，这与氧化矿石制备流程相似。

红土型镍矿床中的钴主要通过露天开采褐铁矿，然后通过湿法冶金高压酸浸提取钴。根据特定工艺，中间产物或最终钴产品将以钴硫化物、钴氢氧化物、钴粉末或钴金属形式存在。钴是硫化镍矿的副产品，可通过露天开采和地下开采的方式进行。矿石最初通过泡沫浮选进行富集，随后通常采用火法冶金工艺生产冰铜，其中大多数钴将进入矿渣中。然后，通过湿法冶金工艺对冰铜进行精炼，以生产钴粉末或钴金属。

镍

硫酸镍是用于电池制造的常见镍产品之一，其可通过硫酸和一价镍的化学反应生产制得。在硬岩矿床（岩浆型和热液型硫化物矿床）、富镍原岩风化形成的红土矿床以及海底铁锰结核和结壳中都发现了具有经济价值的镍资源（图 3）。其中，岩浆硫化镍矿床可在多种地质环境中形成，并有可能与钒、铜和铂族元素矿化相伴^{67,70}。

纵贯镍提取历史，较难从红土矿中分离出镍，因而大部分是从岩浆硫化物矿石中生产的²³。红土矿可分为腐泥和褐铁矿，其中褐铁矿只有通过湿法冶金高压浸出工艺才能生产出一价镍⁷¹。特别是对于镍硫化物来说，通过露天或地下工艺开采获取，再对其进行粉碎、研磨、泡沫浮选来浓缩，将精矿熔炼成中间产物冰镍，随后可采用各种技术将其精炼成一价镍。从褐铁矿中生产一价镍的过程包括：露天采矿、筛分、高温高压条件下酸浸、中和及以硫化物或氢氧化物形式沉淀。该中间产物通过氢还原和电积精制可以生产一价镍^{68,69}。抑或是使用目前新开发的生物堆浸工艺，该工艺具有工业规模，其过程包括：露天采矿，压碎矿石、酸溶液淋浸矿堆。

锰

锰赋存于许多矿石中，主要是锰碳酸盐（如菱锰矿）和锰氧化物（如软锰矿）⁷³。陆地锰资源常赋存于富锰沉积岩中⁷³（图 3）。含锰沉积物可分为单独出现或作为铁质地层的锰质沉积夹层。世界上最重要的锰矿床是南非卡拉哈里锰矿田，此处含锰的沉积物与带状铁层交错⁷⁴。锰矿床也可赋存于热液蚀变火山岩中、海底铁锰结核和结壳中。锰还可通过富锰源岩的风化和氧化作用富集到表生型矿床中，如目前正在开采的加蓬和加纳矿床（Gabon & Ghana）。

电池级硫酸锰可通过电解金属锰精炼或矿石化学提纯来生产低纯度硫酸锰⁷⁵。

表 1|电动汽车电池、储能和直驱电机所需的关键原材料¹⁷⁰⁻¹⁷²

元素	材料	纯度	应用
稀土元素	Nd, Dy	99.95%+	直驱电机（永磁）
锂	碳酸锂 (Li ₂ CO ₃)，氢氧化锂单水合物(LiOH·H ₂ O)	碳酸锂 99.5%+；氢氧化锂 56.5%+，两者杂质均低于指定水平	电池阴极
镍	镍硫酸盐((NiSO ₄ (H ₂ O) ₆)	高纯度	电池阴极
钴	钴硫酸盐 (CoSO ₄ ·7H ₂ O)	高纯度	电池阴极
锰	锰硫酸盐单水合物(MnSO ₄ ·H ₂ O)	32% 锰	电池阴极
石墨	天然石墨，合成石墨	质量分数为 99.95%；合成石墨所需纯度更高，具有低热膨胀和更好的热稳定性	电池阳极
钒	五氧化钒(V ₂ O ₅)	高纯度	全钒液流电池

石墨

石墨可以从天然或合成原料中生产⁷⁶。大多数锂电池阳极是由从石油焦中提取的初级合成石墨制成，因

其具有相对较高的纯度、较低的热膨胀和较好的热稳定性^{77,78}。天然石墨可分为三种类型：无定形石墨、脉状石墨和浸染片状石墨（图 3）。LIB 应用中仅使用片状石墨⁷⁶，而其是由富碳沉积物经变质作用形成，并出现在经历高温变质作用（角闪岩相或麻粒岩相）的沉积岩带中⁷⁹。世界上的大部分石墨来自中国的 170 个矿区⁸⁰。

天然石墨通过露天和地下开采方法开采，并对原矿石进行选矿富集。要达到 90–98% 的纯度，需要对脉石物质进行酸和/或碱淋滤，以去除硅酸盐和碳酸盐。而要获取纯度为 99.95% 的石墨用于电池生产，还需要采取氢氟酸浸出、卤素或碱焙烧以及惰性气氛中的热处理等进行纯化⁷⁶，随后需对粉末形状和粒度进行后处理，从而赋予其于 LIB 阳极所需的表面性质。其中后处理包括铣削、分类、成型（球化）、涂层以减少表面积和包装。

从石油中生产合成石墨需要生产生焦，然后进行煅烧和石墨化^{31,81}。生焦作为炼油的中间产物，含有 5–15% 的挥发物。去除挥发物需要对重油进行煅烧或催化裂化⁸²。煅烧阶段产生针状焦，其纯度在 97% 至 99% 之间。煅烧后，能源密集型石墨化阶段是煅烧针状焦在艾奇逊炉或浇注炉中在约 2500°C 条件下进行处理和石墨化，以生产高纯度石墨^{83,84}。目前还有学者在研究开发更具成本效益和能源效益的石墨合成方法⁸⁵。

钒

钒矿床类型也是多种多样，如与层状镁铁质-超镁铁质岩浆侵入体相关的含钒钛磁铁矿矿床、沉积岩（如砂岩或页岩）中的矿床以及风化和氧化的贱金属矿床。目前，大部分时候钒是层状侵入体（如南非的 Bushveld 层状侵入体）中铁及其他金属的副产品。除原生资源外，全球一小部分的钒生产来自废料，如铝土矿生产铝的残渣、制备碳氢化合物所产生的残渣和燃煤产生的灰烬。

环境的影响

生产技术材料对环境的影响十分重大。本节探讨了生命周期评价方法如何应用于评估技术材料生产的环境影响，并讨论了对稀土、锂、钴、镍、锰和石墨进行生命周期评价研究。

生命周期评价

生命周期评价同样适用于采矿和精炼技术材料，就像适用于供应链的其他部分一样。生命周期评价可用于量化服务或产品对环境的影响，也可广泛用于商业、消费和工业产品，包括原材料和技术金属。ISO 14040 和 ISO 14044 等国际标准概述了生命周期评价应如何进行，ILCD 手册等文件提供了更多细节。

通常称产品生命周期温室气体排放量的量化为碳足迹，它代表一个影响类别，而不是生命周期影响评估（Life Cycle Impact Assessment，简称 LCIA）分类中的全套影响类别。随着企业、项目和产品会计和报告方法的普及，碳足迹方法在过去 10 年中得到了广泛应用。其对于提高消费者意识和促进关于产品环境影响的讨论非常有价值。然而，有人认为，这种对单一影响类别的关注偏离了生命周期评价的初衷，即应以整体的方式看待一系列影响，为避免通过解决一个环境问题的过程中所带来新的环境问题。

在技术材料方面，生命周期评价可以以多种方式来使用（图 4）。它可以评估从摇篮到坟墓的整个生命周期内生产技术材料的总体环境负担和效益。生命周期评价包括原材料的生产、耗材（如试剂或能源）的上游影响、运输、再利用、回收和废弃。大部分原材料的生命周期评价研究是“从摇篮到大门”，这意味着生命周期评价包含了自然资源生产和制造材料的影响，而不是与材料下游使用相关的影响。其他人则关注价值链的特定部分，如炼油厂。或者，如果生命周期评价侧重于单个阶段，则称为“门到门”研究。

技术材料生产的生命周期评价方法尤其重要，因为开采、加工和精炼所需化学条件、纯度以及相关排放和废物输出都需要大量能源和材料投入，这些影响包括在生命周期评价中。产品的上游影响在制造公司直接运营之外所占的比例可能很大，并为减轻环境影响提供了机会。

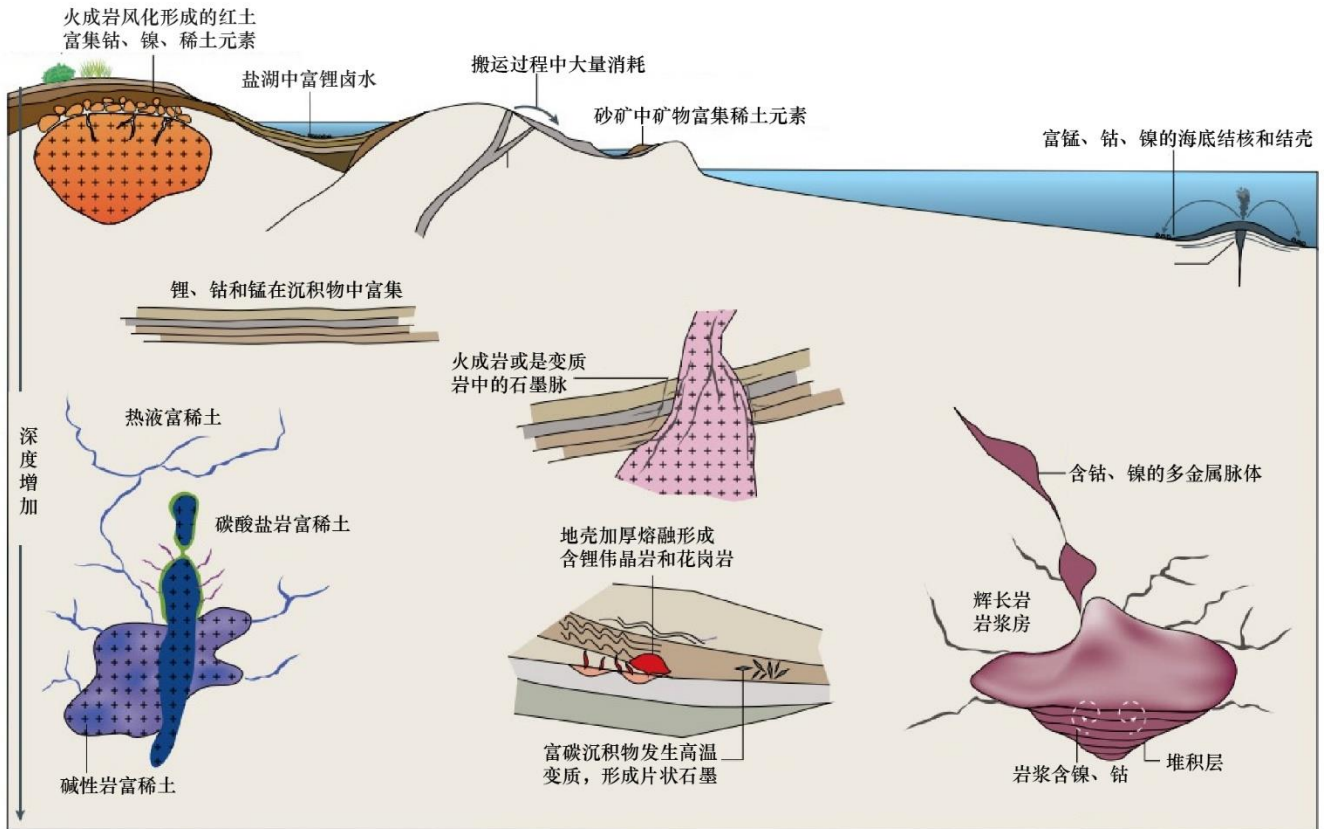


图 3 | 稀土元素、锂、钴、镍、石墨和锰的主要地质矿床类型概述

风化矿床、矿砂和盐水形成于地表；结核和结壳形成于洋中脊附近和海底热液喷口；沉积物和火山沉积物形成于地壳浅部（例如：深度小于 4 公里）；地表 4 公里以下有火成岩和变质岩。

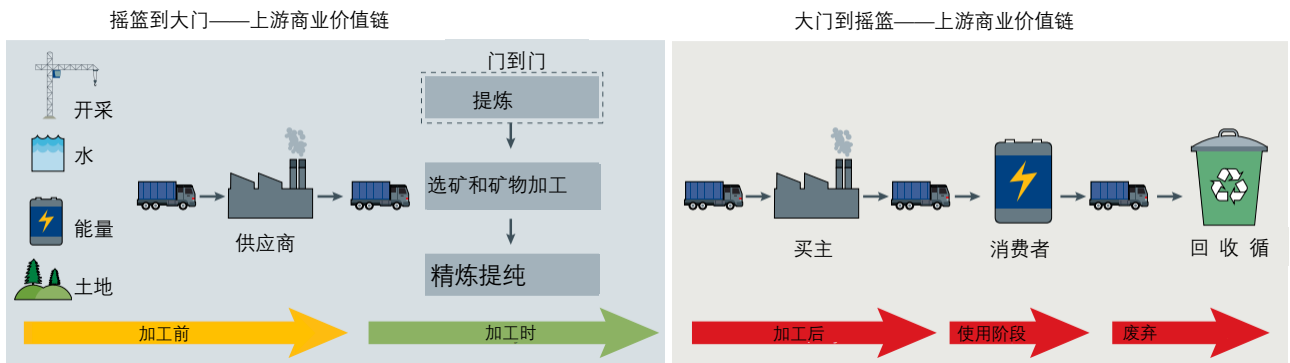


图 4 | 生命周期评估变化

从技术材料生产商的角度来看，不同的生命周期评估彰显了上游和下游价值链之间的区别。从摇篮到门的区别包括将原材料提取到设施门，从门到门将包括整个生产链中的一个增值过程，以及从摇篮到坟墓或摇篮到摇篮的生命周期评估，该评估将考虑与产品生命的所有阶段相关的所有环境影响。

稀土元素：中国白云鄂博是最大的稀土矿床，其目前已采用从摇篮到大门的生命周期评价进行生产。碳足迹结果范围为量每千克稀土氧化物 (Rare-earth Oxide, 简称 REO) 二氧化碳当量为 22.8 至 35.1 千克。对碳酸岩和碱性岩石的混合稀土氧化物生产进行了前瞻性生命周期评价¹⁰¹。已对离子吸附稀土矿床进行了生命周期评价，假设其纯度为 90–92%，碳足迹结果在 20.9 至 35.5 kg CO₂eq./kg REO 之间，而假设纯度为 90%，碳足迹结果在 18.8 至 33.11 kg CO₂eq./kg REO 之间¹⁰³。对从独居石矿砂中分离出的 15 种稀土元素进行了生

命周期评价，平均碳足迹为 65.4 kg CO₂eq./kg REO¹⁰⁴。无论是在稀土元素生产链的不同阶段，还是生产的单个稀土元素的不同比例，生命周期评价结果的变化区间不仅是因为材料来源不同，还因为功能单元不同。

对稀土生产的溶剂萃取阶段进行了门到门的生命周期评价，每千克钽氧化物产生 31.9 至 35.4 千克 CO₂ 当量的影响，针对采矿、选矿、浸出和溶剂萃取各个阶段进行从摇篮到门的生命周期评价，结果显示为每千克钽产生 105 千克 CO₂ 当量^{105,106}。

稀土元素价值链中一系列的其他影响类别非常重要，如离子吸附型重稀土矿床对人类及生态毒性的影响¹⁰²，建议进一步开发其他影响类别，尤其是放射性影响。

锂：目前只在较小程度上对 Li₂CO₃ 和 LiOH·H₂O 进行生命周期评价¹⁰⁸，如比较了卤水和锂辉石制备碳酸锂过程中 CO₂ 的产量。有研究表明锂辉石转炉碳足迹为每千克碳酸锂（Lithium Carbonate Equivalent，简称 LCE）CO₂ 当量为 15.8 kg⁹⁸，而盐水路线的碳足迹为 0.3 kg CO₂eq./kg LCE¹⁰⁹。另一项研究考察了基于资源和技术变化的未来影响变化，该研究表明，盐水资源生产的碳足迹将从 2020 年 3.2kg CO₂eq./kg LCE 增加到 2021 年（原文 2100 应有误）的 LCE 3.3kg CO₂eq./kg LCE³⁴。

与水相关的影响是开采锂的一个重要课题。盐水与环境处于动态平衡状态，受蒸发和集水区有限降雨补给的控制，其周转缓慢。在某些管辖区（如智利）盐水的监管方式与淡水不同，但在其他管辖区（如内华达州）盐水的监管方式与淡水相同。法规上的区别导致了业界对盐水是否应被视为水的问题的困惑。锂卤水开采对生态系统和人类淡水可用性的影响，在不同的开采区之间可能会出现根本性的变化，矿床独特的水文地质决定了这种影响怎样实现。

钴：根据钴研究所，精炼钴的平均碳足迹为每千克精炼钴 38 千克二氧化碳，一次能源消耗为 883 兆焦耳。其中必须注意的是，计算这些值的原始数据仅占全球精炼钴产量的 30%，这还不包括中国的产量^{65,116}。对于精炼钴作为镍的副产品的生产路径上进行的生命周期评价，计算出碳足迹为每千克精炼钴 11.7 千克二氧化碳当量。为了了解生产钴的生命周期影响，阿贡实验室（the Argonne Laboratory）发布了从沉积铜钴矿床中开采铜钴的生命周期清单（Life Cycle Inventory，简称 LCI），生产了一种中间氢氧化钴产品，该产品在中国冶炼为电池级七水硫酸钴。然而，铜-钴开采的 LCI 在假设加工过程中钴回收率为 80% 的情况下进行了调整，该值过高，且未考虑因矿床地质或加工路线而产生的可变性。2020 年的生命周期评价研究表明，加拿大精炼的电池级硫酸盐的碳足迹是中国冶炼厂的一半，分别是每千克七水硫酸钴 1.6kgCO₂eq. 与 3.3kgCO₂eq.。

在全球钴副产品生产中，矿山生产并不总是资源节约的，因为钴回收率和环境足迹并不总与各种矿床类型和加工路线相符。例如，通过湿法冶金处理的红土型镍矿床中钴的回收率相对较高，但由于浸出过程中需要加热，所需能量强度也是最高的。相比较而言，沉积型铜钴矿床的钴回收率相对较低，所需能量强度要低得多。假设在生产过程中 100% 使用可再生能源，再利用经济分配原理，预计深海锰结核生产电池级六角硫酸钴总的碳足迹将会减少 30%。然而，目前这些矿床尚并没有开采。

镍：已对电池级硫酸镍进行了行业平均生命周期评价，功能单位为 1 千克硫酸镍，占全球产量的 15%。研究表明，平均碳足迹为每千克硫酸镍 5.4 千克二氧化碳当量，一次能源需求为每千克硫酸镍 84 兆焦耳，其中可再生能源仅占 5%。具体而言，对从硫化物或红土型镍矿中一价镍提炼的环境影响差异进行了评估。所研究的硫化物作业均是每千克金属释放的 CO₂ 当量少于 10 千克；而对于红土项目，温室气体的年排放量为 25 至 46 kgCO₂eq./kg 金属，这与生命周期评价研究报告的其他值一致，这其中包括镍矿高压酸浸加工⁷¹。假设生产过程中使用 100% 的可再生能源，再利用经济分配原理，深海锰结核生产电池级硫酸镍的过程预计从摇篮到门的生命周期评价将减少 80%。目前，这些矿床尚没有开采。作为参考，陆地采矿过程中硫酸镍中的碳足迹为 19.6kgCO₂eq./kgNi。

锰：全球锰研究所进行了从摇篮到门的生命周期评价，功能单位为 1 千克锰合金¹²¹。生态发明数据集（the Ecoinvent Data Set）的研究也已完成¹²¹。然而，生态发明数据集并不能代表高纯度一水硫酸锰进入了

技术材料价值链。数据集中提供的数据是基于化学计量计算，不考虑杂质去除，这是湿法冶金过程的一个重要环节。目前还没有对高纯度一水硫酸锰进行全行业估计。但对于中国生产的电解锰金属进行了生命周期评价研究。未来将对于深海锰结核进行加工以生产电池级高纯度的一水硫酸锰。研究表明，在生产过程中假设100%的可再生能源，再利用经济分配的原理，该工艺可使总足迹减少22%。对于陆地资源，高纯度一水硫酸锰的碳足迹确定为每千克锰6.4千克二氧化碳当量，而海底资源的高纯度一水硫酸锰的碳足迹确定为每千克锰5.0千克二氧化碳当量。

石墨：LCIA关于石墨的数据有限。先前研究估计源自天然石墨矿床的电池级石墨碳足迹为每千克2.15千克二氧化碳当量¹⁰⁹。综合对天然鳞片石墨源的电池级石墨生产的一次、二次数据，全面评估得出碳足迹为5.3 kg CO₂当量/千克石墨¹²³。

生命周期评价是在从石油焦和煤焦油沥青中提取的电池级石墨的石墨化阶段进行的，结果是每千克石墨产生4.9千克CO₂当量。该门到门研究不包括上游活动或精炼和煅烧的影响。

钒：对钒氧化还原液流电池进行了生命周期评价，并将其分为几个阶段，其中包括从南非钒钛磁铁矿矿石中生产五氧化二钒(V₂O₅)的过程。在本生命周期评价中，钒氧化还原液流电池对环境的影响主要受上游工艺控制。气候变化的影响为每千克五氧化二钒产生1.1千克二氧化碳当量，这表明生产区域的电网结构为煤炭密集型。在使用可再生能源的地区，可以大幅减少这种影响。

前瞻性生命周期评价

生命周期评价可在项目的运营阶段和/或开发阶段进行¹²⁶。在操作阶段进行生命周期评价的优点之一是，前景数据质量将得到改善，因为有机会直接测量试剂或能耗等数据点。然而，很大一部分采矿所带来的影响是由早期开发阶段的决策决定的。因此，在开发初期，采取有效措施确定所使用的技术材料的潜在环境影响，将在缓解对环境的影响方面具有很大潜力¹²⁷。在进行测试工作和制定开发流程图的同时，也可以在项目开发阶段进行前瞻性或事前的生命周期评价¹²⁸。与具有同等功能单元的当前运营项目相比，可在过程和环境的影响中确定环境热点S101¹²⁹。实践表明，在勘探阶段有机会进行生命周期评价¹³⁰。

地质冶金与生命周期评价一体化

地质冶金学最初是一种基于团队的方法，将地质学和矿物加工相结合，以记录矿体内的可变性，并量化矿石性质对工艺性能的影响，从而生成三维块体模型。如今，地质冶金已演变为覆盖多学科的更为全面的方法，旨在通过将所有与矿物和采矿工程有关的地质科学相结合，在能源和资源使用效率方面最大限度地利用矿物原材料。它包括理解和测量矿石的地质学、矿物学和冶金学特性，以生成一个数据库。该数据库可集成到空间预测模型中，用于未来或现有矿山的选矿设计和运营、矿山规划和财务分析。其目的是改善资源管理、冶金工艺性能，最终提高采矿项目的净现值，同时降低运营和技术风险。除上述内容外，地质冶金还可用于提高资源效率，减少采矿价值链沿线所有提取阶段的社会环境影响，例如：减少湿法冶金回路中的酸消耗，从矿山尾矿和废物流中回收副产品提高资源效率，改善尾矿管理和酸性矿山排水系统修复。

实际上，地质冶金方法以矿物为基础，所采用的定量信息来自3D矿床模型以及过程模型。矿床模型记录了矿体内的可变性，特别是能够影响矿石加工的属性，如：矿石品位（目标金属品位）、有害元素、矿石矿物学（矿物、结构）；抑或是地质冶金测试得出的任何其他相关属性，如：粉碎指数、酸溶性金属含量和酸消耗。过程模型使用地质模型中的定量信息作为输入变量，预测冶金性能，并通过模拟来确定作业期内的采矿计划。典型的模拟输出包括与每吨矿石的资本支出（Capital Expenditure，简称为CAPEX）和运营支出（Operational Expenditure，简称为OPEX）、回收率、产量、能源、水和试剂消耗相关的成本。

尽管地质冶金和生命周期评价之间存在这些协同作用，竟无人呼吁将这两种方法结合起来。事实上，虽然地质冶金正在成为采矿项目早期阶段的实践标准，但生命周期评价的应用现已与矿山规划或工艺设计相背而行，并且主要局限于对已运营矿山的回顾性环境评估。在采矿项目的早期阶段将生命周期评价与地质冶金

相结合，可在不同情景的评估过程中纳入环境因素，从而实现综合决策，最大限度地提高流程和环境绩效。

采矿作业性能和环境影响的联合优化可通过生命周期评价-地质冶金方法实现（图 5）。原则上，在采矿项目的早期阶段，将生命周期评价与地质冶金（反之亦然）相结合，超越了传统方法，带来了许多好处。首先，还在可行性评估阶段就能设计出能源、资源高效使用的流程，以便能够管理地质冶金易变性，以提供符合固定规格的产品，同时最大限度地减少碳足迹。基于品位以及从矿石到产品的整个矿山价值链的经济、环境评估，该方法还允许更全面地定义矿体边界（项目资源和储量）。

另一个好处是能够从技术、环境和社会角度规划生产计划，以确保在所有开采阶段都能最有效地利用资源。这种积极主动的管理还可以根据定量地质冶金信息更有效地规划矿山关闭、补救以及恢复策略，从而确保环境影响在很长一段时期内得到缓解，并提高社会接受度。提高对矿产资源有关的地质冶金的理解，可以识别副产品和潜在的副产品，并为材料的联合生产开发合适的、有利可图的工艺，以最大限度地提高资源效率。该方法还可以使产生的废物最小化，更好地管理潜在的杂质元素或问题矿物，特别是通过预测其在加工过程中的行为，以回收这些元素或减少其在尾矿中的含量。通过提供各种材料流（从矿石到产品）的信息和定量数据，有助于监管链条（从源头到消费者）实时透明，支持矿山价值链的可追溯性和负责任的采购。

过程模拟是一项关键的赋能技术，允许地质冶金方法超越基于经济指标和系统边界的传统生命周期评价方法，提供基于矿体知识的更全面的流程改进。随着全球变暖及酸化，一些软件将模拟输出（体量和能量）转换为生命周期评价/环境影响指标。例如，将过程模拟与生命周期评价相结合，这已成功应用于铜初级生产的不同流程方案、黄金加工的环境影响评估以及稀土元素加工厂合适能源的选择。基于空间明确数据生成的环境影响指标可用于生成矿床的环境块体模型。该区块模型以及经济区块模型可用于矿山的规划和调度。尽管使用碳足迹块模型约束长期矿山调度模拟仅限于矿石开采阶段（不包括加工阶段），但该方法的潜在优势已在铁矿石开采案例中得到说明。由此，使项目二氧化碳排放量最小化，同时使其经济效益最大化。

到目前为止，只有少数研究在其 LCIA 中包含了矿石地质冶金的可变性。美国 Bear Lodge 稀土元素项目尝试着将矿石可变性纳入生命周期评价。该分析强调，由于矿石矿物学的差异而导致的矿石成分不同，而这可能会在显著影响到运营矿山的碳足迹。

总体而言，地质冶金-生命周期评价方法可根据矿石性质和模拟，量化和优化采矿项目的环境影响（通过生命周期评价）、过程和/或经济（通过地质冶金）。因此，这些方法可以更为准确和动态优化原材料提取资源效率。

减少环境影响

在生产技术材料时，可以采用各种方法来限制环境影响。生命周期影响（如碳足迹、土地使用影响或技术材料提取和加工的水影响）可以通过多种方式缓解。矿床的环境影响不可避免，应努力了解矿床环境影响并研究其缓解方法。

缓解环境影响的机遇

尽可能将加工过程电气化，采用太阳能和风能等可再生能源，这样只需要并入最小程度上的技术创新。电网通过使用这些新能源降低碳强度，生产技术材料的碳强度也将降低。针对加工路线，还可以探索在工艺中重复使用或回收能源和材料的机会。试剂可从实施类似策略的供应商处购买。例如：锂加工中使用的碳酸钠可从天然碱矿床或氨碱法工艺生产。每生产一千克同等材料，不同生产途径和特定供应商会产生显著不同的影响。技术材料制造商应确定哪些途径提供的产品产生的温室效应最低，并从这些供应商处购买试剂。

采矿和冶金项目通常会产生副产品（工业矿物、金属或能源）。在生命周期评价中，副产品可以抵消成本和环境影响如钒和。稀土元素在内的关键原材料可以作为氧化铝生产的副产品生产。副产品虽然具有潜在的环境效益，但它增加了成本，并不总是受到欢迎，故此需要对这些过程仔细地进行技术经济分析。除此之外，目前正在开发利用地热锂，有望提供大量脱碳机会。在这些开发项目中，锂从深而热的地热卤水中提取出来，用于生产锂化学品和低碳电力。与国家电网相比，这种电力通常环境影响较低。比如：德国电网仍大量使用煤炭，高强度排放二氧化碳，地热锂替代煤炭生产低碳电力将大幅度地降低碳排放。

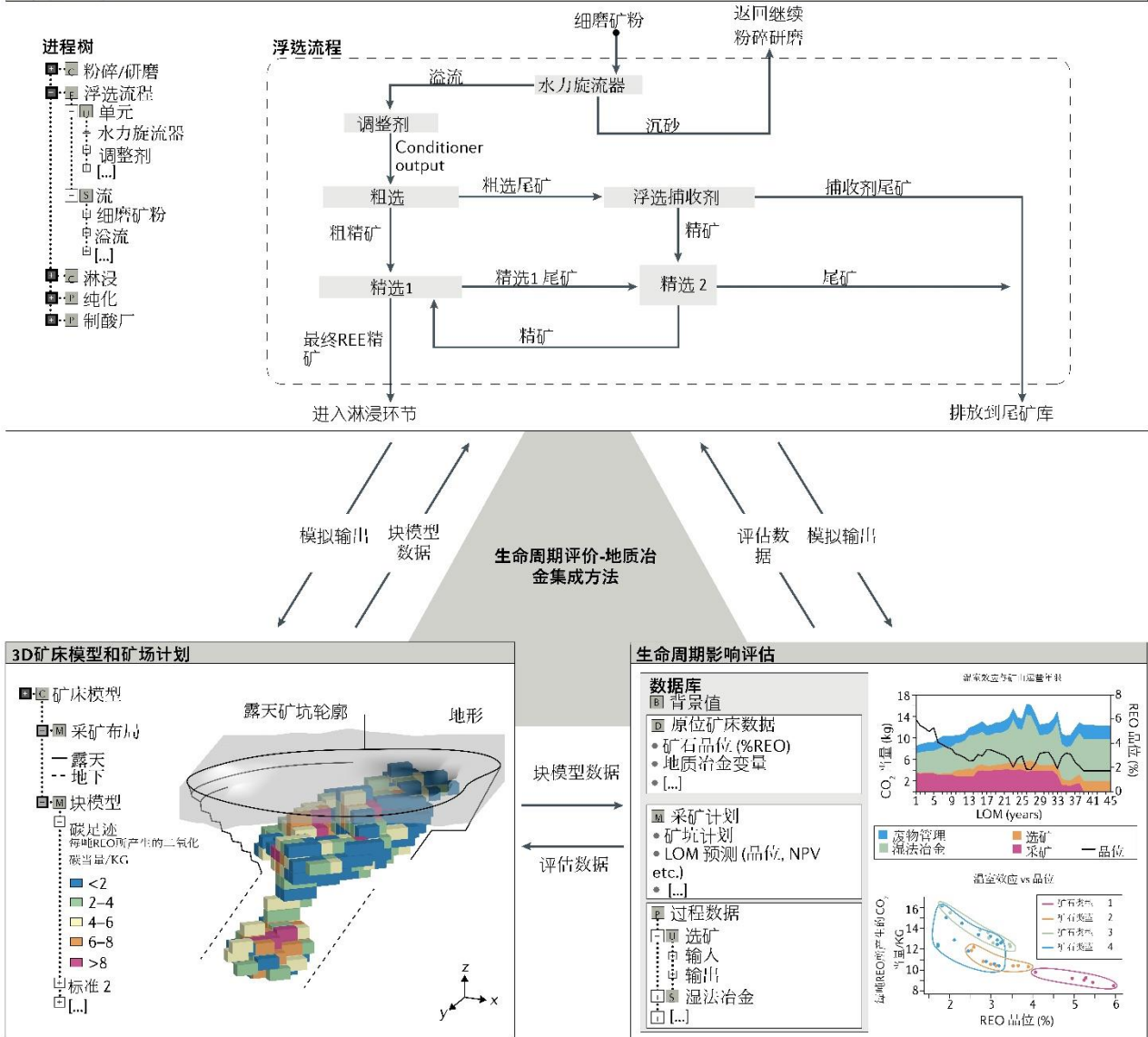


图 5 |生命周期评价-地质冶金集成方法。

为共同优化采矿作业的经济绩效和环境影响，生命周期评估（LCA）几何学方法依赖于三个相互提供定量数据的组件和/或模型：3D 矿床模型和矿场计划过程模型和 LCA 模型。在 3D 矿床模型（露天矿场内的块模型）中，每个块都分配属性，例如：等级、密度、几何学变量（例如硬度、组合指数、酸消耗量）或环境影响标准（例如碳足迹、颗粒排放）等。这些属性可用于数据管理、矿山规划和调度、预测生产和测试不同场景。工艺模型由单元（例如球磨机、浮选单元）和流（例如浓缩物、尾矿、工艺水）组成，用于设计和模拟工艺输出和预测生产。LCA 模型用于根据模拟和/或工艺数据以及原地矿石特性评估整体运营每个阶段的环境影响，如碳足迹¹⁰⁰。LCA 模型允许检查不同的项目选项（如能源、酸再生、水回收）。净现值，净现值;REE，稀土元素;REO，稀土氧化物。“过程模型”中的浮选电路是使用 HSC 化学软件（www.outotec.com）创建并经过调整的。温室效应（GWI）与矿山运营年限（LOM）之间的关系图改编自参考文献¹⁰¹，CC BY 4.0

循环经济思想

含有技术材料的产品将得到大量生产，当这些产品废弃时，回收利用可能成为这些材料的重要来源。适当的循环经济策略（如再利用、再制造和再循环），可以减少对原材料的依赖，并有望在未来几十年内满足产品需求。然而一些人认为基于材料回收率和加工技术等因素，LIB 和硬盘驱动器等回收产品不一定能带来环境效益。因此，仍需要深入研究，以更好地了解技术材料一次加工与二次加工的环境性能。在矿山或选矿厂也有机会采用循环经济方法，即从矿山尾矿和废物中提取具有经济价值的材料。

碳封存的机遇

与技术金属相关的矿物学和项目有望做到二氧化碳封存，尤其是当钴、镍作为副产品生产时。每年人工合成和自然资源消耗向大气排放 40 Gt CO₂，其中约一半的二氧化碳导致全球变暖，而另一半则被海洋和陆地生物圈所消耗。为了防止到 2100 年全球气温上升超过平均升温 2°C，需要多种可再生能源发电技术和方法来降低大气中的温室气体浓度，如碳矿化等负排放方法¹⁶²。

这些负排放方法涉及 CO₂、富镁和富钙硅酸盐岩石（如地幔橄榄岩、玄武岩熔岩或超镁铁质侵入体）之间的反应，以产生惰性碳酸盐矿物，如菱镁矿或石灰石（分别为 MgCO₃ 和 CaCO₃）。这些反应自然发生，尽管在缓慢的地质时间尺度上。这些岩石类型中的主要活性矿物是水镁石（Mg(OH)₂）和橄榄石（Mg, Fe)₂SiO₄，它们反应相对较快，每公吨材料分别封存 0.76 和 0.62 吨 CO₂。其他更常见的矿藏有可能捕获大量的二氧化碳，但是，碳化反应相当复杂。西澳大利亚基思山（Mount Keith）镍矿通过研磨提高矿物溶解速率或可能的生物方法，以产生更多新鲜的反应表面积；将二价阳离子引入溶液，稳定地溶解在 HCO₃⁻ 溶液中，甚至产生了碳酸盐矿物。运营中的基思山镍矿每年封存 39800 吨大气二氧化碳，补偿了该矿每年 11% 的温室气体排放。

如果资源完全碳化且这些方法在经济上可行，则这些岩石最大碳固存潜力可达约 60000000 Gt。杜蒙特镍矿项目（the Dumont Nickel Project）采用被动碳矿化方法，每年有 21000 千克二氧化碳通过尾矿被封存，补偿了矿山运营的年碳排放量达 16%。如果工程或生物方法可以加速其他矿物的溶解，释放矿坑废物以及蛇绿岩杂岩在内的自然露头中的阳离子（如镁和钙），则这些方法有可固存 10⁵-10⁸ Gt CO₂^{162,163}。尽管仍存在许多挑战，但建模和实验表明，碳矿化作为一种长期且相对高效经济的负排放技术具有潜力¹⁶²。

总结和未来展望

到 2040 年，电动汽车和电池储能行业对矿产的需求将快速增长。在国际能源机构所提出的可持续发展方案中，锂的需求将增长 40 倍以上；石墨、钴和镍的需求将增长 20-25 倍；稀土需求将在 2040 年增长 3 倍。为了满足需求，需开发建设几处新矿山、建一些选矿厂和冶炼厂。在需求显著增加之初，确定对环境有益的项目，支持其利用生命周期评价-地质冶金综合方法量化，以达到环境影响最小化。

提前充分了解环境绩效有助于开发商、投资者、监管机构、技术材料购买者和其他承购者在产生影响之前尽早做出决策。因为在影响产生后，再做出改变以减轻这些影响往往为时已晚。未来研究应侧重于早期环境影响评估，将地质学家和生命周期评价实践者与采矿和选矿工程师联系起来，以研发可持续资源开发的综合框架。

在评估和勘探稀土元素、锂、镍、钴、锰、石墨和钒矿床的早期阶段，地质学家可以考虑与开采和下游处理对环境的潜在影响有关的一系列因素。例如：确定一个矿山中潜在的副产品，开发多种技术金属生产；最大限度地提高资源利用率，评估矿床的品位和三维结构，这决定了采矿期间多少土地会受到影响。矿石的地质冶金学特性决定了其在加工过程中的行为，影响资源利用率、废物排出量以及能源、水和材料的消耗。

电力革命和脱碳议程将使社会经济从以化石燃料为基础转向以矿物为基础。不断满足日益增长的产品需求，人们开始意识到开采这些材料所带来的不良的社会和环境影响。关注首尾相接（End-to-end）原材料的可追溯性、相关的生命周期评价绩效数据以及供应链内可靠的社会和管理数据，这是确保原材料生产所带来最小影响的重要步骤。研究应综合以上考虑，从而为最佳实践提供依据。

生产能很大程度上对环境产生不利的影 响，因而实现技术材料生产的可持续性并非易事，需在勘探、采矿和精炼阶段开展更广泛、更系统和更全面的生命周期评价，并结合地质冶金等方法来解决。只有在整个价值链上应用综合性和预测性方法（如：生命周期评价—地质冶金方法），社会才能实现低碳经济，技术才能自始至终地可持续发展。

参考文献（略）

（翻译：郑旭阳/矿产室）（审核：[秦克章](#)/矿产室）