矿产地质

doi:10.12134/j.dzykt.2026.01.005

全球锂电池矿产资源现状及产业链安全研究

史淳元[1,2],张万益[2],王丰翔[1,3],陈 刚[4],胡雅璐[2],袁建国[2],
刘江涛[2],王 磊[1],王诗琪[1],杨 洋[1]

(1.河北省战略性关键矿产资源重点实验室,河北地质大学,河北石家庄 050031;2.中国地质调查局发展研究中心,北京 100037;3.内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室,内蒙古自治区地质调查院,内蒙古呼和浩特 010020;4.新疆维吾尔自治区地质研究院,新疆乌鲁木齐 830000)

[摘 要] 锂电池材料矿产(下称“电池矿产”)是国际上最新提出的新能源关键矿产的一部分,是指锂离子电池制造过程中所需的核心矿产的总称,主要涉及金属矿产锂、钴、镍、锰以及非金属矿产磷、硼和石墨。本文从电池矿产的资源分布、矿产禀赋及找矿潜力出发,结合供需数据研判电池矿产的消费形势及供需格局,提出保障电池矿产供应安全稳定的合理化建议。研究表明:(1)电池矿产的储量总体丰富,但空间分布不均衡;(2)全球电池矿产的供应端呈现出稀缺、集中、离散的趋势,澳大利亚(37%的锂供给量)、刚果(金)(76%的钴供给量)、印尼(59%的镍供给量)、南非(37%的锰供给量)、中国(46%的磷供给量和79%的石墨供给量)、土耳其(74%的硼供给量)是电池矿产最大的供给国;中国面临电池矿产需求总量大(除硼外均占全球需求量的50%以上)但探明资源储量有限的现状,且对外依存度高(钴、镍、锰的对外依存度均高于80%),供应通道相对集中(99%的钴进口自刚果(金));(3)全球电池矿产矿床成因类型和主要供给类型多样,而中国电池矿产矿床成因类型相对单一,主要供给类型与全球有所不同;(4)随着电池矿产需求量持续走高,加大矿产勘查力度、保障全球供应体系、完善开发利用技术和鼓励资源循环利用等举措刻不容缓。

[关键词] 锂电池 电池矿产 关键矿产 产业链 供需现状

[中图分类号] P617 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2026)01-0058-21

Shi Chunyuan, Zhang Wanyi, Wang Fengxiang, Chen Gang, Hu Yalu, Yuan Jianguo, Liu Jiangtao, Wang Lei, Wang Shiqi, Yang Yang. Current situation of global lithium-ion battery mineral resources and resource security of the battery industry chain[J]. Geology and Exploration, 2026, 62(1): 0058-0078.

0 引言

锂电池材料矿产(以下简称“电池矿产”)是最新提出的资源概念,指新能源车动力电池、新型储能以及3C产品(即计算机、通讯和消费电子产品)制造过程中所需的核心矿产资源的总称,主要包括锂、钴、镍、锰、磷、硼和石墨。气候变化和环境污染迫使人类走向低碳,能源转型的深入发展为各国带来资源挑战,电池矿产的争夺日趋激烈,全球供应链风险持续升高(张万益等,2024)。作为新能源产业发展的重要支撑,电池矿产对世界各国都具有重要战略意义,美国、欧盟、中国都对电池矿产制定了一系列相关政策(Nagy et al., 2024)。因此,保障电池矿产资源供应安全,维持全球新能源产业稳定发展是重要的研究课题。

近年来,学界对电池矿产进行了较多研究:对

[收稿日期] 2025-07-04;[改回日期] 2025-09-21;[责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 深地国家科技重大专项“华北北缘东段金矿多尺度找矿预测与勘查”(编号:2025ZD1006400)、中国地质调查局项目“自然资源管理与现代地质工作战略研究”(编号:DD20230558)、河北省自然资源厅科研项目“河北省铜矿成矿规律及找矿方向研究”(编号:Z2024044)和河北省斑岩型矿床研究重点实验室(编号:HBBY202401)联合资助。

[第一作者] 史淳元(2000年-),男,2022年毕业于西北工业大学,软件工程专业,获学士学位,在读硕士研究生,主要从事矿床学、地球化学及矿产资源战略研究。E-mail:sh1cy0205@163.com。

[通讯作者] 王丰翔(1984年-),男,2017年毕业于中国地质大学(武汉),矿产勘查专业,获博士学位,助理研究员,从事大型-超大型矿床研究。E-mail:wfx0316@163.com。

2025至2035年间的锂、钴、镍、锰和石墨供需数据进行预测(Niri et al., 2025)；分析了地缘政治和贸易集团对电池矿产国际贸易的影响，提出了更高维度的国际合作的必要性(Vivoda et al., 2024)；针对单一矿种，从完整产业链视角，讨论了全球锂矿床的分类和地质特征，并对它们长期生产的能力进行了比较(Kesler et al., 2012)；对盐湖提锂工艺和设备进行了优化(Ding et al., 2025)等。综合来看，目前对单一矿种的研究较多，缺乏对电池矿产整体的系统性研究；在矿种方面，多数研究聚焦于锂和钴，而对锰、磷、硼在电池领域的研究相对较少；倾向于分析电池矿产开采所带来的风险，对电池矿产存在的机遇认知相对不足(Wilson et al., 2024)。本文基于锂离子电池产业链系统性地讨论了电池矿产这一概念，并从矿产原材料供需的视角，结合电池矿产资源禀赋特点，提出对电池矿产供应安全保障的思考，为协调全球矿产资源分配、保障锂离子电池产业链安全稳定提供明确而可行的路径。

1　电池产业链的发展与相关矿产

1.1　电池发展现状

纵观电池200余年的发展进程中，产生巨大影响并规模化使用的电池主要有四种：铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池以及锂离子电池。

通过对质量能量密度、体积能量密度、比功率、循环次数、单体电压等方面的比较(表1)，锂离子电池虽然存在高成本、易过热等缺点，但在质量能量密度、体积能量密度和工作电压上具有巨大优势，且更加环保。随着技术的不断提升，大容量锂离子电池达到了更高的续航能力和更优的能量密度，是当前电动汽车、3C及储能产品的主要动力来源，在一定时期内仍无可替代。

表1　主要电池性能、应用、优缺点比较(Zhang et al., 2018；安富强等，2019)

Table 1　Comparison of performance, application, advantages and disadvantages of main power battery (Zhang et al., 2018; An et al., 2019)

电池种类	质量能量密度(W·h/kg)	体积能量密度(W·h/L)	比功率(W/kg)	循环次数	单体电压(V)	应用	优缺点
铅酸电池	30~50	60~75	90~200	500~800	2	短距离电动汽车	优点：放电性能好、低成本、资源丰富、技术成熟、回收率高 缺点：低比能量、低循环寿命、铅污染
镍镉电池	40~60	100~150	200	500~1000	1.2	电动工具	优点：良好的温度适应性 缺点：镉污染
镍氢电池	30~110	140~490	250~1200	500~1500	1.2	混合动力车	优点：更好的性能、过度充放电耐受性高、无镉污染 缺点：性能易受温度影响
锂离子电池	100~250	250~360	250~300	400~2000	3.7	纯电动车、电子设备	优点：高能量密度、高循环寿命、高电压 缺点：低安全性、高成本、工作温度受限

相比之下，其它电池如硅基电池、铝离子电池、钠离子电池、双离子电池、钾离子电池、纸聚合物电池、镁电池等虽在某些技术指标表现优异，但存在更为明显的缺陷，技术尚未成熟。硅基电池优点是能量密度更高，原材料充足，缺点是体积膨胀效应明显，循环性能较差，目前以硅碳复合材料为主要发展方向(Zhang et al., 2025)。铝离子电池具有极高体积能量密度，成本低，可燃性低，充电速度快的优点，然而其缺乏合适的正极材料，工作电压低、循环稳定性差(Shahzad and Cheema, 2024)。钠离子电池虽有高低温性能优异、倍率性能好、安全性高等优点，但存在能量密度较低、电化学性能较差的问题。综合以上比较，本文重点围绕当前发挥重要作用的锂离子电池所需矿产进行研究。

1.2　锂离子电池产业链与相关矿产

锂离子电池产业链主要包括上游原材料生产、中游电芯制造和封装、下游应用(图1)。其核心是电芯生产，封装后再集成线束和PVC膜构成电池模组，再加入线束连接器、BMS(电池管理系统)电路板构成电池成品。电芯主要由正极、负极、电解液和隔膜四大关键材料组成，一般分别占成本结构的44%、10%、32%和14%。

正极材料在电芯成本中占比最高，按不同的正极材料可分为磷酸铁锂、锰酸锂、钴酸锂、镍酸锂及三元复合材料，涉及的矿产为锂、钴、镍、锰、磷(Bridge and Faigen, 2022)。从成本、安全、性能等因素综合考量，目前磷酸铁锂已反超三元成为最主要的正极材料。2024年磷酸铁锂电池装车约139.0

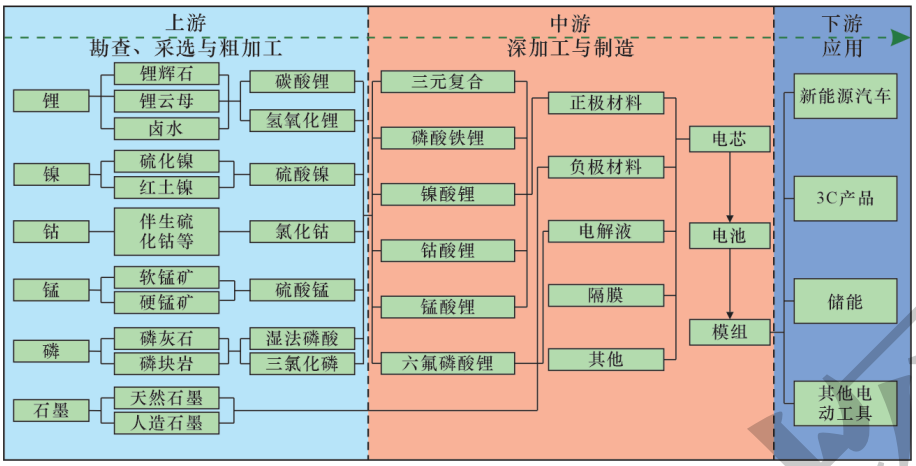

图 1　锂离子电池矿产与产业链

Fig. 1　Battery minerals of LIBs and industrial chain

GWh，三元锂电池装车约 409.0 GWh，从增长率上看磷酸铁锂电池依然持续走高。随着补贴退坡、新国标要求、能量密度边际改善与技术革新，磷酸铁锂的装车量可能持续增长。

负极材料可分为碳材和非碳材两大类。碳系材料包括石墨材料（天然石墨、人造石墨以及中间相碳位球）与其它碳系（硬碳、软碳和石墨烯）两种；非碳系材料可细分为钛基材料、硅基材料、锡基材料、氮化物、金属锂和过渡金属氧化物等。自锂离子电池诞生以来，石墨负极就占据了 98% 的市场份额，虽然其理论能量密度上限较低（372 mAh/g），但热门候选者如硅基负极等加工技术仍不成熟，成本也更高（Chadha et al.，2022）。此外，另一种值得关注的负极材料矿产为硼。含硼电解质添加剂如 $LiBF_4$ 等已被应用在锂离子电池中以提高电化学性能。由于硼优越的电学、力学属性，在电池领域具有以下优势：（1）同等重量可以储存更多的电能，可能成为更强大的电池阳极材料；（2）可以快速完成充放电，且循环寿命可达数十万次（Ayodhya and Veerabhadram，2020；Kumar et al.，2024）。

电解液是溶剂中溶有电解质锂盐的离子型导体，一般由高纯度有机溶剂、电解质、添加剂等材料配制而成。目前，由于较好的性能与较低的成本，六氟磷酸锂（$LiPF_6$）是主流的电解质。双氟磺酰亚胺锂（LiFSI）作为新一代锂盐代表，有望替代 $LiPF_6$，但受限于生产工艺与产能，成本过高。隔膜的性能影响电池的容量、循环以及安全性能等，大规模商品化的锂离子电池隔膜材料以聚烯烃（聚丙烯、聚乙烯等复合材料）为主。

综上所述，从中长期及未来发展角度看，锂、钴、镍、锰、磷、硼和石墨是电池产业发展的关键矿产。

2　电池矿产供需现状与未来发展趋势

2.1　供需现状

低碳经济引发的新能源革命，带来了对电池矿产的强劲需求。2024 年，电池行业贡献了全球约 87% 的锂消费量和约 70% 的钴消费量（USGS，2025）。综合各方数据，当前电池矿产主要供需现状如下（图 2、表 2）。

从地缘角度看，当前全球电池矿产供应相对集中。澳大利亚和“锂三角”国家为锂资源供给主力，合计占比约 65%；作为世界最大的钴储产国，刚果（金）的全球钴供给占比可达 76%；印尼、菲律宾为镍资源主要输出国，占比近 70%；南非、加蓬、澳大利亚为锰资源主要供应国，全球占比 74%；北非的摩洛哥以及中国和美国共同承担了全球 67% 的磷供应；中国是最大的石墨生产国，全球供应占比达 79%；硼资源主要供应国为土耳其，占据了 74% 的资源市场，其次为美国、智利（焦森等，2020；于建国等，2023）。同时，注意到中国电池矿产进口来源高度集中，钴、镍等矿产对最大进口来源国的依赖度超 80%（截至 2024 年）。

从产业角度而言，电池矿产的供需对相关产业的影响巨大。以新能源汽车产业为例，电池矿产在新能源车的整车成本中的占比可达 30%。通过分析各汽车制造商 2024 年 9 月份用于购入锂、钴、镍、锰、石墨五种矿产的总支出可以得出，对大型跨国车企而言，电池矿产支出主要受到产量、销售车型、电池类型等方面影响（图 3）。

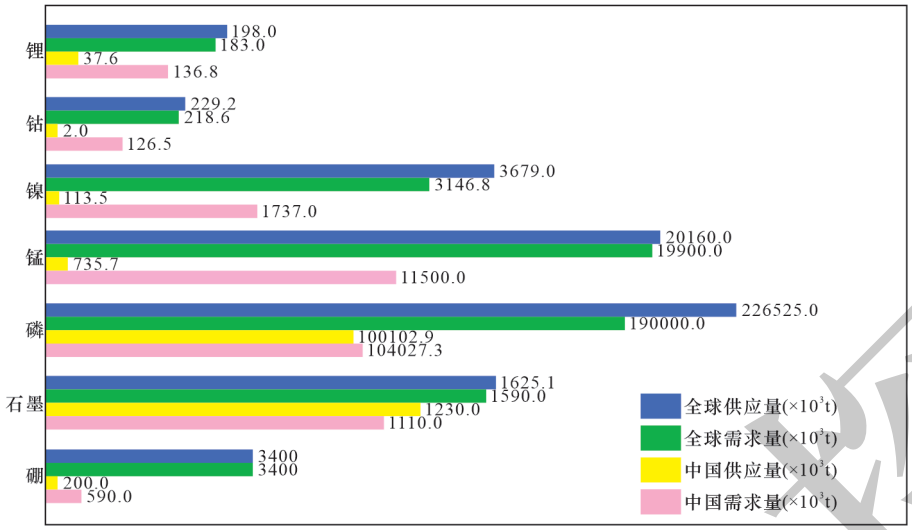

图 2　2023 年电池矿产国内外供需数据

Fig. 2　Supply and demand of battery minerals in China and the world in 2023

注：数据来源：国际能源署（IEA）、美国地质调查局（USGS）、中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心内部报告、能源研究院、世界金属统计局、国际钴业协会、国际镍业研究组织、国际锰业协会；部分冲突数据若差距较小取均值，若差距较大全球供需采用国外数据源，国内供需采用国内数据源。

表 2　2023 年电池矿产供需与中国需求占比

Table 2　Supply and demand of battery minerals and proportion of China´s demand in 2023

矿种	全球供需差(kt)	中国供需差(kt)	中国需求占比(%)	全球市场主要供给国及占比	中国第一进口来源国及占比
锂	+15.0	−99.2	74.75	澳大利亚(37%)、智利(20%)、中国、津巴布韦、阿根廷	澳大利亚(55%)
钴	+10.6	−124.5	57.87	刚果（金）(76%)、印尼、俄罗斯、加拿大、菲律宾	刚果（金）(99%)
镍	+532.2	−1623.5	55.20	印尼(59%)、菲律宾(9%)、俄罗斯、加拿大、新喀里多尼亚	菲律宾(86%)
锰	+260.0	−10764.3	57.79	南非(37%)、加蓬(23%)、澳大利亚、加纳、中国	南非(47%)
磷	+36525.0	−3924.4	54.75	中国(46%)、摩洛哥(13%)、美国、俄罗斯、约旦	埃及(81%)
石墨	+35.1	+120.0	69.81	中国(79%)、马达加斯加、莫桑比克、巴西、印度	—
硼	+0.0	−390.0	17.35	土耳其(74%)、美国、智利、中国	土耳其(82%)

注：数据来源同图 2；表格中“供需差”数据为正则说明供应过剩，为负则说明供应不足。

分析指出，虽然排名第一的特斯拉（当月产量为 16.90 万辆）相比于排名第二的比亚迪（当月产量为 38.75 万辆）产量少约 22 万辆，但是其电池矿产支出却比后者高得多，这主要是因为比亚迪使用了 LFP（磷酸铁锂）动力电池，不产生钴、镍、锰的支出，且超半数销售车型为 PHEV（插电式混合动力汽车），对电池的需求相对更低。此外，考虑到排名第三的丰田销售车型几乎全为 HEV（混合动力电动汽车），可以认为配备镍氢电池组的 HEV 仍然对电池矿产（镍）保有相当大的需求。然而，尽管理想的销售车型以 EREV（增程型电动汽车）为主且总销量并不高，但其支出仍高达 3700 万美元，这是由于理想汽车在其旗舰车型中使用了高能量密度的 NCM（镍钴锰三元）电池，而该型电池的高镍阴极由大约 80% 的镍组成。

2.2　发展趋势

当前，随着全球政治、经济博弈加剧，全球贸易保护主义抬头，电池矿产总体表现出储量、产能增加，国家介入调控力度增加，矿端扩产与供应链扰动并存，结构性紧平衡或延续的趋势。这种趋势体现在以下三点。

2.2.1　短期内供需基本平衡，中长期将面临结构性短缺

基于对储能、电动汽车等产业市场未来发展的信心，以及查、采、选、冶技术革新与发展，全球一大批新建和扩建电池矿产开采项目正在筹备或建设中，已知信息表明未来几年全球电池矿产产能将快速增长，短期内基本可以满足电池及相关产业发展的需求，甚至出现过剩。但从中长期来看，按照全球各国的清洁能源发展规划，根据各行业协会统计

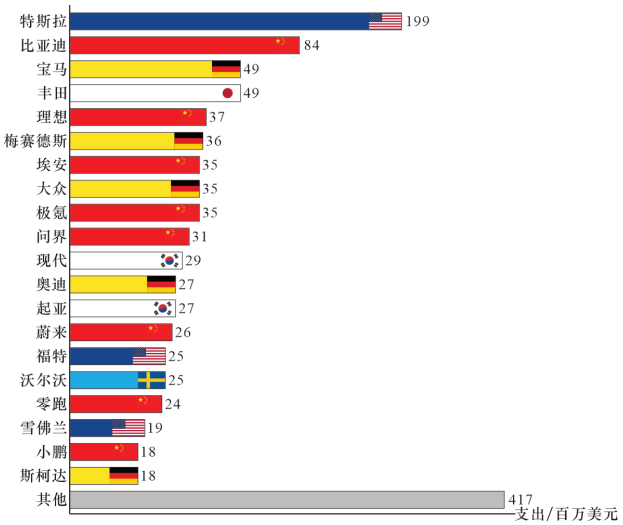

图3　各车企2024年9月销售的电动汽车电池中所含锂、镍、钴、锰和石墨的支出(数据来源:www.mining.com)

Fig. 3　Spending on lithium, nickel, cobalt, manganese and graphite contained in batteries of EVs sold by automakers in September 2024 (Data source: www.mining.com)

结果及相关学者研究,锂、钴、镍将面临长期短缺的可能。

Maisel et al.(2023)认为未来面对气候变化挑战,存在三种不同的电动汽车普及场景:高适应度(SSP1)、中等适应度(SSP2)和低适应度(SSP3),电动汽车数量由高到低递减;而根据电池材料的发展,存在两种不同的场景:关键材料场景指示电池材料以铁锰基为主,丰富材料场景则仍以镍钴材料为主。在此基础上,预测2040年电动汽车电池容量年需求在SSP1场景将达到约6700 GWh,SSP2场景约为4850 GWh,而SSP3场景仅为约930 GWh。

以2023年锂、钴、镍、锰的年供应量与2040年锂、钴、镍、锰的年需求量预测进行对比,结果显示,关键材料场景下,锂、钴仅能满足SSP3的供应,镍、锰能满足所有适应度;丰富材料场景下,锂依然仅能满足SSP3的供应,而钴、镍、锰可以满足所有适应度的供应。然而,应当考虑到并非全部的供应量都被用来制造电动汽车电池,若按当前电池产业对电池矿产的需求占比计算电池产业所使用的矿产量,则仅有丰富材料场景下的钴能同时满足SSP2和SSP3的供应,其余所有情况各矿种均只能满足SSP3的供应(图4)。

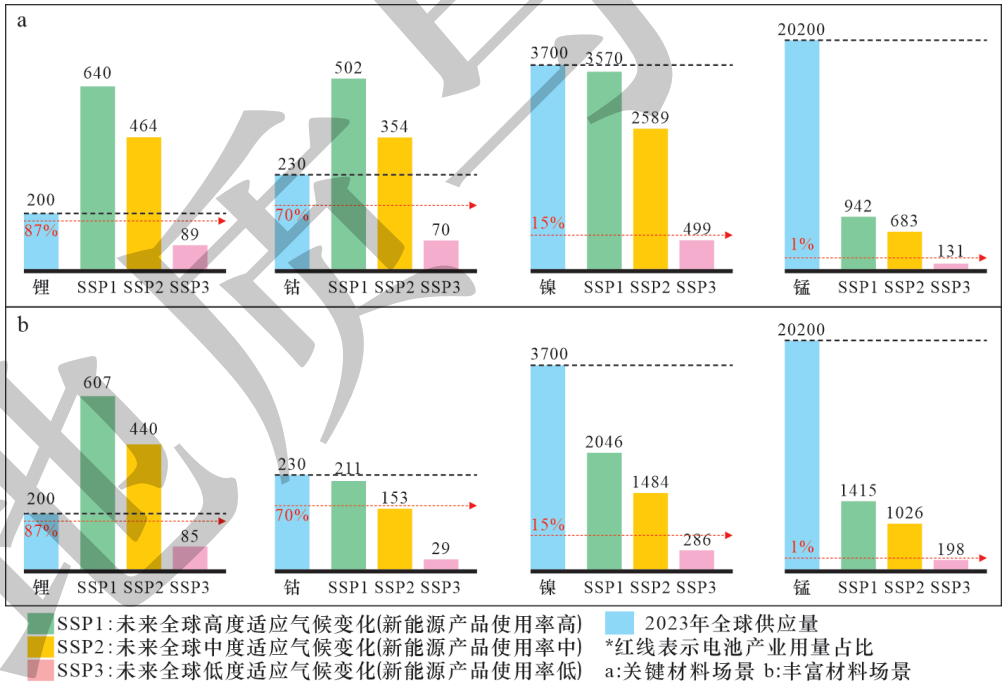

图4　基于不同情景的2040年主要电池矿产年需求量(×10³t)预测(据Maisel et al., 2023修改)

Fig. 4　Forecast of the annual demand for main battery minerals (×10³t) in 2040 based on different scenarios (modified from Maisel et al., 2023)

2.2.2　*矿产供应链渐趋区域化封锁*

此方面的制约因素首要源于政治:2024年4月,美国和加拿大、澳大利亚、日本、英国和欧盟委员会正式启动矿产安全伙伴关系论坛,以增强对关键矿产供应链的影响力;同年11月,加、澳两国先后试图剥离来自中国的锂矿投资。2025年3月,刚

果(金)向美国提出“以矿产换取军事支持”以对抗境内武装组织。此外,美总统特朗普也援引《国防生产法》以提高美国生产关键矿物的能力,从而摆脱对其他国家矿产加工的依赖。其次是资源国的利益诉求:印尼通过2014和2020年两次禁矿,吸引外资以推动本国镍产业从原材料供应向加工制造转型;2022年,智利、阿根廷与玻利维亚共同草拟了一份文件,以推动建立一个锂矿行业区域联盟,帮助本国在国际锂产业链利润分配中占领有利地位。

2.2.3　供应风险增高

造成这种趋势原因是多方面的,除上述宏观政治、经济原因外,还体现在:(1)生产由少数国家、地区控制,中长期内缺乏替代方案;(2)从原材料到成品过程中需多个国家物流的运输、加工;(3)原料和产品生产地区及物流沿途地区存在自然灾害和社会政治稳定方面的风险;(4)全球贸易运输路线的重要枢纽较为固定,容易受到封锁(5)市场容量小、库存少,政策对市场需求的影响很大;(6)部分矿产如钴主要作为共伴生副产品产出,生产受制于主矿产生产成本和市场价格;(7)相关环保政策以及对落后产能的淘汰;(8)国际社会对“负责任开采”以及人权问题的重视(Deberdt and Le Billon, 2021)。

3　电池矿产资源分布与成矿特征

3.1　全球电池矿产空间分布特征

全球范围内的锂资源主要集中在南美“锂三角”和澳大利亚、中国等地,全球锂储量的约31%位于智利。钴资源主要分布在刚果(金)、赞比亚、澳大利亚、古巴、印尼,其中刚果(金)的储量占比超50%。印尼拥有全球最大的镍矿储量,全球占比42.3%,其余集中在澳大利亚、俄罗斯、新喀里多尼亚、菲律宾、加拿大等国。作为世界最大的锰资源国,南非拥有世界1/3的锰储量,其余分布在澳大利亚、中国、巴西、加蓬等国。磷资源主要分布在非洲、亚洲、北美,其中摩洛哥和西撒哈拉储量500亿t,位居世界第一,占世界总量的近70%,而排在第二位的中国仅占世界总储量的5%。全球近90%的石墨资源分布于中国、巴西、莫桑比克、马达加斯加、坦桑尼亚、俄罗斯、印度、土耳其等国家,其中中国储量世界第一,约8100万t,占比约27.93%;巴西储量约7400万t,占约25.52%。全球硼资源绝大部分集中在土耳其、美国、俄罗斯、智利、秘鲁、阿根廷和中国,且土耳其储量约9.5亿t,全球储量占比达82.6%。总体而言,电池矿产高度集中分布于少数几个国家,各国的优势矿种也不相同,这表明电池矿产具有鲜明的空间分布不均衡性(图5)(USGS, 2025)。

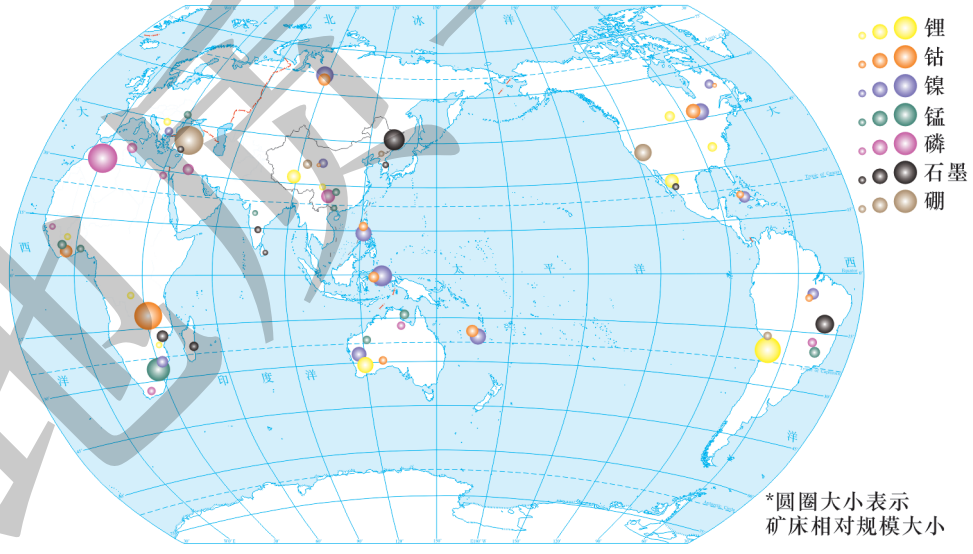

图5　全球电池矿产资源分布(数据来源同图2)

Fig. 5　Distribution of global battery mineral resources (data source same to Fig.2)

3.2　中国电池矿产空间分布特征

在电池矿产资源储量方面,虽然中国电池矿产储量的全球排名均在世界前十位,但储量相对很低,自给能力严重不足。其中,钴、镍、锰、硼的对外依存度均高于80%,仅磷与石墨对外依存度相对较低(表3)。

中国锂资源整体呈现出西部、南部多,东部、北

表3 国内外电池矿产储量、资源量[①]

Table 3 Reserves and resources of battery minerals in China and the world[①]

矿种	全球储量(Mt)	中国储量(Mt)	全球资源量(Mt)	中国资源量(Mt)	全球排名[②]	对外依存度(%)	分布省份
锂	30	3	563.45	3.442	2	70	青海、西藏、四川、江西
钴	11	0.1587	28.38	0.51	9	96	甘肃、青海、云南、吉林、山西
镍	130	4.4	292.25	6.63	9	80	甘肃、新疆、青海、内蒙古
锰[③]	1700	280	9037	1817.55	3	90	广西、贵州、云南、湖南、重庆
磷	74000	3700	122920	24390	4	35	云南、湖北、贵州、湖南、四川
石墨	290	81	—	—	1	25	黑龙江、内蒙古、新疆、四川、山东
硼	1149	9.1	—	—	4	80	辽宁、吉林、青海、西藏

注：①储量数据截至2024年，资源量截至2022年；②全球排名为中国电池矿产储量全球排名；③数据为矿石量。数据来源：同图2，部分数据来自全球矿产资源储量评估报告2024；“—”表示无可靠数据。

部少的特点，主要分布在青、藏、川、赣、疆等省。钴、镍资源也富集于西部、西南，钴主要分布在陇、青、滇、吉、晋、川等省，镍主要分布在陇、青、疆、滇、蒙、吉等省；其中尤以甘肃为最，钴、镍资源储量占比分别约为30%和60%。锰资源主要产出在华南“泛扬子区”，集中于桂、黔、滇、湘、渝、甘等省(市)，其中广西储量占比超40%。中国磷资源主要集中于中南部滇、鄂、川、湘、黔等省，其中云南占全国储量的36%。中国石墨资源探明储量主要集中在东北地区，尤以黑龙江为最，占据了晶质石墨储量的近70%，晋、蒙、川、鲁等省也保有一定储量；隐晶质石墨储量主要来自蒙、湘、粤、吉等省。中国硼资源集中于青、辽、藏、鄂、吉等省，其中青海的硼资源虽然储量很大(储量占比约为55%，已超越辽宁成为硼储量第一大省)，但其赋存形式多为盐湖型且硼并非主要成矿元素，回收提纯较为困难，目前开发程度较低。

3.3 矿床成因类型对比

3.3.1 锂矿床

全球范围内的锂矿床种类可以划分为五种主要类型，即盐湖卤水型、硬岩型、黏土型、锂沸石型和其他卤水型。其中，盐湖卤水型和硬岩型是目前开采的主要矿床类型，前者主要分布在南美“锂三角地区”、中国青藏高原和美国西部科迪勒拉山系，而后者分布广泛。黏土型矿床主要分布于北美西部。锂沸石型矿床是近年在塞尔维亚贾达尔(Jadar)盆地发现的一种独特的锂矿床，矿石矿物为羟硼硅钠锂石($LiNaSiB_3O_7(OH)$)。其他卤水型主要包括地热卤水型、油气田卤水型等，在各大洲均有分布，尤以北美洲的地下卤水锂含量最高，该类矿床具有极高的开发潜力(Kesler et al., 2012；Disu et al., 2024)。

就中国而言，除特殊的锂沸石型锂矿床外，卤水型、硬岩型、黏土型等锂矿床类型均有发现；目前已开发利用的锂矿床类型以盐湖卤水型为主，约占总供应量的70%；硬岩型次之，约占30%；其他卤水型和黏土型矿床虽然目前无法有效利用，但有良好的开发前景(表4；马哲等，2018；刘雪等，2024)。

3.3.2 钴矿床

全球钴资源多以共-伴生矿床的形式产出，成因类型可分为：沉积岩-变沉积岩型铜-钴矿、岩浆硫化物型铜-镍-钴-PGEs矿、热液型钴矿、风化红土型镍-钴矿和海底富钴的铁-锰结核和结壳(Slack et al., 2017)。沉积型矿床经济价值最高，占世界工业产量的65%以上，刚果和赞比亚的中非铜钴成矿带集中了全球超一半的钴资源(张连昌等，2023)。岩浆硫化物型矿床多产出古老克拉通内部或边缘，与超镁铁质-镁铁质大火成岩省有成因联系，其成矿物质来自地球深部，矿床中钴多与铜、镍等共伴生产出，分布较为广泛。风化红土型镍-钴矿近年来呈现出良好的找矿突破，开发潜力高。值得注意的是，海洋中蕴藏着数十倍于陆地储量的丰富钴资源，仅在东太平洋CCZ区就保有陆地总储量3.4倍的钴储量，有望成为未来开发的重要潜在资源(Hein et al., 2013)。

中国钴矿床类型多样，主要包括岩浆型、沉积型、热液型、风化型。现已勘探或开采的钴矿床主要为岩浆型，沉积型见于辽吉两省东部和山西中条山，而热液型矿床分布广泛但品位较低。总体而言，沉积型和热液型矿床的成因及储量评估尚有待进一步研究(表4；苏本勋等，2023)。

3.3.3 镍矿床

全球镍矿床成因类型主要为风化壳型和岩浆

型。风化壳型镍矿床又称红土型镍矿床，多为超基性岩于炎热潮湿的热带-亚热带地区经风化-运移-再富集形成；岩浆型矿床形成的构造背景主要为大陆边缘裂谷、造山带或大火成岩省，矿体与镁铁-超镁铁质侵入体关系密切，而加拿大Sudbury矿床可能为特殊的陨击成因（Keays and Lightfoot，2020）。此外，全球还分布有少量的海相沉积型、热液型等镍矿床类型，但目前经济效益较低。

与世界范围内的镍矿床相比，中国超大型-大型镍矿床数量较少（占比不足1%），成因类型以岩浆型为主（占矿产地数量的74.5%，占查明储量的89.6%），如甘肃金川、青海夏日哈木等超大型岩浆铜-镍-钴硫化物矿床；海相沉积型镍-钼-钒矿床集中产出于黔湘两省的黑色页岩中，风化壳型则多分布于云南、海南二省（表4；王岩等，2020；Cai and Ma，2024）。

3.3.4　**锰矿床**

全球锰矿床成因类型主要有变质型、海相沉积型、火山（热液）-沉积型、表生型和海底结核-结壳型，其中变质型和海相沉积型的工业价值最高，二者储量占世界锰总储量的90%以上；海相沉积型锰矿床形成于浅海环境，矿体多与碎屑岩-黏土、碳酸岩、黑色页岩共同产出，而变质型多产于古老的地盾中。火山（热液）-沉积型和表生型储量占比较低（程湘等，2021）。除陆地矿床以外，海底铁-锰结核/结壳和多金属硫化物中的锰具有极高的经济和工业潜力，储量巨大，因此开发前景广阔（Toro et al.，2020）。

中国锰资源高度集中于扬子地块，矿床类型以海相沉积型为主，储量占比超过70%，中国最大的广西下雷锰矿和贵州松桃锰矿即属于此类型；表生型占比约15%，多分布于扬子地块南部；而变质型矿床则仅占约5%（表4；Xiang et al.，2020）。

3.3.5　**磷矿床**

全球磷矿床主要为沉积型，岩浆岩型、次生型和变质型。沉积型磷矿床最具经济价值，全球磷供应量占比达76%，主要分布于非洲的摩洛哥和西撒哈拉、突尼斯、阿尔及利亚和埃及等国家（地区）。学界对沉积型磷矿的成因观点不一，但普遍认为磷的来源为有机质。岩浆岩型磷矿床占全球磷供应量的23%，其成矿与岩浆岩（多为火成碳酸岩或碱性侵入体等）中的磷灰石密切相关。次生磷矿床一般形成年代较新且埋藏深度较浅，而变质型数量较少且规模不大（吴发富等，2021；Ali et al.，2024）。

中国最主要的磷矿床类型为沉积型，占比超75%，多有规模大且品位高的特点，主要产出于扬子地块、华北克拉通、天山造山带，其中又以扬子地块西部占比最高；岩浆型和变质型次之，占比约20%，主要分布在中国北部；次生型占比不足1%（表4；王莹和熊先孝，2023）。

3.3.6　**石墨矿床**

全球石墨矿床可分为区域变质型、热液型、岩浆（岩）型和接触变质型四个大类。区域变质型矿床是最重要的石墨矿床类型，广泛分布于各大洲。热液型石墨矿床矿体形成于含碳地层重熔，多呈脉状充填在断裂或洞穴中。岩浆（岩）型矿床矿体主要为含石墨混染的花岗岩或基性-超基性岩，一般品位较低（3%～6%）。接触变质型矿床主要产出隐晶质石墨，与煤、油气藏等高碳沉积岩密切相关（张艳飞等，2022）。

中国已知的具有工业价值的石墨矿床按其成因可划分为区域变质型、接触变质型与岩浆（岩）型三种（张苏江等，2021）。其中以区域变质型矿床最为重要，是晶质石墨的主要来源，如中国最大的黑龙江萝北云山石墨矿床；接触变质型矿床次之，主要分布在环太平洋构造域，规模多为中小型；岩浆（岩）型较为少见，主要位于新疆（表4；Sun et al.，2018）。

3.3.7　**硼矿床**

全球硼矿床类型主要有五种：火山沉积型、沉积变质型、矽卡岩型、现代盐湖型和地下卤水型。火山沉积型矿床是世界最主要的硼矿床类型，以位于土耳其安纳托利亚高原的矿集区最为典型；沉积变质型矿床主要位于中国辽、吉两省；矽卡岩型矿床中硼常与镁铁质矿物共生，例如俄罗斯的Tayozhnoye硼-铁矿床；现代盐湖型矿床于第四纪形成，硼多呈固液相共存状态；地下卤水型矿床一般埋藏较深，目前未有大规模开采（Pertsev and Kulakovskiy，2002；林勇杰等，2017）。

由于与土耳其Emet等世界级矿床的成矿环境不同，中国火山沉积型硼矿床少见，而以沉积变质型（占比约65%）和现代盐湖型（占比约33%）为主；前者主要分布在辽吉两省东部，后者则分布于青藏高原。矽卡岩型占比相对较低，主要产出于湘粤两省；而地下卤水型等其他类型则尚不具工业价值（表4；王靓靓等，2019）。

表4　全球电池矿产矿床成因类型

Table 4　Genetic types of global battery mineral deposits

主要矿床类型	代表矿床	储量@品位(Mt@10^{-2})	形成时代	资料来源
		锂矿床		
盐湖卤水型	玻利维亚 Uyuni	10.2@(Li^+)321mg/L	中新世及之后	刘成林等，2021；王卓等，2023
	智利 Atacama	6.3@(Li^+)1400mg/L		
	中国西藏扎布耶	(Li_2CO_3)1.841@(Li^+)632 mg/L		
	中国青海察尔汗	(LiCl)12.042@(Li^+)310 mg/L		
硬岩型	澳大利亚 Greenbushes	（资源量）(Li_2O)16@1.5	2527Ma	李建康等，2006；Wang et al., 2020; 隰弯弯等，2023；曾瑞垠等，2024；朱文斌等，2024
	刚果（金）Manono	(Li_2O)6.6@1.66	940Ma	
	中国四川甲基卡	X03矿脉：(Li_2O)2.8611@1.51	213～191Ma	
	中国四川可尔因	(Li_2O)1.6184@?	152Ma	
黏土型	美国 McDermitt Caldera	（资源量）5.1@0.1~0.6	中新世中期	张英利等，2022；Roy et al., 2024；www.ganfenglithium.com
	墨西哥 Sonora	（确定资源量）(Li_2CO_3)1.91@~1.7		
锂沸石型	塞尔维亚 Jadar Basin	(Li_2O)2.524@1.86	中新世	Gourcerol et al., 2019；王微等，2024
其他卤水型	美国 Smackover	2.8@174~187mg/L	新生代	Marza et al., 2024
		钴矿床		
沉积型	刚果（金）Kamoto	1.89@0.5	821±51Ma	卢宜冠等，2020；李庆哲等，2023；莫江平等，2024
	赞比亚 Chambishi	0.14@0.12	503±5Ma	
岩浆型	俄罗斯 Noril′sk-Talnakh	1.38@0.01	二叠纪末-三叠纪初	Zhang et al., 2010；杨卉凡和王威，2019
	加拿大 Voisey′s Bay	0.042@0.13	中元古代（1.34Ga）	
	中国甘肃金川	0.168@0.03	831.8±0.6Ma	
热液型	加拿大 Windy Craggy	0.205@0.069	—	赵俊兴等，2019；Saintilan et al., 2023
	摩洛哥 Bou Azzer	0.016@~1	海西期	
风化红土型	喀麦隆 Nkamouna	0.86@0.25	—	张照伟等，2022
	中国云南元江-墨江	~0.004@0.03~0.04	~62Ma	
海底结核/结壳型	—	—	—	—
		镍矿床		
风化壳型（红土型）	新喀里多尼亚 Goro	4.78@1.48	中新世至今	张伟波等，2015；陈喜峰等，2017；Wells et al., 2022
	印度尼西亚 Sorowako	2.24@1.4~1.9	渐新世-更新世	

续表 4

Continued Table 4

主要矿床类型	代表矿床	储量@品位(Mt@10^{-2})	形成时代	资料来源
岩浆型	南非 Bushveld	15.28@0.13	~2.06Ga	吕林素等，2011；聂凤军等，2013；李文渊等，2023
	加拿大 Sudbury	18.58@1.2	~1850Ma	
	中国青海夏日哈木	1.18@0.68	~411Ma	
海相沉积型	中国贵州庙子湾	（资源量）0.032@?	寒武纪	孙涛等，2014
热液型	中国广西金秀龙华	?@16.17	462.6±8.5Ma	Huang et al., 2020; 周云等，2023
		锰矿床		
变质型	南非 Kalahari-Postmasburg	130~150@30~45(K)&32~59(P)	~2.2Ga(K)& 2.5~2.6Ga(P)（原生矿床）	Cabral et al., 2019; 孙宏伟等，2022；孙凯等，2022
	加蓬 Francevillian	20~48@40~48	2.0~2.3Ga	
	澳大利亚 Pilbara 地块 Woodie Woodie	49@30.2	中元古代	
	巴西 Morro da Mina	（矿石储量）608@25.63~49.51	2.07~1.86Ga	
海相沉积型	乌克兰 Nikopol-Bol′she-Tokmak	（矿石储量）626@10~45	渐新世	金玺和陈显锋，2018；Sasmaz et al., 2020
	澳大利亚 Groote Eylandt	152@>40	白垩纪	
	中国广西下雷	137@~30	晚泥盆世	
火山（热液）-沉积型	伊朗 Cheshmeh-Frezi	? @19.41	晚白垩世	Maghfouri et al., 2017
表生型	加蓬 Moanda	269@45.4	2.2～2.16Ga	程湘等，2021
海底结核/结壳型	—	—	—	—
		磷矿床		
沉积型	摩洛哥 Khouribga	（矿石储量）26800@？	晚白垩世-古近纪	王靓靓等，2021
	澳大利亚 Ammaroo	32.4@18.2	中寒武世	
	中国贵州开阳	（矿石储量）190@33.32	新元古代晚期至寒武纪初期	
岩浆岩型	南非 Foskor Phalaborwa	（矿石储量）1500@？	元古宙时期	—
次生型	瑙鲁	—	近-现代	—
	中国南海诸岛	—		
变质型	较少，且多为中小型矿床	—	多产出于元古宙或太古宙	—
		石墨矿床		
区域变质型	加拿大 Bissett Creek	（资源量）54@1.9	—	杨培奇等，2017；张艳飞等，2022

续表 4

Continued Table 4

主要矿床类型	代表矿床	储量@品位(Mt@10^{-2})	形成时代	资料来源
区域变质型	中国黑龙江柳毛	29.54@4~16	(1855±5)~(1979±13) Ma	杨培奇等，2017；张艳飞等，2022
	中国黑龙江云山	（资源量）46.52@15~25	(476±9)~(575±12) Ma	
热液型	斯里兰卡 Kahatagaha	—	前寒武纪	Acharya et al., 1996; Sanyal et al., 2009; Touret et al., 2019
	印度 Orissa	0.9@?	2.5~2.2 Ga	
岩浆型	俄罗斯 Pogranichnoe	—	624±3Ma	Ripp et al., 2005; Doroshkevich et al., 2007; 白建科等，2018；艾江等，2020
	中国新疆黄羊山	（资源量）78.34@6.14（一号矿体）&7.04（二号矿体）	303.6±4.0Ma&304.6±3.7Ma	
接触变质型	墨西哥 Sonora	—	—	李超等，2017
	中国湖南鲁塘	? @80.79	155.6±3.6Ma	
		硼矿床		
火山沉积型	土耳其 Kestelek	10@26~42(B_2O_3)	古近纪-新近纪	李空，2016；焦森等，2020
	土耳其 Emet	190@26~42(B_2O_3)		
	土耳其 Kirka	100@26~42(B_2O_3)		
	土耳其 BigadicDistrict	299@26~42(B_2O_3)		
	美国 Kramer	14@25(B_2O_3)		
	美国 Death Valley	? @~25		
沉积变质型	中国辽宁后仙峪	—	2260~2175 Ma	付燕刚等，2018
矽卡岩型	俄罗斯 Tayozhnoye	（矿石储量）>100@21.85(B_2O_3)	中生代	Schreyer et al., 1998
现代盐湖型	阿根廷 Tincalayu	—	第四纪	石海岩等，2024
	中国青海察尔汗	(B_2O_3)5.4893@?		
地下卤水型	四川自贡邓井关	—	—	—

注：“?”和“—”表示数据未知。

4　讨论：全球电池矿产供应及产业链保障

4.1　矿产勘查与资源调配

新能源产业的迅速发展使得全球电池矿产需求量持续升高，大量对电池矿产供需的预测表明，未来电池矿产发生供应短缺的可能较高。因此，需要提前布局资源勘查，明确电池矿产的高潜力前景区，提高可采储量，从源头稳定电池矿产产业链。

前文中论述了电池矿产的供需格局和资源空间分布，显示电池矿产的开采国、加工国和消费国并不一致，这说明电池矿产产业链无法被个别国家垄断（Kannan et al., 2025）。为缓解空间分布对新能源产业的限制，各国应认清自身在产业链中的地位，分析资源禀赋的优势与不足，合作进行全球性资源调配工作。

4.1.1　锂&硼

结合近年世界锂勘探进展，世界范围内锂资源格局总体保持稳定，预计未来一段时间内，盐湖卤水型矿床和硬岩型矿床将持续占据主要地位；盐湖卤水型矿床依然以世界三大盐湖锂矿集区（南美锂三角、北美西部高原盆地、中国青藏高原）为找矿远景区域；硬岩型矿床则主要分布于澳大利亚西部、中国西部、美国-加拿大东部、非洲中南部。值得注意的是，虽然非洲的锂资源尚处于勘探中，但已探明的资源量证实非洲中南部和西部地区（如津巴布韦、刚果金、马里）都有较高的硬岩型锂矿床成矿潜力（Boafo et al., 2024）。

现有硼矿床中，火山沉积型储量占比可达75%，据此推测硼资源勘查远景区为阿尔卑斯-喜马拉雅火山-构造带以及环太平洋火山-构造带的东侧，与现有资源分布接近。研究表明，在中国青藏高原雄巴盆地发现了有利于硼酸盐成矿的新生代火山-沉积二元结构，并在岩石化学分析结果中找到了硼矿化的证据（Zheng et al., 2016）。而在Emet-Hisarcik盆地进行的地球化学研究则表明硼元素自身具有作为硼矿床勘查指示剂的前景，因而在区域地球化学勘查的过程中可以重点关注高硼异常的区域（Özkul et al., 2017）。

4.1.2　镍&钴&锰

根据钴、镍、锰成矿规律，以已有矿产地和成矿区带为中心，向外围辐射拓展进行进一步勘探工作。

钴少见独立成矿产出，而是通常作为铜、镍等矿床的共伴生产品。因此，寻找有利于钴伴生产出的、以其他金属（如铜/铁/镍）为主要成矿元素的矿床也可以作为另一种提高钴资源量的找矿路径。

全球已探明的镍资源中红土型镍矿约占70%，但全球红土型镍矿产量仅占世界镍产量的40%。随着高品位、易处理的岩浆型镍资源越来越少，镍的生产将更多依靠低品位、难处理的氧化镍矿及镍混合矿，镍资源的重点勘探开发也将转向红土型镍矿资源。炎热潮湿的热带地区是红土型镍矿形成的理想环境，也是与超基性岩呈高相关性的红土型镍-钴矿的找矿远景区，包括东南亚和大洋洲范围内北至菲律宾，南至新喀里多尼亚的群岛，中美洲加勒比海地区的群岛，南美洲东北部和非洲西海岸的热带国家（付伟等，2013）。

锰资源前景区与现有的锰矿产地高度接近，非洲南部和西部、澳大利亚、巴西都有大量且优质的锰资源潜力等待挖掘。例如，2020年在南非西北省的Carletonville-Ventersdorp地区探得了新的锰矿床；澳大利亚西北部的Oakover项目于2023年提交的成果表明其初步探明的锰资源量可达105.8Mt。新的勘探进展证实，在南非Kaapvaal克拉通、澳大利亚Pilbara克拉通及它们的周缘依然有发现大型锰矿床的潜力（Pharoe et al., 2020；栾卓然等，2021）。

继续开展海底铁锰结核/结壳勘探，以查明海底钴、镍、锰保有资源量及分布区域。在陆地资源以外，占据全球71%面积的海洋中也有巨量的金属资源。据统计，2021年全球陆地钴、镍、锰资源量约为2500万t、2.8亿t、80.7亿t（金属量），对比太平洋、大西洋、印度洋等洋底赋存的铁锰结壳总储量可达近30000亿t，其中锰、钴、镍平均含量约为26.9%、0.24%和1.2%，其所含资源量为陆地的数十至数百倍（Parianos et al., 2021）。目前已开展的勘探项目主要位于以东太平洋的CCZ区域为代表的几个区域内，对各大洋洋底的普查和更多潜力区域的圈定还极为有限；而近期的研究显示，在北冰洋洋脊也发现了富钴的硫化物矿床（Peterson et al., 2016；Sahlström et al., 2023）。应当意识到，海底的电池矿产资源量是相当可观的，未来对海洋资源的开发必将成为全球资源供应的一大重要来源。

4.1.3　磷

自2010年摩洛哥和西撒哈拉地区探明约500亿t磷矿储量后，世界磷矿储量总体保持稳定。然而，Norge Mining于2018年宣布在挪威Rogaland地区发现了巨大的地下磷矿床，据称资源量可达700亿t（Ihlen et al., 2014；www.mining-technology.com）。

这也许意味着仍有数量相当可观的尚未被探明的磷酸盐隐藏在古老地层之中。

作为世界磷产量位列前三的大国，2024年中国磷资源储采比仅为33.6，而美国的磷资源储采比则为50，两国储采比远低于世界平均值(336)。储采比数据表明传统磷出口大国的磷矿储量已经随着大量开采使用而日渐枯竭，而北非和中东的磷储量大国的磷出口必将随着产能的增加逐渐占据重要位置，未来的磷矿供给结构中心将持续从北美和东亚向中东和北非转移(吴发富等，2021)。

4.1.4 石墨

石墨的成矿作用与构造活动和地层中的碳元素密切相关，因此多赋存于古老变质岩系的含碳地层或与岩浆岩接触的含碳地层中；近年来，中国北部、巴西东部、非洲东南部(坦桑尼亚、莫桑比克、马达加斯加等国)、欧洲北部(芬兰、挪威、瑞典等国)陆续探得多个石墨矿床，使得全球石墨储量持续增加(Roshanak et al., 2021；张艳飞等，2022；Loukola-Ruskeeniemi et al., 2023)。

4.2 开发利用技术

部分高储量矿床类型(如卤水型锂矿、红土型镍矿)尚未得到充分利用，需要在采、选、研、用技术领域取得突破，提高对难采矿、难选矿、贫矿、伴生矿中资源的利用率，发展低污染、低能耗、低成本、高效率的应用技术，将科技进步转化为生产力的提高。

4.2.1 锂&硼

鼓励科研机构和矿企对现有的盐湖卤水提锂技术进行迭代升级，同时对其他卤水型和黏土型矿床的开发技术开展研究。虽然目前吸附法应用广泛，但需要消耗大量的淡水资源，这一缺陷对吸附法从环保和产量两个方面产生了制约；而溶剂萃取法则对溶剂的选择提出了很高的要求。基于目前的研究水平，膜分离技术将在各种卤水矿床的提锂工艺中发挥重要作用；此外，通过不同的萃取液可以逐步高效萃取盐湖卤水中的锂、镁、硼，提高了不同元素的提取效率(Nikkhah et al., 2024；Li et al., 2025)。黏土型矿床目前仍局限于酸浸和高温焙烧两种提取方法，存在严重的能耗和污染问题(Xie et al., 2024)。对更多类型锂矿床的有效利用可以降低高原盐湖卤水开发成本，并同步降低对硬岩型锂矿的依赖度，避免过度开采。

此外，在推进开发智利和玻利维亚的盐湖卤水型矿床(如Atacama和Uyuni)以及塞尔维亚Jadar盆地锂沸石型矿床的过程中，最大的阻力来源于当地原住民对环境和水源可能遭受破坏的担忧，以及对政府信任的不足。为了缓解这一问题，政府和企业需要采用更为绿色环保的开采方式、保证向当地原住民提供一定的就业岗位或矿业红利、同时投资建设大量基础设施(Stojan et al., 2023；Carpanese et al., 2025；Souza et al., 2025)。

加强对低品位硼矿床和盐湖型硼矿床开采技术的研发。世界范围内已知的大储量、高品位、易开采的沉积变质型硼矿床相对集中且技术成熟，应将研究目标转移至规模较小、品位较低、不易开采的矿床(如硼铁矿)，或是暂无法开发利用的盐湖型硼矿床。研究表明，使用如脂肪醇类、芳香族化合物和胺类化合物的溶剂萃取法可以对盐湖卤水中的硼进行有效提取，此类方法应用前景广阔(袁建国等，2018)。

4.2.2 钴&镍&锰

积极研发海底铁锰结核/结壳开采技术。目前试用的开采方式多以海底采矿车与采矿机器人为主，但仍存在容易受到复杂海底地形和水体环境影响、开采的矿石不易运输至海面、采出物成分复杂难以选矿等关键问题，仍然需要推进技术攻关以解决钴、镍资源供应困难的现状。

寻找含钴硬质合金及锂电池正极材料的替代产品，减少钴在电池中的用量。钴在电池中主要起抑制阳离子(如锂/镍)混排的作用。以此机制为理论基础，衍生出了元素掺杂、表面包覆、单晶技术等无钴化方案，如掺杂锰和铝的$LiNi_{0.883}Mn_{0.056}Al_{0.061}O_2$，以及利用锆替代钴合成$LiNi_{0.85}Mn_{0.1}Zr_{0.05}O_2$等。无钴材料的发展与应用可以减少产品中钴的用量，缓解钴的供需矛盾(吴锋等，2022；彭展鹏等，2024)。

持续推进选冶技术的发展与更新。对钴、镍的两种最主要的选冶工艺中，火法具有能耗高、综合利用率低的缺点，而湿法的劣势则在于设备要求高、产生有害尾渣。对于火法而言，如何降低能耗、对接新能源产业，并有效利用其中的钴等伴生矿产意义重大；对于湿法而言，降低工业环境要求以及尾渣的无害化处理必须改进。此外，生物浸出、氯化提镍(钴)等新式选冶技术尚无法实现大规模市场化应用，需要进一步提高可行性和经济性(Dehaine et al., 2021；Zhang et al., 2025)。

全球高品位锰矿相对集中于南非、巴西、澳大

利亚、加蓬四国，而一些储量大国如乌克兰、中国等锰矿品位较低。建议发展低品位难选锰矿的选冶技术，打造高效锰矿加工体系，以利用禀赋较差的锰资源。综合分析指出，相比于目前以传统选矿法或还原浸出法为主的锰矿选矿技术，综合使用磁法、焙烧法、酸浸法等多种方法的焙烧联合法是一种更为有效且经济的分选难选锰矿的方法（Liu et al., 2019）。

4.2.3　磷

虽然高品位磷矿易于开采且经济效益高，然而其不可再生和分布不均的特性决定了人们依然需要大量利用中低品位矿石。应鼓励并监管对贫矿的开采利用，发展贫矿采选工艺，避免富矿开采过度，贫矿遭到浪费。目前投入应用的选矿方法主要有浮选、静电、磁选、有机酸浸出、煅烧等，而针对不同磷矿特点采取多重处理的方式有望成为提高综合利用率的发展方向（Sajid et al., 2022）。

此外，磷矿开采及加工时所产生的固态废弃物（主要为磷尾矿、磷石膏、磷渣）、渗滤液、废水和废气对环境污染严重；需要提升磷矿加工工艺，在开采、选矿、加工等流程中推广使用新技术，对固废进行再利用或无害化处理，实现磷矿加工生产闭路循环，降低废弃物排放。

4.2.4　石墨

低品位石墨的开发利用对缓解高品位石墨资源短缺、促进石墨产业可持续发展具有重要意义。通过选矿、提纯和深加工技术的不断创新，低品位石墨的应用领域将不断拓展。然而，低品位石墨的开发利用仍面临技术可行性、经济效益和环境污染等多方面的挑战，需要政府、企业和科研机构的共同努力，推动低品位石墨资源的高效、绿色利用。

4.3　二次资源充分利用

现有锂电池的设计使用寿命多为8~10年，预计到2030年共将产生1100万t废旧锂电池，废旧锂电池的数量即将迎来爆发式增长（Ren et al., 2024）。废旧锂电池的回收-再利用过程并非仅仅避免了环境污染问题：锂电池中的电池矿产含量远高于矿石中的含量，这意味着回收利用废旧电池中的材料可以进一步缓解电池矿产的供应压力。然而，废旧锂电池的回收利用也面临技术不成熟、社会认知不足、投资风险等一系列挑战（Azadnia et al., 2021; Feng et al., 2025）。据此，未来的发展方向应为：加强低成本、高回收率、低污染回收技术研究；普及电池回收的重要性以及分类回收观念；建立依托法律和政府监管的回收体系。

4.3.1　正极材料锂、钴、镍、锰

加强锂、钴、镍、锰回收利用技术相关研究，提高各种二次资源，特别是废旧电池中的资源回收利用率。根据预测，到2050年，仅中国理论锂、钴、镍金属回收量就可达12.9~14.5万t、8.6~11.8万t和45.0~64.5万t，在不同技术路线下可以满足中国35%~53%、44%~91%、31%~46%的金属需求（应雄等，2024）。目前，对正极主要的回收方法有火法冶炼、湿法冶炼、直接再生，它们具有工艺简单，成本低的优势；而生物浸出、离子吸附、有机溶剂浸出、还原焙烧等新技术还有待进一步完善并投入商业化（Mohanty et al., 2021）。相较于锂、钴、镍，锰的价值较低，且在湿法处理时Ni^{2+}、Al^{3+}与Mn^{2+}容易同时沉淀，分离难度较高，因此锰回收相对不受重视；需要发展更加高效、精确、低成本的锰分离回收技术，提高废旧电池中锰回收利用率。

新技术的应用可能大幅促进锂电池回收产业的发展。Chen et al.（2023）将闪蒸焦耳热技术应用于电池正极的回收，在保证了~98%的锂、钴、镍、锰回收率的同时将能耗降低至~234kWh/t，显著减少了能源的消耗。Wang et al.（2025）使用NO_2通过电化学方法处理废弃LIBs，获得了~97%的锂回收率、副产品$LiNO_3$以及平均每处理1kg废旧电极获得的66Wh电能，实现了同步无害化处理废旧电极和工业废气。

4.3.2　负极材料石墨

发展高效回收技术，推进石墨资源重复循环利用。作为目前应用最广泛的负极材料，锂离子电池中石墨的重量占比可达12%~21%，但目前对以石墨为主的负极材料的回收尚未被重视。建议发展高效清洁的回收技术并建立完善的负极材料回收流程；重点关注石墨晶格修复等先进技术的发展，以产出更高性能的二次石墨资源。

5　结语

（1）电池矿产是制造锂离子电池核心元件电芯的关键原材料，包括锂、钴、镍、锰、磷、石墨和硼。

（2）全球电池矿产的供应来源相对集中、空间分布相对离散、供给路径相对单一。预计未来全球电池矿产供需存在短期内供给偏过剩、长期供给偏

短缺的趋势。中国是全球最大的电池矿产需求国，锂、钴、镍、锰、硼对外依存度高，进口来源高度集中。

(3)全球电池矿产分布极不均衡，空间分布集中，非洲、澳大利亚、北美是最主要的产出地。中国电池矿产储量占比大多较低，且空间分布不均衡，主要集中在西部、南部，并以低品位难开采矿床居多。

(4)根据各方数据，电池矿产保障应重视以下方面：持续开展找矿和资源量详查工作，协调全球电池矿产资源合理调配；改进采选加工工艺，提高资源利用率，选择合理的开采方式，寻找可行的替代品；完善废旧电池回收体系，推进二次资源回收再利用，在降低回收成本的同时提高资源回收率。

致谢：在数据收集的过程中得到了中国地质调查局张伟波高级工程师的大力帮助；各位审稿专家对本文提出了宝贵的意见与建议，在此一并表示衷心的感谢。

[References]

Acharya B C, Rao D S, Prakash S, Reddy P S R, Biswal S K.1996. Processing of low grade graphite ores of Orissa, India [J]. Minerals Engineering,9(11):1165-1169.

Ai Jiang, Lü Xinbiao, Li Zuowu, Wu Yalun. 2020. Geological characteristics and diagenetic geochronology of the Huangyangshan graphite deposit, Xinjiang[J]. Geology in China,47(2):334-347(in Chinese with English abstract).

Ali O A, Morshedy S A, El-Zahhar E A A, Alghamdi M M, El Naggar A M A.2024. African continent: Rich land of minerals and energy sources[J]. Inorganic Chemistry Communications,169:113123.

An Fuqiang, Zhao Hongliang, Cheng Zhi, Qiu Ji Yicheng, Zhou Weinan, Li Ping.2019. Development status and research progress of power battery for pure electric vehicles[J]. Chinese Journal of Engineering,41(1):22-42(in Chinese with English abstract).

Ayodhya D, Veerabhadram G. 2020. A brief review on synthesis, properties and lithium-ion battery applications of borophene[J]. FlatChem,19:100150.

Azadnia A H, Onofrei G, Ghadimi P.2021.Electric vehicles lithium-ion batteries reverse logistics implementation barriers analysis: A TISM-MICMAC approach [J]. Resources, Conservation & Recycling, 174.

Bai Jianke, Chen Juanlu, Peng Suxia. 2018. Geochronology and geochemistry of ore-bearing intrusions from Huangyangshan magmatic hydrothermal graphite deposit in Qitai County, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica,34(8):2327-2340(in Chinese with English abstract).

Boafo J, Obodai J, Stemn E, Nkrumah P N.2024. The race for critical minerals in Africa: A blessing or another resource curse? [J]. Resources Policy, 93:105046.

Bridge G, Faigen E. 2022. Towards the lithium-ion battery production network: Thinking beyond mineral supply chains [J]. Energy Research & Social Science,89:102659.

Cabral A R, Zeh A, Vianna N C, Ackerman L, Pašava J, Lehmann B, Chrastný V. 2019. Molybdenum-isotope signals and cerium anomalies in Palaeoproterozoic manganese ore survive high-grade metamorphism[J]. Scientific Reports,9(1):1-7.

Cai P, Ma X.2024. Metallogenic regularity and main research progress of cobalt and nickel deposits in China[J]. Journal of Geochemical Exploration,266:107574.

Carpanese C, Saxinger G, Wilson E.2024. Clean and future-oriented: Local perceptions of lithium extraction in Bolivia during the presidency of Evo Morales [J]. The Extractive Industries and Society, 19:101522.

Carr-Wilson S, Pattanayak S K, Weinthal E.2024.Critical mineral mining in the energy transition: A systematic review of environmental, social, and governance risks and opportunities[J].Energy Research & Social Science,116:103672.

Chadha U, Hafiz M, Bhardwaj P, Padmanaban S, Sinha S, Hariharan S, Kabra D, Venkatarangan V, Khanna M, Selvaraj S K, Banavoth M, Sonar P, Badoni B, Vimala R.2022. Theoretical progresses in silicon anode substitutes for lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage,55:105352.

Chen W Y, Chen J H, V. Bets K, Salvatierra R V, Wyss K M, Gao G H, Choi C H, Deng B, Wang X, Li J T C, Kittrell C, La N, Eddy L, Scotland P, Cheng Y, Xu S C, Li B W, Tomson M B, Han Y M, Yakobson B I, Tour J M.2023. Battery metal recycling by flash Joule heating[J]. Science Advances, 9(39):eadh5131.

Chen Xifeng, Ye Jinhua, Chen Xiufa.2017. Distribution characteristics of nickel mineral resources in "One Belt and One Road" and its exploration and development potential[J]. Geological Review,63(supp.):11-12(in Chinese with English abstract).

Cheng Xiang, Hu Peng, Zhang Haikun, Jiang Junsheng. 2021. The main types, distribution and current development of manganese ore deposits[J]. Geology in China, 48(1): 102-119(in Chinese with English abstract).

Cui N, Sun L, Bagas L, Xiao K, Xia J.2017.Geological characteristics and analysis of known and undiscovered graphite resources of China[J]. Ore Geology Reviews,91:1119-1129.

Deberdt R, Le Billon P.2021. Conflict minerals and battery materials supply chains: A mapping review of responsible sourcing initiatives[J]. The Extractive Industries and Society,8(4):100935.

Dehaine Q, Tijsseling L T, Glass H J, Törmänen T, Butcher A R.2021. Geometallurgy of cobalt ores: A review[J]. Minerals Engineering, 160:106656.

Ding T, Nie Z, Wu Q, Yu J J, Bu L Z, Wang Y S, Xing E Y, Zheng M P, Li Y B.2025. Optimization of lithium extraction solar pond in Zabuye Salt Lake: Theoretical calculation combined with field experiments[J]. China Geology, 8(01):26-38.

Disu B, Rafati R, Haddad A S, Roca J A M, Clar M I I, Bakhtiari S S E. 2024. Review of recent advances in lithium extraction from subsurface brines[J]. Geoenergy Science and Engineering, 241: 213189.

Doroshkevich A G, Wall F, Ripp G S. 2007. Magmatic graphite in dolomite carbonatite at Pogranichnoe, North Transbaikalia, Russia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 153(3): 339-353.

Feng J H, Liu W J, Chen F.2025. Moving towards a circular economy: A systematic review of barriers to electric vehicle battery recycling[J]. Sustainable Production and Consumption, 54:241-260.

Fu Wei, Niu Hujie, Huang Xiaorong, Yang Mengli, Chen Yuanrong.2013. Diversified genesis of the laterite nickel deposits: A comparative study based on the global scale[J]. Acta Geologica Sinica, 87(6): 832-849(in Chinese with English abstract).

Fu Yangang, Hu Guyue, Li Yanhe, Fan Chanfu, Hou Kejun, Zhao Yue. 2018. LA-MC-ICP-MS U-Pb zircon ages of Paleoproterozoic migmatitized granites from the Houxianyu borate deposit, eastern Liaoning: Constraints on the evolution of the borate Deposits[J]. Geological Review, 64(2): 405-417(in Chinese with English abstract).

Gourcerol B, Gloaguen E, Melleton J, Tuduri J, Galiègue J.2019. Re-assessing the European lithium resource potential - A review of hard-rock resources and metallogeny [J]. Ore Geology Reviews, 109:494-519.

Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, Conrad T A.2013. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources[J]. Ore Geology Reviews, 51:1-14.

Huang W T, Wu J, Liang H Y, Chen X L, Zhang J, Ren L.2020. Geology, geochemistry and genesis of the Longhua low-temperature hydrothermal Ni-Co arsenide deposit in sedimentary rocks, Guangxi, South China[J]. Ore Geology Reviews, 120(2): 103393.

Ihlen P, Schiellerup H, Gautneb H, Skår Ø.2014. Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential — A review[J]. Ore Geology Reviews, 58:126-147.

Ivanović S, Tomićević-Dubljević J, Bjedov I, Đorđević J, Živojinović I. 2023. Cultural landscape management in context: Local communities′ perceptions under Jadar mineral extraction project in Serbia[J]. The Extractive Industries and Society, 16(000):15.

Jiang Sihong, Liu Chao, Chen Lei, Liu Yifei, Wang Gang, Zhang Lili, Li Xiaomei, Wang Jiawei, Wang Jiaxin, Zhao Ting, Dai Tao.2024. Assessment report for mineral reserves in the world (2024) [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-163(in Chinese).

Jin Xi, Chen Xianfeng.2018. Geological characteristics and genesis of the Xialei Mn deposit in Daxin County, Guangxi [J]. Mineral Resources and Geology, 32 (3) : 404-408 (in Chinese with English abstract).

Keays R R, Lightfoot P C.2020. Mafic intrusions in the footwall of the Sudbury Igneous Complex: Origin of the Sudbury impact melt sheet and its associated ore deposits[J]. Ore Geology Reviews, 120:103435.

Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, Everson M P, Wallington T J.2012.Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. Ore Geology Reviews, 48: 55-69.

Kumar P, Singh G, Bahadur R, Li Z X, Zhang X W, Sathish C I, Benzigar M R, Tran T K A, Padmanabhan N T, Radhakrishnan S, Janardhanan J C, Biji C A, Mathews A J, John H, Tavakkoli E, Murugavel R, Roy S, Ajayan P M, Vinu A. 2024. The rise of borophene[J]. Progress in Materials Science, 146:101331.

Li Chao, Wang Denghong, Zhou Limin, Zhao Hong, Li Xinwei, Qu Wenjun.2017. Study on the Re-Os isotope composition of graphite from the Lutang graphite deposit in Hunan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 36(3):297-304(in Chinese with English abstract).

Li J, Zhang G Q, Luo M Z, Li G M, He J. 2025. Separation and utilization of lithium, magnesium, and boron resources from salt lakes through ionic liquid extraction and CO_2 mineralization[J]. Separation and Purification Technology, 358(PB):130444.

Li Jiankang, Wang Denghong, Fu Xiaofang.2006. $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of the Keeryin pegmatite type rare metal deposit, western Sichuan, and its tectonic significances[J]. Acta Geologica Sinica, 80(6): 843-848(in Chinese with English abstract).

Li Kong.2016. Global boron ore resources distribution and resource potential analysis[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing):1-52 (in Chinese with English abstract).

Li Qingzhe, Liu Dawen, Wang Jingbin, He Zhijun. 2023. Geological characteristics and copper-cobalt resources of the Central Africa copper-cobalt metallogenic belt[J]. Geology and Exploration, 59(2): 451-464(in Chinese with English abstract).

Li W Y, Gao Y B, Zhang Z W, Ren G L, Zhang Z B, Kong H L, Wang Y L.2023. Comparison of mafic-ultramafic and granite-pegmatite "small intrusion forming large deposit"—Taking Xiarihamu and Dahongliutan super-large deposits in Kunlun metallogenic belt, China as examples[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 45(5):1036-1048.

Liu B B, Zhang Y B, Lu M M, Su Z J, Li G H, Jiang T.2019. Extraction and separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores: A review[J]. Minerals Engineering, 131:286-303.

Lin Yongjie, Zheng Mianping, Liu Xifang.2017. Boron resource of salt lakes in Qinghai-Tibet Plateau[J].Science & Technology Review, 35(12):77-82(in Chinese with English abstract).

Liu Chenglin, Yu Xiaocan, Yuan Xueyin, Li Ruiqin, Yao Fojun, Shen Lijian, Li Qiang, Zhao Yuanyi.2021. Characteristics, distribution regularity and formation model of brine- type Li deposits in salt lakes in the world[J]. Acta Geologica Sinica, 95(7):2009-2029(in Chinese with English abstract).

Liu Xue, Wang Chunlian, Liu Xuelong, Liu Dianhe, Yan Kai, Liu Sihan, Liu Yanting. 2024. Main types, distribution, development and utilization of lithium deposits in China[J]. Geology in China, 51(3): 811-832 (in Chinese with English abstract).

Loukola-Ruskeeniemi K, Hyvönen E, Airo M L, Lerssi J, Arkimaa H.2023. Country-wide exploration for graphite- and sulphide-rich black shales with airborne geophysics and petrophysical and geochemical studies[J]. Journal of Geochemical Exploration, 244: 107123.

Lu Yiguan, Hao Bo, Sun Kai, He Shengfei, Xu Kangkang, Gong

Penghui, Zhang Hang.2020. General situation of cobalt resource and its utilization analysis[J]. North China Geology,43 (1):72-80(in Chinese with English abstract).

Luan Zhuoran, Yan Lingjun, Chen Chao, Chen Xifeng, Zhang Weibo, Wang Fengxiang, Liu Jing, Lu Xianke.2021. Metallogenic regularity, development and utilization status and suggestions on exploration of manganese resources in Africa[J]. Geology and Exploration, 57(6): 1216-1228(in Chinese with English abstract).

Lü Linsu, Wang Yunfeng, Li Hongbo, Zhou Zhenhua, Zhang Zuoheng, Xie Guiqing.2011. Disscussion on the metallogenesis of Bushveld magmatic Cu-Ni-PGE sulphide deposit in South Africa[J]. Mineral Deposits,30(6):1129-1148(in Chinese with English abstract).

Maghfouri S, Rastad E, Mousivand F, Choulet F, Ye L.2017. Geological and geochemical constraints on the Cheshmeh-Frezi volcanogenic stratiform manganese deposit, southwest Sabzevar Basin, Iran[J]. Ore Geology Reviews,89:96-113.

Maisel F, Neef C, Marscheider-Weidemann F M, Nissen N F.2023. A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. Resources, Conservation & Recycling,192:106920.

Marza M, Ferguson G, Thorson J, Barton I, Kim J H, Ma L, McIntosh J.2024. Geological controls on lithium production from basinal brines across North America[J]. Journal of Geochemical Exploration,257: 107383.

Mo Jiangping, Hu Qiaofan, Fang Ke, Liu Wei, Zhou Shouyu, Li Mingjun. 2024. Metallogenic characteristics and enrichment mechanism of cobalt deposits in the Central African Cu-Co metllogenic belt [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,43(1):127-139,5(in Chinese with English abstract).

Mohanty A, Sahu S, Sukla L B, Devi N.2021. Application of various processes to recycle lithium-ion batteries (LIBs): A brief review[J]. Materials Today: Proceedings, 47(P5):1203-1212.

Nagy E, Jurani A H, Xydis G.2024. Will the EU have enough minerals to drive their electric dreams by 2030? [J]. The Extractive Industries and Society,20:101556.

Nie Fengjun, Xin Hongbo, Zhang Weibo, Zhao Yuanyi, Liu Yifei.2013. Sudbury ultra-large Ni-Cu-PGE deposit, Canada[J]. Mineral Deposits, 32 (1) : 217-220 (in Chinese with English abstract).

Niri A J, Poelzer G A, Pettersson M, Rosenkranz J.2025. Evaluating battery minerals future supply through production predicting in the context of the green energy transition[J]. Resources Policy,103: 105526.

Nikkhah H, Ipekçi D, Xiang W J, Stoll Z A, Xu P, Li B K, McCutcheon J R, Beykal B.2024. Challenges and opportunities of recovering lithium from seawater, produced water, geothermal brines, and salt lakes using conventional and emerging technologies[J]. Chemical Engineering Journal,498:55349.

Özkul C, Çiftçi E, Tokel S, Savaş M. 2017. Boron as an exploration tool for terrestrial borate deposits: A soil geochemical study in Neogene Emet-Hisarcik basin where the world largest borate deposits occur (Kutahya-western Turkey) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 173:31-51.

Parianos J, Lipton I, Nimmo M. 2021. Aspects of estimation and reporting of mineral resources of seabed polymetallic nodules: A contemporaneous case study[J]. Minerals, 11(2):200.

Peng Zhanpeng, Liu Zhaoguo, Guo Shaohua.2024. Progress of research on cobalt-free nickel-rich cathodes for lithium-ion batteries[J]. Chinese Science Bulletin,69:3354-3366(in Chinese with English abstract).

Pertsev N N, Kulakovskiy A.2002. Structural and petrological evolution of the boron-iron Tayoznoye deposit (Central Aldan, Russia) [J]. Geology of Ore Deposits,44:1-17.

Petersen S, Krätschell A, Augustin N, Jamieson J, Hein J R, Hannington M D.2016. News from the seabed-Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources[J]. Marine Policy, 70:175-187.

Pharoe B K, Evdokimov A N, Gembitskaya I M, Bushuyev Y Y.2020. Mineralogy, geochemistry and genesis of the post-Gondwana supergene manganese deposit of the Carletonville-Ventersdorp area, North West Province, South Africa[J]. Ore Geology Reviews,120: 103372.

Qi D R, Lan T G, Shu Q, Feng Y, Zhou S H.2024. Nickel enrichment during lateritization of ophiolitic ultramafic rocks: A case study from the Kelurahan Pondidrha laterite profile in Sulawesi, Indonesia[J]. Ore Geology Reviews, 170:106140.

Ren Z J, Li H J, Wang Y T, Wang P F, Lv L Y, Sun Z, Gao W F.2024. Green recycling assessment on typical spent lithium-ion batteries (LIBs): A multi-objective assessment[J]. Resources, Conservation & Recycling,206:107648.

Ripp G S, Badmatsyrenov M V, Doroshkevich A G, Lzbrodin I A.2005. New carbonatite-bearing area in Northern Transbaikalia [J]. Petrology,13:489-498.

Roy V, Paranthaman P M, Zhao F.2024. Lithium from clay: Assessing the environmental impacts of extraction[J]. Sustainable Production and Consumption, 52:324-332.

Sahlström F, Strmic P S, Dundas S H, Sendula E, Cheng Y B, Wold M, Pedersen R B S.2023. Mineralogical distribution and genetic aspects of cobalt at the active Fåvne and Loki's Castle seafloor massive sulfide deposits, Arctic Mid-Ocean Ridges [J]. Ore Geology Reviews, 153:105261.

Saintilan N J, Ikenne M, Bernasconi S M, Toma J, Creaser R A, Souhassou M, Allaz J M, Karfal A, Maacha L, Spangenberg J E.2023. The world's highest-grade cobalt mineralization at Bou Azzer associated with Gondwana supercontinent breakup, serpentinite and Kellwasser hydrocarbon source rocks [J]. American Journal of Science,323:12.

Sajid M, Bary G, Asim M, Ahmad R, Irfan Ahamad M, Alotaibi H, Rehman A, Khan I, Yin G L. 2022. Synoptic view on P ore beneficiation techniques[J]. Alexandria Engineering Journal,61(4): 3069-3092.

Sanyal P, Acharya B, Bhattacharya S, Sarkar A, Agrawal S, Bera M K.2009. Origin of graphite, and temperature of metamorphism in Precambrian Eastern Ghats Mobile Belt, Orissa, India: A carbon isotope approach[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 36(2-3):

252-260.

Sasmaz A, Zagnitko V M, Sasmaz B.2020. Major, trace and rare earth element (REE) geochemistry of the Oligocene stratiform manganese oxide-hydroxide deposits in the Nikopol, Ukraine[J]. Ore Geology Reviews,126:103772.

Schreyer W, Pertsev N, Medenbach O, Burchard M, Dettmar D.1998. Pseudosinhalite: Discovery of the hydrous MgAl-borate as a new mineral in the Tayozhnoye, Siberia, skarn deposit [J]. Contrib Mineral Petrol,133:382-388.

Shahzad K, Cheema I I.2024. Aluminum batteries: Unique potentials and addressing key challenges in energy storage [J]. Journal of Energy Storage,90:111795.

Shi Haiyan, Fan Qishun, Wang Liwen, Liu Wanping, Wang Mingxiang, Li Zeren, Li Qingkuan, Chen Tianyuan, Yang Haotian. 2024. Characterization of lithium and boron resource distribution and material sources in Dongling Lake, located in the northern region of Qarhan[J]. Acta Geoscientia Sinica,45(5):728-742(in Chinese with English abstract).

Shi H Y, Zhang J F, Ou L M. 2025. A comprehensive review: Evaluating emerging green leaching technologies for recycling spent lithium-ion batteries [J]. Chemical Engineering Journal, 506:160006.

Slack J F, Kimball B E, Shedd K B. 2017. Cobalt[A]. In: Schulz K I, DeYoung J H, Seal Il R R, Bradley D C. Critical mineral resources of the United States economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, F1-F40.

Souza R G, Domingues A M, Spindlegger A, Mair-Bauernfeind C, Part F.2025. Review of the current knowledge and identified gaps in assessing the social and environmental impacts of mining processes in the Lithium Triangle[J]. Sustainable Production and Consumption,53:40-63.

Su Benxun, Qin Kezhang, Jiang Shaoyong, Cao Mingjian, Zhang Zhaochong, Zhang Hongluo, Xue Guoqiang, Zhou Taofa, Mo Jiangping. 2023. Mineralization regularity, scientific issues, prospecting technology and research prospect of Co-Ni deposits in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(4):968-980(in Chinese with English abstract).

Sun Hongwei, Ren Junping, Wang Jie, Wu Xingyuan, Tang Wenlong, Gu Alei, Zuo Libo.2022. Metallogenic regularity and resource potential of manganese deposits in southern Africa[J]. Geological Bulletin of China,41(1):60-71(in Chinese with English abstract).

Sun Kai, Zhang Qizuan, Zhu Qing, Jiang Sihong, Ren Junping, Sun Hongwei, Zhang Hang, Gu Alei, Zeng Wei, Wang Jiaying, Lu Yiguan, Dong Jinmeng, Zhang Jinrun. 2022. Global manganese resources characteristics and supply-demand patterns[J]. Mineral Exploration,13(4):371-387(in Chinese with English abstract).

Sun L, Xu C P, Xiao K Y, Zhu Y S, Yan L Y. 2018. Geological characteristics, metallogenic regularities and the exploration of graphite deposits in China[J]. China Geology,1(3):425-434.

Sun T, Wang D H, Qian Z Z, Fu Y, Chen Z H, Lou D B.2014. Summary of metallogenic regularity for the nickel deposits, China[J]. Acta Geologica Sinica,88(12):2227-2251.

Toro N, Robles P, Jeldres I R. 2020. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: A critical review[J]. Ore Geology Reviews,126:103699.

Touret J L R, Huizenga J M, Kehelpannala K V W, Piccoli F.2019. Vein-type graphite deposits in Sri Lanka: The ultimate fate of granulite fluids[J]. Chemical Geology,508:167-181.

USGS.2025. Mineral commodity summaries[R]. U. S. Geological Survey: 1-212.

Vadoodi R, Rasmussen T M, Smirnov M, Bauer T.2021. Towards an understanding of mineral systems – Contributions from magneto-telluric data from the Fennoscandian Shield in northern Sweden[J]. Tectonophysics,808:228816.

Vivoda V, Matthews R, McGregor N. 2024. A critical minerals perspective on the emergence of geopolitical trade blocs [J]. Resources Policy,89:104587.

Wang D H, Dai H Z, Liu S B, Wang C H, Yu Y, Dai J J, Liu L J, Yang Y Q, Ma S C.2020. Research and exploration progress on lithium deposits in China[J]. China Geology, 3(1), 137-152.

Wang Liangliang, Wang Qiushu, Wu Liang.2019. Analysis of global exploration situation and potential of boron resources [J]. China Mining Magazine,28(4):74-78(in Chinese with English abstract).

Wang Liangliang, Yu Rui, Chen Xifeng, Wu Liang.2021. Overview and development status of phosphate ore resources in Africa[J]. Geology and Exploration, 57(6): 1269-1277(in Chinese with English abstract).

Wang Wei, Jiang Shaoyong, Ge Wen, Zhang Qidao, Liu Tong, Zhang Xingkai.2024. Geological characteristics and genetic mechanism of the lacustrine sedimentary clay type lithium deposit [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,43(1):64-78,6(in Chinese with English abstract).

Wang W P, Liu Z C, Zhu Z X, Ma Y R, Zhang K, Meng Y H, Ahmad T, Khan N A, Peng Q, Xie Z H, Zhang Z D, Chen W.2025. Electrochemical lithium recycling from spent batteries with electricity generation[J]. Nature Sustainability, 8:287-296

Wang Ying, Xiong Xianxiao.2023. Phosphate ore series, metallogenic regularity, and prospecting direction in China[J]. Acta Geologica Sinica,44(4):625-634(in Chinese with English abstract).

Wang Zhuo, Huang Ranxiao, Wu Datian, Xu Fengming, Sun Wei, Zhang Dehui, Zhao Yuandong.2023. The basic characteristics and development potential evaluation of salt lake brine-type lithium deposits[J]. Geology in China,50(1):102-117(in Chinese with English abstract).

Wells M A, Ramanaidou E R, Quadir M Z, Roberts M, Bourdet J, Verrall M.2022. Morphology, composition and dissolution of chromite in the Goro lateritic nickel deposit, New Caledonia: Insight into ophiolite and laterite genesis[J]. Ore Geology Reviews,143:104752.

Wu Fafu, Wang Jianxiong, Liu Jiangtao, Zeng Guoping, Xiang Peng, Hu Peng, Xiang Wenshuai.2021. Distribution, geology and development status of phosphate resources[J]. Geology in China,48(1):82-101(in Chinese with English abstract).

Wu Feng, Li Qing, Chen Lai, Wang Zirun, Chen Gang, Bao Liying, Lu

Yun, Chen Shi, Su Yuefeng.2022. An optimized synthetic process for the substitution of cobalt in nickel-rich cathode materials[J].Acta Acta Physico-Chimica Sinica,38(5): 66-75(in Chinese with English abstract).

Xi Wanwan, Zhao Yuhao, Ni Pei, Yao Chunyan, Zhu Yiping, Zheng Lu, Yao Zhongyou, Wang Tiangang.2023. Main types, characteristics, distributions, and prospecting potential of lithium deposits [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1):19-35(in Chinese with English abstract).

Xiang J, Chen J P, Bagas L, Li S, Wei H T, Chen B H.2020. Southern China's manganese resource assessment: An overview of resource status, mineral system, and prediction model [J]. Ore Geology Reviews,116:103261.

Xie R Q, Zhao Z H, Tong X, Xie X, Song Q, Fan P Q.2024. Review of the research on the development and utilization of clay-type lithium resources[J]. Particuology,87:46-53.

Yang Huipeng, Wang Wei. 2019. Global cobalt resources status and exploitation trends [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(5):41-49,55(in Chinese with English abstract).

Yang Peiqi, Liu Jingdang, Zhang Yanfei, Liang Shuai, Zhao Yue, Liu Shumei. 2017. Ore geochemical characteristics and metallogenic epoch of typical graphite deposits in Jiamusi Massif, Heilongjiang Province[J]. Geology in China,44(2):301-315(in Chinese with English abstract).

Ying Xiong, Wang Shouyang, Yang Yuyao. 2024. Analysis of demand and recycling potential of lithium, cobalt, and nickel under energy transition—From perspective of electric vehicles [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 39(7):1226-1234(in Chinese with English abstract).

Yu Jianguo, Sun Qing, Qiu Shengbo, Zhang Yiren, Chen Jun. 2023. Lithium resources development supporting national new energy strategy development[J]. Inorganic Chemicals Industry,55(1):1-14(in Chinese with English abstract).

Yuan Jianguo, Qu Yunyan, Liu Qiuying, Feng Xiaoli.2018. Analysis of the supply and demand tendency of boron resources in China[J]. China Mining Magazine,27(5):9-12,27(in Chinese with English abstract).

Zeng Ruiyin, Zhu Xinyou, Wang Rong, Li Qingzhe, Zhan Yong, Zhang Xiong, Sun Ning, Li Liang, Tan Kangyu, Huang Jianye. 2024. Geological and mineralization characteristics of Manono-Kitotolo Li-Cs-Ta pegmatite in the Democratic Republic of Congo[J]. Geology in China,51(2):443-456(in Chinese with English abstract).

Zhang H Q, Wang J C, Zhang D, Ren W S, Shi S, Bi L S, Li Y H, Xue H Y, Liu Z M, He Y. 2025. Contemporary advancements and prospective outlook on feasible lithium-ion batteries based on silicon anodes[J]. Journal of Alloys and Compounds,1014:178763.

Zhang Lianchang, Zhang Aikui, Liu Yongle, Li Wen, Dong Zhiguo, Gao Bingyu, Wang Changle, Zhu Mingtian.2023. Research progresses and problems of sedimentary-metasedimentary rock-hosted cobalt deposits[J]. Acta Petrologica Sinica,39(4):981-997(in Chinese with English abstract).

Zhang M J, Kamo S L, Li C S, Hu P Q, Ripley E M.2010. Precise U-Pb zircon-baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China[J]. Mineralium Deposita,45(1):3-9.

Zhang Sujiang, Wang Nan, Cui Liwei, Ji Genyuan, Deng Wenbing, Zhang Yanwen.2021. Analysis of supply and demand situation of graphite resources at home and abroad [J]. Inorganic Chemicals Industry,53(7):1-11(in Chinese with English abstract).

Zhang Wanyi, Du Can, Hu Yalu, Liu Jiangtao, Xia Ye, Wang Fengxiang, Huang Kuan, Shi Chunyuan.2024. Basic principles and application prospects of earth system science[J]. Geological Bulletin of China, 43(8):1277-1288(in Chinese with English abstract).

Zhang Weibo, Ye Jinhua, Xiang Yunchuan, Chen Xiufa, Chen Zheng, Cui Minli, Chen Xifeng, Zhang Chao.2015. Geological characteristics of laterite nickel-cobalt deposit in New Caledonia [J]. Acta Mineralogica Sinica,35(S1):1091(in Chinese with English abstract).

Zhang X Q, Zhao C Z, Huang J Q, Zhang Q.2018. Recent advances in energy chemical engineering of next-generation lithium batteries[J]. Engineering,4(6):831-847.

Zhang Yanfei, An Zhengzhen, Liang Shuai, Zhai Furong, Zhang Sen, Ju Nan, Jiang Ping, Jin Xiuying, Xiao Rongge. 2022. Distribution characteristics, genetic types and prospecting progress of graphite deposits[J]. Geology in China,49(1):135-150(in Chinese with English abstract).

Zhang Yingli, Chen Lei, Wang Kunming, Wang Gang, Guo Xianqing, Nie Xiao, Pang Xuyong.2022. Metallogenic characteristics of sedimentary lithium resources [J]. Mineral Deposits, 41(5): 1073-1092(in Chinese with English abstract).

Zhang Z F, Zhang W B, Zhang Z G, Chen X F.2025. Nickel extraction from nickel laterites: Processes, resources, environment and cost[J]. China Geology,8(1):187-213.

Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Feng Chengyou, Wang Hui, Wang Yalei, Wu Junjie, Li Dexian, Lü Xinbiao, Zhu Bopeng, Hui Bo, Liu Huiwen.2022. Study on metallogenic regularity of Co-Ni deposits in China and its efficient exploration techniques [J]. Northwestern Geology, 55(2):14-34(in Chinese with English abstract).

Zhao Junxing, Li Guangming, Qin Kezhang, Tang Dongmei.2019. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits[J]. Chinese Science Bulletin,64:2484-2500(in Chinese with English abstract).

Zheng M P, Chen W X, Qi W. 2016. New findings and perspective analysis of prospecting for volcanic sedimentary boron deposits in the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica,(4):407-418.

Zhou Yun, Li Kun, Yu Yushuai, Zhao Wuqiang, Liu Fei, Huang Xiaokun. 2023. Properties, origin and evolution of ore-forming fluids from Longhua Ni-Co deposit, Jinxiu County, Guangxi[J]. South China Geology, 39(3): 558-570(in Chinese with English abstract).

Zhu Wenbin, Xu Zhiqin, Lin Hefeng, Zhou Mingzhao, Zhu Junyue, Jin Wenkai, Luo Xianglong, Zhang Rongqing, Che Xudong, Li Guangwei, Zheng Bihai. 2024. Textural zonation of pegmatites and multiple-phase magmatic mineralization in the Jiajika lithium deposit in western Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica,98(5):1358-1379(in Chinese with English abstract).

［附中文参考文献］

艾江，吕新彪，李作武，吴亚伦．黄羊山石墨矿床地质特征及成岩年代研究[J]．中国地质，2020.47(2)：334-347.

安富强，赵洪量，程志，邱继一承，周伟男，李平．2019.纯电动车用锂离子电池发展现状与研究进展[J]．工程科学学报，41(1)：22-42.

白建科，陈隽璐，彭素霞．2018.新疆奇台县黄羊山岩浆热液型石墨矿床含矿岩体年代学与地球化学特征[J]．岩石学报，34(8)：2327-2340.

陈喜峰，叶锦华，陈秀法．2017“一带一路”沿线镍矿资源分布特征与勘查开发现状[J]．地质论评，63(S1)：11-12.

程湘，胡鹏，张海坤，姜军胜．2021.锰矿主要类型、分布特点及开发现状[J]．中国地质，48(1)：102-119.

付伟，牛虎杰，黄小荣，杨梦力，陈远荣．2013.红土型镍矿床成因的多样性：基于全球尺度的对比研究[J]．地质学报，87(6)：832-849.

付燕刚，胡古月，李延河，范昌福，侯可军，赵悦．2018.辽宁后仙峪硼矿区混合岩的LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄：对硼矿成矿演化的制约[J]．地质论评，64(2)：405-417.

江思宏，刘超，陈雷，刘翼飞，王刚，张莉莉，李晓妹，王嘉玮，王佳新，赵汀，代涛．2024.全球矿产资源储量评估报告(2024)[R]．北京：地质出版社：1-163.

金玺，陈显锋．2018.广西大新县下雷锰矿地质特征与矿床成因探讨[J]．矿产与地质，32(3)：404-408.

李超，王登红，周利敏，赵鸿，李欣尉，屈文俊．2017.湖南鲁塘石墨矿Re-Os同位素研究[J]．岩矿测试，36(3)：297-304.

李建康，王登红，付小方．2006.川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床的$^{40}Ar/^{39}Ar$年代及其构造意义[J]．地质学报，(6)：843-848.

李空．2016.全球硼矿资源分布与潜力分析研究[D]．北京：中国地质大学(北京)：1-52.

李庆哲，刘大文，王京彬，和志军．2023.中非铜钴成矿带地质特征及铜钴矿床资源量分析[J]．地质与勘探，59(2)：451-464.

林勇杰，郑绵平，刘喜方．2017.青藏高原盐湖硼矿资源[J]．科技导报，35(12)：77-82.

刘成林，余小灿，袁学银，李瑞琴，姚佛军，沈立建，李强，赵元艺．2021.世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型[J]．地质学报，95(7)：2009-2029.

刘雪，王春连，刘学龙，刘殿鹤，颜开，刘思晗，刘延亭．2024.中国锂矿床主要类型特征、分布情况及开发利用现状[J]．中国地质，51(3)：811-832.

卢宜冠，郝波，孙凯，何胜飞，许康康，龚鹏辉，张航．2020.钴金属资源概况与资源利用情况分析[J]．地质调查与研究，43(1)：72-80.

栾卓然，闫领军，陈超，陈喜峰，张伟波，王丰翔，刘景，鲁先科．2021.非洲锰矿床成矿规律、开发利用与勘查建议[J]．地质与勘探，57(6)：1216-1228.

吕林素，汪云峰，李宏博，周振华，张作衡，谢桂青．2011.南非布什维尔德岩浆型Cu-Ni-PGE硫化物矿床成因探讨[J]．矿床地质，30(6)：1129-1148.

莫江平，胡乔帆，方科，刘伟，周守余，李明君．2024.中非铜钴矿带钴矿成矿特征和富集机理[J]．矿物岩石地球化学通报，43(1)：127-139，5.

聂凤军，辛洪波，张伟波，赵元艺，刘翼飞．2013.加拿大萨德伯里超大型镍-铜-铂族元素矿床[J]．矿床地质，32(1)：217-220.

彭展鹏，刘兆国，郭少华．2024.锂离子电池无钴高镍正极的研究进展[J]．科学通报，69(23)：3354-3366.

石海岩，樊启顺，王利文，刘万平，王明祥，李泽仁，李庆宽，陈天源，杨浩田．2024.察尔汗北部东陵湖Li、B资源分布特征与物质来源[J]．地球学报，45(5)：728-742.

苏本勋，秦克章，蒋少涌，曹明坚，张招崇，张宏罗，薛国强，周涛发，莫江平．2023.我国钴镍矿床的成矿规律、科学问题、勘查技术瓶颈与研究展望[J]．岩石学报，39(4)：968-980.

孙宏伟，任军平，王杰，吴兴源，唐文龙，古阿雷，左立波．2022.南部非洲锰矿成矿规律与资源潜力[J]．地质通报，41(1)：60-71.

孙凯，张起钻，朱清，江思宏，任军平，孙宏伟，张航，古阿雷，曾威，王佳营，卢宜冠，董津蒙，张津瑞．2022.全球锰矿资源特征及供需格局[J]．矿产勘查，13(4)：371-387.

王靓靓，王秋舒，吴亮．2019.全球硼矿资源开发现状与潜力分析[J]．中国矿业，28(4)：74-78.

王靓靓，于瑞，陈喜峰，吴亮．2021.非洲磷矿资源格局与开发现状[J]．地质与勘探，57(6)：1269-1277.

王微，蒋少涌，葛文，张七道，刘桐，张行凯．2024.湖相沉积黏土型锂矿主要地质特征及成因[J]．矿物岩石地球化学通报，43(1)：64-78，6.

王莹，熊先孝．2023.中国磷矿成矿系列、成矿规律与找矿方向[J]．地球学报，44(4)：625-634.

王卓，黄冉笑，吴大天，许逢明，孙巍，张德会，赵院冬．2023.盐湖卤水型锂矿基本特征及其开发利用潜力评价[J]．中国地质，50(1)：102-117.

吴发富，王建雄，刘江涛，曾国平，向鹏，胡鹏，向文帅．2021.磷矿的分布、特征与开发现状[J]．中国地质，48(1)：82-101.

吴锋，李晴，陈来，王紫润，陈刚，包丽颖，卢赟，陈实，苏岳锋．2022.高镍正极材料中钴元素的替代方案及其合成工艺优化[J]．物理化学学报，38(5)：66-75.

隰弯弯，赵宇浩，倪培，姚春彦，朱意萍，郑璐，姚仲友，王天刚．2023.锂矿主要类型、特征、时空分布及找矿潜力分析[J]．沉积与特提斯地质，43(1)：19-35.

杨卉芃，王威．2019.全球钴矿资源现状及开发利用趋势[J]．矿产保护与利用，39(5)：41-49，55.

杨培奇，刘敬党，张艳飞，梁帅，赵越，刘淑梅．2017.黑龙江佳木斯地块典型石墨矿床含矿岩石地球化学特征及成矿时代[J]．中国地质，44(2)：301-315.

应雄，汪寿阳，杨宇瑶．2024.能源转型下的锂、钴、镍资源需求及回收潜力分析——基于电动汽车的视角[J]．中国科学院院刊，39(7)：1226-1234.

于建国，孙庆，裘晟波，张以任，陈君．2023.支撑国家新能源战略发展的锂资源开发[J]．无机盐工业，55(1)：1-14.

袁建国，屈云燕，刘秋颖，冯晓利．2018.中国硼矿资源供需趋势分析[J]．中国矿业，27(5)：9-1227.

曾瑞垠，祝新友，王蓉，李庆哲，詹勇，张雄，孙宁，李亮，谭康雨，黄建业．2024.刚果(金)Manono-Kitotolo含锂-铯-钽伟晶岩地质与矿化特征研究[J]．中国地质，51(2)：443-456.

张连昌，张爱奎，刘永乐，李文，董志国，高炳宇，王长乐，朱明田．2023.沉积岩-变沉积岩型钴矿研究进展与问题[J]．岩石学报，39(4)：981-997.

张苏江,王楠,崔立伟,季根源,邓文兵,张彦文.2021.国内外石墨资源供需形势分析[J].无机盐工业,53(7):1-11.
张万益,杜璨,胡雅璐,刘江涛,夏烨,王丰翔,黄宽,史淳元.2024。地球系统科学基本原理与应用展望[J].地质通报,43(8):1277-1288.
张伟波,叶锦华,向运川,陈秀法,陈正,崔敏利,陈喜峰,张潮.2015.新喀里多尼亚红土型镍-钴矿床地质特征[J].矿物学报,35(S1):1091.
张艳飞,安政臻,梁帅,翟富荣,张森,鞠楠,姜平,金秀英,肖荣阁.2022.石墨矿床分布特征、成因类型及勘查进展[J].中国地质,49(1):135-150.
张英利,陈雷,王坤明,王刚,郭现轻,聂潇,庞绪勇.2022.沉积型锂资源成矿作用特征[J].矿床地质,41(5):1073-1092.
张照伟,李文渊,丰成友,王辉,王亚磊,武军杰,李德贤,吕新彪,朱伯鹏,惠博,刘会文.2022.中国钴-镍成矿规律与高效勘查技术[J].西北地质,55(2):14-34.
赵俊兴,李光明,秦克章,唐冬梅.2019.富含钴矿床研究进展与问题分析[J].科学通报,64(24):2484-2500.
周云,李堃,于玉帅,赵武强,刘飞,黄啸坤.2023.广西金秀县龙华镍钴矿床成矿流体性质、来源及演化[J].华南地质,39(3):558-570.
朱文斌,许志琴,林和丰,周明召,朱鋆悦,靳文楷,罗祥龙,章荣清,车旭东,李广伟,郑碧海.2024.川西甲基卡锂矿床伟晶岩结构分带及多期岩浆成矿作用[J].地质学报,98(5):1358-1379.

Current Situation of Global Lithium-Ion Battery Mineral Resources and Resource Security of the Battery Industry Chain

SHI Chunyuan[1,2], ZHANG Wanyi[2], WANG Fengxiang[1,3], CHEN Gang[4], HU Yalu[2], YUAN Jianguo[2], LIU Jiangtao[2], WANG Lei[1], WANG Shiqi[1], YANG Yang[1]

(1. *Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei* 050031; 2. *Development Research Center, China Geological Survey, Beijing* 100037; 3. *Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-Prospecting, Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia* 010020; 4. *Geological Research Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang* 830000)

Abstract: Battery material minerals (hereafter referred to as "battery minerals") are part of the newly defined critical minerals for new energy internationally. They encompass the core minerals required in the manufacturing process of lithium-ion batteries, which primarily involve metallic minerals such as lithium, cobalt, nickel, and manganese, as well as non-metallic minerals like phosphorus, boron, and graphite. Starting from the resource distribution, mineral endowment, and exploration potential of battery minerals, this paper analyzes the consumption trends and supply-demand patterns based on supply and demand data, and proposes rationalized suggestions for ensuring the secure and stable supply of battery minerals. The research indicates: (1) The overall reserves of battery minerals are abundant, but their spatial distribution is uneven. (2) The global supply side of battery minerals exhibits trends of scarcity, concentration, and dispersion. The largest supplying countries are Australia (37% of lithium supply), the Democratic Republic of the Congo (76% of cobalt supply), Indonesia (59% of nickel supply), South Africa (37% of manganese supply), China (46% of phosphorus supply and 79% of graphite supply), and Turkey (74% of boron supply). China faces a situation where the total demand for battery minerals is high (accounting for over 50% of global demand for all except boron) but proven resource reserves are limited. Furthermore, China's external dependence is high (exceeding 80% for cobalt, nickel, and manganese), and its supply channels are relatively concentrated (99% of cobalt imports come from the Democratic Republic of the Congo). (3) The genetic types of global battery mineral deposits and the main supply types are diverse. In contrast, the genetic types of battery mineral deposits in China are relatively singular, and its primary supply types differ from the global pattern. (4) As the demand for battery minerals continues to rise, measures such as intensifying mineral exploration, securing the global supply system, improving development and utilization technologies, and encouraging resource recycling are urgently needed.

Key words: lithium-ion battery, battery minerals, critical minerals, industrial chain, supply and demand status