院士专栏

文章编号：1004-4051(2025)10-0001-14 DOI：10.12075/j.issn.1004-4051.20252198

中国锆资源国际供应链评价与资源保障战略研究

朱 磊[1]，刘 敏[2]，毛景文[3]，闫晶晶[4]

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院，北京 100083；2. 中国地质大学(北京)自然资源战略发展研究院，北京 100083；3. 中国地质科学院矿产资源研究所，北京 100037；4. 中国地质大学(北京)经济管理学院，北京 100083)

摘 要：中国作为全球最大的锆资源消费国，受国内储量和产能规模影响，外采度长期保持在 90% 以上。随着核工业和新一代信息技术产业的加速发展，国内锆资源需求仍将持续增长，因此，亟须保障国际供应链安全和提升国内供应能力。基于国际供应链安全评价体系，对 2013—2023 年的锆资源供给安全和贸易流通安全两个维度的十三项指标进行分析，结果显示，锆资源国际供应链风险整体趋于释缓但仍存在波动风险，按照风险态势可以划分为高风险期(2013—2016 年)、首次风险波动期(2016—2018 年)、风险下降期(2018—2021 年)和第二次风险波动期(2021—2023 年)四个阶段。另外，从资源禀赋、选冶和回收利用等三个方面分析国内锆资源保障现状显示，国内锆资源勘查远景可观，碱性岩型锆矿选矿技术已有突破，核级锆材的回收体系已经建立。综合国际供应链安全评价和国内资源保障现状分析结果，中国仍面临锆资源市场供需缺口持续扩大、供给多元化程度不足、选冶技术有待进一步提高、二次资源回收体系不完善等挑战。针对上述问题，建议中国应优先增加滨海地区及塔里木盆地边缘新生代沉积锆矿砂的勘查投入，构建多元化的国际供应链，优化选冶工艺的资金投入，强化二次资源回收力度，扩大核级锆材产能，建立锆资源国家战略储备体系，以全面保障中国锆资源供应能力和韧性。

关键词：锆资源；供需矛盾；国际供应链；技术瓶颈；资源保障；战略性矿产

中图分类号：TD-9; F407.1; F416.1 **文献标识码：**A

Evaluation and resource security strategy study on the international supply chain of zirconium resources in China

ZHU Lei[1]，LIU Min[2]，MAO Jingwen[3]，YAN Jingjing[4]

(1. *School of Earth Sciences and Resources*，*China University of Geosciences*(*Beijing*)，*Beijing* 100083，*China*；2. *Institute of Natural Resources Strategic Development*，*China University of Geosciences*(*Beijing*)，*Beijing* 100083，*China*；3. *Institute of Mineral Resources*，*Chinese Academy of Geological Sciences*，*Beijing* 100037，*China*；4. *School of Economics and Management*，*China University of Geosciences*(*Beijing*)，*Beijing* 100083，*China*)

收稿日期：2025-09-22 **责任编辑：**赵奎涛

基金项目：中国工程院咨询项目“战略性矿产资源国际供应链安全战略研究”资助(编号：2024-XBZD-10)；中国工程院咨询项目“战略性矿产资源安全战略研究”资助(编号：2022-JB-05-07)

第一作者简介：朱磊(1998—)，男，汉族，内蒙古乌兰察布人，博士研究生，主要从事金属矿床成矿规律与战略研究，E-mail：roy_cugb@126.com。

通讯作者简介：刘敏(1983—)，女，汉族，山东聊城人，博士，高级工程师，主要从事金属矿床成矿规律与战略研究，E-mail：liuminhello@163.com。

引用格式：朱磊，刘敏，毛景文，等. 中国锆资源国际供应链评价与资源保障战略研究[J]. 中国矿业，2025，34(10)：1-14.

ZHU Lei，LIU Min，MAO Jingwen，et al. Evaluation and resource security strategy study on the international supply chain of zirconium resources in China[J]. China Mining Magazine，2025，34(10)：1-14.

Abstract: As the global largest consumer of zirconium resources, China's reliance on external sources has long remained above 90% due to domestic reserves and production capacity constraints. With the accelerated development of the nuclear industry and the new generation of information technology, domestic demand for zirconium resources is expected to continue to grow. Therefore, it is urgent to ensure the security of the international supply chain and enhance domestic supply capabilities. Based on the international supply chain security evaluation system, an analysis of thirteen indicators across two dimensions—resource supply security and trade circulation security—from 2013 to 2023 reveals that the overall risk in the international zirconium resources supply chain has trended toward alleviation, but it remains at risk of fluctuation. These risks can be categorized into four phases: the high-risk period (2013–2016), the first risk fluctuation period (2016–2018), the risk decline period (2018–2021), and the second risk fluctuation period (2021–2023). Additionally, an analysis of domestic zirconium resources security from the perspectives of resources endowment, beneficiation and smelting, and recycling shows promising prospects for zirconium exploration, breakthroughs in beneficiation technology for alkaline rock-type zirconium ores, and the establishment of a recycling system for nuclear-grade zirconium materials. Based on the results of the international supply chain security evaluation and analysis of the current situation of domestic resource security, China is still facing challenges such as an expanding supply-demand gap in the zirconium resources, insufficient diversification of supply, the need for further improvement in beneficiation technologies, and an incomplete secondary resource recycling system. To solve these problems, China should focus on increasing investment in exploration of Cenozoic sedimentary zirconium ores in coastal areas and along the margins of the Tarim Basin, building a diverse international supply chain, optimizing funding for beneficiation processes, strengthening efforts to recycle secondary resources, increasing the production capacity of nuclear-grade zirconium materials, and setting up a national strategic reserve system for zirconium resources to comprehensively protect supply capabilities and resilience.

Keywords: zirconium resources; supply-demand imbalance; international supply chain; technological bottleneck; resource security; strategic mineral

0 引 言

锆作为稀有金属之一,因其在核工业和高端制造业方面的重要应用,被中国、美国、澳大利亚、日本和印度等多个国家列入战略性矿产或者关键矿产的行列[1-4]。锆和铪化学性质相似,常以类质同象的形式互相替代[5],因此,根据铪含量差异,锆金属可分为核级锆(铪含量小于0.01%)和工业级锆[6]。核级锆具有低中子吸收率、抗腐蚀等优点,被广泛应用于核反应堆的结构材料[7-9];工业级锆及其合金具有高熔点、高强度等特性,在军工、化工和电子等领域发挥重要作用[10-11]。此外,锆化合物也有重要的工业用途:例如二氧化锆可制作耐火材料和陶瓷材料等特种材料;碳酸锆可用于建材、涂料和纺织等生产领域[9-10]。近年来,锆产品的应用领域范围也在不断扩大,例如在固态电池、智能终端与可穿戴设备等新兴领域的应用[12],凸显了锆在先进制造行业中的关键性作用。

锆英砂是锆制品的主要原料,经过加工可制成电熔锆、氯氧化锆、硅酸锆等中间产品,因此,其供应稳定性将直接关乎锆的全产业链安全。中国是全球最大的锆英砂消费国,每年消费量在70万t左右[13],但国内资源禀赋不足,锆英砂外采度多年超过90%[14]。此外,中国锆英砂进口集中于澳大利亚和南非两国,并主要依赖艾璐卡(Iluka)、特诺(Tronox)和力拓(Rio Tinto)三大锆矿国际巨头供应商[10],使得供应链易受到地缘政治冲突、国际价格波动、运输通道中断等影响。因此,开展锆资源供应安全的研究,系统识别国际供应链风险,厘清中国锆资源保障能力短板,对维护国家锆资源安全具有重要意义。

当前,锆资源供应安全研究已包括资源供需分析、贸易供应分析、指标评价体系构建等多个方向,但各方向的研究相对独立,缺乏系统性的整合。在资源供需方面,现有研究普遍指出中国锆资源储量不足、对外依存度高的现实困境[8,10,14-16],并提出通过加快矿业"走出去"的步伐及参与境外锆资源开发来保障锆资源稳定供应[17-18]。在贸易和供应分析层面,王珏等[19]运用矿产资源进口成本的测算模型分析计算了锆矿石平均进口成本,指出中国从欧美地区进口锆矿石成本较高;ZHU等[12]基于2005—2020年中国锆资源的物质流分析,揭示了国内资源保障程度不足的现状,进而建议在全球范围内寻求高品位锆矿资源;LUO等[20]对2013—2022年锆矿石进出口数

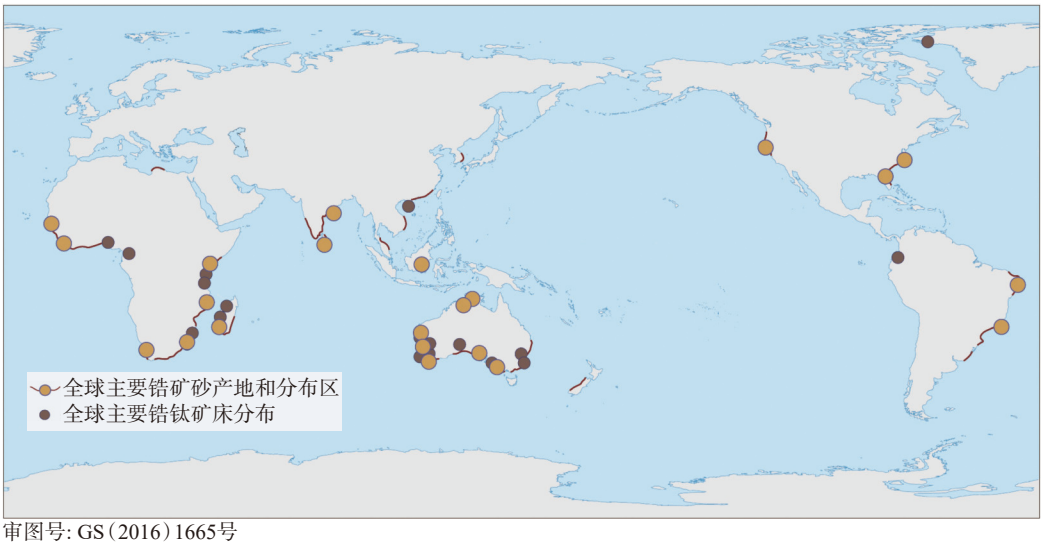
据进行了贸易网络分析，明确了中国在全球锆贸易中的关键地位，并强调应在分析中考虑地缘政治与环境政策等因素。此外，尽管已有多项研究为锆等战略性矿产资源建立起国际供应链安全评估指标体系[3,21-25]，但这些评价体系多侧重于静态评估，或未考量贸易竞争、运输通道安全等关键指标，因而难以全面反映国际供应链的动态特征。综上所述，在中国锆资源供需缺口持续扩大与地缘风险叠加的背景下，构建一个能够融合资源禀赋、贸易结构和外部环境因素的动态综合评价体系，并协同分析选冶与二次资源回收技术等资源保障现状，对提升中国锆资源安全保障水平具有重要的理论价值。

本文梳理了全球和中国锆资源情况，运用指标测度方法构建一个更具综合性和动态性的锆资源国际供应链安全评价体系，并从资源端、选冶端和回收端三个维度系统剖析中国锆资源保障现状，进而为保障锆资源安全提出更具系统性的对策建议。

1　全球和中国锆资源情况

1.1　锆资源分布

全球锆资源分布极度不均，主要位于大洋洲和非洲（图 1）。美国地质调查局（USGS）最新统计显示[26]，全球锆矿储量约 7 400 万 t（以 ZrO2 计），其中，澳大利亚 5 500 万 t，南非 560 万 t，塞内加尔 260 万 t，马达加斯加 230 万 t，莫桑比克 150 万 t。



审图号：GS（2016）1665号

图 1　全球主要锆矿床分布

Fig. 1　Global distribution of major zirconium deposits

（资料来源：据文献 [10]、文献 [14] 修改）

根据美国地质调查局（USGS）统计，2022 年以前中国锆矿资源储量为 50 万 t。2022 年，自然资源部公布经济可采储量为 7.16 万 t（以 ZrO_2 计），其中，海南 5.22 万 t、江西 1.94 万 t[8]。内生锆矿床中，内蒙古巴尔哲超大型稀土铌铍锆矿床资源量为最，推断资源量为 280 万 t（以 ZrO_2 计）[27]，但至今仍无法实现经济性开采；外生锆矿床主要分布于海南、广东和广西等沿海地区，其中，海南储量最大[28]。而在新疆塔里木盆地北缘发现的远景规模超大型的古河湖相锆矿床，将大幅提升中国锆矿资源远景储量[29]。

1.2　锆资源产量情况

2024 年，全球锆矿产量约 150 万 t（锆精矿），相比 2023 年增长 6 万 t[26]。澳大利亚和南非是锆矿生产大国，其中，澳大利亚 2024 年产量为 50 万 t，占全球总产量的 33.33%；南非 2024 年产量为 30 万 t，占全球总产量的 20.00%。莫桑比克（16 万 t）、中国（10 万 t）、美国（10 万 t）和印度尼西亚（9.5 万 t）也是主要锆矿生产国，合计产量占全球总产量的 30.33%。

中国锆矿产量的 90% 以上来源于滨海砂矿[13]。2013—2015 年，中国锆矿年产量为 15 万 t，但自 2016 年起呈下降趋势，2016 年锆矿年产量为 14 万 t，到 2023 年锆矿年产量已降至 10 万 t。

1.3　锆资源消费情况

全球锆资源主要消费国家和地区为中国、欧洲、美国和日本[10,30]。在全球锆资源消费结构中，陶瓷行业占比在 50% 左右，其次是锆化学制品、精密铸造和电熔锆等行业[13]。

21 世纪前，锆资源消费量一度集中在欧洲、美国和日本等国家和地区。自 20 世纪 90 年代以来，中国的锆制品工业快速发展，在 2007 年超越日本成为

全球第一大锆资源消费国[31]。目前，中国的锆资源消费量已经超过全球锆资源总消费量的 50%[15,30]，并在 2020 年增长至 71.7 万 t[12]。同时，国内锆资源消费结构已经实现转变，陶瓷、耐火材料的占比正在减小，而化工、铸造、核工业的占比正不断增长[32]。

1.4 锆资源贸易情况

根据锆矿石的全球贸易网络分析，锆矿石进口市场自 2013 年已向亚洲转移，中国成为了核心进口市场[20]。根据联合国商品贸易数据库（UN Comtrade Database）数据，2024 年，中国是全球锆矿砂及其精矿的最大进口国，进口量为 174.56 万 t；第二大进口国是印度，进口量为 9.46 万 t。另外，西班牙（8.07 万 t）、马来西亚（4.81 万 t）、美国（2.91 万 t）、意大利（2.82 万 t）、荷兰（2.54 万 t）也是主要的锆资源进口国。澳大利亚和南非则是全球主要的锆资源出口国，其次是莫桑比克、印度尼西亚等国。

中国进口的锆矿石主要用于初级加工后对外出口。中国生产了全球 95% 以上的氧化锆，并有 30%～50% 对外出口[10]。中国还拥有全球产能最大的氯氧化锆生产商[33]，2024 年出口氯氧化锆达到 5.04 万 t。另外，中国已经实现核级海绵锆和工业级海绵锆海外出口[34-36]，但出口规模相对较小。

2 中国锆资源国际供应链安全评价

2.1 数据来源

本文所使用的锆矿产量和储量数据均来源于美国地质调查局（USGS），进出口贸易数据来源于联合国商品贸易统计数据库（UN Comtrade Database），全球治理指标数据来源于世界银行（World Bank），全球化指数来源于 KOF 瑞士经济研究所（KOF Swiss Economic Institute），国际价格来自万得（Wind）海绵锆价格。

2.2 指标体系

国内矿产资源的供应能力也直接影响国际供应链，因此，本文结合国际和国内锆矿资源和供应情况，并参考多种战略性矿产资源指标评价体系[37-42]，将国际供应链安全评价精炼为两个维度，涵盖十三项具体指标。①资源供给安全，指锆矿资源的供应安全情况，包括国外资源供应潜力、储采比、资源可替代性、市场供给多元化程度、市场垄断程度、供应链断链风险、外采度和受制约程度共八项二级指标；②贸易流通安全，指中国进口锆矿的贸易竞争、运输风险和价格波动等情况，包括国际贸易竞争强度、全球化指数、运输通道风险、国际价格波动水平和资源国出口规制水平共五项二级指标。具体指标体系和计算公式见表 1。本文对非专家打分的指标采用熵权法进行权重赋值[43-44]，该方法包括数据标准化、计算比重和信息熵等步骤。另外，专家打分指标按等权重平均赋值（1/13），以获得综合评价分数。在此基础上，为量化各指标在不同阶段对综合得分的贡献程度，本文采用了基于加法指标的分阶段贡献度分析方法[45-46]。该方法通过计算相邻阶段间各单指标均值与综合评价分数均值的变化率来量化各单指标贡献度。

2.3 资源供给安全

国外资源供应潜力（*H*1）根据国内表观消费量和国外资源可开采储量计算得到（表 1），该比值在 2013—2023 年间呈波动上升趋势。其中，表观消费量与国内产量、进出口量有关，国外资源可开采储量与国内储量和全球储量有关。中国的锆资源进口量呈现增加趋势，2023 年已经升至 155.61 万 t，而出口量始终低于 2.50 万 t（表 2，图 2）。因此，国内表观消费量整体呈上升趋势，从 2013 年的 97.8 万 t 已经增加至 2023 年的 163.2 万 t。2023 年，全球锆资源储量约为 7 400 万 t（以 ZrO_2 计算），而中国的储量相对较少，国外资源可开采储量稳定在 7 000 万 t 左右。

储采比（*H*2）在 2023 年以前稳定为 3.5 左右。

资源可替代性（*H*3）专家打分呈降低趋势，从 2013 年的 55 分下降至 2023 年的 43 分，表示资源可替代性逐渐降低。

市场供给多元化程度（*H*4）根据锆矿主要进口国的进口量占比计算得到，2013—2023 年整体呈下降趋势，但指标值稳定在 20% 以上。在 2023 年之前，中国进口锆矿资源 50% 左右来自澳大利亚，20% 左右来自南非。自 2021 年起，锆矿资源从澳大利亚进口比重有所下降，而从南非进口比重不断上升；另外，从莫桑比克和塞内加尔进口的比重已经增加到 15% 和 4%（表 3，图 3）。

市场垄断程度（*H*5）受主要供应国家产量和全球总产量影响（表 1）。根据美国地质调查局（USGS）锆精矿产量数据，2023 年澳大利亚、南非和莫桑比克三个国家的产量占全球总产量的 64.8%。澳大利亚虽然是全球最大锆资源生产国，但年产量在 2014—2020 年间呈下降趋势，从 79.8 万 t 下降至 40.0 万 t，2021—2023 年仅增长至 50.0 万 t；南非是第二大锆资源生产国，年产量从 2014 年达到峰值 39.8 万 t 后逐年下降至 2023 年的 28.9 万 t；莫桑比克在 2016 年、2018 年和 2023 年超过中国成为第三大锆资源生产国，但中国、莫桑比克两国产量自 2013 年起呈下降趋势。因此，在全球资源开采总量稳定的情况下，由于前三国总产量占全球比重的下降，市场垄断程度指标一同

表 1　锆矿国际供应链评价指标

Table 1　Evaluation indicators for the international supply chain of zirconium minerals

主要指标	二级指标	属性	指标计算公式和说明	参考文献
			$AP=Pc+Im-Ex\ RT=R-Rc$	
	国外资源供应潜力（*H*1）	−	$H1=\frac{AP}{RT}$ 式中：*AP*为国内资源表观消费量；*Pc*为国内年度产量；*Im*为锆矿砂及其精矿进口总量；*Ex*为锆矿砂及其精矿出口总量；*RT*为国外资源可开采储量；*R*为当年全球储量；*Rc*为国内当年储量	修改自文献[40]，使用国内表观消费量与国外储量的比值以表征国外资源的供给潜力，若国内表观消费量增大，或国外资源储量持续减少，则代表国外资源供应潜力将减小
	储采比（*H*2）	+	$H2=\frac{Rc}{Pc}$	文献[38]
	资源可替代性（*H*3）	+	专家评分	表征该矿产资源被其他资源替代或被较低品位该矿产替代的能力，分数越高，表示可替代性越大
资源供给安全	市场供给多元化程度（*H*4）	−	$H4=\sum_{i=1}^{N}Im_i^2\left(\sum_{i=1}^{N}Im_i\geqslant 50\%\right)$ 式中，Im_i为中国自第*i*个国家或地区进口的锆矿砂及其精矿数量占进口总量的比重，要求统计比重和大于50%	文献[37]
	市场垄断程度（*H*5）	−	$H5=\frac{\sum_{i=1}^{3}P_i}{P}$ 式中：P_i为第*i*个国家锆矿产量；*P*为全球锆矿总产量	文献[39]
	供应链断链风险（*H*6）	+	$H6=\sum_{i=1}^{N}Im_i\times(0.2\times WGI_{pv}+0.5)$ 式中，WGI_{pv}为全球治理指标（WGI）中与供应结构稳定性有显著相关性的“政治稳定和没有暴力/恐怖主义”的估计值	文献[37]
	外采度（*H*7）	−	$H7=\frac{Im-Ex}{AP}$	文献[38]
	受制约程度（*H*8）	−	专家评分	用于表征我国矿产资源的国际影响力，分数越高，则受到制约程度越高
	国际贸易竞争强度（*H*9）	−	$H9=\left(\frac{Im_{ck}+Im_{jk}}{Im_w}\right)\times\left[1-\frac{\left\lvert\frac{Im_{ck}}{Im}-\frac{Im_{jk}}{Im_j}\right\rvert}{\frac{Im_{ck}}{Im}+\frac{Im_{jk}}{Im_j}}\right]$ 式中：设国家*k*为Im_i最大值，即中国从该国进口锆矿石总量占中国锆矿石总进口比重最大；Im_{ck}为中国从该国进口的锆矿石量；设国家*j*为国家*k*第二大锆矿石进口国；Im_{jk}为该国从国家*k*进口的锆矿石量；Im_j为该国锆矿石进口总量；Im_w为全球锆矿石资源的进口总量	文献[42]
贸易流通安全	全球化指数（*H*10）	+	$H10=\sum_{i=1}^{N}KOF_i\times Im_i$ 式中，KOF_i为年度国家*i*的全球化指数	修改自文献[47]，用于表征全球化程度对供应链稳定性的影响
	运输通道风险（*H*11）	+	专家评分	表征运输通道的稳定性，分数越高，表示运输通道越稳定
	国际价格波动水平（*H*12）	−	$H12=\frac{P_{\max}-P_{\min}}{P_{\min}}$ 式中：$P_{\max}$为矿产国际价格的最高价；$P_{\min}$为矿产国际价格的最低价	文献[37]
	资源国出口规制水平（*H*13）	+	专家评分	表征资源出口国政策规制水平，分数越低，则规制水平越高，对资源进口国断供的可能性越大

呈下降趋势（图 4）。

供应链断链风险（*H*6）受到主要国家进口比例和全球治理指标（WGI）中与供应结构稳定性有显著相关性的“政治稳定和没有暴力/恐怖主义”的估计值（Political Stability and Absence of Violence/Terrorism, PV）影响。2013—2023 年，澳大利亚的*PV*值最低为 0.84（2021 年），最高为 1.03（2013 年、2014 年和 2016 年），数值波动范围较小；南非的*PV*值不断下降，已经从 2013 年的−0.05 降低至 2023 年的−0.67。因此，随着中国从澳大利亚进口比重降低和从南非进口比重升高，供应链断链风险指标呈波动下降趋势。

表 2 2013—2023 年全球锆矿资源总量、中国进出口量与全球和中国产量

Table 2 Total global zirconium resources, China's imports and exports, and global and Chinese production from 2013 to 2023

单位: 万t

年份	世界资源总量	中国进口量	中国出口量	全球产量	中国产量
2013	6 700	84.96	2.13	108	15
2014	7 800	80.90	1.35	158	15
2015	7 800	102.32	1.46	150	15
2016	7 500	55.57	1.42	158	14
2017	7 400	97.96	1.04	156	14
2018	7 300	104.60	1.98	158	14
2019	6 200	118.08	1.39	143	14
2020	6 400	108.45	1.71	119	13
2021	7 000	128.13	1.51	136	14
2022	6 800	121.58	2.46	144	14
2023	7 400	155.61	2.38	144	10

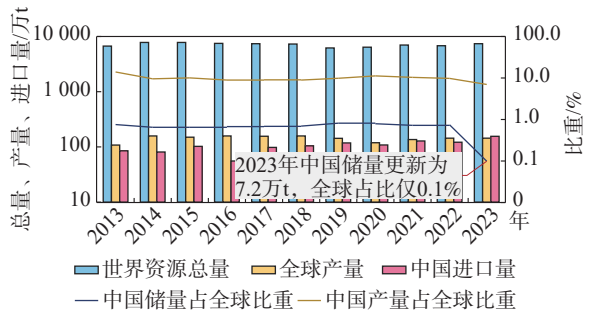


图 2 2013—2023 年全球锆资源储量、产量与中国进口量

Fig. 2 Global reserves, production of zirconium resources, and China's imports from 2013 to 2023

外采度(*H*7)基于资源净进口量与产量计算，随着资源净进口量的持续攀升及开采量的波动下降，外采度呈上升趋势(图 5)。由图 5 可知，外采度已经从 2013 年的 85% 上升至 2023 年的 94%。

受制约程度(*H*8)根据专家评分打分，已经从 2013 年的 55 分逐年下降至 2023 年的 45 分，表明其受制约程度正有所减缓。

2.4 贸易流通安全

国际贸易竞争强度(*H*9)需分析中国进口锆资源量最大的国家，即澳大利亚。根据联合国商品贸易数据库(UN Comtrade Database)数据，印度和中国是澳大利亚锆矿的主要出口国。尽管印度从澳大利亚的进口量近年来有所下降，但仍保持在 2 万 t 左右，2023 年的进口量约为中国进口量的 4.1%(表 4)。根据指标计算(表 1)，国际贸易竞争强度稳定在 20%～40% 之间(图 6)。

全球化指数(*H*10)呈波动下降趋势，归因于两方面因素：一是澳大利亚的全球化指数(KOF Globalization Index, KOF)始终高于南非 *KOF* 分值，显示南非的全球化程度低于澳大利亚；二是中国自澳大利亚进口比重下降，而自南非进口比重上升，进一步拉低了全球化指数指标的分数。

运输通道风险(*H*11)专家打分在 2013 年为 85 分，2020 年为 80 分，2023 年下降至 78 分，表明运输通道风险持续加剧，安全形势逐步恶化。

国际价格波动水平(*H*12)在 2020 年和 2021 年经历了明显波动，波动幅度分别达 85.0% 和 83.5%。2022 年波动趋势明显缓解，幅度收窄至 22.1%，2023 年进一步降至 13.7%(图 7)。

资源国出口规制水平(*H*13)，专家打分从 2013 年的 90 分下降至 2023 年的 80 分，表明资源出口法规管控加强，相关国家对锆资源的出口限制趋严。

2.5 综合指标评价

根据指标综合分析结果，2013—2023 年锆资源国际供应链综合得分呈波动下降趋势(表 5 和图 8)。自 2018 年起，综合得分开始稳定下降，2021 年降至

表 3 2013—2023 年中国锆资源进口国家及进口量

Table 3 Countries of origin and imports of zirconium resources in China from 2013 to 2023

年份	国家	进口量/万 t	国家	进口量/万 t	国家	进口量/万 t	国家	进口量/万 t	前四国占总进口量比重/%
2013	澳大利亚	45.44	南非	19.11	印度尼西亚	5.07	马达加斯加	2.91	85.37
2014	澳大利亚	40.92	南非	19.57	巴基斯坦	3.37	莫桑比克	2.82	82.43
2015	澳大利亚	47.28	南非	23.20	莫桑比克	7.26	塞拉利昂	5.09	80.95
2016	澳大利亚	25.99	南非	15.31	莫桑比克	3.97	肯尼亚	2.26	85.53
2017	澳大利亚	37.37	南非	21.52	莫桑比克	11.87	美国	7.66	80.04
2018	澳大利亚	37.09	南非	20.01	美国	17.61	莫桑比克	10.48	81.45
2019	澳大利亚	57.56	南非	22.25	莫桑比克	7.36	美国	6.17	79.05
2020	澳大利亚	62.74	南非	19.23	莫桑比克	7.73	印度尼西亚	3.97	86.37
2021	澳大利亚	71.48	南非	19.56	莫桑比克	7.95	塞拉利昂	5.39	81.47
2022	澳大利亚	62.90	南非	23.78	莫桑比克	8.22	印度尼西亚	5.18	82.32
2023	澳大利亚	59.39	南非	32.63	莫桑比克	23.41	塞拉利昂	6.10	78.10

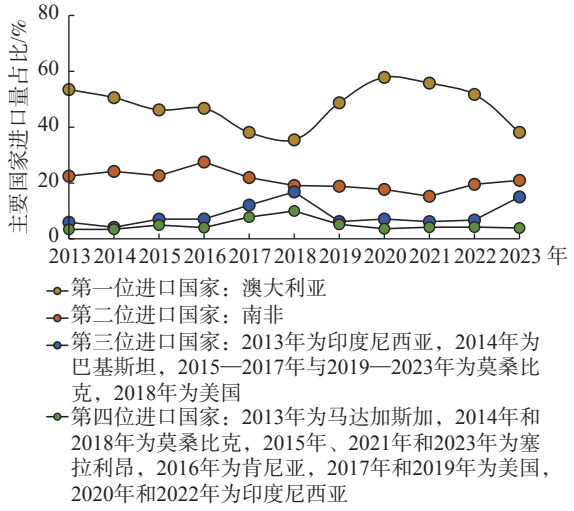


图 3　2013—2023 年中国锆资源主要进口国进口量占比

Fig. 3　Proportion of imports of zirconium resources from major importing countries in China from 2013 to 2023

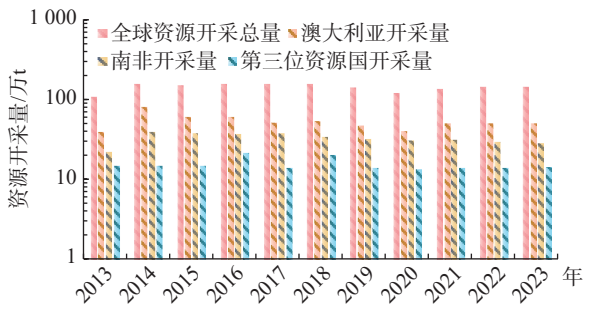


图 4　2013—2023 年全球及前三位资源国锆资源开采量

Fig. 4　Mining output of zirconium resources in the world and the top three resource countries from 2013 to 2023

（注：2016 年、2018 年和 2023 年第三位资源开采国为莫桑比克，其余年份为中国）

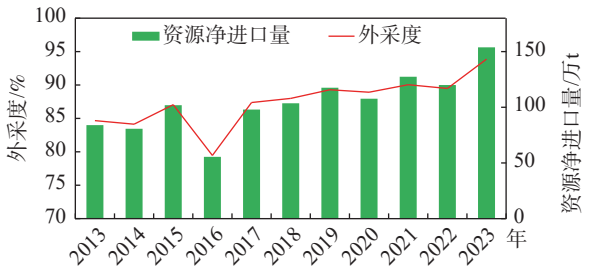


图 5　2013—2023 年锆资源净进口量与外采度

Fig. 5　Net imports and external dependence of zirconium resources from 2013 to 2023

0.40 的低位；2022 年小幅反弹至 0.55，但在 2023 年再度回落至 0.46。通过熵权法计算得出，三项核心指标的权重占比较大：国外资源供应潜力（*H*1）占 13.09%，市场供给多元化程度（*H*4）占 10.52%，国际价格波动水平（*H*12）占 8.94%。

国外资源供应潜力（*H*1）为负向指标，受海外资源可开采储量和表观消费量的共同影响，表观消费量的大幅上升抑制了综合得分的下降。市场供给多元化程度（*H*4）为负向指标，2013—2018 年间，其呈现微弱下降趋势；然而在 2019 年和 2020 年，中国从澳大利亚的进口量大幅增加（2020 年前四大进口国占

表 4　2013—2023 年中国及印度进口锆资源量与国际贸易竞争强度

Table 4　Imports of zirconium resources by China and India and the intensity of international trade competition from 2013 to 2023

年份	中国自澳大利亚进口量/万 t	印度自澳大利亚进口量/万 t	印度总进口量/万 t	国际贸易竞争强度/%
2013	45.44	4.64	5.43	28.53
2014	40.92	3.99	4.42	27.20
2015	47.28	4.83	5.08	20.94
2016	25.99	5.14	7.27	22.05
2017	37.37	4.94	7.48	21.94
2018	37.09	3.90	8.53	22.87
2019	57.56	1.91	5.71	33.76
2020	62.74	1.87	5.55	34.52
2021	71.48	5.14	10.29	39.71
2022	62.90	2.72	8.35	29.31
2023	59.39	2.44	7.85	29.46

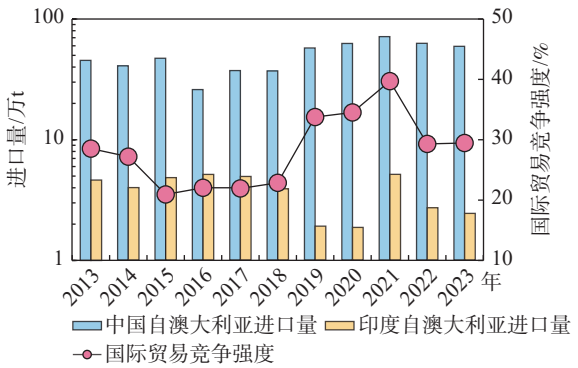


图 6　2013—2023 年中国及印度进口锆资源量与国际贸易竞争强度变化趋势

Fig. 6　Variation trend of imports of zirconium resources by China and India and the intensity of international trade competition from 2013 to 2023

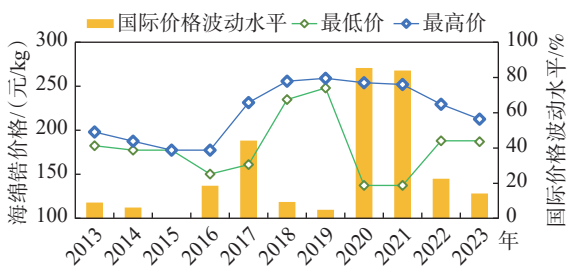


图 7　2013—2023 年国际海绵锆价格

Fig. 7　International sponge zirconium prices from 2013 to 2023

表 5 2013—2023 年锆资源国际供应链各指标分数与综合评价结果

Table 5 Scores of each indicator and comprehensive evaluation results in the international supply chain of zirconium resources from 2013 to 2023

指标	*H*1	*H*2	*H*3	*H*4	*H*5	*H*6	*H*7	*H*8	*H*9	*H*10	*H*11	*H*12	*H*13	综合得分
类型	负向	正向	正向	负向	负向	正向	负向	负向	负向	正向	正向	负向	正向	—
权重/%	13.09	4.18	7.69	10.52	5.43	5.83	7.91	7.69	7.32	5.99	7.69	8.94	7.69	—
2013 年	0.01	3.33	55.00	0.34	0.71	0.52	0.85	55.00	0.29	62.74	85.00	0.08	90.00	0.67
2014 年	0.01	3.33	55.00	0.32	0.85	0.49	0.84	54.00	0.27	60.47	85.00	0.06	90.00	0.65
2015 年	0.01	3.33	53.00	0.27	0.75	0.47	0.87	52.00	0.21	57.66	85.00	0.00	90.00	0.66
2016 年	0.01	3.57	50.00	0.30	0.75	0.49	0.79	50.00	0.22	62.11	85.00	0.18	88.00	0.76
2017 年	0.02	3.57	48.00	0.21	0.66	0.44	0.87	50.00	0.22	58.37	84.00	0.44	88.00	0.66
2018 年	0.02	3.57	47.00	0.20	0.68	0.46	0.88	48.00	0.23	60.13	83.00	0.09	85.00	0.70
2019 年	0.02	3.57	45.00	0.28	0.65	0.47	0.89	47.00	0.34	59.40	83.00	0.04	85.00	0.56
2020 年	0.02	3.76	42.00	0.37	0.71	0.50	0.89	46.00	0.35	63.49	80.00	0.85	82.00	0.47
2021 年	0.02	3.57	40.00	0.34	0.71	0.46	0.90	45.00	0.40	59.38	80.00	0.84	81.00	0.40
2022 年	0.02	3.57	42.00	0.31	0.65	0.46	0.89	45.00	0.29	60.83	78.00	0.22	80.00	0.55
2023 年	0.02	0.72	43.00	0.21	0.65	0.39	0.94	45.00	0.29	54.34	78.00	0.15	80.00	0.46

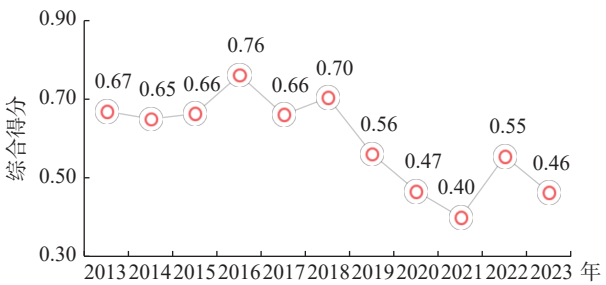


图 8 2013—2023 年锆资源国际供应链综合评价得分

Fig. 8 Comprehensive evaluation scores of international supply chain for zirconium resources from 2013 to 2023

总进口量的比重高达 86.37%, 表 3), 这在一定程度上抑制了综合得分的下降幅度。另外, 国际价格波动水平在 2020 年和 2021 年波动剧烈, 直接导致了综合得分的上升。

2.6 分阶段指标贡献度分析

依据综合评价得分(图 8), 锆资源国际供应链风险态势可划分为四个阶段: 2013—2016 年为高风险期(阶段Ⅰ), 2016—2018 年为首次风险波动期(阶段Ⅱ), 2018—2021 年为风险下降期(阶段Ⅲ), 2021—2023 年为第二次风险波动期(阶段Ⅳ)。

锆资源国际供应链分阶段指标贡献度分析结果见表 6。由表 6 可知, 锆资源国际供应链风险在不同阶段的变化由不同指标驱动。从阶段Ⅰ到阶段Ⅱ, 锆资源国际供应链风险上升, 市场供给多元化程度(*H*4)与市场垄断程度(*H*5)对综合得分的上升产生了较大的正向贡献, 而供应链断链风险(*H*6)和国际价格波动水平(*H*12)发挥了抑制作用(负向贡献)。在阶段Ⅱ到阶段Ⅲ的风险下降期, 国外资源供应潜力(*H*1)、市场供给多元化程度(*H*4)和国际贸易竞争强度(*H*9)是导致风险下降的主要因素。阶段Ⅲ到阶段Ⅳ国际供应链风险小幅下降, 国外资源供应潜力(*H*1)、储采比(*H*2)和供应链断链风险(*H*6)对综合得分的下降贡献度较大。

表 6 锆资源国际供应链分阶段指标贡献度分析结果

Table 6 Analysis results of the contribution of zirconium resources international supply chain indicators in stages

指标	阶段Ⅰ-阶段Ⅱ		阶段Ⅱ-阶段Ⅲ		阶段Ⅲ-阶段Ⅳ	
	贡献分数	贡献度/%	贡献分数	贡献度/%	贡献分数	贡献度/%
*H*1	−0.007 0	−30.58	−0.057 5	32.62	−0.015 8	26.19
*H*2	0.002 5	10.77	0.000 6	−0.37	−0.013 7	22.74
*H*3	−0.003 8	−16.59	−0.003 7	2.11	−0.001 4	2.34
*H*4	0.042 4	185.95	−0.036 4	20.65	0.005 8	−9.69
*H*5	0.018 4	80.81	0.002 8	−1.58	0.004 7	−7.87
*H*6	−0.012 8	−56.09	0.004 3	−2.45	−0.014 7	24.40
*H*7	−0.006 1	−26.84	−0.022 6	12.83	−0.011 4	18.85
*H*8	0.002 6	11.53	0.002 2	−1.24	0.001 2	−1.91
*H*9	0.009 3	41.00	−0.040 7	23.11	−0.000 4	0.72
*H*10	−0.003 5	−15.53	0.002 6	−1.49	−0.015 8	26.26
*H*11	−0.000 8	−3.37	−0.001 9	1.09	−0.002 2	3.61
*H*12	−0.016 6	−72.62	−0.023 0	13.07	0.005 6	−9.36
*H*13	−0.001 9	−8.43	−0.002 9	1.64	−0.002 2	3.72

3 中国锆资源保障现状

对锆资源国际供应链安全的评价结果揭示了中国锆资源国际供应链的潜在风险, 也反映出当前资源保障仍存在短板, 亟须构建稳健的国内供应体系。当前, 中国锆资源保障能力正处于关键转折点, 并有望通过三个方面提升国内供应的稳定性: 在资源端

持续实现锆矿找矿突破，实现锆资源有效增储；在选冶端推进碱性岩型锆矿的有效利用，突破技术可采瓶颈；在回收端建立健全的回收体系，保障核级锆材的稳定回收。

3.1　资源端：远景资源潜力较大

中国锆资源消费需求不断增长，通过增储实现资源保障极为重要。自新一轮找矿突破战略行动实施以来，中国在锆资源勘探方面取得有效成果。2024 年全国新探获锆资源量超 5.5 万 t（锆英石按 65% 换算二氧化锆含量[48]，下同），且内蒙古、福建、广东、广西、海南等省（区）仍有巨大找矿潜力[49]。

在中国地质科学院矿产资源研究所承担的“战略新兴产业矿产地质调查”项目下，2024 年新设立了“中国南方砂矿型锆铪矿调查评价”三级项目。该项目基于海南锆矿的成矿规律和研究资料，已经圈定了 16 个成矿区块，预计可新增锆资源量达到 521.1 万 t[50]。

由中国地质调查局武汉地质调查中心等多家单位与海南省地质调查院联合共同完成的“海南滨海沉积型锆铪砂矿资源评价项目”入选中国地质调查局 2024 年度地质调查十大进展成果[51]。该项目评审备案显示，文昌市昌洒镇大山村矿区推断锆资源量为 5.54 万 t；同时，该项目圈定乐东黎族自治县九所镇抱浅村至湖镜村一带锆铪矿体 1 个，初步估算推断锆资源量 3.22 万 t；圈定万宁市乌场湾锆铪矿产地 1 处，初步估算推断锆英石资源量 3.25 万 t[52]。

除海南外，新疆也是中国锆资源勘查的重点区域。2025 年 4 月，新疆成立锆（铪）矿找矿行动联合创新中心，主要工作是建立适用于新疆的锆（铪）矿勘查评价体系，推动中国锆（铪）矿勘查开发和综合利用[53]。近期，该中心新发现的古河湖相锆矿床，潜在锆资源量大于 130 万 t[29]。

3.2　选冶端：碱性岩型锆矿有望开采

在开采和选矿方面，国内外生矿床中滨海锆砂矿开采技术成熟[54]，而内生锆矿床如碱性岩锆矿床尚未开采。受当前选冶技术条件及经济性限制，这些资源在现有市场价格下不具备商业开发利用价值[13]。例如在碱性岩锆矿床中锆石虽是常见矿物，但由于富含钇、铕等元素具有磁性和可浮性，且常与多种矿物密切共生并颗粒细小，导致回收难度极大[55]。但核工业北京化工冶金研究院已开展相关研究，提出了从碱性岩型稀有稀土矿中分离富集锆矿物的方法[55-56]，有望为该类型矿产的商业开采提供技术支撑。

在冶炼方面，工业级海绵锆的制备无需进行铪的分离，其余工艺与核级锆相似。锆铪分离的工艺主要是火法分离和湿法分离两类：火法分离锆铪包括了熔盐精馏、熔盐萃取等方式；湿法分离锆铪包括分步结晶、离子交换和溶剂萃取等方法，其中，溶剂萃取工艺用于生产核级锆[57]。国内对锆铪分离的工艺已经应用成熟，生产核级锆主要有四个工艺流程：湿法或火法制备锆盐和四氯化锆，锆铪分离制取氧化锆，再次氯化氧化锆并提纯，使用镁或者镁钠还原制取海绵锆并精炼纯化[58]。

3.3　回收端：核级锆已经实现高效回收

锆产品的二次资源回收技术是锆资源循环供应的重要科技支撑。中国锆金属回收技术及配套政策体系仍处于完善阶段，但部分领域已实现标准化和产业化突破。2011 年，中国已经发布《锆及锆合金废料》（GB/T 26931—2011），明确规定了再生原料类锆废料的技术要求与检验规则，但排除核工业废旧设备拆解产生的放射性废料[59]。工业级锆回收可以使用熔盐电解方式，在特定温度、较短时间内连续化处理大量的废锆，有效降低能耗并提高回收效率[60]，也可以通过将含锆回收料与石英砂或纯碱混合经过熔炼、碱溶、滤碱、洗碱等步骤，从含锆回收料高纯度回收氧化锆[61]。

2025 年中国原子能科学研究院公布回收核燃料包壳中氚、锆的专利，将核燃料包壳在 800～1 200 ℃下氧化，后进行氯化得到氯化锆产物，最后还原得到锆金属，实现锆元素的高效回收[62]。由中国原子能工业有限公司牵头组建的西安西部新锆科技股份有限公司也已经拥有核用锆铪材自主化科研生产基地，并搭建了核级锆废料规模回收利用示范线[63]。

4　中国锆资源保障问题

4.1　锆资源国内供应能力不足，进口多元化程度偏低

未来随着中国高端制造业如新能源固态电池领域和核能产业如核电领域的不断发展[64]，锆资源需求量还将持续扩大。然而中国锆矿产量有限，长期保持在 15 万 t 以下。因此，中国锆资源国内供应缺口将不断扩大，国内供应能力不足的问题日趋严重。此外，根据国际供应链安全评价结果，中国锆资源进口多元化程度整体保持在较低水平。中国锆资源严重依赖从澳大利亚和南非进口，伴有极大的供应稳定风险：例如南非德班港多次罢工事件，直接导致中国锆英砂供应关系紧张；而受中美贸易关系紧张及全球经济不确定性因素的影响，澳大利亚锆矿生产企业也一度减产[17]。

4.2　技术瓶颈制约资源开采与二次资源回收

目前中国碱性岩型锆矿尚未实现商业开采，该

类型矿床的选矿技术尚待市场化验证。尽管已有技术实现对碱性岩中的锆进行回收，如通过分步富集得到高品位的锆石精矿[55]，但国内矿业企业仍未针对碱性岩型锆矿（如内蒙古巴尔哲超大型稀土铌铍锆矿床）进行规模化开采和选矿。此外，中国锆资源的二次资源回收目前主要来源于从矿渣、尾矿中提取[65]，尚未建立起对锆金属废料的规模化回收市场体系，民用锆金属回收力度尚显不足。

4.3 初级产品为主，核级锆材仍待商用

在核能领域，尽管中国已具备 Zr-4、E110、ZIRLO 等合金材料的制造和供应能力[66]，且核级锆材已经克服关键生产技术壁垒[67]并实现首次出口[36]，但其在规模化商业应用与长期稳定出口方面仍有待突破。例如三祥新材股份有限公司已经开始建设 1 300 t 核级海绵锆项目[35]，但还未实现规模化生产和销售；广东东方锆业科技股份有限公司在 2024 年开展“核级氧化锆芯块加工工艺研究”项目，研究出可用于核堆使用的无铪氧化锆陶瓷，但暂未投入市场[65]。

5 中国锆资源保障对策建议

5.1 加强锆矿勘查力度，打造多元化供应链

在勘查方面，中国应重点增加滨海区域和新疆塔里木盆地边缘的锆矿勘查力度。例如山东海岸线约占全国的六分之一，早在 21 世纪初就划定多个锆英石砂矿远景成矿区[68-69]；广西 2024 年已经实现沿海区域中防城港-合浦区域锆矿勘查突破[70]；海南省东北部第四纪地层和东部、东南部浅海表层仍具有较大勘查潜力[71-74]，而塔里木盆地边缘曾发育的河流、湖泊及三角洲体系具备锆矿的沉积条件。因此，建议结合已有找矿成果和新划定的远景区，进一步加大山东、广西和海南等省（区）滨海海域锆矿砂与塔里木盆地边缘新生代沉积锆矿砂的勘查力度，并以持续的勘查资金投入增强中国锆资源增储能力。

此外，还应建立锆资源多元化供应渠道。根据美国地质调查局（USGS）统计，2024 年非洲的莫桑比克、塞拉利昂锆资源合计储量是南非的 77.4%，合计产量为南非的 73.3%。而中国已经与莫桑比克、塞拉利昂建立了全面战略合作伙伴关系，并在莫桑比克已有良好的锆矿投资基础[75]，因此，建议增加从莫桑比克、塞拉利昂等国家进口量，减少对澳大利亚和南非的依赖，进一步稳定供应渠道。

5.2 优化选冶工艺流程，重视锆金属资源回收

高效利用碱性岩型矿产资源是增加中国锆资源有效储量的重要途径。因此，在选冶技术方面，建议设立“揭榜挂帅”的技术创新引导专项（基金），激励科研机构与企业协同攻关，力争实现碱性岩锆资源的规模化开采与高效选冶技术突破，以此支撑中国锆资源长期稳定的供给能力。

目前，中国核级锆材资源回收技术和体系已经较为成熟，但民用锆资源回收仍是空白。因此，建议将民用锆资源回收纳入“城市矿产”开发体系统筹考虑，如在推进废旧手机回收的过程中，可同步实现纳米氧化锆陶瓷背板[76]的再生利用，以成为未来重要的锆金属循环利用方式。

5.3 扩大核级锆材产能，健全战略储备体系

2025 年，国家自然科学基金委员会已将核级锆铪分离纯化技术列入关键金属冶金重大研究计划[77]，足见中国对核级锆制备能力的重视程度之高。因此，建议在提升锆铪分离技术的基础上，鼓励商业公司扩大核级锆材的供应能力，从而提升产业链议价能力。

另外，世界产业链供应链已经趋向本土化和区域化[78]，构建中国战略性矿产资源储备体系已十分紧迫[79-81]。因此，建议建设“产品、产能、产地”三级锆资源储备体系，控制潜在风险。在产品储备方面，实现原矿资源锆英砂和高端制造品核级锆材的双重储备模式；在产能储备方面，对小规模生产线提供产能补贴，对大规模生产线提供税收优惠，全面扩大产能规模；在产地储备方面，稳定国内以海南为主的产地储备，加快开发境外特别是非洲国家的控股矿产项目。

参考文献（References）：

[1] 张生辉，王振涛，李永胜，等. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用，2022，42(5)：138-168.
ZHANG Shenghui, WANG Zhentao, LI Yongsheng, et al. List, application and global pattern of critical minerals of China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 138-168.

[2] 陈从喜，张雅丽，孙春强，等. 战略性矿产概念和矿种目录的国际比较研究[J]. 中南大学学报（社会科学版），2024，30(1)：87-98.
CHEN Congxi, ZHANG Yali, SUN Chunqiang, et al. International comparative study on the concept and list of strategic minerals[J]. Journal of Central South University(Social Sciences), 2024, 30(1): 87-98.

[3] 郭娟，闫卫东，徐曙光，等. 中国关键矿产评价标准和清单的探讨[J]. 地球学报，2021，42(2)：151-158.
GUO Juan, YAN Weidong, XU Shuguang, et al. A discussion on evaluation criteria and list of critical minerals in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2): 151-158.

[4] 梅燕雄，裴荣富，魏然，等. 关键矿产与能源资源安全[J]. 中国矿业，2022，31(11)：1-8.
MEI Yanxiong, PEI Rongfu, WEI Ran, et al. Critical minerals and energy resources security[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(11): 1-8.

[5] 许箭琪，郭春丽，王登红. 锆与铪：最为稀缺的关键金属[J]. 矿

物岩石地球化学通报, 2024, 44(3): 690-694.
XU Jianqi, GUO Chunli, WANG Denghong. Zirconium and hafnium: the most scarce critical metals petrology and geochemistry[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2024, 44(3): 690-694.

[6] 王登红, 孙艳, 代鸿章, 等. 我国“三稀矿产”的资源特征及开发利用研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 119-127.
WANG Denghong, SUN Yan, DAI Hongzhang, et al. Characteristics and exploitation of rare earth, rare metal and rare-scattered element minerals in China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 119-127.

[7] 冯志浩, 夏超群, 张新宇, 等. 高强韧锆合金的发展与应用[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(2): 1-8.
FENG Zhihao, XIA Chaoqun, ZHANG Xinyu, et al. Development and applications of zirconium alloys with high strength and toughness[J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(2): 1-8.

[8] 尹传凯, 王春连, 游超, 等. 中国锆矿资源特征、矿床类型、关键应用及找矿远景[J]. 中国地质, 2024, 51(6): 1930-1945.
YIN Chuankai, WANG Chunlian, YOU Chao, et al. Zircon resource characteristics, deposit types, key applications and prospecting prospects in China[J]. Geology in China, 2024, 51(6): 1930-1945.

[9] 贾豫婕, 林希衡, 邹小伟, 等. 锆合金的研发历史、现状及发展趋势[J]. 中国材料进展, 2022, 41(5): 354-370.
JIA Yujie, LIN Xiheng, ZOU Xiaowei, et al. Research & development history, status and prospect of zirconium alloys[J]. Materials China, 2022, 41(5): 354-370.

[10] 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 全球锆矿资源现状与利用趋势[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 98-105.
SUN Hongwei, WANG Jie, REN Junping, et al. Present situation and utilization trend of zirconium resources in the world[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 98-105.

[11] 李立新, 宗海涛, 李明, 等. 具有高强度和良好塑性的锆基晶态合金[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(1): 100-103.
LI Lixin, ZONG Haitao, LI Ming, et al. Zr-based crystalline alloy with high strength and plasticity[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2012, 31(1): 100-103.

[12] ZHU X, GENG Y, GAO Z, et al. Investigating zirconium flows and stocks in China: a dynamic material flow analysis[J]. Resources Policy, 2023, 80: 103139.

[13] 张振芳, 陈秀法, 高爱红, 等. 锆资源形势分析及全球布局[J]. 中国矿业, 2019, 28(4): 50-56.
ZHANG Zhenfang, CHEN Xiufa, GAO Aihong, et al. Analysis of the zirconium resource situation and global layout[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(4): 50-56.

[14] 孙宏伟, 许康康, 左立波, 等. 锆-钛矿产资源分布特点、类型、供需格局及开发利用现状[J]. 中国地质, 2023, 50(4): 1070-1081.
SUN Hongwei, XU Kangkang, ZUO Libo, et al. Distribution characteristics, types, supply-demand and development utilization status of zirconium and titanium resources[J]. Geology in China, 2023, 50(4): 1070-1081.

[15] 薛翻琴, 谭化川, 张艳飞. 全球锆英砂资源供需格局分析[J]. 中国矿业, 2016, 25(8): 47-52.
XUE Fanqin, TAN Huachuan, ZHANG Yanfei. The global supply and demand trend of zircon resources[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(8): 47-52.

[16] 申正伟, 张方方, 韩聪, 等. 我国锆资源现状分析及可持续发展建议[J]. 中国矿业, 2016, 25(3): 16-20.
SHEN Zhengwei, ZHANG Fangfang, HAN Cong, et al. Situation analysis and sustainable development suggestions of zirconium resources in China[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(3): 16-20.

[17] 刘劲松, 高丽丽. 澳大利亚锆矿产业发展及其产业政策分析[J]. 矿产综合利用, 2023, 44(2): 116-123.
LIU Jinsong, GAO Lili. Zirconium industry development and industrial policy analysis in Australia[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023, 44(2): 116-123.

[18] 张振芳, 王靓靓, 于瑞, 等. 非洲锆矿资源地质特征及勘查开发[J]. 地质与勘探, 2021, 57(6): 1257-1268.
ZHANG Zhenfang, WANG Liangliang, YU Rui, et al. Geological characteristics, exploration and development of zirconium resources in Africa[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(6): 1257-1268.

[19] 王珏, 冯宗宪. 基于间接进口成本的中国战略性矿产海外供应风险分析: 以锆为例[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2022, 22(5): 70-87.
WANG Jue, FENG Zongxian. Overseas supply risk analysis of China's strategic mineral based on indirect import costs: a case study of zirconium[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2022, 22(5): 70-87.

[20] LUO F, LIU W, XU M, et al. Evolution characteristics and invulnerability simulation analysis of global zirconium ore trade network[J]. Frontiers in Earth Science, 2025, 12: 1496579.

[21] 李颖, 陈其慎, 柳群义, 等. 中国海外矿产资源供应安全评价与形势分析[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 900-907.
LI Ying, CHEN Qishen, LIU Qunyi, et al. An indicator system for overseas mineral resource supply security and analysis of the security situation for China's overseas resource supply[J]. Resources Science, 2015, 37(5): 900-907.

[22] 李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 等. 稀有矿产资源的全球供应风险分析: 基于战略性新兴产业发展的视角[J]. 世界经济研究, 2015(2): 96-104, 129
LI Pengfei, YANG Danhui, QU Shenning, et al. Analysis on global supply risk of rare minerals: from the perspective of strategic emerging industry development[J]. World Economy Studies, 2015(2): 96-104, 129.

[23] 李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 等. 稀有矿产资源的战略性评估: 基于战略性新兴产业发展的视角[J]. 中国工业经济, 2014(7): 44-57.
LI Pengfei, YANG Danhui, QU Shenning, et al. A strategic assessment of rare minerals: based on the perspective of strategic emerging industries development[J]. China Industrial Economics, 2014(7): 44-57.

[24] YU S, DUAN H, CHENG J. An evaluation of the supply risk for China's strategic metallic mineral resources[J]. Resources Policy, 2021, 70: 101891.

[25] ZHOU Y, LI J, WANG G, et al. Assessing the short-to medium-term supply risks of clean energy minerals for China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 217-225.

[26] US Geological Survey. Mineral commodity summaries 2025: zirconium and hafnium[R/OL]. (2025-01)[2025-09-28]. https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-zirconium-hafnium.pdf.

[27] WU M, SAMSON I M, QIU K, et al. Concentration mechanisms of rare earth element-Nb-Zr-Be mineralization in the Baerzhe Deposit, Northeast China: insights from textural and chemical features of amphibole and rare metal minerals[J]. Economic Geology, 2021, 116(3): 651-679.

[28] 王汝成, 车旭东, 邬斌, 等. 中国铌钽锆铪资源[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3763-3777.
WANG Rucheng, CHE Xudong, WU Bin, et al. Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3763-3777.

[29] 刘兵, 李益龙, 彭宇, 等. 新疆库拜盆地北缘古河湖相锆石砂矿的发现实现我国锆矿找矿突破[J]. 地球科学, 2025, 50(6): 2452-2456.
LIU Bing, LI Yilong, PENG Yu, et al. The discovery of a paleo-fluvio-lacustrine facies zircon deposit on the northern margin of the Kubai Basin in Xinjiang represents a breakthrough in the exploration of zircon deposits in China[J]. Earth Science, 2025, 50(6): 2452-2456.

[30] 刘皓阳, 马哲. 中国锆资源安全分析[J]. 中国矿业, 2017, 26(9): 6-10.
LIU Haoyang, MA Zhe. Analysis of the zirconium resources security in China[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(9): 6-10.

[31] 谭化川, 张艳飞, 陈其慎, 等. 2015—2025 年中国锆英砂资源供需形势分析[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 998-1007.
TAN Huachuan, ZHANG Yanfei, CHEN Qishen, et al. The demand trend of zircon resources and analysis of supply and demand in China from 2015 to 2025[J]. Resources Science, 2015, 37(5): 998-1007.

[32] 刘皓阳, 李建武. 中国锆资源利用现状及其进出口形势分析[J]. 地质论评, 2016, 62(S1): 11-12.
LIU Haoyang, LI Jianwu. Situation of utilization and analysis of import and export situation of zirconium resources in China[J]. Geological Review, 2016, 62(S1): 11-12.

[33] 长裕控股集团股份有限公司. 长裕控股集团股份有限公司主板首次公开发行股票招股说明书(申报稿)[R/OL]. (2025-05-21)[2025-07-29]. https://data.eastmoney.com/notices/detail/A25100/AN202505211676642939.html.

[34] 辽宁华锆新材料有限公司. 辽宁华锆新材料有限公司公司简介[EB/OL]. [2025-07-28]. https://www.lnhgxc.com/about/9.html.

[35] 三祥新材股份有限公司. 三祥新材股份有限公司 2024 年年度报告[R/OL]. (2025-04-25)[2025-07-29]. https://data.eastmoney.com/notices/detail/603663/AN202504241661655478.html.

[36] 中核集团核级海绵锆首次实现批量出口[N]. 中国工业报, 2020-08-25.

[37] 郑明贵, 倪京生, 罗来文, 等. 中国石油资源产业链供应链安全评价[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 99-110.
ZHENG Minggui, NI Jingsheng, LUO Laiwen, et al. Security evaluation of industry and supply chains of petroleum resources in China[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 99-110.

[38] 兰振宇, 谢国林, 刘泽群. 战略性矿产资源安全评价方法研究分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(S1): 16-20.
LAN Zhenyu, XIE Guolin, LIU Zequn. Analysis of safety assessment and supply risk of strategic mineral resources[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S1): 16-20.

[39] 范凤岩, 柳群义. 基于改进的熵权层次分析法的中国锡资源供应安全评价研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(10): 77-84.
FAN Fengyan, LIU Qunyi. Study on the supply safety assessment of tin resources in China based on improved entropy weight Analytic Hierarchy Process[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(10): 77-84.

[40] 屈金芝, 张艳松, 张艳, 等. 新形势下中国锂矿资源供应安全评价[J]. 中国矿业, 2021, 30(12): 1-7.
QU Jinzhi, ZHANG Yansong, ZHANG Yan, et al. Safety evaluation of lithium resources supply in China under the new situation[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(12): 1-7.

[41] 韩世通, 李华姣. 矿产资源供应风险研究进展和前沿[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1723-1745.
HAN Shitong, LI Huajiao. Progress of research on supply risk of mineral resources and future directions[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1723-1745.

[42] 金宇宁, 钟维琼. 全球锡原材料贸易竞争网络格局演化分析[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 371-384.
JIN Yuning, ZHONG Weiqiong. Analysis of the evolution of the trade competition network pattern of global tin raw material[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 371-384.

[43] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.
ZHANG Sui, ZHANG Mei, CHI Guotai. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical research[J]. Chinese Journal of Management, 2010, 7(1): 34-42.

[44] ZHU Y, TIAN D, YAN F. Effectiveness of entropy weight method in decision-making[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(1): 1-5.

[45] 宋旭光. 可持续发展综合评价方法的系统分析[J]. 社会科学辑刊, 2018(6): 82-85.
SONG Xuguang. Systematic analysis of comprehensive evaluation methods for sustainable development[J]. Social Science Journal, 2018(6): 82-85.

[46] 朱永光, 张伍丰, 王迪, 等. 中国铜资源产业链供应链韧性评价[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1761-1777.
ZHU Yongguang, ZHANG Wufeng, WANG Di, et al. Resilience evaluation of China's copper resources industrial chain and supply chain[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1761-1777.

[47] GYGLI S, HAELG F, POTRAFKE N, et al. The KOF globalisation index-revisited[J]. Review of International Organizations, 2019, 14(3): 543-574.

[48] 彭程, 周迎春, 李国杰, 等. 金属砂矿矿物品位换算公式优化研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(9): 175-181.
PENG Cheng, ZHOU Yingchun, LI Guojie, et al. Study on optimization of grade conversion formula for metallic placer minerals[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(9): 175-181.

[49] 新一轮找矿突破战略行动重要成果发布[EB/OL]. (2025-01-15)[2025-07-28]. http://finance.people.com.cn/n1/2025/0115/c1004-40402330.html.

[50] 中国地质科学院矿产资源研究所. 资源所中国南方砂矿型锆铪矿调查评价项目圈定 16 处找矿区块建议[EB/OL]. (2024-07-

30)[2025-07-28]. http://www.imr.cgs.gov.cn/dzky/cgkx_2713/202407/t20240730_768325.html.

[51] 中国地质调查局 2024 年度地质调查十大进展、地质科技十大进展[N]. 中国矿业报, 2025-01-21.

[52] 贾文涛. 陆海统筹推进战略性矿产增储上产[N]. 中国矿业报, 2025-04-08.

[53] 新疆锆(铪)矿找矿行动联合创新中心成立[EB/OL]. (2025-05-12)[2025-07-28]. https://www.worldmr.net/Ore/OreNewsList/Info/2025-05-12/311539.shtml.

[54] 张岳. 从砂矿中回收有用矿物的工艺流程现状[J]. 矿产综合利用, 2014(4): 20-24.
ZHANG Yue. Discussion on the process of recovering valuable minerals from a placer[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(4): 20-24.

[55] 核工业北京化工冶金研究院. 一种从碱性岩型稀有稀土矿中分离富集锆矿物的方法: CN202310000487.2[P]. 2025-08-15.

[56] 核工业北京化工冶金研究院. 一种从含稀土铌多金属岩矿中选出锆精矿的方法: CN202311672876.6[P]. 2024-02-23.

[57] 张楷, 徐亮, 赵卓. 锆铪分离技术研究现状及展望[J]. 稀有金属与硬质合金, 2021, 49(3): 24-30.
ZHANG Kai, XU Liang, ZHAO Zhuo. Research status and prospect of zirconium and hafnium separation technology[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2021, 49(3): 24-30.

[58] 王峰, 王快社, 马林生, 等. 核级锆及锆合金研究状况及发展前景[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(1): 107-110.
WANG Feng, WANG Kuaishe, MA Linsheng, et al. Current situation and development trend of zirconium and zirconium alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(1): 107-110.

[59] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 锆及锆合金废料: GB/T 26931—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

[60] 郑州大学. 废锆中回收制备高纯锆的方法: CN202411276934.8[P]. 2024-12-06.

[61] 三祥新材股份有限公司. 一种使用含锆回收料生产高纯度氧化锆的方法: CN202310282224.5[P]. 2024-09-24.

[62] 中国原子能科学研究院. 回收核燃料包壳中氚、锆的方法: CN202411650439.9[P]. 2025-03-11.

[63] 田锋, 严宝辉, 袁波. 核级锆废料规模回收利用示范数据集[EB/OL]. [2025-07-29]. https://www.nbsdc.cn/general/dataDetail?id=64edc5bdbb16e07753c33ddd&type=1.

[64] 王晓飞, 张莹, 郭焦锋. 中国能源安全新战略与实现途径[J]. 中国煤炭, 2021, 47(3): 62-67.
WANG Xiaofei, ZHANG Ying, GUO Jiaofeng. The new strategy and realization approach of China's energy security[J]. China Coal, 2021, 47(3): 62-67.

[65] 广东东方锆业科技股份有限公司. 2024 年年度报告[R/OL]. (2025-04-16)[2025-07-29]. https://data.eastmoney.com/notices/detail/002167/AN202504151656958246.html.

[66] 袁改焕. 我国核级锆合金材料自主化发展的机遇与挑战[C]// 全球核能产业发展报告(2021—2022). 2022: 231-240, 538.

[67] 我国三代核电核级锆材成功实现国产化[N]. 中国工业报, 2020-03-24.

[68] 迟洪纪, 李秀章, 郑作平. 山东省滨海砂矿成矿规律及远景区划[J]. 山东地质, 2001(5): 24-31.
CHI Hongji, LI Xiuzhang, ZHENG Zuoping. Littoral placers forming rule and prospecting divisions in Shandong Province[J]. Geology of Shandong, 2001(5): 24-31.

[69] 罗文强, 张尚坤, 杨斌, 等. 山东省沿海岸带矿产资源分布特征[J]. 山东国土资源, 2014, 30(12): 32-37.
LUO Wenqiang, ZHANG Shangkun, YANG Bin, et al. Distribution characteristics of mineral resources along the coastal zone in Shandong Province[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2014, 30(12): 32-37.

[70] 唐广生, 周复宏, 黄世财. 筑牢能源资源安全“压舱石”[N]. 广西日报, 2025-07-10.

[71] 余万林. 海南东北部第四纪地层赋矿特征及其找矿指导意义[J]. 中国金属通报, 2025(7): 73-75.
YU Wanlin. Mineralization characteristics of quaternary strata in northeast Hainan Province and its implications for prospecting[J]. China Metal Bulletin, 2025(7): 73-75.

[72] 付标, 薛玉龙, 曾维特, 等. 海南岛东南部近岸表层沉积物锆、钛地球化学特征对浅海砂矿的指示[J]. 中国矿业, 2021, 30(S1): 208-216.
FU Biao, XUE Yulong, ZENG Weite, et al. Geochemical characteristics of Zr and Ti in surface sediments indicate the shallow sea placers at southeast off-shore of Hainan Island[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(S1): 208-216.

[73] 宋家伟, 伍德明, 陈飞, 等. 海南岛东部浅海表层沉积物锆、钛地球化学特征及资源潜力分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(S1): 217-221.
SONG Jiawei, WU Deming, CHEN Fei, et al. Geochemical characteristics and resource potential of Zr and Ti in shallow sea surface sediments in the east of Hainan Island[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(S1): 217-221.

[74] 韩孝辉, 王雪木, 陈卫, 等. 海南岛东部滨海砂矿资源分布特征[J]. 中国矿业, 2017, 26(S1): 246-250.
HAN Xiaohui, WANG Xuemu, CHEN Wei, et al. The distributing characteristics of the marginal marine placer deposit resources in the eastern Hainan Island[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S1): 246-250.

[75] 任军平, 王杰, 古阿雷, 等. 莫桑比克钛锆砂矿资源开发现状及投资环境分析[J]. 地质与资源, 2021, 30(1): 45-52.
REN Junping, WANG Jie, GU Alei, et al. Development status and investment environment of the ilmenite-zircon resources in Mozambique[J]. Geology and Resources, 2021, 30(1): 45-52.

[76] 谢志鹏, 余诺婷. 智能终端陶瓷的发展与应用状况分析[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(3): 349-359.
XIE Zhipeng, YU Nuoting. Progress in development and applications of smart terminal ceramics[J]. Journal of Ceramics, 2021, 42(3): 349-359.

[77] 关于发布关键金属冶金的科学基础重大研究计划 2025 年度项目指南的通告[EB/OL]. (2025-01-26)[2025-08-09]. https://www.nsfc.gov.cn/p1/3381/2824/66770.html.

[78] 董煜, 沈娟, 白斯如, 等. 矿产资源储备地建设的形势、问题与策略[J]. 中国矿业, 2025, 34(4): 163-169.
DONG Yu, SHEN Juan, BAI Siru, et al. The situation, problems and strategies for the construction of stockpiling areas of mineral re-

sources[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(4): 163-169.

[79] 陈从喜. 战略性矿产资源开发利用研究进展与展望[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 4-19.
CHEN Congxi. Progress and prospects in the development and utilization of strategic mineral resources[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 4-19.

[80] 刘雨晨, 苗琦, 孟刚, 等. 我国战略性矿产资源管理制度梳理及政策建议[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 20-28.
LIU Yuchen, MIAO Qi, MENG Gang, et al. Research on China's strategic mineral resource management system and policy suggestions[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 20-28.

[81] 孙佑海, 徐哲. 战略性矿产资源储备法律制度完善研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(4): 54-61.
SUN Youhai, XU Zhe. Research on the improvement of the legal system for strategic mineral resource reserves[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(4): 54-61.