“无废城市”建设背景下中国铜尾矿管理挑战及应对策略

郭东方[1]，侯慧敏[2]，徐鹤[1,3,4,5*]

（1. 南开大学环境科学与工程学院，天津 300350；2. 山西大学资源与环境工程研究所，山西太原 030031；
3. 南开大学生态文明研究院，天津 300350；4. 南开大学战略环境评价研究中心，天津 300350；
5. 重庆大学管理科学与房地产学院，重庆 400045）

【摘　要】矿产资源的大规模开发利用支撑了经济社会发展，但采选过程中产生并长期堆存的大量尾矿已成为“无废城市”建设的重大挑战。为支撑尾矿的科学、精细化管理，本文以铜尾矿为研究对象，构建产生量测算模型，基于动态物质流分析预测未来铜尾矿产生趋势，并结合生命周期评价评估铜尾矿资源化利用的减污降碳效益。结果表明：①1950—2020 年，我国累计产生铜尾矿 55.6 亿t，其中华东地区和西南地区分别占37.1%和26.0%，其余地区合计占 36.9%，在“碳中和”情景下，预计2021—2060年我国将累计产生铜尾矿 190.1 亿t，是 1950—2020 年累计产生量的3.4倍；②铜尾矿资源化利用不仅能够有效消纳新增与历史遗存尾矿，还可以在全生命周期尺度上产生显著的减污降碳协同效益，其环境影响相较基准情景平均降低 10%～30%，不同资源化利用路径在不同省级电力结构条件下的碳减排潜力也存在显著差异。本文建议：①因地制宜推进尾矿资源化利用，强化源头治理；②构建铜产业可持续发展模式；③完善风险防控体系，系统提升尾矿安全治理能力。强化政府、矿山企业与资源化利用主体之间的协同联动，推动尾矿管理向规范化、系统化和可持续方向发展，为“无废城市”和美丽中国建设提供长期稳定支撑。

【关键词】尾矿；无废城市；循环经济；物质流分析；生命周期评价

【中图分类号】X32；X75；TD98　　【文章编号】1674-6252（2026）03-0012-11

【文献标志码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2026.03.012

引言

矿产资源的开发利用是支撑人类社会生存与经济社会发展的物质基础。在全球能源系统加速向低碳化、清洁化转型的背景下，以铜、锂、镍、钴等为代表的关键金属因其独特且难以替代的物理化学性能，正成为新能源产业发展的重要物质支撑，其需求规模呈现快速增长态势[1]。以铜为例，光伏、风电等可再生能源发电技术单位发电量的用铜量为传统火电的 10～30 倍，新能源汽车单车用铜量为燃油车的 4 倍以上[2,3]。在“双碳”目标背景下，我国能源结构转型将持续推高铜资源需求，进而推动铜矿开发活动不断扩张[4]。铜矿资源的大规模开发利用将不可避免地产生大量固体废弃物。其中，尾矿作为铜矿选矿过程中剥离有价组分后产生

资助项目：国家自然科学基金项目“无废城市”建设背景下固体废物资源化减污降碳协同效应及实现机制研究”（72374112）。

作者简介：郭东方（1998—），男，博士研究生，研究方向为固体废物管理、生命周期评价，E-mail: guodf@mail.nankai.edu.cn。

*** 责任作者：**徐鹤（1971—），男，博士，教授，博士生导师，研究方向为环境影响评价、固体废物管理，E-mail: seacenter@nankai.edu.cn。

的主要固体废物流，其产生量在矿业固体废物中的占比最高[5]。受我国铜矿“富而不丰”的资源禀赋特征制约，多数铜矿矿石品位偏低[6]，导致单位精矿产量带来的尾矿产生量较大，尾矿妥善管理的压力长期存在。目前，我国的尾矿仍以排入尾矿库堆存为主。该模式在一定时期内缓解了尾矿集中处置需求压力，但也累积了较为突出的生态环境风险与安全风险[7]。一方面，尾矿库不断有尾矿排入，再加上设施老化、极端气候叠加等因素显著提升了溃坝、渗漏和滑坡等事故的发生概率，一旦发生尾矿库事故，将会给下游河流、农田及居民区造成严重破坏，甚至引发重大人员伤亡和社会影响；另一方面，尾矿中往往富集重金属及其他潜在有害物质，若防渗与管理措施不到位，这些有害物质长期堆存可能对周边水体、土壤及生态系统造成持续性的污染风险，对区域可持续发展构成严峻挑战。近年来，我国以“无废城市”建设为抓手，持续推进固体废物减量化、资源化与安全处置，在固体废物治理方面取得阶段性成效[8]。“无废城市”建设明确提出，要减少矿业固体废物产生和贮存处置量，推动大宗工业固体废物资源化利用，并逐步解决历史遗留问题[9,10]。

现有针对铜资源的研究主要集中于物质代谢规律、供应风险及减碳路径等方面[11-15]，而关于尾矿的研究多侧重于利用技术层面[16,17]，对尾矿产生特性及其资源化利用所带来的减污降碳综合效益尚缺乏系统性刻画。与此同时，我国尾矿基础统计体系尚不完善，尾矿产生的区域分布、未来演化趋势及其资源化利用的减污降碳效益缺乏系统量化研究，制约了尾矿科学管理与相关政策的制定。在此背景下，本文综合运用动态物质流分析与生命周期评价方法，系统刻画我国铜尾矿的时空演化特征及其资源化利用的减污降碳效益，并与“无废城市”建设目标相衔接，提出面向实践的治理路径与政策建议，为矿业固体废物资源化利用和铜产业绿色转型提供定量支撑。

1 研究方法

1.1 研究框架

本研究分为三部分：尾矿产生量测算模型构建、基于动态物质流分析的未来铜尾矿产生量预测、基于生命周期评价的铜尾矿资源化利用减污降碳效益分析，相关数据来源见表1。

表1 数据来源

研究部分	数据类型	数据来源
尾矿产生量测算模型	矿山产铜量	美国地质勘探局（USGS）、英国地质调查局（BGS）、中国有色金属工业协会
	铜品位	文献、行业报告[18]～[22]
基于动态物质流分析的铜尾矿产生量预测	生产数据	USGS、BGS、中国有色金属工业协会、《中国有色金属工业年鉴》、实地调研、文献[18]～[20]
	贸易数据	中华人民共和国海关总署官方数据库、联合国商品贸易统计数据库、文献[23]
	寿命数据	文献[4]、[14]、[21]
	人均存量饱和值	文献[4]
	人口预测	《世界人口展望》[24]
基于生命周期评价的减污降碳效益分析	生命周期清单	实地调研、文献[25]～[28]

1.2 尾矿产生量测算模型

根据质量守恒定律，在选矿阶段，原矿质量等于精矿质量和尾矿质量。同时，它们的含铜量也存在守恒关系，式（1）～式（4）给出了模型的主要计算流程。

$$M_{\mathrm{ore}} = M_{\mathrm{con}} + M_{\mathrm{tai}} \tag{1}$$

$$M_{\mathrm{ore}} \times \alpha = M_{\mathrm{con}} \times \beta + M_{\mathrm{tai}} \times \varepsilon \tag{2}$$

$$M_{\mathrm{con}} \times \beta = M_{\mathrm{Cu}} \tag{3}$$

$$M_{\mathrm{tai}} = \frac{\beta - \alpha}{\beta(\alpha - \varepsilon)} \times M_{\mathrm{Cu}} \tag{4}$$

$$\alpha = 4 \times 10^{82} \times (y - A)^{-25.05} \tag{5}$$

其中，M_{ore}为原矿重量；M_{con}为精矿重量；M_{tai}为尾矿重量；M_{Cu}为矿山产铜重量；α为原矿铜品位；β为精矿铜品位；ε为尾矿中的铜含量；y为年份；A为修正系数，通过将现有各省（区、市）矿石品位数据与该公式进行拟合确定。鉴于采矿方法

是影响铜矿石品位的重要因素，而我国铜矿石开采方式主要包括地下开采和露天开采 [22]，本文首先对各省（区、市）的主要采矿方式进行了分类。在此基础上，由于缺乏覆盖各省（区、市）、连续年份的原矿铜品位公开数据，本文假设原矿铜品位随时间呈持续下降趋势 [29]，如式（5）所示，以刻画原矿铜品位的长期变化特征。本文在对我国主要铜冶炼企业开展调研并结合相关文献 [20] 的基础上，考虑到其选矿工艺流程具有较高相似性，统一采用 30% 作为铜精矿品位的代表值。尾矿中的铜含量则结合调研过程中与矿山企业技术人员的访谈和相关文献 [30]，假设为原矿铜品位的 10%。在上述参数设定和数据可获得性的基础上，本文对 1950—2020 年我国主要铜矿产省（区、市）的铜尾矿产生量进行了测算。

1.3 动态物质流分析

按照物质流向，国内铜矿石的开发利用依次经历采选、精炼和加工等环节，最终形成各类铜产品，并进一步应用于电力、电子电气、交通和建筑等多个部门；产品报废后，所产生的含铜废料通过回收利用重新进入精炼或加工环节，从而形成资源的循环流动。同时，铜资源在各生命周期环节通过进出口贸易与国际市场发生交互，构建铜资源全产业链的物质流动框架 [15]。本文系统收集了铜生命周期各阶段的进出口数据，并在具体计算过程中通过将各类含铜产品的贸易量与其平均含铜量相乘，统一折算为对应的含铜量 [31]。

大量研究表明，基于存量驱动的物质流分析模型适用于刻画金属资源的长期发展路径 [32]。其核心假设是人均资源存量随时间呈“S”形增长，并最终趋于稳定 [33,34]。基于该理论，本研究构建了铜资源存量驱动的动态物质流分析框架，对 1950—2060 年我国铜资源在采选、精炼、加工、使用和回收等环节的物质流动进行系统刻画，预测我国 2021—2060 年铜资源需求及铜尾矿的产生情况。其中，人均铜资源存量的预测模型如式（6）所示：

$$\mathrm{d}S_i / \mathrm{d}t = r_i \times S_i\left(1 - S_i / K_i\right) \tag{6}$$

式中，i 为铜资源消费部门；r_i 为 i 部门的固有增长率参数；t 为预测的时间序列；S_i 为 i 部门铜资源的人均存量；K_i 为 i 部门铜资源的人均存量的饱和值。社会的在用存量等于上一年的存量加上该年的产品投入量减去该年的产品废弃量，如式（7）和式（8）所示：

$$\mathrm{stock}_{i,t} = \mathrm{stock}_{i,t-1} + \mathrm{inflow}_{i,t} - \mathrm{outflow}_{i,t} \tag{7}$$

$$\mathrm{outflow}_{i,t} = \sum_{m<t} \mathrm{inflow}_{i,m} \times L\left(t-m\right) \tag{8}$$

其中，$\mathrm{stock}_{i,t}$ 为第 i 部门在 t 年的在用铜存量；$\mathrm{inflow}_{i,t}$ 为第 i 部门在 t 年的年度铜需求量；$\mathrm{outflow}_{i,t}$ 为第 i 部门在 t 年产生的废铜量；L 为产品寿命概率分布函数；$L\left(t-m\right)$ 为产品在第 m 年进入市场并在第 t 年报废的概率。含铜产品的寿命假设服从 Weibull 分布，该分布可使用式（9）计算。

$$L(t) = \begin{cases} uv^{-u}(t-a)^{u-1}\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-a}{v}\right)^u}, & t > a \\ 0 & t \leqslant a \end{cases} \tag{9}$$

其中，t 为时间；a 为位置参数；u 和 v 分别为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数。

1.4 基于生命周期评价的尾矿资源化利用减污降碳效益分析

生命周期评价（Life Cycle Assessment，LCA）作为一种成熟的环境影响评估方法，已被广泛应用于各领域 [35]。基于生命周期评价方法对铜尾矿资源化利用路径开展减污降碳效益分析，有助于从全生命周期的视角系统评估其环境可持续性。为量化铜尾矿资源化利用的减排效益，本文构建了基准情景与资源化情景，并将二者进行对比分析 [36]。其中，基准情景由两部分组成：一是铜尾矿在未进行资源化利用时的堆存处置过程，二是为满足相同产品功能需求而开展的原生资源开采、加工及制造过程。资源化情景则假定以铜尾矿替代部分原生原材料，用于制备相应的资源化产品，覆盖其生产全过程。本研究将功能单位设定为资源化利用 1 t 铜尾矿，以确保不同情景之间评价结果的可比性，系统边界如图 1 所示。基准情景与资源化情景中各单元过程的清单数据来源见表 1。在影响评价阶段，本研究借助 GaBi 10 软件，选用 Recipe 2016 Midpoind（H）方法对环境影响进行量化分析。同时，鉴于尾矿制

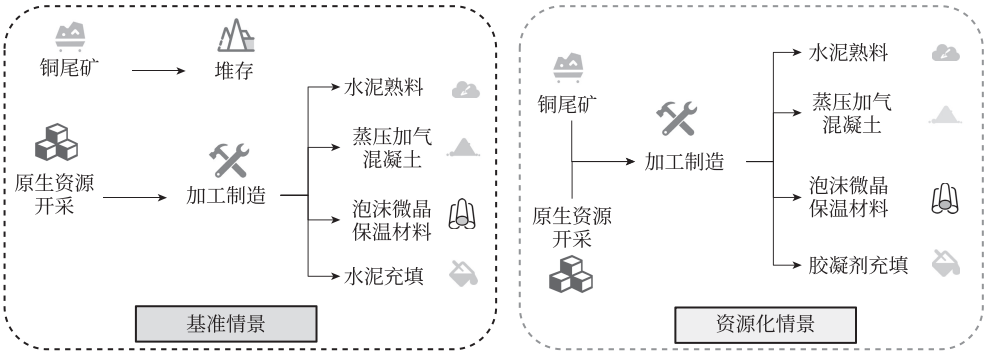


图 1　尾矿资源化利用减污降碳情景设定和系统边界

备水泥熟料、泡沫微晶保温材料和蒸压加气混凝土等路径存在显著电力消耗差异，且不同省份电力碳排放因子差异较大，本研究基于生态环境部与国家统计局发布的各省份电力碳排放数据 [37] 测算了上述路径的分省份碳减排潜力。

2 研究结果

2.1 我国铜尾矿产生分布

如图 2 所示，我国铜尾矿的产生呈现出显著的空间集聚特征。1950—2020 年，全国累计产生的铜尾矿主要集中分布于华东地区（37.1%）和西南地区（26.0%），两者合计占全国总量的 63.1%。从省域尺度看，江西省铜尾矿产生量最高，占全国总量的 26.5%，其次依次为云南省（20.0%）、安徽省（8.0%）、内蒙古自治区（7.8%）、湖北省（6.8%）和甘肃省（6.6%），其余地区合计占比为 24.3%。铜尾矿产生的空间分布格局主要受资源禀赋条件与矿业开发方式的共同影响。一方面，上述省（区、市）多为我国重要的铜资源富集区，集聚了江西铜业、云南铜业、铜陵有色等大型铜矿采选企业，长期高强度的铜矿开发活动导致尾矿产生规模持续累积。另一方面，部分地区铜矿以露天开采方式为主，矿石平均品位相对较低，在相同精矿产量条件下对应产生的尾矿量更大，从而导致铜尾矿在这些区域呈现空间集中分布的特征。

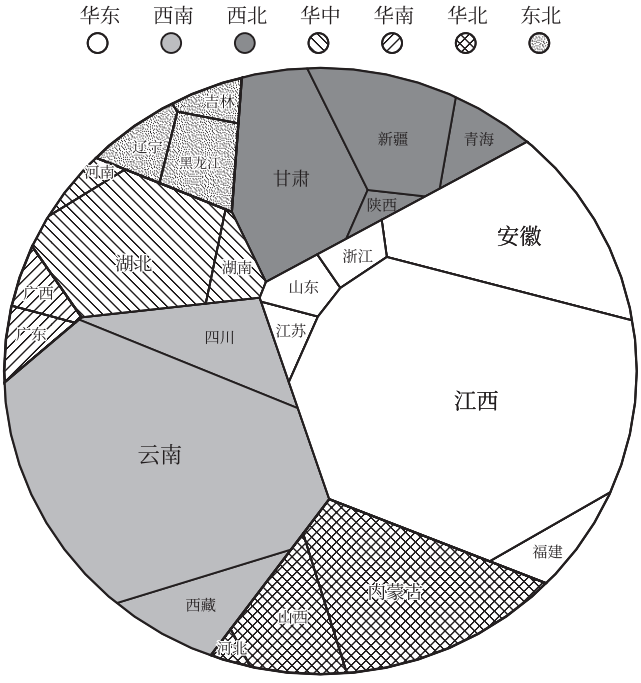


图 2　1950—2020 年我国铜尾矿产生累积分布

2.2 我国铜尾矿产生趋势

如图 3 所示，我国铜尾矿的产生量在时间维度上呈现出显著的阶段性演化特征，可大致划分为 4 个发展阶段。第 1 阶段为 1950—2000 年的缓慢增长期。该阶段我国铜矿开发规模整体较小，铜尾矿产生量处于较低水平，增长幅度相对有限。第 2 阶段为 2001—2020 年的快速增长期。随着我国经济持续高速发展和基础设施建设全面推进，电力、交通、建筑等领域对铜资源的需求显著增加，带动国内铜矿开发强度不断提升，铜尾矿产生量随之快速上升。第 3 阶段为 2021—2035 年的加速增长期。在“双碳”目标约束下，新能源发电、特高压电网、新能源汽车等清洁能源相关产业加快布局，对铜资源的需求进一步增加，推动铜矿开采强度持续提升，铜尾矿产生量进入加速增长阶段。第 4 阶段为 2036—2060 年的下降阶段。随着前期投入使用的大量含铜产品逐步进入集中报废期，再生铜供给能力提升，对原生铜资源形成有效替代；同时，人口规模缩减叠加人均铜资源社会存量逐步趋于饱和，初级铜资源需求开始回落，铜尾矿产生量随之下降。从空间演化趋势看，未来我国铜尾矿产生的区域分布将呈现出一定程度的“西进东退”特

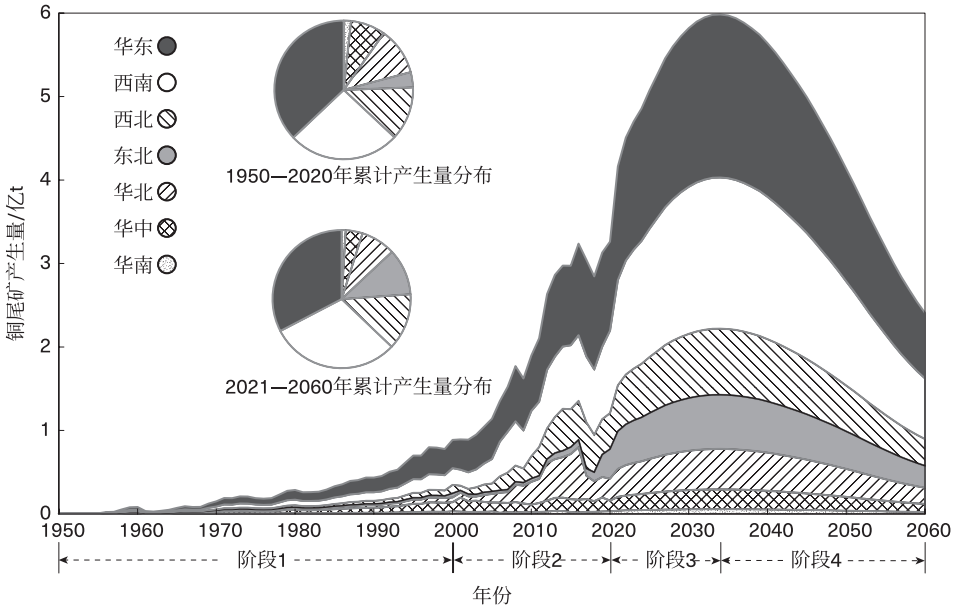


图 3　中国铜尾矿产生趋势

征。华东地区铜尾矿产生占比预计由历史阶段的高位降至 32.6%，而西南地区占比则升至 30.2%。这一空间格局的重构主要源于国内铜矿资源储量与开发重心的动态调整：东部传统矿区资源逐步衰减，开发潜力趋于下降，促使矿业开发活动向资源条件相对优越的西部地区转移，青藏高原及西北地区新探明储量区逐渐成为我国铜资源开发的重要战略接续基地。总体而言，在“双碳”目标背景下，预计 2021—2060 年我国将累计产生约 190.1 亿 t 铜尾矿，是历史累计产生量的 3.4 倍，铜尾矿产生规模持续扩大，将对尾矿安全处置及区域环境管理带来长期而严峻的挑战。

2.3 尾矿资源化利用的减污降碳效益

图 4 展示了不同铜尾矿资源化利用路径的减污降碳效益对比结果。总体来看，各类铜尾矿资源化利用路径在整体上均表现出不同程度的减污降碳效益，资源化利用情景的环境影响水平普遍低于基准情景。从具体利用路径看，尾矿制备蒸压加气混凝土在各环境影响类别下的降幅最为显著，其环境影响相较基准情景平均降低约 30%。主要原因在于该路径中铜尾矿替代了部分水泥和石英砂等原生材料，尤其是水泥的生产过程具有高能耗、高排放的特征，尾矿替代效应能够间接避免相关能源消耗与污染物排放，从而显著改善整体环境绩效。相较而言，尾矿制备泡沫微晶保温材料的环境影响降幅相对有限，其环境影响相较基准情景平均降低约 10%，减排效益主要来源于尾矿对部分石英砂原料的替代作用。由于替代比例和能耗削减幅度相对较小，整体环境改善效果不如蒸压加气混凝土路径显著。尾矿制备水泥熟料的环境影响相较基准情景平均降低约 20%，其减排效益则主要体现在原料替代环节，通过减少石灰石和煤粉等原生原料的使用，在一定程度上降低了资源消耗和相关排放。在尾矿胶凝材料充填路径下，资源化情景在大多数环境影响指标中均低于基准情景，整体仍表现出环境正效益。然而，在淡水富营养化、电离辐射、土地利用和臭氧消耗等指标上，其环境影响水平高于基准情景，这主要与胶凝材料制备过程中粒化高炉矿渣的使用有关。

图 5 展示了不同省（区、市）各类铜尾矿资源化利用路径的碳减排潜力差异。总体来看，不同资源化路径对区域电力结构的敏感性存在显著差异，这表明能源结构在尾矿资源化减排绩效中发挥了重要作用。从路径对比看，尾矿制备水泥熟料在省际尺度上的碳减排潜力差异最为明显，其最大值与最小值相差 49.2 kg CO_2eq。这主要源于水泥熟料生产过程能耗高，其碳排放强度对区域电力结构变化高度敏感，在以水电等清洁能源为主的省（区、市）减排效益更为突出。从区域适配性角度看，对于云南、四川、青海等清洁能源占比较高的省份，若想发挥地区优势，可优先考虑对电力结构敏感、减排潜力提升空间更大的资源化路径；而在化石能源占比较高的地区，则更适合推广减排效益相对稳定的资源化利用方式，如充填矿坑。从碳减排潜力的绝对量看，尾矿制备蒸压加气混凝土在各省（区、市）普遍表现出最大的减排规模，仍是实现铜尾矿资源化减污降碳目标的重要路径，但在实际应用中仍需综合考虑其经济可行性和市场消纳能力，合理选择最优资源化利用方案。

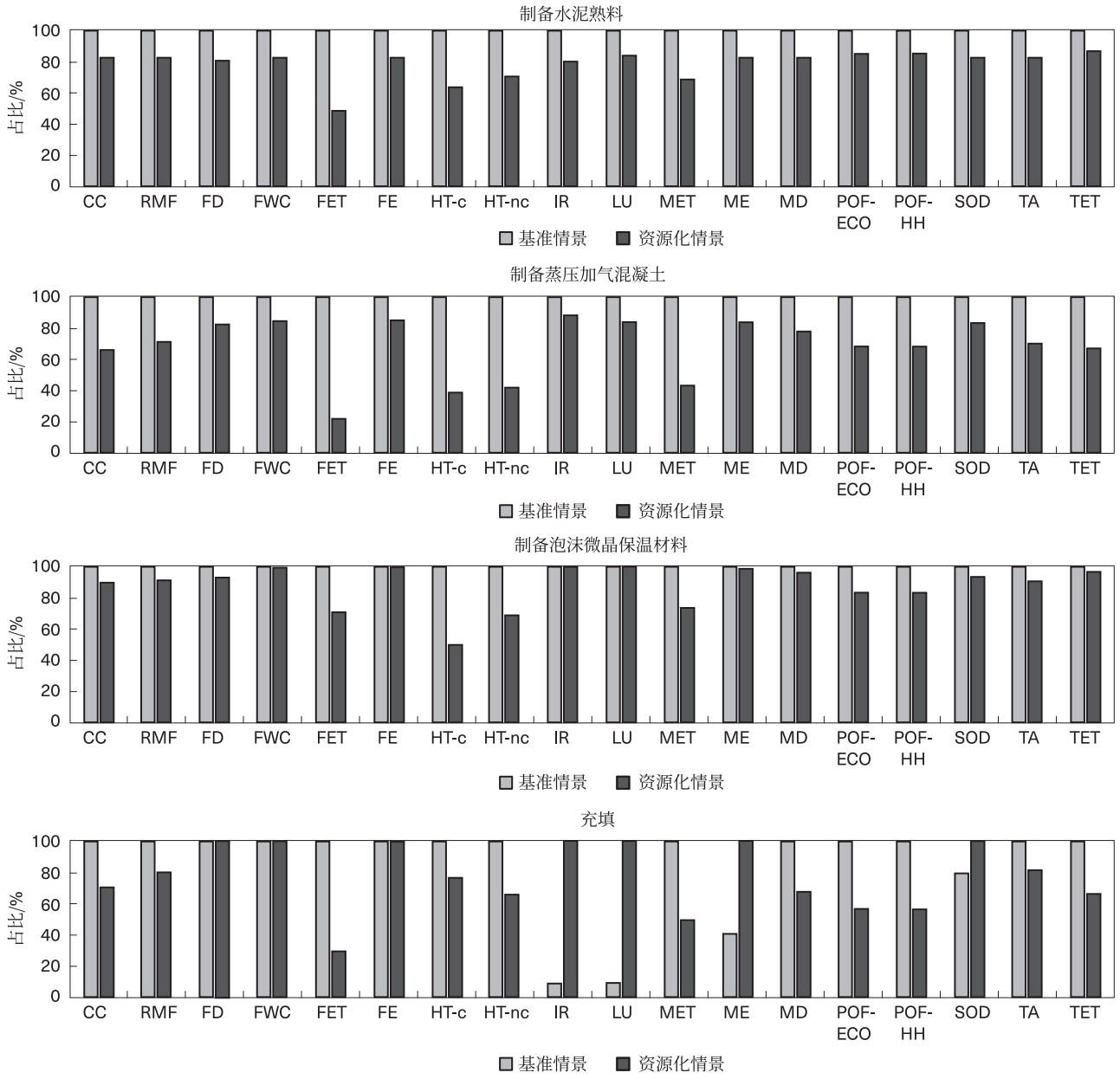


图 4　铜尾矿资源化利用减污降碳效益

注：气候变化为 CC，细颗粒物形成为 PMF，化石资源枯竭为 FD，淡水消耗为 FWC，淡水生态毒性为 FET，淡水富营养化为 FE，人类毒性为致癌为 HT-c，人类毒性为非致癌为 HT-nc，电离辐射为 IR，土地利用为 LU，海洋生态毒性为 MET，海洋富营养化为 ME，金属资源枯竭为 MD，光化学臭氧形成 - 生态系统为 POF-ECO，光化学臭氧形成 - 人类健康为 POF-HH，平流层臭氧消耗为 SOD，陆地酸化为 TA，陆地生态毒性为 TET。图 6 同。

2.4 研究局限性

本研究假设我国未来的铜矿资源可以满足初级铜需求。尽管在本研究的预测下，到 2040 年前后我国的初级铜资源在现有储量下将会耗竭 [18]，然而铜资源储量具有动态变化特征，随着勘探技术的进步和新矿床的发现，铜储量规模可能发生调整，因此铜矿资源不应被视为固定不变的 [4]。此外，本研究结果的不确定性主要来源于模型参数设定。为评估输入数据不确定性对计算结果的影响，本研究进行了敏感性分析 [38]。其中，来源于统计年鉴等官方文件的数据浮动范围设定为 2%，来源于文献和专家访谈的数据浮动范围设定为 5%。不确定性分析结果如图 6 所示，表明本研究结论具有较好的稳健性。

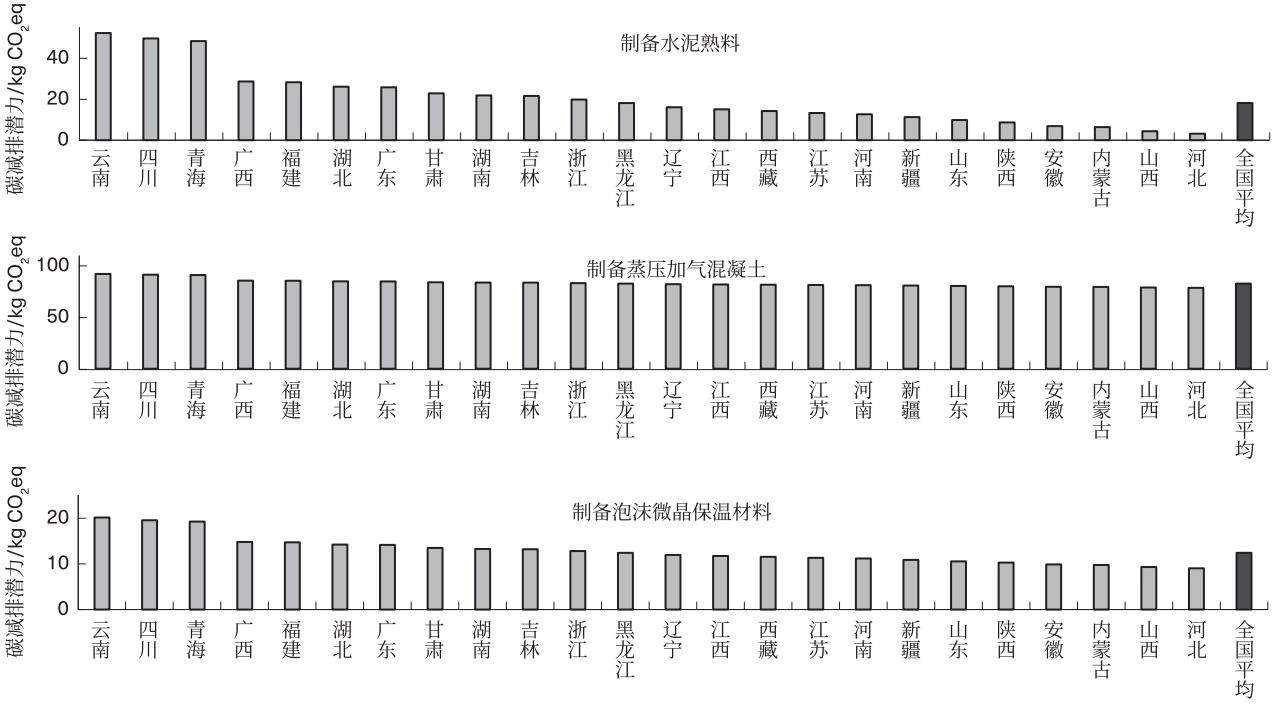
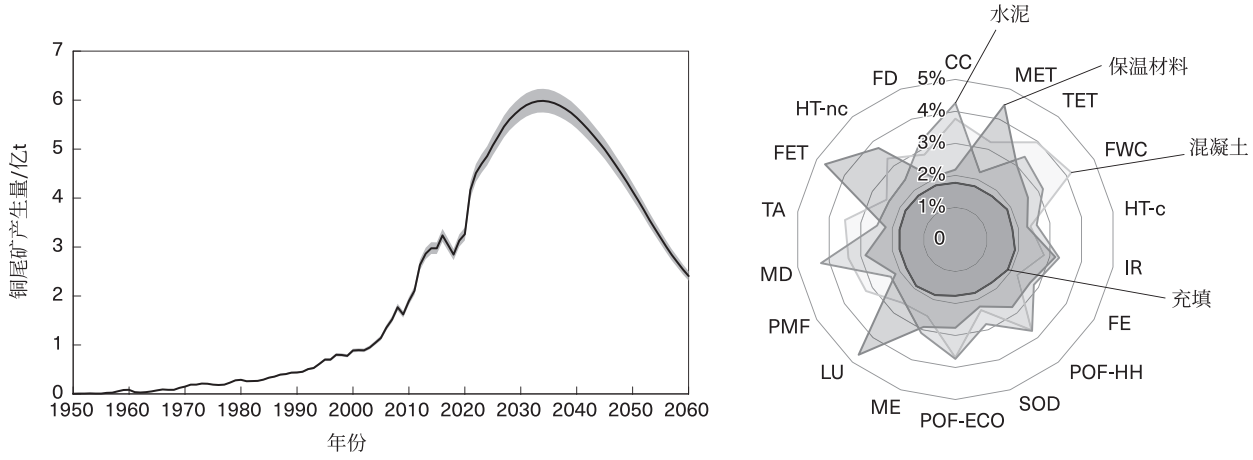


图 5　铜尾矿资源化利用各省（区、市）碳减排潜力



（a）尾矿产生量不确定性分析　　（b）减污降碳效益不确定性分析

注：图 6（a）中灰色范围为不确定性的范围。

图 6　不确定性分析结果

3 “无废城市”建设背景下的中国铜尾矿治理建议

“无废城市”建设强调固体废物源头减量、全过程管控和资源化利用优先，要求从传统以末端处置为主的管理模式转向覆盖产生、贮存、利用和处置全过程的系统治理。作为产生量大、环境风险高的大宗工业固体废物，铜尾矿在“无废城市”建设中既是重点管控对象，也是实现减量化和资源化的重要突破口。因此，有必要在“无废城市”建设框架下，结合制度要求，对铜尾矿治理路径进行有针对性的优化。

3.1 践行绿水青山就是金山银山理念，变“生态包袱”为资源财富

从生产末端的视角看，尾矿往往被视为矿业活动中难以处置的“生态包袱”，但从全生命周期的视角看，尾矿是放错位置的“二次资源”。推进尾矿资源化利用，不仅有助于大规模消纳历史遗存和新增尾矿，还可以在一定程度上替代原生资源开采，从源头

上减少生态破坏，并在全生命周期尺度上产生显著的减污降碳协同效益。然而，当前尾矿资源化利用的规模化推广仍面临多重约束[39]。在技术层面，相关技术整体成熟度偏低，具备工程化和规模化推广条件的利用路径有限，且对尾矿成分和理化性质有较强的适用要求；在经济层面，资源化产品附加值普遍较低，部分尾矿需经过预处理，从而增加了生产成本，加之税收优惠和财政补贴力度不足，导致市场竞争力有限。目前，矿山企业和相关主体在决策过程中仍以经济收益为主要导向，对尾矿资源化利用所带来的环境效益和社会效益关注不足。在现实条件下，尾矿资源化项目往往呈现环境效益和社会效益大于直接经济效益的特征，导致即便技术路径成熟、环境绩效良好，若缺乏稳定收益预期，仍难以吸引社会资本参与。此外，在制度层面，尾矿资源化涉及多个管理部门，存在职责边界交叉、协调机制不畅，以及产品标准和技术规范不健全等问题，这均在一定程度上制约了项目落地和产品推广。

针对上述问题，国家层面应重点支持附加值高、环境影响小且具备区域适应性的尾矿资源化技术研发和示范推广，完善税收减免、财政补贴和专项资金支持政策。对符合质量和环保要求的资源化产品，可在政府投资工程和公共基础设施建设中探索优先采购机制，培育稳定的市场需求，并通过政策激励和示范引导社会资本参与尾矿资源化产业发展。考虑到尾矿成分和性质具有显著的区域差异，应鼓励地方因地制宜地探索适合本地条件的资源化技术路径，在充分掌握尾矿属性的基础上开展有针对性的工艺设计与技术集成。同时，应通过建立跨部门协调机制、统一技术指南和管理清单，加快构建涵盖生产、产品和应用环节的尾矿资源化标准体系，减少部门间重复审查和不确定性，提升尾矿资源化项目推进效率。此外，随着矿产资源开发重心逐步由东部向西部转移，西部地区受地形复杂、交通基础设施相对薄弱等因素制约，资源化产品运输成本高、市场半径受限，制约了尾矿资源化利用的规模化推广。国家应持续推进西部地区交通基础设施建设，重点完善铁路和公路等物流通道，通过降低运输成本拓展资源化产品市场空间，并引导社会资本向西部集聚[40]，促进尾矿资源化产业与区域经济协同发展。

3.2 坚持源头减量增效，构建铜产业循环发展新格局

在“无废城市”建设背景下，固体废物治理强调源头减量优先，尾矿源头治理的重要性进一步凸显。尽管强化现有尾矿库的安全管理、推进尾矿资源化利用能够在一定程度上缓解环境与安全压力，但在铜矿持续开采的背景下，尾矿仍在不断产生。因此，必须从产业链上游与系统层面入手，通过源头减量和过程优化从根本上控制尾矿的产生规模。提高再生铜利用比例是实现尾矿源头减量的关键途径之一。相较原生铜冶炼，再生铜在能耗和污染物排放方面显著降低，且不产生尾矿，具有突出的资源与环境优势。然而，受回收网络不完善、拆解体系薄弱及产品品质稳定性不足等因素制约，我国再生铜在短期内仍难以实现对原生铜的规模化替代[41]。为充分释放再生铜的替代潜力，应加快构建覆盖前端分类、渠道回收、专业拆解与再生利用的完整回收体系，通过数字化和标准化手段提升回收过程的透明度与产品质量的可靠性，并结合税收优惠、绿色认证等政策工具，引导再生铜在电力、建筑、交通等重点用铜领域的应用比例持续提升。与此同时，应从需求侧入手降低全社会对铜资源的需求强度。通过推动绿色设计、提升产品可维修性、延长产品使用寿命、促进共享使用等方式，减少单位功能需求对应的铜资源消耗[42]，从而在需求端间接降低原生铜开采规模，减少尾矿的产生。相较之下，通过扩大铜产品进口降低国内尾矿产生，虽然在短期内可缓解国内环境压力，但从全球环境视角看，本质上属于污染转移，并未减少尾矿的总体产生量；过度依赖进口也会削弱国内再生铜体系建设与材料效率提升的内生动力，不利于构建具备长期韧性的循环经济体系。此外，尾矿主要产生于选矿阶段，其成分以硅酸盐为主，与天然砂石在物质组成上具有较高的相似性，若能够在选矿流程中将其中性质较为清洁的部分作为副产品或共生矿砂加以分选和利用，不仅有助于从源头上减少尾矿产生总量，还可以在一定程度上替代天然砂石资源，避免其开采过程带来的生态环境影响，从而成为实现尾矿源头减量的另一条重要途径[43]。综上可知，尾矿源头治理应以系统化、全链条视角推进铜产业绿色转型，通过再生替代、需求管理与过程优化协同发

力，为“无废城市”建设提供长期、稳定的支撑。

3.3 守牢安全与生态底线，筑牢尾矿库风险屏障

近年来，尾矿库事故仍时有发生[44]，其成因既包括库容接近饱和、极端天气干扰、防渗与排水措施不足等问题，也与监测预警体系不完善、运行管理和责任落实不到位等管理因素密切相关[45]。尾矿库不仅是一般意义上的安全设施，更是城市和区域固体废物体系中的高风险节点，其安全稳定运行是“无废城市”建设底线约束的重要组成部分。

随着数字化与智能化技术的快速发展，依托新兴技术手段提升尾矿库风险监测与预警能力，已成为现代尾矿安全管理的重要方向。多源遥感、声波探测和地质雷达等技术逐步应用于尾矿库监管，实现了对坝体位移、沉陷等关键风险指标的连续获取[46,47]；结合人工智能和大数据分析，可对监测数据进行自动识别和风险研判，有助于在早期发现隐患并降低事故发生概率[48]。在制度层面，近年来我国相继出台尾矿库“只减不增”、加快闭库治理、强化分类分级管理等系列监管政策[49-51]，尾矿库安全监管总体趋严。但鉴于我国尾矿库在规模、坝型结构、运行年限、地质条件及管理水平等方面存在显著区域差异，有必要在国家制度框架下进一步细化地方性法规和技术规范，实施分区分级、差异化的风险管控措施。例如，在老旧尾矿库密集分布的地区，应重点加强在线监测系统建设、闭库治理验收和移民安置保障等要求；而在地形起伏大、降雨强度高、地质条件复杂的山区，则需提高防渗、防洪和排水系统的设计标准，并与地质灾害监测体系协同，构建更为严格的安全防控机制。此外，尾矿库既是安全风险源，也是重要的生态风险源，其溃坝或渗漏事故可能对下游生态系统造成长期影响。因此，应将生态风险系统性地纳入尾矿库风险管控体系，探索构建“生态红线区—风险缓冲带”的空间管控机制，并结合区域生态敏感性实施必要的生态隔离与修复措施，以提升区域生态系统应对突发风险的韧性。

总体而言，尾矿库风险管控应从单一工程安全管理转向涵盖技术监测、制度约束和生态保护的综合治理模式。只有通过强化智能化监测预警、完善分级分类监管并同步推进生态风险防控，才能在尾矿长期高位运行的背景下有效降低系统性风险，为“无废城市”建设和矿业可持续发展提供保障。

4 结论与政策建议

在碳中和目标和能源结构转型背景下，我国铜资源需求持续增长，铜尾矿产生规模在未来一段时期内仍将进一步上升，从而对尾矿安全管理、环境风险防控及资源化利用提出了更高要求。本文系统分析了我国铜尾矿产生的时空演化特征，并定量评估了不同资源化利用路径的减污降碳效益，为我国尾矿的科学管理与相关政策制定提供了定量化数据支撑。总体来看，我国铜尾矿呈现出产生规模大、潜在风险高、减污降碳潜力显著的基本特征，亟须通过系统化治理路径加以应对。基于上述研究结论，本文提出以下政策建议：

（1）因地制宜推进尾矿资源化利用，促进绿色经济发展。进一步推动尾矿资源化利用，将尾矿治理从单纯的环境负担转变为资源利用与价值创造并重的发展路径。结合不同地区的尾矿成分特征、资源禀赋条件和产业基础，探索差异化、可复制的资源化利用模式，培育尾矿资源化相关产业，推动尾矿治理与区域绿色经济发展形成良性互动。

（2）从源头控增量，推动铜产业可持续发展。通过发展循环经济、提升材料利用效率，降低全社会对原生铜资源的依赖。同时，完善生产者责任延伸制度，加强废铜回收和再生利用体系建设，以再生铜逐步替代原生铜，构建覆盖资源开采、产品使用与回收再生的绿色产业链，从源头上减少铜尾矿的产生。

（3）完善风险防控体系，系统提升尾矿安全治理能力。针对存量尾矿库，应持续加强风险监管力度，推动数字化、智能化技术在尾矿库监测预警中的应用，降低事故发生概率。在国家政策框架下，各地应结合区域风险特征，制定精细化的地方性法规和技术规范，落实分级分类管理要求。通过强化信息公开和公众参与，提升尾矿管理透明度和企业主体责任意识，系统防范尾矿安全与生态风险。

总体而言，尾矿治理是一项需要在技术、经济与管理之间实现动态协调的系统性工程。未来，应在国家政策与标准体系引导下，强化政府、矿山企业与资源化利用主体之间的协同联动，持续总结和推广成熟经验，推动尾矿管理向规范化、系统化和可持续方向发展，为“无废城市”建设和美丽中国

建设提供长期稳定支撑。

参考文献

[1] 王安建，袁小晶 . 大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考 [J]. 中国科学院院刊，2022, 37(11): 1550-1559.

[2] WATARI T, NANSAI K, GIURCO D, et al. Global metal use targets in line with climate goals[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(19): 12476-12483.

[3] 李双美 . 清洁能源转型下铜全产业链的碳排放驱动机理和脱碳路径研究 [D]. 长沙 : 中南大学 , 2024.

[4] GU Y F, YANG H Y, WU Y F, et al. Regulation mechanism for designing decarbonization pathways in the copper industry toward carbon neutrality[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(3): 1518-1530.

[5] 张锐，毕婷婷，袁信 . 尾矿库环境风险管理问题及对策 [J]. 环境保护，2021, 49(14): 52-53.

[6] 任彦瑛 . 中国铜矿资源的现状及潜力分析 [J]. 中国金属通报 , 2021(1): 5-6.

[7] 王玉晶，石一辰，聂晶磊，等 . 尾矿污染防治的进展、问题与对策建议 [J]. 环境保护，2022, 50(24): 52-55.

[8] 李华京 . 我国“无废城市”建设全面推进 [J]. 生态经济，2025, 41(3): 9-12.

[9] 马超，冯印成，赵康，等 . 我国矿产资源型城市“无废城市”建设路径探索 [J]. 中国环境科学，2024, 44(9): 5077-5084.

[10] 石海佳，项赟，周宏春，等 . 资源型城市的“无废城市”建设模式探讨 [J]. 中国环境管理，2020, 12(3): 53-60.

[11] 汪鹏，王翘楚，韩茹茹，等 . 全球关键金属 - 低碳能源关联研究综述及其启示 [J]. 资源科学，2021, 43(4): 669-681.

[12] 黄伟军 , 龚先政 , 高峰 , 等 . 中国铜产品环境足迹评价和供应风险综合评估 [J]. 中国有色金属学报 , 2023, 33(5): 1541-1553.

[13] 郝敏 , 汪鹏 , 陈伟强 . 中国电力系统低碳转型的铜资源需求预测 [J]. 资源科学 , 2025, 47(7): 1449-1461.

[14] 温宗国 , 季晓立 . 中国铜资源代谢趋势及减量化措施 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2013, 53(9): 1283-1288.

[15] 顾一帆 , 杨弘扬 , 吴玉锋 , 等 . 中国铜产业体系演化的碳中和实现机制研究 [J]. 中国环境管理 , 2023, 15(4): 61-71.

[16] 武志红 , 彭静之 , 潘悦鑫 , 等 . 铜尾矿在水泥生产及混凝土应用中的研究进展 [J]. 硅酸盐通报 , 2025, 44(6): 2172-2180, 2192.

[17] 刘海营 , 杨航 , 钱志博 , 等 . 铜尾矿资源化利用技术进展 [J]. 中国矿业 , 2020, 29(S2): 117-120.

[18] USGS. Mineral Commodity Summaries 2020[R]. Reston: United States Geological Survey, 2020.

[19] USGS. Copper Statistics and Information[R]. National Minerals Information Center, 2025.

[20] International Copper Study Group. World Copper Factbook 2024[R]. International Copper Study Group, 2024.

[21] GUO D F, HOU H M, LIU H, et al. The imminent copper tailings crisis in China[J]. Environmental Science & Technology, 2026, 60(2): 1800-1809.

[22] LIU L, SCHANDL H, WEST J, et al. Copper ore material footprints and transfers embodied in domestic and international trade of provinces in China[J]. Journal of Industrial Ecology, 2022, 26(4): 1423-1436.

[23] UN Comtrade. United Nations comtrade database[R/OL]. [2025-11-30]. https://comtrade.un.org.

[24] United Nations. World Population Prospects[R]. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2024.

[25] GUO D F, HOU H M, LONG J, et al. Underestimated environmental benefits of tailings resource utilization: evidence from a life cycle perspective[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 96: 106832.

[26] GUO D F, ZHANG S, HOU H M, et al. Synergistic evaluation methodology for pollution and carbon reduction in the field of solid waste resource utilization[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024, 108: 107604.

[27] 林锦 , 陈云嫩 , 陆柳鲜 , 等 . 基于生命周期评价法的铜尾矿资源化利用的环境效益分析 [J]. 有色金属科学与工程 , 2021, 12(3): 106-112, 121.

[28] 李畅 . 江西省某铜尾矿资源化过程生命周期评价研究 [D]. 赣州 : 江西理工大学 , 2020.

[29] CROWSON P. Some observations on copper yields and ore grades[J]. Resources Policy, 2012, 37(1): 59-72.

[30] ALCALDE J, KELM U, VERGARA D. Historical assessment of metal recovery potential from old mine tailings: a study case for porphyry copper tailings, Chile[J]. Minerals Engineering, 2018, 127: 334-338.

[31] YIN J H, LIU L, JI H R, et al. Sustain China's copper resources with domestic mining, trading, and recycling[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 202: 107396.

[32] SCHIPPER B W, LIN H C, MELONI M A, et al. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 132: 28-36.

[33] HE R, SMALL M J. Forecast of the U.S. copper demand: a framework based on scenario analysis and stock dynamics[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(4): 2709-2717.

[34] 王俊博 , 范蕾 , 李新 , 等 . 基于物质流方法的中国铜资源社会存量研究 [J]. 资源科学 , 2016, 38(5): 939-947.

[35] 翟一杰 , 张天祚 , 申晓旭 , 等 . 生命周期评价方法研究进展 [J]. 资源科学 , 2021, 43(3): 446-455.

[36] 郭东方 , 侯慧敏 , 徐鹤 . 基于生命周期视角的固废资源化温室气体减排效益核算研究 [J]. 环境影响评价 , 2023, 45(5): 53-58.

[37] 中华人民共和国生态环境部 . 关于发布 2022 年电力二氧化碳排放因子的公告 [EB/OL]. (2024-12-06)[2025-

12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202412/t20241226_1099413.html.
[38] GAO Z Y, GENG Y, ZENG X L, et al. Evolution of the anthropogenic chromium cycle in China[J]. Journal of Industrial Ecology, 2022, 26(2): 592-608.
[39] 潘美晨 , 穆攀攀 , 张晓光 . 铜尾矿资源化利用现状 : 技术、问题和挑战 [J]. 中国矿业 , 2025, 34(7): 42-55.
[40] 张玲 , 杨哂 , 董战峰 . 中国资源循环利用产业金融支持水平和效率的区域差异 [J]. 中国环境管理 , 2022, 14(6): 110-117.
[41] 拜冰阳 , 李艳萍 , 张昕 , 等 . 再生铜行业环境管理问题的若干思考和建议 [J]. 中国环境管理 , 2019, 11(1): 101-105.
[42] 温宗国 , 唐岩岩 , 王俊博 , 等 . 新时代循环经济发展助力美丽中国建设的路径与方向 [J]. 中国环境管理 , 2022, 14(6): 33-41.
[43] FRANKS D M, SEGURA-SALAZAR J, GALLAGHER L, et al. Nose to tail mining: a circular solution for sand supply and tailings reduction at scale[J]. One Earth, 2025, 8(2): 101198.
[44] SU C X, RANA N M, EVANS S G, et al. Tailings storage facilities in China: historical failure incidents, existing status, and database-driven quantitative risk assessment[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 114: 104973.
[45] 孟春阳 , 项波 . 环境安全视阈下尾矿库监管体制研究 [J]. 环境保护 , 2017, 45(9): 55-58.
[46] OUELLET S M, DETTMER J, OLIVIER G, et al. Advanced monitoring of tailings dam performance using seismic noise and stress models[J]. Communications Earth & Environment, 2022, 3(1): 301.
[47] GREBBY S, SOWTER A, GLUYAS J, et al. Advanced analysis of satellite data reveals ground deformation precursors to the Brumadinho Tailings Dam collapse[J]. Communications Earth & Environment, 2021, 2(1): 2.
[48] 唐宇峰 , 何俚秋 , 胡光忠 . 尾矿坝位移实时预测在线深度学习方法研究 [J]. 安全与环境学报 , 2026, 26(2): 529-536.
[49] 中华人民共和国应急管理部 . 关于印发防范化解尾矿库安全风险工作方案的通知 [EB/OL]. (2020-02-11)[2025-11-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/24/content_5494834.htm.
[50] 中华人民共和国生态环境部 . 尾矿污染环境防治管理办法 [EB/OL]. (2022-04-06)[2025-11-25]. https://www.mee.gov.cn/gzk/gz/202204/t20220414_974709.shtml.
[51] 国家矿山安全监察局 . 尾矿库安全监督管理规定 (征求意见稿)[EB/OL]. (2022-09-28)[2025-11-25]. https://nmg.chinamine-safety.gov.cn/Item/14815.aspx.

Challenges and Strategic Countermeasures for Copper Tailings Management in China under the “Zero-Waste City” Initiative

GUO Dongfang[1], HOU Huimin[2], XU He[1,3,4,5*]

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Institute of Resource and Environmental Engineering, Shanxi University, Taiyuan, 030031, China; 3. Institute of Ecological Civilization, Nankai University, Tianjin 300350, China; 4. Research Center of Strategic Environmental Assessment, Nankai University, Tianjin 300350, China; 5. School of Management Science and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The large-scale exploitation of mineral resources has strongly supported economic and social development; however, the massive generation and long-term storage of tailings during mining and beneficiation have become a major challenge for the construction of “zero-waste cities” in China. To support the scientific and refined management of tailings, this study takes copper tailings as the research object, constructs a tailings generation accounting model, predicts future trends of copper tailings generation using dynamic material flow analysis, and evaluates the pollution and carbon reduction benefits of copper tailings resource utilization through life cycle assessment. The results show that: ① From 1950 to 2020, China generated a total of 5.56 billion tons of copper tailings, with East China and Southwest China accounting for 37.1% and 26.0%, respectively, and the remaining regions together contributing for 36.9%. Under the carbon neutrality scenario, the cumulative copper tailings generation from 2021 to 2060 is expected to reach 19.01 billion tons, approximately 3.4 times the total generation from 1950 to 2020. ② The resource utilization of copper tailings can not only effectively absorb both newly generated and historically accumulated tailings, but also deliver significant synergistic benefits in pollution and carbon reduction at the life cycle scale, with environmental impacts reduced by an average of approximately 10%–30% compared to the baseline scenario. Meanwhile, the carbon-reduction potential of different resource utilization pathways varies markedly under different provincial electricity-mix conditions. Based on these findings, it is recommended that, under the ocntext of “zero-waste cities” development, tailings resource utilization should be promoted in accordance with local conditions, source control should be strengthened, and a sustainable development model for the copper industry should be established. In addition, risk prevention and control systems should be improved, tailings safety management capacity should be systematically enhanced, and collaborative linkages among governments, mining enterprises, and resource utilization entities should be strengthened. These measures will help advance the standardization, systematization, and sustainability of tailings management, providing long-term and stable support for the construction of “zero-waste cities” and a Beautiful China.

Keywords: tailings; zero-waste cities; circular economy; material flow analysis; life cycle assessment