

矿业综述

文章编号: 1004-4051(2023)10-0001-10

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230747

城市矿产开发利用: 前景、影响因素及管理政策

何朋蔚, 彭亚山

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

摘要: 城市矿产开发利用是一种以循环经济为基础, 将废弃物转化为可再生资源的管理方式, 有助于改善循环经济中的资源消耗和可持续性。通过全面、深入地梳理相关研究, 有助于加深对城市矿产开发利用的系统认识。本文首先从城市矿产的社会蓄积量、开发价值和开发利用模式入手, 分析城市矿产开发利用的前景; 其次围绕技术条件、成本效益和政策环境探讨城市矿产开发利用的影响因素; 最后从政策体系现状、政策工具效果和政策顶层设计等三方面分析城市矿产开发利用的管理政策。研究结果表明: 典型城市矿产不仅储量丰富, 而且开发价值巨大, 但仍存在诸多问题与挑战, 如现阶段实际回收率并不高等。因此, 需大力发展新技术和提升正规回收渠道的比例来提高城市矿产开发利用效率。此外, 国家层面应将循环商业模式和生产者责任延伸(EPR)模式有机融入城市矿产开发利用管理政策体系中, 构建可再生资源开发利用的产业生态链。最后, 展望了城市矿产开发利用的未来研究方向。

关键词: 城市矿产; 开发利用; 循环经济; 影响因素; 管理政策

中图分类号: TD98; TD-9 **文献标识码:** A

Urban mineral development and utilization: prospects, influencing factors and management policies

HE Pengwei, PENG Yashan

(Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Urban mineral development and utilization is a management method based on the circular economy that converts waste into renewable resources, which helps to improve resource consumption and sustainability in the circular economy. Through comprehensive and in-depth combing of the relevant research, it is helpful to deepen the systematic understanding of urban mineral development and utilization. Firstly, analyzes the prospects of urban mineral development and utilization from the social stock, development value and development and utilization mode of urban minerals. Secondly, the influencing factors of urban mineral development and utilization are discussed around technical conditions, cost-effectiveness and policy environment. Finally, the management policies of urban mineral development and utilization are analyzed from three aspects: the status quo of the policy system, the effect of policy tools and the top-level design of policies. The results show that typical urban

收稿日期: 2023-10-09 责任编辑: 赵奎涛

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”软科学研究青年项目资助(编号: 22692198100)

第一作者简介: 何朋蔚, 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事环境管理等方向的研究, E-mail: hepengwei@usst.edu.cn。

通讯作者简介: 彭亚山, 男, 硕士研究生, 主要从事工商管理方向的研究, E-mail: pys1946682167@163.com。

引用格式: 何朋蔚, 彭亚山. 城市矿产开发利用: 前景、影响因素及管理政策[J]. 中国矿业, 2023, 32(10): 1-10.

HE Pengwei, PENG Yashan. Urban mineral development and utilization: prospects, influencing factors and management policies[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(10): 1-10.

minerals are not only rich in reserves, but also have great development value, but there are still many problems and challenges, such as the actual recovery rate is not high at this stage. Therefore, it is necessary to vigorously develop new technologies and increase the proportion of formal recycling channels to improve the efficiency of urban mineral development and utilization. In addition, the national level should organically integrate the circular business model and extended producer responsibility (EPR) model into the management policy system of urban mineral development and utilization, and build an industrial ecological chain for the development and utilization of renewable resources. Finally, the future research direction of urban mineral development and utilization is envisioned.

Keywords: urban mineral; development and utilization; circular economy; influencing factor; management policy

0 引言

城市矿产是工业化和城市化的产物,是一种重要的载能性、循环性、战略性资源^[1],它是相对于地下原生矿产的另外一种重要资源^[2]。在全球“碳达峰、碳中和”目标驱动下,以低碳能源技术为核心的绿色低碳产业迅速发展^[3]。英国施罗德基金经理 Mark 表示,在 2020 年至 2050 年期间,全球向清洁能源的转型将创造至少价值 100 万亿美元的投资机会^[4]。世界经济论坛 2023 年的报告指出,全球废弃物产量预计将从 2016 年的 20.1 亿 t 增加到 2050 年的 34 亿 t^[5]; 2021 年 7 月,中国的《“十四五”循环经济发展规划》提出,到 2025 年,循环型生产方式全面推行,资源循环型产业体系基本建立,资源循环利用产业产值将超过 5 万亿元^[6]。因此,合理开发城市矿产具有重大战略意义。城市矿产的开发利用可以节约资源,具有绿色、高效等优点,能够有效缓解资源约束瓶颈和环境压力^[2,7-8]。

一些学者认为“城市矿产”的概念最早是由城市学家 JACOBS J 和日本学者南条道夫相继提出^[9-13]。城市矿产与固体废弃物和可再生资源有所不同。城市矿产是具有经济价值、环境价值和战略价值的资源,而固体废弃物是指在生产和生活等活动中产生的固态、半固态的废弃物。固体废弃物需在一定技术条件下才能转化为城市矿产资源开发利用^[14]。城市矿产与可再生资源的差异主要体现在:一方面是侧重的性质不同,前者着眼于社会属性,强调资源开发的战略价值与环境效益,后者则强调废弃物可被二次利用的自然属性;另一方面是侧重的对象不同,前者主要以生活废弃物为原料,而后者主要以工业废弃物为原料^[7,14]。

当前,全球不少学者围绕“城市矿产”,从不同的维度开展了相关研究^[15-20]。通过对以往研究文献的梳理,本文从城市矿产开发利用的前景、影响因素及管理政策等三方面的相关热点研究话题展开讨论,

指出现有研究的不足之处,并展望城市矿产开发利用的未来研究方向。

1 城市矿产开发利用的前景

城市矿产中蕴含着丰富的可再生资源,与原生矿产相比,城市矿产开发利用具有显著的战略效益、环境效益和经济效益,如妥善回收,可对原生矿产资源起到明显的替代作用。因此,有必要就城市矿产的量、价以及开发利用模式进行梳理,以更好地厘清城市矿产开发利用的逻辑。

1.1 城市矿产的社会蓄积量

在各类城市矿产中,以新能源汽车动力蓄电池和废旧手机为代表的城市矿产开发利用形势尤为突出。一方面,第一代新能源汽车动力蓄电池大规模退役高峰期已经到来,许多国家面临着如何有效回收利用这一挑战;另一方面,在废旧电子设备中,手机具有更新快、普及广、回收率低等特点,全球每年产生大量废旧手机,面临着如何提高回收率等难题。

以上两类城市矿产中含有丰富的战略性关键金属资源,具有广泛的开发利用前景。对这两类典型

表 1 典型城市矿产的社会蓄积量
Table 1 Social accumulation of typical urban mineral resources

国家	年份	城市矿产类别	社会蓄积量
英国	2025 年	新能源汽车动力蓄电池	4.2 万 t
美国	2025 年/2050 年	新能源汽车动力蓄电池	1.9 万~7.3 万 t 120 万~850 万 t
中国	2030 年	新能源汽车动力蓄电池	237.3 万 t
全球	2080 年	新能源汽车动力蓄电池	1 692.8 万 t
希腊	2021—2035 年	废旧手机	4 300 万部
中国	2025 年	废旧手机	9.37 亿部
印度	2035 年	废旧手机	2.2 亿部,战略性关键金属 超过 17 万 t

注:作者根据相关研究整理所得。

城市矿产社会蓄积量的计算,有助于对其进行有效的开发利用,相关数据详见表 1。

新能源汽车动力蓄电池的社会蓄积量方面, SKEETE 等^[15]预测,到 2025 年,英国废旧新能源汽车动力蓄电池将达 4.2 万 t,对其进行开发利用可满足 2030 年欧洲汽车行业 10% 的钴需求量。DUNN 等^[21]研究结果表明,美国新能源汽车动力蓄电池退役量将迅速增加至 1.9 万~7.3 万 t(2025 年),120 万~850 万 t(2050 年);假设闭环回收,到 2035 年,可满足 15%~18% 的钴、9%~11% 的锂和 15%~17% 的镍需求。致力于电池回收的康佛森公司预测,中国新能源汽车动力蓄电池 2030 年底的退役量约为 237.3 万 t^[22]。王翹楚等^[23]预测,到 2080 年,全球锂城市矿产社会蓄积量将达 1 840 万 t,新能源汽车动力蓄电池中所含的锂城市矿产将占全球锂城市矿产社会蓄积量的 92%。由此可见,新能源汽车动力蓄电池未来将成为再生锂资源的重要蓄积地。废旧手机的社会蓄积量方面, KASTANAKI 等^[24]估计,2021—2035 年期间,希腊累计废旧手机将增加到 4 300 万部,如果能有效回收 1995—2020 年间的废旧手机,可满足希腊未来十几年生产智能手机所需的战略性关键金属。相关研究表明,中国 2021 年手机报废量高达 4.98 亿部,但回收率仅为 4.2%,传统渠道回收约占 4%,互联网渠道回收仅占 0.2%^[25]。何朋蔚等^[26]预计,中国各类废旧手机 2025 年底将超过 9.37 亿部,按照 1% 的回收率仅能回收约 937 万部,实际上甚至更低。HE 等^[27]预测,到 2035 年,印度废旧手机将超过 2.2 亿部,可回收利用的战略性关键金属将超过 17 万 t。由此可见,手机报废量巨大且内含战略性关键金属储量丰富,但实际回收率堪忧。

1.2 城市矿产的开发价值

1) 城市矿产开发利用的战略价值。如何确保战略性关键金属供应安全,是各国政府面临的共同挑战。习近平总书记在党的二十大报告中指出:“巩固优势产业领先地位,在关系安全发展的领域加快补齐短板,提升战略性资源供应保障能力。”中国对外依存度超过 50% 的金属多达 12 种(铌、铬、钴、镍、锰、钡等),其中超过 90% 的有 6 种(镍、钨、铬、钴、钨、钼族);同时,进口来源高度集中,受地缘政治风险影响,供应风险隐患巨大^[16]。HAMMOND 等^[28]指出美国有 14 种战略性关键金属 100% 依赖进口,另外 22 种国内缺乏主要生产。欧盟、美国和日本等经济体正在加紧努力,通过资源储备、进口替代国多样化、全球矿山收购和建立国际关键矿产联盟来加强关键矿产供应链安全^[29]。根据国际能源署(IEA)^[30]测

算,从报废电池中回收铜、锂、镍和钴等战略性关键金属,可将这些金属的原生矿产开采供应需求减少约 10%。城市矿产开发利用能够从根本上改变资源的代谢特征,显著提升对原生矿产资源的替代效益,对于降低战略性关键金属资源的对外依存度能够产生长期而深远的影响^[31]。

2) 城市矿产开发利用的生态价值。国际能源署(IEA)^[30]、世界银行^[32]、欧盟委员会^[33]、美国能源部^[34]相继发布报告指出,锂、钴、稀土等战略性关键金属既是支撑碳中和目标实现的关键物质基础,也是影响其目标实现的潜在资源约束^[16]。而从新能源汽车动力蓄电池和废旧手机中提取可再生金属,能有效缓解资源约束瓶颈和环境压力,具备多重生态环境效益^[16]。根据相关测算,回收处理 1 t 废旧电子设备可减排二氧化碳 4.73 t、二氧化硫 0.046 t、废水 24.23 t、固体废物 13.61 t,节约标准煤 1.97 t,能够有效防止“二次污染”,同时节约巨额的生态环境修复成本^[35-36]。如果城市矿产没有得到有效开发,将导致局部空气污染、土壤退化和水污染,对自然栖息地、生物多样性和人类健康会产生不利影响^[5]。SAHA 等^[37]指出由于缺乏合理处置废旧电子设备的认识,导致印度等发展中国家出现严重的环境问题和健康问题,在一定程度上也导致发达国家出现了同样的问题。

3) 城市矿产开发利用的经济价值。①城市矿产相关产业规模庞大,已经成为新的经济增长点。美国政府宣布了 2023—2028 年期间将为清洁能源项目投资 5 550 亿美元的计划^[38]。根据行业测算,中国新能源汽车动力蓄电池回收市场规模到 2030 年底预计可达 1 406 亿元,比 2022 年实际市场规模增长近 9 倍^[39]。中国的《“十四五”循环经济发展规划》提出,到 2025 年,资源循环型产业体系基本建立,资源循环利用产业产值将超过 5 万亿元^[6]。②该产业集群带来了大量的就业机会。城市矿产开发利用属于劳动力密集型产业,产值每增加 1 000 亿元,就会相应增加 100 万个就业岗位^[40]。相关研究发现^[41-42],西方国家的循环经济就业通常占全国就业的 0.5%~5%。美国环境保护署(EPA)2020 年发布的报告表明,城市矿产开发利用行业创造了 68.1 万个就业岗位,为劳动者提供了 378 亿美元的工资^[43]。中国循环经济协会 2022 年发布的报告显示,中国资源循环利用产业 2021 年产值超过 3 万亿元,带动超过 3 000 万人就业^[6]。③城市矿产开发利用的成本与收益。ZENG 等^[17]计算得出从原生矿产中开采铜和铝的成本分别为 5 500 美元/t、2 500 美元/t,而从城市矿产中回收铜和铝的成本分别为 3 000 美元/t、1 660 美元/t。HE 等^[44]

从生命周期成本角度进行分析,结果表明除钨和铂外,废旧手机中所含的其他高技术矿产的回收成本均大于其市场价值。HONMA 等^[45]指出日本 2018 年回收 4 270 万 t 城市矿产花费约 189 亿美元,回收成本可能太高,约为 19.9% 的回收率并不一定具有成本效益。

城市矿产不仅储量丰富,而且具有巨大的开发价值,为使城市矿产在战略、环境和经济等方面可持续发展,亟需寻求高效的开发利用模式。

1.3 城市矿产的开发利用模式

相关研究表明,预计到 2050 年,全球废旧电子设备将达每年 1.2 亿 t^[46-47]。由于没有建立起有效的开发利用模式,80% 的废旧电子设备没有被正规渠道回收,最终被填埋或被非正规渠道回收^[5]。因此,采用合适的开发利用模式提升城市矿产的回收效率尤为必要。城市矿产开发利用模式可以分为以下两类。一类是立足于循环经济理念的商业模式。循环商业模式是一种通过循环(材料和能源的循环利用)、扩展(延长产品寿命)、强化(通过共享经济等解决方案强化产品使用率)和去物质化(通过服务和软件解决方案替代产品)等策略来实现资源循环利用的商业模式,以减少资源消耗和浪费,最大化地创造价值^[18,48]。随着互联网科学技术的发展,诞生了致力于提升城市矿产终端回收效率的“互联网+回收”模式。目前,已经形成三种经典的模式:第一种是基于大数据的回收系统,如爱回收和回收哥等互联网回收平台;第二种是与垃圾分类相结合的回收系统,通过互联网技术将垃圾分类与城市矿产开发利用相结合^[49];第三种是以政府为核心的多主体协同的回收系统,该系统包括由居民和企事业单位组成的资源提供主体、流通单位主体、资源再利用企业主体、政府主体^[50]。另一类是基于生命周期角度的生产者责任延伸(Extended Producer Responsibility, EPR)模式。EPR 模式将生产者的责任扩展到产品的整个生命周期,特别是在生命周期末端的收集、拆解和再利用,以减少产品给资源和环境带来的不利影响^[51]。王昶等^[52]指出,德国为政府主导、生产商参与、公共废物管理机构配合的集体 EPR 模式;而日本呈现政府引导、生产商主导、消费者参与的个体 EPR 模式。

基于先进技术和理念,循环商业模式和 EPR 模式构建起了可再生资源开发利用的产业生态链,有效提升了城市矿产开发利用的效率。

2 城市矿产开发利用的影响因素

有研究表明城市矿产中金、银、铅和锌的蓄积量高于已知的自然矿床,而铜和铁的蓄积量与已知

的自然矿床相等^[53]。受多重因素影响,仅有 17.4% 的废旧电子设备被回收利用^[54]。因此,围绕技术条件、成本效益和政策环境探讨其对城市矿产开发利用的影响。

2.1 城市矿产开发利用的技术条件

城市矿产开发利用的技术水平越高,越能从开发利用过程中获益^[14]。世界经济论坛 2023 年的报告显示,一些基础设施和技术水平有限的国家依靠填埋或露天倾倒处理 96% 的废弃物,而其他国家只有 2%^[5],这造成了资源的极大浪费。许多废旧电子设备是通过破坏性回收的,回收利用率并不高,而 PEIRÓ 等^[19]的研究表明,通过无损拆解技术回收硬盘驱动器是经济可行的,该技术将在一定程度上改善原材料的二次供应。VANEGAS 等^[55]的研究表明,无损拆解技术能够显著提高战略性关键金属的回收率和纯度。ACHILLAS 等^[56]研究表明,拆解技术水平决定了回收废旧电子设备的收益水平,拆解程度越高则收益越高。WU 等^[57]在考虑了经济效益和环境影响的基础上对废旧电路板的各种回收方法进行了比较分析后,认为火法冶金和热解是综合有效的技术。“互联网+逆向物流”等现代化技术也很大程度上提升了城市矿产终端回收效率。产品生态设计致力于改善消费电子产品在整个生命周期中的环境表现^[58],能够有效延长产品寿命,降低更换频率,提高回收效率。KHOR 等^[59]的研究表明,产品生态设计会正向影响逆向物流的实施,进而带来经济效益与环境效益。王翹楚等^[23]认为使用清洁化与智能化的回收利用技术与装备,将有利于城市矿产开发利用。但产品生态设计不足将导致资源回收困难,如锂电池设计之初未充分考虑资源回收利用等问题,很大程度上限制了末端回收的整体效率。

科学技术的进步突破了效率瓶颈,带来了资源效益、环境效益和经济效益,促进了城市矿产开发利用的发展。因此,国家和社会应积极投资资源回收技术的研究,大力发展新技术。

2.2 城市矿产开发利用的成本效益

城市矿产开发利用具备环境与经济的双重效益。城市矿产开发利用的环境效益方面,CUDJOE 等^[60]的研究表明,2005 年至 2017 年,中国城市矿产开发利用累计节电 37.43 亿 t 标准煤,平均节省 43.2% 的电力,累计减排二氧化碳 47.66 亿 t、甲烷 0.23 亿 t。GHISELLINI 等^[61]认为通过回收建筑和拆迁废物,避免了填埋和主要材料的生产,其潜在的环境效益高于回收的环境影响。由于大量的废旧电子设备没有得到有效的开发利用,导致有毒物质和重金属渗入

周围的生态系统,超过了人体健康的阈值,这些地区不再适合种植粮食,水也不适合饮用^[62]。城市矿产开发利用的经济效益方面,YANG等^[63]测算出,2013年至2017年,中国29个省(区、市)废旧电子设备的总减排效益为63.4亿元。ZHU等^[64]指出,相比从原生矿产中开采和精炼金属,从废旧电子设备中回收金属所使用的能源更少,更具经济性。但也有学者指出中国许多正规回收企业收入严重依赖基金补贴,如鑫广绿环再生资源股份有限公司,2014年至2017年期间,基金补贴一直占废旧电子设备回收业务收入的60%左右^[65]。HONMA等^[45]研究发现日本成本最小化的回收率为7.6%,认为低效的回收措施和回收率两个因素导致了城市矿产开发利用成本增加,且开发利用成本与回收率呈U型关系。

城市矿产开发利用在减少温室气体排放和减缓气候变化方面贡献突出。目前,城市矿产中很大一部分是通过非正规渠道处理,该部分的减排效率很低,后续减排潜力巨大。如果能够提升正规回收渠道的比例,将带来巨大的能源效益、经济效益和环境效益。

2.3 城市矿产开发利用的政策环境

2022年12月,196个缔约方通过了具有历史意义的《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》,要求各国政府在2030年前采取政策,遏制和扭转对自然的损害^[5]。该框架号召政府、企业和个人等所有行动者共同努力去实现使命和目标。相关研究表明政府环境规制能够倒逼企业进行技术创新,并推动企业绿色化转型^[66]。面对日益增多的城市矿产带来的资源和环境压力,许多国家都制定了相关政策来管理城市矿产的开发利用。欧盟修订了《关于废旧电子设备的指令》《限制在电子设备中使用有害物质的指令》,以提高回收效率和再利用效率^[63]。一些亚洲国家也建立了全面的废旧电子设备管理制度,日本通过《促进建立循环型社会基本法》确立了城市矿产开发利用的基本原则,还制定了《容器及包装回收法》《家电回收法》《报废汽车回收法》等一系列回收法^[45]。通过上述政策法律的实施,日本城市矿产开发利用得到了改善。2021年东京奥运会打造的5000枚奖牌的原料全部来自于回收的城市矿产,这不仅吸引了全世界的目光,也让城市矿产这一资源宝藏展现了其独特价值^[67]。中国先后制定了《中华人民共和国清洁生产促进法》《废旧电子设备污染环境防治管理办法》《中华人民共和国循环经济促进法》和《废旧电子设备回收处理管理条例》等法律法规^[58],对中国的城市矿产管理产生了重要影响。2022年11月,工业

和信息化部、国家发展和改革委员会、生态环境部联合印发《有色金属行业碳达峰实施方案》,提出“十四五”期间可再生金属供应占比达到24%以上,这不仅提升了中国资源安全保障能力,也促进了发展方式绿色转型^[67]。

城市矿产开发利用也面临着多重挑战,相关研究表明消费者的绿色消费态度并没有很好地转换为绿色消费行为^[65],信息泄露已成为废旧手机回收的最大障碍,导致约30.45%的手机被存放在家中^[68]。因此,建议政府实施消费者押金退款激励制度^[51],提高消费者参与回收的积极性,同时制定相关法律法规和行业处理标准来保护个人隐私,促进行业健康发展。

3 城市矿产开发利用的管理政策

城市矿产相关的产业政策从全局出发、立足于长远利益,影响着城市矿产产业的发展^[20]。城市矿产开发利用的管理政策旨在促进对各类城市矿产的综合开发利用能力。通过对城市矿产开发利用的管理政策相关文献进行梳理发现,现有研究主要集中在以下三个方面^[20,69]:一是政策体系现状分析^[37,52,54,70-71],通过分析一国城市矿产政策体系现状与存在的问题、或与发达国家政策体系对比分析,进而提出合理的政策建议;二是政策实施效果评价^[37,51,65,71-74],评估不同类别政策的作用机制及其实施效果;三是政策顶层设计^[35,37,52,75],针对产业自身特点和现有政策不足来设计政策顶层框架。

3.1 城市矿产开发利用政策的体系现状

在政策体系发展现状及问题分析方面,欧洲已实施统一的废旧电子设备回收利用法律法规,如《废旧电子设备的指令》(2003)、《限制在电子设备中使用有害物质的指令》《耗能产品生态设计指令》、新《废旧电子设备的指令》(2012)、废旧电子设备卓越标签等^[54]。到目前为止,欧洲已经建立起由消费者、销售商、生产商和政府多主体协同治理的回收系统。当前,美国各州对废旧电子设备回收制度还未达成共识,暂无关于废旧电子设备的联邦法规,但各州都出台了自己的废旧电子设备管理法律,这些法律都旨在促进其回收利用,并禁止填埋^[54]。日本颁布并实施了《促进建立循环型社会基本法》《废弃物处理法》《资源有效利用促进法》等法律法规,形成了消费者付费、经销商回收或政府在指定地点回收的模式^[54]。SUN等^[70]总结了我国废旧电子设备回收管理现状及未来的挑战,认为中国已经建立了比较完善的废旧电子设备回收的政策体系,但是政府基金的持续赤字、补贴发放严重滞后、电子设备生态设计不足、回收知识宣传普及不足等问题将对政策的有效实施造

成一定的挑战。

在政策体系对比分析方面,王昶等^[52]认为日本是一种政府引导下的个体EPR模式,而德国是一种政府主导下的集体EPR模式,中国城市矿产开发利用应借鉴国外的先进经验,倡导多主体社会参与,实施产品全生命周期管理,强化技术创新和基础设施支撑,构建多层次的制度体系。YANG等^[71]对中国、德国、日本和荷兰不同的城市矿产基金运作模式进行了比较分析,结果表明中国具有全球最大的废旧电子设备市场,但在成本管理和回收效率方面仍处于落后阶段;德国对城市矿产的管理相对成熟;日本的基金运作由消费者和制造商全权负责,降低了基金管理成本,缩短了资金周转周期;荷兰的基金政策模式对企业的约束力更大,提高了废旧电子设备的回收率,有利于维持回收系统的长期稳定,但基金运作成本大,企业难以实现低成本效益。

全球范围内的城市矿产开发利用行业处于正规回收渠道与非正规回收渠道并存的状态,特别是在发展中国家,大约95%的城市矿产实际上是被非正规回收渠道回收^[37]。由此可见,非正规回收渠道仍占比很大,这严重影响了行业的发展。如何制定有效政策来推动城市矿产开发利用行业中正规回收渠道的发展是目前全球亟需解决的问题,也是未来值得学术界讨论的问题。

3.2 城市矿产开发利用政策的工具效果

德国作为最早实行EPR模式的国家,其城市矿产基金补贴制度规定了城市矿产管理环节所有利益相关者的具体义务,但无法识别绿色制造的隐性成本^[71]。日本关于促进资源有效利用的立法,如《促进建立循环型社会基本法》《废弃物处理法》《资源有效利用促进法》,建立起一个基于EPR模式的资源回收经济体系,强化了回收系统,提高了资源的利用率^[71],并全面减少了城市矿产的产生量^[37]。PORTUGAISE等^[72]在研究日本和加拿大实施的EPR模式时,发现日本实施的生产者实体责任延伸制促使生产商改变产品设计,以简化下游对废旧电子设备的回收处理;而加拿大实施的生产者经济责任延伸制则使生产商更关心节约成本,使报废处理复杂化。印度2011年制定了第一部以EPR模式为基础的城市矿产管理法规,但是该法规也存在一些问题,如回避了非正规回收渠道与正规回收渠道的整合问题、消费者延伸责任未纳入该法规、不同利益相关者责任规定的不够明确、缺乏支撑管理的可靠数据等^[37]。中国的城市矿产试点政策是《中华人民共和国循环经济促进法》的一项重要规定,旨在促进循环经济、环境友好型产

业和社会的发展^[73]。SHEN等^[73]的研究结果表明,中国的城市矿产试点城市项目显著提高了城市废物管理效率和环境质量。WANG等^[74]对中国补贴回收废旧电子设备的基金政策效果进行了全面分析,结果表明以补贴基金政策为核心的EPR模式对废旧电子设备回收行业的变化具有较强的适应性,且该制度是促进行业标准化、推动行业发展的有效途径。姚海琳等^[69]将中国的城市矿产相关政策划分为规制型、经济激励型和社会型三类,研究发现规制型政策削弱了城市矿产开发利用的驱动力,经济激励型政策和社会型政策对于促进城市矿产开发利用的效果更为显著。

发达国家较早地实施了EPR模式,在促进城市矿产行业持续健康发展方面起到了积极作用。中国先后于2012年实施基金制度、2015年开展EPR模式试点工作^[65],已取得一定的成效,但仍面临一系列的挑战。从国内外EPR模式建设与实践来看,城市矿产开发利用始终缺乏产品生态化设计与无害化处理的激励制度设计^[51]。

3.3 城市矿产开发利用政策的顶层设计

当前,日本在循环经济法律体系的引领下已逐渐形成了责任明确、原则清晰、分类指导的城市矿产开发利用政策法律体系^[52]。日本的循环经济法律体系由1部基本法、2部综合法、6部专项法所组成。通过颁布《促进建立循环型社会基本法》,明确了废物处理原则以及政府和企业的责任与义务;通过颁布《废弃物处理法》《资源有效利用促进法》等2部综合法,确定了资源循环利用的3R原则;根据行业特征和产品性质制定了《容器包装再生利用法》《家用电器再生利用法》《建筑材料循环利用法》《食品再生利用法》《汽车回收再生利用法》《绿色采购法》等6部专项法,分类指导城市矿产的开发利用(图1)^[75]。

德国政府在《循环经济和废物管理法》的框架指导下,根据各行业的发展状况,制定了《废弃木材处置条例》《废弃电池条例》等行业法规。此外,德国以欧盟400多个适用于德国的法规,加上联邦政府和各州制定的8000余部法律法规,建立起一套完善的城市矿产开发利用政策法律体系,分级分类指导德国的城市矿产开发利用(图2)^[53]。

中国基于《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》《中华人民共和国清洁生产促进法》《中华人民共和国循环经济促进法》,初步构建起由《废旧电子设备回收处理管理条例》及相关办法、目录等相关组成的中国城市矿产开发利用政策法律体系,形成了城市矿产的全生命周期监管模式(图3)^[55]。

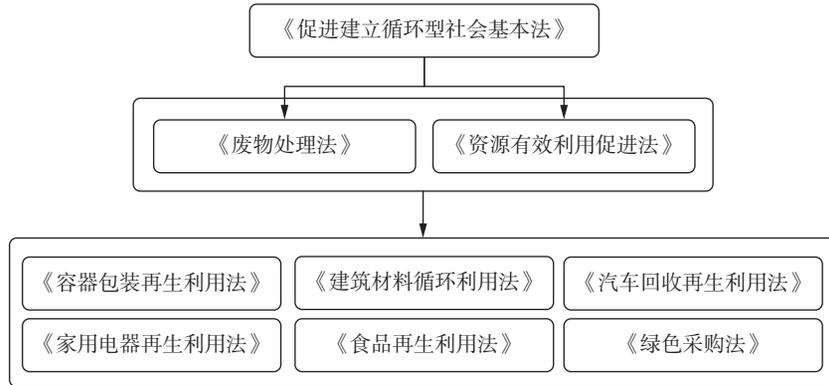


图 1 日本城市矿产开发利用政策体系框架

Fig. 1 Policy framework for urban mineral development and utilization in Japan

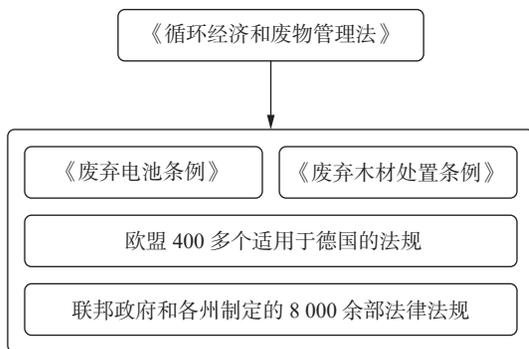


图 2 德国城市矿产开发利用政策体系框架

Fig. 2 Policy framework for urban mineral development and utilization in Germany

日本和德国均已建立起一套相对完整的政策法律体系,从国家到地方再到行业,自上而下,分级分类指导城市矿产的开发利用^[5]。中国城市矿产管理的各个方面以碎片化的方式纳入了不同的法律法规,这也反映了与城市矿产相关的政策法律框架整体性不

强^[7]。此外,与日本不同的是中国的法律法规没有对消费者的城市矿产处理行为进行约束^[7]。

4 结论与展望

本文在明确城市矿产相关概念的基础上,从城市矿产开发利用的前景、影响因素及管理政策等三方面梳理近几年该领域的研究进展。研究结果表明:典型城市矿产不仅储量丰富,而且在保障国家战略性关键金属资源供应安全方面具有重大战略意义,但仍存在诸多问题与挑战。一是政府层面,当前,城市矿产开发利用的政策法律法规整体性不强,各主体参与积极性不够。建议政府在将循环商业模式和EPR模式融入城市矿产开发利用的管理政策体系时,要考虑生产者、经销商、消费者等主体的责任、利益与激励的协调问题,建立由政府主导,到生产者运作,再到消费者参与的多主体协同治理EPR模式,让城市矿产全生命周期中的更多主体积极主动地参与到开发利用过程中来。二是企业层面,存在技术水平

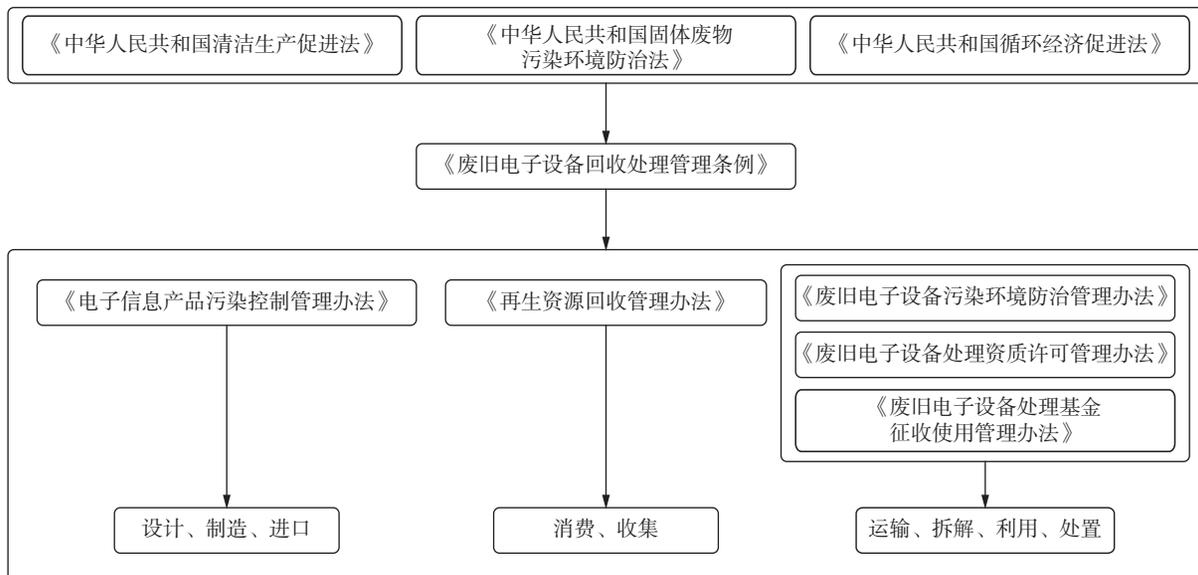


图 3 中国城市矿产开发利用政策体系框架

Fig. 3 Policy framework for urban mineral development and utilization in China

落后,回收处理经济效益不显著,参与积极性不高等问题。企业主体应加大技术研发投入、创新盈利模式、积极承担责任,如回收处理企业应加大无害化、精细化、智能化拆解技术的研发投入,提高废旧电子设备深加工处理程度;生产企业应加大实施产品生态设计,减少资源浪费,建立“互联网+逆向物流”回收模式,提升城市矿产末端的开发利用效率。三是个人层面,消费者存在绿色消费态度与行为的缺口。消费者应加强学习绿色消费知识、提高绿色消费意识和强化绿色消费行为,如学习和倡导绿色生活方式,积极参与绿色消费运动和垃圾分类回收等活动,强化产品使用率,注重对废弃物的安全处置,选择正规回收企业进行处理,承担城市矿产开发利用的相关责任与义务,以更好地将消费者绿色消费态度转化为绿色消费行为。

现有研究仍未全面。第一,现有研究对象大多集中在废旧电子设备、新能源汽车动力电池和建筑废物等方面,未来研究应拓展至其他研究对象。第二,当前针对城市矿产开发利用中非正规回收渠道与正规回收渠道的融合研究尚不充分,如何推动非正规回收渠道与正规回收渠道协调发展是未来值得学者们关注的议题。第三,针对城市矿产开发利用的产品生态设计与绿色处理的激励制度研究尚不足,未来需关注城市矿产开发利用各主体的激励制度设计问题。

参考文献(References):

- [1] 王昶,孙桥,左绿水.城市矿产研究的理论与方法探析[J].中国人口·资源与环境,2017,27(12):117-125.
WANG Chang, SUN Qiao, ZUO Lyushui. Research on theories and methods of urban minerals[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(12): 117-125.
- [2] 魏伟,李金铠,郭崇慧.基于知识图谱的中国城市矿产研究进展[J].资源科学,2021,43(3):489-500.
WEI Wei, LI Jinkai, GUO Chonghui. Evolution of urban mineral resources research based on knowledge maps[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 489-500.
- [3] 曾现来,李金惠,耿涌,等.碳中和背景下我国典型战略性金属中长期可持续供给路径[J].中国科学院院刊,2023,38(8):1099-1109.
ZENG Xianlai, LI Jinhui, GENG Yong, et al. Pathways for medium- and long-term sustainable supply of typical strategic metals in China in context of carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1099-1109.
- [4] 前瞻经济学人.英国资管巨头:未来30年全球清洁能源转型将带来至少价值100万亿美元投资机会[EB/OL].(2023-08-20)[2023-10-07]. <https://t.qianzhan.com/caijing/detail/230818-b5ebddfc.html>.
- [5] World Economic Forum. "Waste management: priority actions towards a nature-positive future"[R]. 2023.
- [6] 智库报告:宜提前规划打造“城市矿产”园区促循环经济高质量发展[J].再生资源与循环经济,2022,15(12):26.
- [7] 刘航.中国城市矿产资源开发利用现状、问题及对策[J].中国矿业,2018,27(9):1-6.
LIU Hang. Current situation, problems and countermeasures of urban mineral resources development and utilization in China[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(9): 1-6.
- [8] BRUNNER P H. Urban mining a contribution to reindustrializing the city[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(3): 339-341.
- [9] GRAEDEL T E. The prospects for urban mining[J]. *Bridge*, 2011, 41(1): 43-50.
- [10] WALLSTEN B, JOHANSSON N, KROOK J. A cable laid is a cable played: on the hibernation logic behind urban infrastructure mines[J]. *Journal of Urban Technology*, 2013, 20(3): 85-103.
- [11] KROOK J, SVENSSON N, WALLSTEN B. Urban infrastructure mines: on the economic and environmental motives of cable recovery from subsurface power grids[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 353-363.
- [12] 南條道夫.都市鉱山開発-包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け[J].東北大学選礦製錬研究所彙報,1988,43(2):239-251.
- [13] JACOBS J. *The Economy of Cities*[M]. New York: Random House, 1969.
- [14] 王昶,徐尖,姚海琳.城市矿产理论研究综述[J].资源科学,2014,36(8):1618-1625.
WANG Chang, XU Jian, YAO Hailin. A systematic review of urban mining theory[J]. *Resources Science*, 2014, 36(8): 1618-1625.
- [15] SKEETE J P, WELLS P, DONG X, et al. Beyond the event horizon: battery waste, recycling, and sustainability in the United Kingdom electric vehicle transition[J]. *Energy Research & Social Science*, 2020, 69: 101581.
- [16] 陈伟强,汪鹏,钟维琼.支撑“双碳”目标的关键金属供应挑战与保障对策[J].中国科学院院刊,2022,37(11):1577-1585.
CHEN Weiqiang, WANG Peng, ZHONG Weiqiong. Challenges and security strategies of China's critical metals supply for carbon neutrality pledge[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(11): 1577-1585.
- [17] ZENG X, XIAO T, XU G, et al. Comparing the costs and benefits of virgin and urban mining[J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2022, 7(1): 98-106.
- [18] GEISSDOERFER M, PIERONI M P P, PIGOSSO D C A, et al. Circular business models: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123741.
- [19] PEIRÓ L T, GIRÓN A C, I DURANY X G. Examining the feasibility of the urban mining of hard disk drives[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119216.
- [20] 王昶,耿红军,姚海琳,等.中国城市矿产政策演化研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(5):92-101.
WANG Chang, GENG Hongjun, YAO Hailin, et al. The evolution of urban mining policies in China[J]. *China Population, Resources and*

- Environment, 2017, 27(5): 92-101.
- [21] DUNN J, KENDALL A, SLATTERY M. Electric vehicle lithium-ion battery recycled content standards for the US: targets, costs, and environmental impacts[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 185: 106488.
- [22] 康佛森. 预计 2030 年我国动力电池退役量将达 237.3 万 t[EB/OL]. (2022-07-21)[2023-10-07]. <https://www.kfdchs.com/news/193.html>.
- [23] 王翹楚, 孙鑫, 郝瀚, 等. 锂的城市矿产利用: 前景、挑战及政策建议[J]. *科技导报*, 2020, 38(15): 6-15.
WANG Qiaochu, SUN Xin, HAO Han, et al. Urban mining of lithium: Prospects, challenges and policy recommendation[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(15): 6-15.
- [24] KASTANAKI E, GIANNIS A. Forecasting quantities of critical raw materials in obsolete feature and smart phones in Greece: a path to circular economy[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 307: 114566.
- [25] HAN H, ZHEN X, ZHANG Q, et al. Automatic used mobile phone color determination: enhancing the used mobile phone recycling in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 187: 106627.
- [26] 何朋蔚. 废旧手机中的高技术矿产资源回收现状与未来展望[J]. *中国矿业*, 2020, 29(11): 32-37.
HE Pengwei. The current status and future outlook of high-tech minerals in waste mobile phones[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(11): 32-37.
- [27] HE P, HU G, WANG C, et al. Analyzing present and future availability of critical high-tech minerals in waste cellphones: a case study of India[J]. *Waste Management*, 2021, 119: 275-284.
- [28] HAMMOND D R, BRADY T F. Critical minerals for green energy transition: a United States perspective[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2022, 36(9): 624-641.
- [29] DOU S Q, XU D Y. The security of critical mineral supply chains[J]. *Mineral Economics*, 2022, 25: 1-12.
- [30] International Energy Agency(IEA). The role of critical minerals in clean energy transitions[R]. 2021.
- [31] 孙笑非, 钱易, 温宗国, 等. 我国“城市矿山”开发利用战略研究[J]. *中国工程科学*, 2017, 19(4): 97-102.
SUN Xiaofei, QIAN Yi, WEN Zongguo, et al. Research on urban mining development in China[J]. *Chinese Engineering Science*, 2017, 19(4): 97-102.
- [32] World Bank. Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition[R]. 2020.
- [33] European Commission. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study[R]. 2020.
- [34] US Department of Energy. Strategy to support domestic critical mineral and material supply chains[R]. 2021.
- [35] 邓毅, 韦洪莲, 罗锦程, 等. 中国废弃电器电子产品环境管理政策与处理行业发展成效及展望[J]. *环境保护*, 2023, 51(8): 57-60.
DENG Yi, WEI Honglian, LUO Jincheng, et al. Effectiveness and prospect of China's waste electrical and electronic equipment management policy and treatment industry development[J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(8): 57-60.
- [36] 生态环境部. 中国电子废物环境综合管理(2012—2021)[R]. 2021.
- [37] SAHA L, KUMAR V, TIWARI J, et al. Electronic waste and their leachates impact on human health and environment: global ecological threat and management[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 24: 102049.
- [38] Mordor Intelligence. 美国可再生能源市场规模和份额分析-增长趋势和预测(2023—2028)[R]. 2023.
- [39] 环球网. 全球动力电池回收产业加速布局, 行业空间潜力巨大[EB/OL]. (2023-07-08)[2023-10-07]. <https://world.huanqiu.com/article/4DcPjh35xv>.
- [40] 中国能源网. 加速开采移动“城市矿产”拓宽绿色经济发展渠道[EB/OL]. (2017-03-24)[2023-10-08]. <https://www.china5e.com/news/news-982355-1.html>.
- [41] BURGER M, STAVROPOULOS S, RAMKUMAR S, et al. The heterogeneous skill-base of circular economy employment[J]. *Research Policy*, 2019, 48(1): 248-261.
- [42] HORBACH J, RENNINGS K, SOMMERFELD K. Circular economy and employment[C]//3 rd IZA Workshop: Labor Market Effects of Environmental Policies. 2015: 1-39.
- [43] EPA (Environmental Protection Agency). Recycling economic information report 2020[R]. 2020.
- [44] HE P W, FENG H B, HU G J, et al. Life cycle cost analysis for recycling high-tech minerals from waste mobile phones in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119498.
- [45] HONMA S, HU J L. Cost efficiency of recycling and waste disposal in Japan[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 284: 125274.
- [46] VISHWAKARMA S, KUMAR V, ARYA S, et al. E-waste in information and communication technology sector: existing scenario, management schemes and initiatives[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 27: 102797.
- [47] World Economic Forum. Globalization 4.0: a better version[R]. 2019.
- [48] XAVIER L H, OTTONI M, ABREU L P P. A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 190: 106840.
- [49] 刘婷婷, 朱坤, 温志超, 等. 废弃电器电子产品互联网回收发展趋势与挑战[J]. *环境保护*, 2023, 51(8): 66-71.
LIU Tingting, ZHU Kun, WEN Zhichao, et al. Development trends and challenges of internet recycling of waste electrical and electronic equipment[J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(8): 66-71.
- [50] 陈丽强, 高明, 梁开荣. 基于 ANP-BPNN 的“城市矿产”开发利用多主体协同影响因素识别[J]. *管理评论*, 2023, 35(2): 16-27.
CHEN Liqiang, GAO Ming, LIANG Kairong. ANP-BPNN model based identification of the factors that affect the multi-agent collaboration of “urban minerals”[J]. *Management Review*, 2023, 35(2): 16-27.
- [51] 李文军, 郑艳玲. 中国废弃电器电子产品行业发展及EPR模式效应[J]. *数量经济技术经济研究*, 2021, 38(1): 98-116.
LI Wenjun, ZHENG Yanling. Waste electrical and electronic products in China and the effects of its EPR system[J]. *Research on Quantitative and Technical Economics*, 2021, 38(1): 98-116.
- [52] 王昶, 胡月昕, 耿红军. 日德城市矿产开发利用的实践及启示[J]. *城市问题*, 2018(4): 94-103.

- WANG Chang, HU Yuexin, GENG Hongjun. Practice and enlightenment of urban mineral development and utilization in Japan and Germany[J]. *Urban Issues*, 2018(4): 94-103.
- [53] GHISELLINI P, NCUBE A, CASAZZA M, et al. Toward circular and socially just urban mining in global societies and cities: present state and future perspectives[J]. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2022, 4: 930061.
- [54] LIU K, TAN Q, YU J, et al. A global perspective on e-waste recycling[J]. *Circular Economy*, 2023: 100028.
- [55] VANEGAS P, PEETERS J R, CATTRYSSE D, et al. Ease of disassembly of products to support circular economy strategies[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 135: 323-334.
- [56] ACHILLAS C, AIDONIS D, VLACHOKOSTAS C, et al. Depth of manual dismantling analysis: a cost-benefit approach[J]. *Waste Management*, 2013, 33(4): 948-956.
- [57] WU C, AWASTHI A K, QIN W, et al. Recycling value materials from waste PCBs focus on electronic components: a review on technologies, obstruction and prospects[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10: 108516.
- [58] LI J, ZENG X, STEVELS A. Ecodesign in consumer electronics: past, present, and future[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 45(8): 840-860.
- [59] KHOR K S, RAMAYAH T, FOULADGARAN H R P. Managing eco-design for reverse logistics[J]. *International Journal of Environment and Waste Management*, 2020, 26(2): 125-146.
- [60] CUDJOE D, WANG H, ZHU B. Assessment of the potential energy and environmental benefits of solid waste recycling in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295: 113072.
- [61] GHISELLINI P, NCUBE A, D'AMBROSIO G, et al. Potential energy savings from circular economy scenarios based on construction and agri-food waste in Italy[J]. *Energies*, 2021, 14(24): 8561.
- [62] LI W, ACHAL V. Environmental and health impacts due to e-waste disposal in China: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 139745.
- [63] YANG H, ZHANG S, YE W, et al. Emission reduction benefits and efficiency of e-waste recycling in China[J]. *Waste Management*, 2020, 102: 541-549.
- [64] ZHU X, LANE R, WERNER T T. Modelling in-use stocks and spatial distributions of household electronic devices and their contained metals based on household survey data[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 120: 27-37.
- [65] 刘婷婷, 吴尚昀, 郑紫晨. 绿色转型背景下我国电器电子产品生产者责任延伸制度发展机遇与挑战[J]. *环境保护*, 2021, 49(14): 34-39.
- LIU Tingting, WU Shangyun, ZHENG Zichen. The development opportunities and challenges of extended producer responsibility of electrical and electronic equipment in China under green transformation background[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(14): 34-39.
- [66] 金祥义, 张文菲. 人工智能与企业污染减排: 智能治理的环境效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(8): 138-145.
- JIN Xiangyi, ZHANG Wenfei. Artificial intelligence and enterprise pollution reduction: environmental effects of intelligent governance[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(8): 138-145.
- [67] 21世纪经济报道. “城市矿产”中蕴含的高质量发展密码: 再生金属如何赋能制造业绿色循环经济发展[EB/OL]. (2023-04-28)[2023-10-07]. <http://www.21jingji.com/article/20230428/herald/f9add2da7c2b37663edc2417b6e2312.html>.
- [68] LIU J, BAI H, ZHANG Q, et al. Why are obsolete mobile phones difficult to recycle in China?[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 141: 200-210.
- [69] 姚海琳, 张翠虹. 政策工具视角下中国城市矿产政策效果评估[J]. *城市问题*, 2018(11): 12-20.
- YAO Hailin, ZHANG Cuihong. Evaluation of the effect of China's urban mineral policy from the perspective of policy tools[J]. *Urban Issues*, 2018(11): 12-20.
- [70] SUN B, SCHNOOR J L, ZENG E Y. Decadal journey of e-waste recycling: what has it achieved?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(18): 12785-12792.
- [71] YANG X S, ZHENG X X, ZHANG T Y, et al. Waste electrical and electronic fund policy: current status and evaluation of implementation in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(24): 12945.
- [72] PORTUGAISE M K, JÓHANNSDÓTTIR L, MURAKAMI S. Extended producer responsibility's effect on producers' electronic waste management practices in Japan and Canada: drivers, barriers, and potential of the urban mine[J]. *Discover Sustainability*, 2023, 4(1): 8.
- [73] SHEN H, LIU Y. Can circular economy legislation promote pollution reduction? evidence from urban mining pilot cities in China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(22): 14700.
- [74] WANG J, WANG Y, ZHANG S, et al. Effects of fund policy incorporating extended producer responsibility for WEEE dismantling industry in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 130: 44-50.
- [75] 韩帅帅, 邓毅, 侯贵光, 等. 废旧动力锂电池回收利用的国际经验及借鉴意义[J]. *环境保护*, 2023, 51(S3): 83-86.
- HAN Shuaishuai, DENG Yi, HOU Guiguang, et al. International management experience of waste power lithium battery recycling and utilization, and its reference significance[J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(S3): 83-86.