

# 资源循环助推碳中和的路径

宋璐璐<sup>1,2</sup>, 熊小平<sup>3</sup>, 陈伟强<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院城市环境研究所;中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 北京 100010

**摘要** 再生资源的循环利用是实现可持续发展和碳中和目标的强大支撑。为了定量评估再生资源循环利用的碳减排潜力,基于物质流分析和生命周期评价方法,核算了大宗物质资源,主要包括水泥、沙子、碎石、砖块、石灰、玻璃、橡胶、木材、塑料、沥青、钢铁、铝和铜等的循环利用潜力,特别对“高耗能、高排放、高产量”的钢铁和水泥行业的碳减排路径和碳中和潜力进行了梳理和分析。测算结果表明,大宗物质资源的需求量将在2022—2025年达峰后持续减少,2030年后物质资源报废量将逐年增加,并于2060年达到约54.6亿t/a,建筑垃圾的比例高达90%且集中在东南沿海省份;2019—2060年,大宗物质资源需求量的减少导致了碳排放的持续降低,若协同资源高效循环策略,2060年碳排放量将下降至4.3亿t/a,比2018年排放水平低77%。其中,废金属尤其是废钢铁的循环利用碳减排潜力最大,若在2060年将废钢铁的循环利用率提高至90%以上,碳减排量将达到4.4亿t/a,比2018年碳排放量降低90%。相比之下,水泥由于回收处理技术和产品回收价值的限制,仅能通过提高资源使用效率和延长产品使用寿命等策略达到碳减排效果。最后,阐述了“十四五”时期作为推动再生资源循环利用的关键期和窗口期需要部署的资源循环政策、模式和技术等,为助力碳中和目标的实现提供重要支撑。

**关键词** 循环经济;资源循环潜力;碳减排路径;碳减排潜力;碳中和

为应对全球气候变化贡献中国力量,中国在2020年明确提出了碳达峰、碳中和目标。碳中和目标的实现必将带来一场深刻的经济社会系统性变革,不断推动经济、能源、环境、气候的可持续发展。从中国当前的碳排放规模和产业结构看,实现碳中和目标极具挑战性。能源转型和碳捕获与封

存技术(CCUS)被认为是实现碳中和目标的重要抓手<sup>[1-3]</sup>。然而,应该清楚地认识到,能源转型是一个漫长且艰难的过程。例如,天然气在世界能源供应中的比例从1%提升至20%用了70 a之久。此外,CCUS还需不断突破有效性、安全性、经济性等技术瓶颈<sup>[4]</sup>。相比之下,资源循环利用是一个成本可控

收稿日期:2022-07-01;修回日期:2022-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(52070178, 52170183);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(71961147003)

作者简介:宋璐璐,副研究员,研究方向为资源循环及其环境效应,电子信箱:llsong@iue.ac.cn;陈伟强(通信作者),研究员,研究方向为资源环境管理与可持续发展,电子信箱:wqchen@iue.ac.cn

引用格式:宋璐璐,熊小平,陈伟强. 资源循环助推碳中和的路径[J]. 科技导报, 2022, 40(24): 5-13; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.24.001

的碳中和方案,是实现可持续发展和碳中和目标的强大支撑。

资源循环利用以“减量化、再利用和再循环”为原则,通过打造“资源-产品-废弃物-再生资源”的发展模式,倡导将物质、能量进行梯次和闭路循环使用,不但可以减少对原生资源的依赖、提升资源综合利用效率,同时还可以有效降低碳排放量,使生产消费过程表现为“两低两高”,即低消耗、低污染、高效率、高循环的模式<sup>[5-7]</sup>。英国艾伦·麦克阿瑟基金会的研究报告指出,若对全球矿产资源加工制造行业进行循环经济改造,可有效减少全球约45%的碳排放。中国作为全球第二大经济体,高能耗和高排放行业(例如钢铁、水泥等)的产品消费量占全球50%以上,再生资源循环利用的碳减排潜力巨大<sup>[1-2]</sup>。面对碳中和目标的国家战略需求,评估和识别中国再生资源的碳减排路径和潜力显得尤为重要和紧迫。

“十三五”期间,中国再生资源循环利用工作有较大突破,环境和经济效益显著。然而,中国资源循环利用工艺技术水平仍落后国际先进水平10~15 a,再生资源回收利用率总体偏低。例如,中国废钢炼钢比例仅为21%,与美国(69%)、欧洲(58%)、日本(84%)的废钢炼钢比例差距较大<sup>[8]</sup>;废纸回收率约为48%,比全球平均水平低10%<sup>[9]</sup>;废玻璃回收利用率仅为35%~40%,显著低于瑞士、德国和日本(回收率均达到80%以上);建筑垃圾的回收率不足10%<sup>[10-11]</sup>,远低于日本的98%<sup>[12]</sup>、荷兰的100%<sup>[13]</sup>、英国的98%<sup>[14]</sup>。总体上,中国固废管理面临着产生强度高、利用不充分、综合利用产品附加

值低的严峻挑战。特别是近年来,中国报废需要回收处理的废旧家电、废旧汽车和建筑垃圾等数量大幅上升<sup>[15]</sup>。固废的随意堆置或填埋造成了大量的资源浪费和严重的环境污染。

随着“十四五”时期城市化的不断深入,中国固废产生量将持续增加。2021年3月,国家发改委等10部委联合发布的《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》中提出,到2025年新增大宗固废综合利用率需达到60%<sup>[15]</sup>。在此背景下,本研究基于动态物质流模型,预测物质资源报废量的产生特征,厘清再生资源的减废降碳路径和碳减排潜力。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 碳减排核算框架和方法

为了探讨再生资源的产生量及循环利用对碳减排的贡献力度,以中国大陆地区31个省级行政区为研究范围,以社会经济系统中“高耗能、高排放、高产量”的13种大宗物质资源(包括水泥、沙子、碎石、砖块、石灰、玻璃、橡胶、木材、塑料、沥青、钢铁、铝和铜)为研究对象,构建了“资源循环-碳减排”(material cycle-carbon emission, MCCE)耦合评估模型,核算了1978—2018年社会经济系统中物质资源的使用存量,预测了2019—2060年物质资源在基准情景和资源高效循环情景下的需求量和报废量,识别了不同物质资源的减废降碳路径,评估了再生资源循环利用的碳减排潜力(图1、表1)。

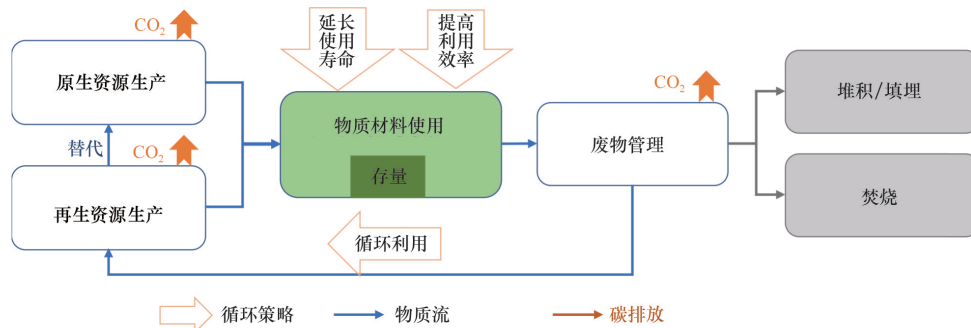


图1 MCCE耦合评估模型核算框架

表1 预测情景

情景	策略	描述
基准情景	—	2019—2060年资源回收率、资源利用效率和产品使用寿命保持不变
资源高效循环情景	高循环利用率	废旧材料的回收利用是最流行的循环经济策略之一。较低的回收率主要是由于产品设计的复杂性、小型化等导致的收集、分离和净化困难。为了评估一个近乎完美的回收策略所产生的碳减排潜力,研究假设回收率将逐渐提高,并在2060年通过改善回收系统和基础设施等手段达到理论最大值
	高利用效率	材料效率逐步提高,通过合理的建筑设计、轻量化的汽车设计、空间共享等策略,使得2060年将材料需求与经济发展脱钩
	长使用寿命	产品的使用寿命可以通过耐用设计、维修、再制造和组件重用等来延长。参考以往研究结果,假设2019年后新生产的产品将按照更长的寿命设计来制造和生产。产品的平均寿命将逐渐增加,到2060年达到理论最大值。研究没有考虑现有产品的寿命延长

模型核算主要分为物质代谢层和碳排放层,主要内容包以下4方面。

1) 基于物质流分析方法,搜集了各省级行政区1978—2018年社会经济系统五大终端部门(包括房屋建筑、基础设施、交通设备、机械设备、家用电器)中103种产品的社会保有量,评估了各产品中13种物质资源的使用强度,核算了31个省级行政区13种大宗物质资源的使用存量(式(1)),识别了物质资源使用存量的历史发展规律遵循“S型”曲线。

$$S(t_h) = I(t_h)M(t_h) \quad (1)$$

式中, $S(t_h)$ 为第 $t_h$ ( $1978 \leq t_h \leq 2018$ )年的物质资源使用存量(即物质资源保有量); $I(t_h)$ 为第 $t_h$ 年产品中物质的使用强度; $M(t_h)$ 为第 $t_h$ 年的产品保有量。

未来( $2019 \leq t_f \leq 2060$ )的物质资源使用存量( $S_f$ )由未来人口( $P_f$ )和人均物质资源使用存量( $S_p$ )计算得到

$$S_f(t_f) = P_f S_p \quad (2)$$

$$S_p(t_f) = \frac{\hat{s}}{1 + \left(\frac{\hat{s}}{c_0} - 1\right) \exp\left(-\frac{\hat{s} d_0}{c_0(\hat{s} - c_0)}(t_f - t_0)\right)} \quad (3)$$

式中, $c_0$ 为2018年人均物质资源使用存量; $d_0$ 为2018年人均物质资源使用存量变化率; $t_0=2018$ ; $\hat{s}$ 为人均物质资源使用存量的饱和值(参数设置详见表2)。

2) 在物质流分析中,产品达到服务年限后会

表2 产品使用寿命和资源利用效率的参数设置

终端部门	寿命/a		资源利用效率/(t·人 <sup>-1</sup> )	
	基准情景	长使用寿命情景	基准情景	高利用效率情景
房屋建筑	50	75	180	135
基础设施	50	75	15	12
交通设备	25	30	3	1
机械设备	30	35	1	1
家用电器	15	18	1	1

产生报废量( $F_{out}$ ),而新投入使用的称之为需求量( $F_{in}$ )。基于服务年限模型,物质资源理论报废量、需求量和保有量之间的关系为

$$F_{out}(t) = \sum_{t' \leq t} F_{in}(t') \lambda(t, t', \tau, \sigma) \quad (4)$$

$$F_{in}(t) = S(t) - S(t-1) + F_{out}(t) \quad (5)$$

$$\lambda(t, t', \tau, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(t - t' - \tau)}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

式中, $F_{out}$ 为第 $t$ 年的理论报废量; $F_{in}$ 为第 $t$ 年的理论需求量; $S(t)$ 、 $S(t-1)$ 分别为第 $t$ 、 $t-1$ 年的使用存量(即保有量); $t'$ 为初始年; $\tau$ 为产品的平均使用寿命; $\sigma$ 为使用寿命的标准差。

物质资源报废后会被回收利用,回收量取决于资源回收率( $r$ )。回收的再生资源可直接替代原生资源进行生产加工,因此,资源需求量分为原生资源需求量( $F_{primary}$ )和再生资源替代量( $F_{secondary}$ ):

$$F_{secondary}(t) = F_{recycl}(t) = F_{out}(t) \times r \quad (7)$$

$$F_{primary}(t) = F_{in}(t) - F_{recycl}(t) \quad (8)$$

3) 在物质代谢层共设置了2个对比情景,即

基准情景和资源高效循环情景。基准情景为当前发展路径,假设2060年中国大宗物质资源人均保有量将沿着发达国家的发展轨迹达到200 t/a;房屋建筑、基础设施、交通设备、机械设备和家用电器部门产品的使用寿命分别为50、50、25、30、15 a;各终端部门的物质资源回收率维持2018年水平。

在资源高效循环情景下,假设2060年各物质资源的回收率将逐步提升至最高水平(表3);物质资源利用效率显著提高,人均物质资源保有量由目前的131 t/a逐步提升为150 t/a;通过修缮或加固手段有效延长房屋建筑、基础设施、交通设备、机械设备和家用电器部门产品的使用寿命,使其分别达到75、75、30、35、18 a。

4) 该部分属于碳排放层。基于生命周期评价

方法,检索相关数据库和文献报告,明确不同物质资源在“开采-加工-制造”(原生资源生产)和“回收-处理-循环”(再生资源生产)阶段的CO<sub>2</sub>排放强度,识别不同物质资源的减废降碳路径,评估原生资源生产和再生资源循环利用阶段的CO<sub>2</sub>排放量,辨识不同减废降碳路径下资源循环利用的碳减排潜力。

$$C_{\text{pri}}(t) = F_{\text{primary}}(t)e_{\text{pri}} \quad (9)$$

$$C_{\text{sec}}(t) = F_{\text{recycl}}(t)e_{\text{sec}} \quad (10)$$

式中, $e_{\text{pri}}$ 为原生资源生产阶段的CO<sub>2</sub>排放密度; $e_{\text{sec}}$ 为再生资源生产阶段的CO<sub>2</sub>排放密度; $C_{\text{pri}}$ 为第 $t$ 年原生资源生产阶段的CO<sub>2</sub>排放量; $C_{\text{sec}}$ 为第 $t$ 年再生资源生产阶段的CO<sub>2</sub>排放量。本研究中用的碳排放密度均来自Ecoevent3.8数据库。

表3 物质资源回收率

物质资源	回收率/%			物质资源	回收率/%		
	1978年	2018年	2060年		1978年	2018年	2060年
钢铁	—	70	90	砖块	15	—	—
铜	10	43	93	石灰	—	—	—
铝	2	62	95	玻璃	—	13	80
水泥	—	—	—	沥青	—	27	100
沙子	—	10	100	橡胶	—	9	85
碎石	—	10	100	塑料	—	25	54
木头	—	10	100				

## 2 结果与分析

### 2.1 不同资源循环利用的碳减排潜力

当前,中国大宗物质资源人均保有量达到131 t/a,仅相当于发达国家在20世纪70年代的水平。参考发达国家的发展路径,中国大宗物质资源人均保有量将持续增长并最终达到饱和,这将导致大宗物质资源的需求量会在达到峰值(2022—2025年达到约74.8亿t/a)后逐渐下降,2060年大宗物质需求量将下降至41.1亿t/a。

在以上背景下,2019—2060年大宗物质生产的碳排放量也会呈现下降趋势。基准情景下,2035、2060年的碳排放量将分别降低到11.4亿、7.5亿t/a;资源高效循环情景下,由不同循环策略导致的碳减排效应将持续加大,2035年碳排放量将低

至6.1亿t/a,比2018年排放水平低67%。2060年碳排放量为4.3亿t/a,比2018年排放水平低77%(图2)。

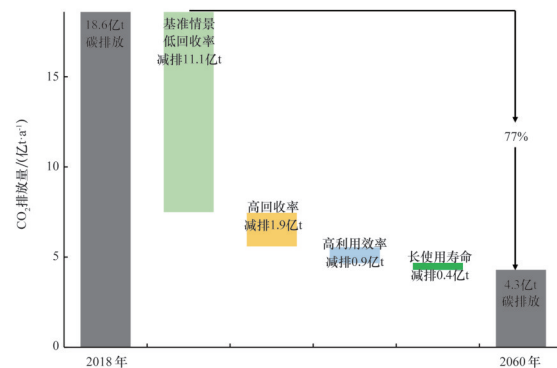


图2 2060年中国13种大宗物质资源循环利用的碳减排潜力预测

不同资源循环策略的碳减排潜力有所不同。若将资源回收率持续提高(如,废钢铁等基础金属回收率提升至90%以上,混凝土的回收率提升至100%等),可使2060年的碳排放量降低至5.6亿t(比基准情景低25%);通过简化产品设计、改用轻型材料等措施将资源利用效率提升25%,可使碳排放量降低至4.7亿t(比基准情景低38%);将产品使用寿命延长20%~50%(建筑和基础设施寿命由50 a延长到75 a,交通设备由15 a延长至18 a),2060年碳排放量可低至4.3亿t(比基准情景低42%)(图2)。

东部沿海省份将成为大力推广循环经济策略的先行者。由于经济发展水平和城镇化进程的区域不平等,较发达的东部省份的物质资源保有量占全国总量的60%。随着物质资源的迅速饱和,东南沿海省份将比欠发达的内陆省份提前10~20 a进入“废物时代”。在2019—2040年,一些发达省份(包括北京、天津、江苏、上海、浙江、广东等)的物质资源报废量将增加1倍,并于2030—2040年超过需求量,这为更大程度提高再生资源的回收再制造提供了可能。相比之下,欠发达地区(包括新疆、云南、贵州、宁夏等)的物质资源报废量在2060年前无法超过需求量。届时,东南沿海省份过剩的物质资源报废量可弥补内陆省份再生资源的需求缺口,以达到缓解工业资源匮乏和降低环境污染等目的。

水泥和钢铁行业是中国工业部门中两大高碳排放行业,碳排放量占工业部门碳排放总量的60%<sup>[16]</sup>。辨识和评估以上行业中再生资源的减废降碳路径及其碳减排潜力是实现工业部门碳减排的重要支撑。

### 2.1.1 钢铁

钢铁是全球碳密集型产品之一<sup>[17]</sup>。在当今的“钢铁时代”,钢铁产品是经济建设和日常生活的重要功能性材料,是国家和国防现代化建设的重要保障性材料。在全球生产的金属材料中,钢铁占95%<sup>[18]</sup>。中国是全球最大的钢铁生产和消费国,2020年中国粗钢产量达到约11亿t,行业碳排放量为15亿t左右<sup>[16]</sup>,占工业生产排放总量的33%<sup>[19]</sup>。

目前,炼钢工艺以“长流程”(即高炉钢,以铁矿石为原料)和“短流程”(即电炉钢,以废钢为原料)为主。与长流程相比,短流程炼钢的碳减排潜力巨大,电炉吨钢碳排放仅0.2 t,显著低于高炉吨钢1.7 t碳排放量<sup>[20]</sup>。

中国钢铁的需求量将在2022—2025年达峰后逐渐降低,同时钢铁的报废量将逐年增加。2035年钢铁需求量将降低至1.7亿t/a,2060年持续降低至1.5亿t/a。2035年钢铁报废量将增加至1.1亿t/a,2060年将超过需求量并达到1.6亿t/a。废钢铁将集中产生于建筑部门(占总报废量的50%),其次是基础设施和交通部门(合计占总报废量的40%)。

随着钢铁报废量的持续增加,可逐渐提高电炉钢炼钢比例(废钢炼钢),减少钢铁行业的碳排放。基准情景下,钢铁行业碳排放量将由2018年的4.8亿t降低至2060年的0.7亿t;资源高效循环情景下,钢铁行业碳排放量将于2035年降低至1.0亿t,2060年持续降低至0.3亿t/a,比基准情景减少了55%的碳排放。

对比不同的资源循环策略,可以发现钢铁行业通过提高回收率的碳减排潜力最高。具体而言,若将废钢铁回收率逐步提升至90%,2060年钢铁行业的碳排放量可降低至0.5亿t/a,比基准情景减少了40%的碳排放;提高钢铁利用效率可减少11%的碳排放,碳排放量将持续降低至0.4亿t/a;延长钢铁产品使用寿命可减少4%的碳排放,2060年碳排放量低至0.3亿t/a(图3)。

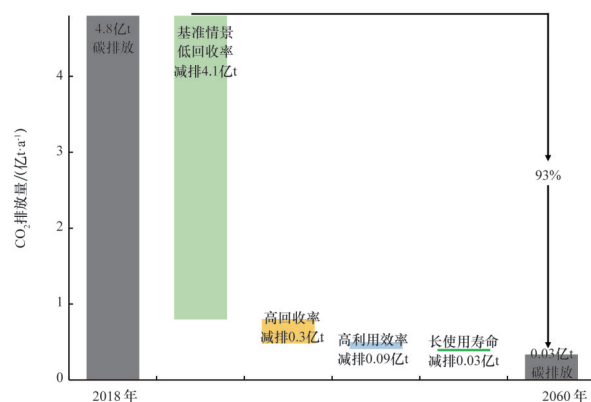


图3 钢铁循环利用的碳减排潜力

### 2.1.2 水泥

中国是全球水泥生产第一大国,生产全球近60%的水泥<sup>[21]</sup>,水泥行业的碳排放量占全球水泥产业碳排放总量的50%以上,占中国工业生产碳排放总量的26%<sup>[19]</sup>。水泥行业是高减排难度(hard-to-abate)工业行业之一,这不仅是因为水泥的生产工艺过程产生CO<sub>2</sub>排放,更是由于水泥行业整体体量大但单体规模小,且因绝对价格较低而难以承受很高的碳减排成本<sup>[22-23]</sup>。水泥主要被用于制作混凝土,在废物处理端,废旧混凝土无法被回收再生为水泥。因此,水泥目前没有成本低廉且技术可行的循环利用途径和技术手段<sup>[24-25]</sup>。

随着房地产行业的持续下行和人们对住宅需求量的降低,水泥的需求量将持续降低。评估结果表明,水泥的需求量将于2035年降低至5.9亿t/a,于2060年降低至5.0亿t/a。此外,随着往年建制的建筑寿命的终结,水泥的报废量将逐年增加。2060年水泥的报废量将增加至6.8亿t/a,东南沿海地区将是集中产生的重要区域。

基准情景下,水泥行业的碳排放量将在2022—2025年达到峰值后持续下降,2035年水泥行业的碳排放量为4.1亿t/a,2060年降低至3.5亿t/a;资源高效循环情景下,水泥行业的碳排放量将于2060年降低至2.7亿t/a,比基准情景减少了22%。

水泥行业的碳减排策略主要依赖延长建筑寿命和提高水泥的利用效率。其中,提高水泥的利用效率可使2060年碳排放量减少16%(与基准情景相比),并达到3.0亿t/a;延长水泥产品的使用寿命可减少2060年碳排放量的6%(图4)。

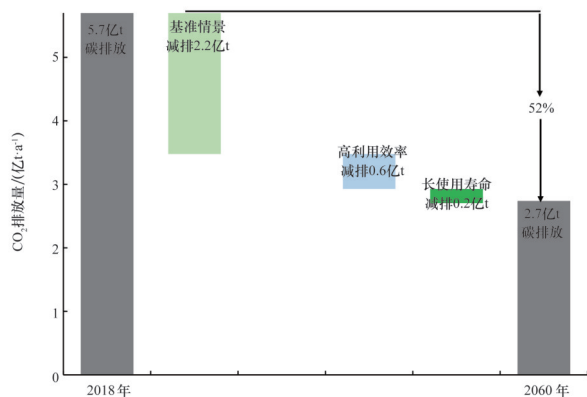


图4 水泥的碳减排潜力

### 2.2 提升资源循环碳减排潜力的对策建议

与能源转型和CCUS技术相比,资源的循环利用是当下成本可控、可复制、可推广的碳减排方案。特别是,中国目前的能源结构仍以煤炭、石油等传统化石燃料为主<sup>[21]</sup>,高耗能、高排放行业的低碳技术起步较晚,能源替代和CCUS仍处于前期研究阶段,未来能否大规模推广和应用还是未知数。相比之下,资源循环利用的碳减排潜力巨大且技术可行、成本可控。然而,中国再生资源行业仍需克服定位不明确、分拣水平和规范化水平低、回收设施缺乏用地保障、低值可回收物回收利用难等突出问题<sup>[15]</sup>。推进资源消费从线性模式走向闭路循环模式,是一场从理念、技术、管理到生产、消费的系统性变革。“十四五”是推动资源循环利用的重要窗口期,是政府精准部署再生资源回收治理体系、企业持续落实绿色生产理念和公众践行低碳绿色生活方式的关键期。

1) 政府应发挥“指挥棒”的作用,识别关键部门和关键物质资源的减废降碳路径,制定相应的政策法规去规划、扶持、监督全社会行为,充分发挥引导、调动和约束作用。

首先,大力推动废旧金属的闭路循环,攻克回收工艺关键技术,提升再生产品的质量和清洁化水平。与其他大宗物质资源相比,废金属的循环利用具有较大的碳减排潜力<sup>[26]</sup>。随着城市化的不断深入,废金属产量将会逐年增加。因此,政府亟需:完善废金属闭路循环体系,构架严格的分类、除杂等预处理标准、质量分类标准和监管标准;辨识不同产品或零部件的循环路径并构建实施方案和关键技术清单,完善废弃物全过程、精细化循环方案;持续完善产业结构,挖掘废金属再生潜力,提升再生产品比重;攻克回收工艺的关键技术,降低痕量金属的污染。

其次,合理规划建筑规模,减少过量建设,以“修缮”代替“大拆大建”。建材工业是中国碳排放最大的工业部门之一,也是未来最大的固废产生源,减少建材的需求量并延长建筑寿命是未来建材工业的重要减排路径<sup>[1, 27-28]</sup>。因此,各地政府应依据未来人口增长规模明确建制总量。在执行过程

中,地方政府应严格控制新开工房屋面积,并将这一指标列入新建房屋节能论证体系;以“修缮”代替“大拆大建”,发展建筑寿命监测、诊断、评估、维修改造等技术,增加建筑维修与功能提升的比例;合理规划并逐步实现对老旧小区、既有市政基础设施等的改造升质,提升建筑和基础设施的利用效率;针对建筑垃圾的存量、新增快、区域特征明显等特点,为建筑垃圾回收企业提供用地保障,提升建筑垃圾的资源化利用技术,降低再生产品成本,提升再生产品的市场竞争力和认可度。

再次,提升资源综合利用效率,促进源头减量。强化部门合作,提倡和引导企业通过生态设计、清洁生产和绿色供应链管理等方式减少原材料投入以满足既定生产目的和消费需求,减少有毒有害原辅料使用;加强立法,强制企业实施绿色开采,减少尾矿等矿业固体废物产生量;督促企业强化施工质量管控,减少因质量问题导致的返工或修补等;鼓励企业推行绿色供应链管理,形成固体废物产生量小、循环利用率高、处理处置合适的生产方式;扶持企业推广高标号、高强度、高性能产品,创新材料使用方式以实现材料的高效应用。

最后,深化固废资源化管理改革,制定更有力的固废利用率约束性目标。“十四五”期间,采取自上而下和自下而上相结合的路径,依据发改委等10部委制定的全国固废利用率总量控制目标<sup>[15]</sup>,各地方政府应根据当地的“再生资源禀赋”落实任务指标,并制定地方性法规和政策以促进分配指标的完成;针对不同再生资源行业修订相关的管理条例,同时设立准入制度,从建设标准、设施设备、产品质量、环境保护、经营管理及安全生产等方面设立准入门槛,避免因企业良莠不齐造成非法交易和二次污染,分类别、分阶段的切实推进再生资源的回收利用;加强基础设施建设及职能部门的监管能力,促进易回收产品实现100%回收;国家设立专项资金加大对资源循环利用基地和再生资源产业的政策及资金支持,由地方政府协调有关部门制定具体扶持办法,同时加强跟踪监督,引导企业开展再生资源综合利用并加大技术研发力度,扎实推进再生资源的循环利用。

2) 企业作为资源生产主体,应加大低碳创新技术和产品绿色设计攻关,从源头上重视产品的拆解和回收。加强企业研发力度,支持固体废物与能源、材料、信息等多学科的联合创新研究,开发固体废物的智能化分类技术。攻克废金属、建筑垃圾和废塑料等再制造工艺的关键技术,持续优化再生产品的质量;设立相关科研专项推动光伏板和动力电池等新兴废弃物的回收拆解,促进循环低碳技术的研发与应用;产品设计要兼顾材料的节约性和零件的可拆解性,再通过回收政策的约束,推动回收体系和渠道的不断完善,同时提高再生产品的技术标准。促进产学研深度融合,加强行业技术实践与原创理论相结合,推动原创技术的转化和工程应用。

3) 公众作为产品消费主体,应在废物治理前端发挥强大的支撑作用。加强商户、社会组织、居民等在源头处的垃圾分类投放,可减少垃圾处理量和处理设备、降低再生资源处理成本和提升垃圾处理处置效率,其环境和经济效益巨大。近年来,国家发改委、住建部、教育部等多个部门积极响应垃圾分类工作,相继出台了《生活垃圾分类制度实施方案》<sup>[29]</sup>《关于加快推进部分重点城市生活垃圾分类工作的通知》<sup>[30]</sup>《关于在学校推进生活垃圾分类管理工作的通知》<sup>[31]</sup>《关于进一步推进生活垃圾分类工作的若干意见》<sup>[32]</sup>等一系列方案,为垃圾分类工作提供了制度化保障,但在垃圾分类工作的推动中还应注意:通过有偿回收方式增加居民的垃圾分类动力;通过社区向居民分发属性分类垃圾袋,引导居民主动分类,避免“先分后混”的垃圾回收现象;编制垃圾分类手册,在社区、学校、工厂等场所进行公益宣传,将垃圾分类工作列入文明单位考核标准,对成效差的单位进行适当的惩戒。

### 3 结论

资源循环可有效缓解资源约束、减轻环境压力,是中国应对气候变化、实现碳中和目标的强大支撑。中国物质资源的循环利用策略可使2060年碳排放量降低至4.3亿t,相当于2018年工业生产

碳排放的23%。然而,并不是所有的物质资源均可通过提高回收率来降低碳排放。废金属具有高循环利用潜力和碳减排潜力,因此,大力推动废旧金属的闭路循环,攻克回收工艺关键技术,提升再生产品的质量和清洁化水平是实现金属循环利用的重要途径。相比之下,水泥等建筑材料因没有成本低廉且技术可行的循环利用途径和技术手段,因此,合理规划建筑规模,减少过量建设,以“修缮”代替“大拆大建”,促进源头减量并提升资源利用效率是实现水泥等建筑材料的重要减排路径和手段。

在实践中,推进资源消费从线性模式走向循环模式,是一场从理念、技术、管理到生产、消费的系统性变革,这场变革需要形成以政策为指引、企业为主体、公众广泛参与的多元共治体系。在双碳战略中需要明确资源循环的重要作用,完善相关政策扶持,突出抓好重点领域资源循环利用,加强资源循环协同减碳的国际合作。

### 参考文献(References)

- [1] 中国尽早实现二氧化碳排放峰值的实施路径研究课题组. 中国碳排放: 尽早达峰[M]. 北京: 中国经济出版社, 2018.
- [2] Ellen M F. Completing the picture: How the circular economy tackles climate change[R]. London: Ellen Macarthur Foundation, 2019.
- [3] 黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1010-1018.
- [4] 比尔·盖茨. 气候经济与人类未来[M]. 北京: 中信出版社, 2021.
- [5] Morsetto P. Targets for a circular economy[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 153: 104553.
- [6] Enkvist P-A, Klevnäs P. The circular economy: A powerful force for climate mitigation[R]. Stockholm: Material Economics, 2018.
- [7] 诸大建. 可持续发展呼唤循环经济[J]. 科技导报, 1998, 16(9): 39-42.
- [8] Bureau of International Recycling. World steel recycling in figures 2016-2020[R]. Belgium: BIR, 2021.
- [9] 光大证券研究所. 循环经济: 对抗熵增, 助力碳中和与双循环[R]. 上海: 光大证券研究所, 2021.
- [10] Han J, Chen W Q, Zhang L, et al. Uncovering the spatio-temporal dynamics of urban infrastructure development: A high spatial resolution material stock and flow analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52: 12122-12132.
- [11] Zhang C, Hu M, Dong L, et al. Co-benefits of urban concrete recycling on the mitigation of greenhouse gas emissions and land use change: A case in Chongqing metropolis, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 481-498.
- [12] Tam V W. Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(7): 688-702.
- [13] Zhang C, Hu M, Yang X, et al. Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 266: 121718.
- [14] Barritt J. An overview on recycling and waste in construction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 2016, 169(2): 49-53.
- [15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》[EB/OL]. (2021-03-18) [2022-09-29]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202103/t20210324\\_1270286\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202103/t20210324_1270286_ext.html).
- [16] International Energy Agency. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [17] Bo X, Jia M, Xue X, et al. Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions [J]. Nature Sustainability, 2021, 4(9): 811-820.
- [18] U.S. Geological Survey. Iron and steel statistics and information[EB/OL]. (2022-01-20) [2022-09-29]. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/iron-and-steel-statistics-and-information>.
- [19] Allwood J M, Cullen J M, Carruth M A, et al. Sustainable materials: With both eyes open[M]. Cambridge: UIT Cambridge Limited, 2012.
- [20] Material Economics. The circular economy: A powerful force for climate mitigation[R]. Stockholm: Material Economics, 2018.
- [21] International Energy Agency. Cement[R]. Paris: IEA, 2021.
- [22] Cao Z, Myers R J, Lupton R C, et al. The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3777.
- [23] 麦肯锡公司大中华区. “中国加速迈向碳中和”水泥篇: 水泥行业碳减排路径[R]. 上海: 麦肯锡公司大中华区, 2021.
- [24] Huang B, Gao X, Xu X, et al. A life cycle thinking framework to mitigate the environmental impact of building materials[J]. One Earth, 2020, 3(5): 564-573.
- [25] Worrell E, Reuter M A. Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [26] Reck B K, Graedel T E. Challenges in metal recycling

- [J]. Science, 2012, 337(6095): 690–695.
- [27] 中国建筑材料联合会. 中国建筑材料工业碳排放报告(2020年度)[R]. 北京: 中国建筑材料联合会, 2021.
- [28] Jin R, Yuan H, Chen Q. Science mapping approach to assisting the review of construction and demolition waste management research published between 2009 and 2018 [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 140: 175–188.
- [29] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 生活垃圾分类制度实施方案[EB/OL]. (2017-03-18)[2022-09-29]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfl/qt/201703/t20170331\\_966653.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfl/qt/201703/t20170331_966653.html?code=&state=123).
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于加快推进部分重点城市生活垃圾分类工作的通知[EB/OL]. (2018-01-08) [2022-09-29]. [http://www.gov.cn/xinwen/2018-01/08/content\\_5254498.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2018-01/08/content_5254498.htm).
- [31] 中华人民共和国教育部. 关于在学校推进生活垃圾分类管理工作的通知[EB/OL]. (2018-02-12)[2022-09-29]. [http://www.gov.cn/xinwen/2018-02/12/content\\_5266175.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2018-02/12/content_5266175.htm).
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于进一步推进生活垃圾分类工作的若干意见[EB/OL]. (2020-11-27) [2022-09-29]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/05/content\\_5567136.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/05/content_5567136.htm).

## Reducing carbon emissions by recycling bulk materials: Potentials and pathways

SONG Lulu<sup>1,2</sup>, XIONG Xiaoping<sup>3</sup>, CHEN Weiqiang<sup>1,2\*</sup>

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Institute of Resources and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council, Beijing 100010, China

**Abstract** The recycling of renewable resources is a feasible, cost-controllable, replicable and popularizable carbon emission reduction scheme, which is a strong support for achieving sustainable development and carbon neutrality. In view of the lack of quantitative assessment of carbon emission reduction potential of renewable resources recycling, this study evaluates the recycling potential of bulk material resources, including cement, sand, gravel, brick, lime, glass, rubber, wood, plastics, asphalt, steel, aluminum and copper. In particular, the carbon emission reduction path and carbon neutralization potential of the steel and cement industries with "high energy consumption, high emission and high output" were sorted out and quantitatively assessed. The calculation results show that the demand for bulk material resources will continue to decrease after reaching the peak around 2025, and the amount of scrapped material resources will increase after 2030. The amount of scrapped material resources will reach about 5.46 billion tons per year in 2060, and the proportion of construction waste will be as high as 90% and concentrated in the southeastern coastal provinces. From 2019 to 2060, the reduction of demand for bulk material resources has led to the continuous reduction of carbon emissions. If the circular economy strategies are coordinated, the CO<sub>2</sub> emissions in 2060 will be reduced to 430 million tons per year, 77% lower than the emission level in 2018. Among them, the recycling of scrap metals, especially scrap iron and steel, has the greatest potential for CO<sub>2</sub> emission reduction. If the recycling rate of scrap iron and steel is increased to more than 90% in 2060, the carbon emissions of the iron and steel industry in 2018 will be reduced by 90%, and the carbon emissions will be reduced by 440 million tons. In contrast, due to the limitation of recycling technology and product recycling value, cement production can only achieve CO<sub>2</sub> emission reduction by improving resource efficiency and prolonging product service life. Finally, this study describes the resource recycling policies, models and technologies that need to be deployed during the "14th Five-Year Plan" period as the key period and window period to promote the recycling of renewable resources. Our study provides important support for the realization of carbon neutrality goals.

**Keywords** circular economy; resource recycling potential; carbon emission reduction path; carbon emission reduction potential; carbon neutralization ●



(责任编辑 刘志远)