



移动扫码阅读

袁嘉翼, 陈楚珂, 吴悦菡, 等. 中国工业固废的演化与驱动机制: 数据驱动分析 [J]. 能源环境保护, 2026, 40(2): 62-73.

YUAN Jiayi, CHEN Chuke, WU Yuehan, et al. Evolution and Driving Mechanisms of Industrial Solid Waste in China: A Data-Driven Analysis [J]. Energy Environmental Protection, 2026, 40(2): 62-73.

中国工业固废的演化与驱动机制: 数据驱动分析

袁嘉翼¹, 陈楚珂^{1,*}, 吴悦菡¹, 陈思晨¹, 常慧敏², 杨航¹, 徐明³

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 清华苏州环境创新研究院 天工智库中心,

江苏苏州 215163; 3. 清华大学环境学院钢铁工业环境保护全国重点实验室, 北京 100084)

摘要: 在工业化持续推进与“双碳”目标约束并行的背景下, 我国工业固体废物的产生呈现长期高位增长、结构调整和治理转型并存的复杂态势。厘清工业固废长期演化阶段与主导驱动力, 对于制定差异化、阶段性控废政策具有重要意义。本研究系统分析了 2003—2019 年间我国城市工业固体废物产生的长期演化阶段结构及其驱动力在不同阶段中的变化特征。研究表明, 工业固体废物产生经历了 2003—2007、2008—2012 和 2013—2019 年三个稳定的阶段, 尽管总量持续增长, 但增速显著放缓。人口规模与经济富裕度构成的规模效应在各阶段持续增强, 占比达 33.4%。然而增速放缓的主要原因在于产业结构效应由正向拉动($+1.13 \times 10^4$ 万吨)转为显著的负向抵消(-2.90×10^4 万吨), 与此同时, 强度效应保持相对稳定且发挥一定的抑制作用。在区域层面, 各地通过结构或强度降低等不同路径抵消增长的拉动作用, 东北地区在后期阶段出现了强度效应由抑制转为正向的特殊情况; 城市层面上, 工业固体废物产生对工业活动强度相关因素的短期年际变化更为敏感, 而对规模与结构变量的年际变化响应有限。在多指标竞争条件下, 治理绩效和过程性指标表现出更高的稳定性, 更适合作为城市年度固废治理的操作性工具。本研究结果为不同阶段和尺度上协调结构性调控与过程性管理, 提升工业固体废物治理的针对性与可执行性提供了有力的实证支持。

关键词: 工业固体废物; 阶段划分; 结构性转型; 城市异质性; 随机森林

中图分类号: X505

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2026)02-0062-12

Evolution and Driving Mechanisms of Industrial Solid Waste in China: A Data-Driven Analysis

YUAN Jiayi¹, CHEN Chuke^{1,*}, WU Yuehan¹, CHEN Sichen¹,
CHANG Huimin², YANG Hang¹, XU Ming³

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. TianGong Think Tank, Research Institute for Environmental Innovation (Suzhou), Suzhou 215163, China; 3. State Key Laboratory of Iron and Steel Industry Environmental Protection, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Against the backdrop of continued industrialization and China's "dual-carbon" targets, industrial solid waste (ISW) generation has exhibited persistent growth amidst structural adjustments and governance transitions. Understanding whether this growth follows a stable trajectory or undergoes stage-specific shifts is essential for interpreting governance outcomes and designing differentiated waste

收稿日期: 2026-01-23

修回日期: 2026-02-05

接受日期: 2026-02-07

DOI: 10.20078/j.eep.20260301

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52400239)

第一作者: 袁嘉翼(1999—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要研究方向为产品可持续性设计。E-mail: yuanjy24@mails.tsinghua.edu.cn

*通讯作者: 陈楚珂(1997—), 女, 福建龙岩人, 助理研究员, 主要研究方向为基于人工智能的产品生命周期影响评价。

E-mail: chukechen@tsinghua.edu.cn

management strategies. This study applies a data-driven analytical framework to a city-level panel dataset to identify the long-term stage structure of urban ISW generation in China from 2003 to 2019 and to examine how its driving mechanisms evolve across different stages and spatial scales. First, unsupervised time-series structural learning is employed to detect endogenous stage boundaries in national ISW generation without predefined breakpoints. Second, inter-stage changes are decomposed into population scale, economic affluence, industrial structure, and composite intensity effects using the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) method. Third, city-level dynamics are analyzed using two-way fixed effects models and a random forest-based feature selection procedure to identify governance-relevant signals that remain stable at the annual municipal scale. We identify three stable stages: 2003–2007, 2008–2012, and 2013–2019. Total ISW continued to increase in all stages; however, the growth rate declined over time. Scale effects remained persistently positive, strengthened across stages, and explained 33.4% of cumulative growth. The post-2013 slowdown primarily reflects a structural transition. The industrial structure effect shifted from a positive contribution (+113 Mt) to a substantial negative contribution (−290 Mt). In contrast, the intensity effect was negative across all stages, with minimal variation in magnitude, indicating a stable offset rather than a trigger for a stage change. Regionally, all major regions shared a common temporal stage structure but relied on different pathways to mitigate scale-driven growth. In the later stage (2013–2019), the Eastern and Central regions primarily depended on intensity-related mitigation, whereas the Western regions exhibited stronger structural offsets. Northeast China, however, demonstrated a notable deviation in driving mechanisms in the later stage, during which the intensity effect turned positive and became the dominant contributor to regional ISW changes. City-level evidence suggests this pattern is consistent in direction across cities but highly concentrated in magnitude, with a small number of cities accounting for most of the positive intensity contribution. At the city scale, ISW generation is more responsive to short-term interannual changes in industrial activity intensity than to variations in economic scale or industrial structure, once time-invariant city characteristics and common shocks are controlled for (coefficient = 0.0787, $p = 0.032$). Under multi-indicator competition, performance- and process-oriented indicators, such as comprehensive ISW utilization, demonstrate greater stability and explanatory power in annual variations, standing out as especially informative for municipal operations. Overall, the findings suggest that the recent slowdown in China's ISW growth primarily reflects a structural transition rather than a weakening of scale pressures. Effective governance, therefore, requires aligning policy instruments with stage-specific driving mechanisms, emphasizing structural adjustment at the macro level while strengthening process-oriented management at the urban scale.

Keywords: Industrial solid waste; Stage Identification; Structural transition; Urban heterogeneity; Random Forest

0 引 言

在工业化持续推进与“双碳”目标约束并行的背景下,我国工业固体废物产量长期呈现高位增长、结构调整与治理转型并存的复杂态势。工业固体废物是工业化进程中最具规模的环境压力之一^[1-2],截至2023年,全国排放源统计调查范围内一般工业固体废物产生量约为42.7亿吨,综合利用量约为25.8亿吨,处置量约为8.3亿吨^[3]。工业

固体废物产生水平与资源能源型产业扩张、城市产业结构调整及治理能力提升高度相关。在我国长期快速工业化与绿色转型并行的背景下,工业固体废物产量呈现显著的阶段性节奏变化与空间差异^[4]。不同地区、不同时期的增长动力与约束机制并不一致^[5]。

与此同时,随着资源环境约束趋紧以及碳达峰碳中和目标的提出^[6],工业固体废物治理逐步从末端处置导向,转向源头减量^[7-8]、结构优化与效

率提升^[9-11]的系统性调控路径。然而,在转型过程中,固体废物产生的长期演化规律及其阶段性驱动结构仍缺乏深入研究^[12]:一方面,现有研究多假定工业固废增长机制在较长时期内相对稳定,难以体现不同发展阶段之间增长速度、结构贡献与治理绩效的显著差异^[13];另一方面,阶段性政策目标与区域差异化管控实践,也亟须以可复现的长期演化事实作为基础支撑^[14]。因此,对工业固体废物长期演化过程中的阶段结构进行系统识别,不仅是理解固废治理成效与演变逻辑的基础前提,也是识别关键政策窗口、解释区域差异并制定差异化、阶段化控废政策的重要前提^[15-16]。

已有研究指出,在快速工业化阶段,全国层面的工业固体废物产量快速上升,并与经济增长高度耦合,而在2011至2013年前后出现明显的增速变化并进入增幅放缓或阶段平台期^[5]。脱钩视角的证据也表明,1978—2011年污染排放与经济增长保持较强耦合,2011年后排放增速趋稳甚至略降,表明污染排放增长与环境压力之间的关系发生阶段性松动^[15-17]。政策研究为治理节奏的阶段划分进一步提供制度层面的旁证,即2003—2012年被界定为循环经济稳步推进阶段,2013—2019年被界定为监管强化与政策创新阶段,显示2013年前后可能存在具有制度含义的阶段转折^[18-19]。

需要强调的是,阶段转折并不意味着永久峰值。相关研究^[20-21]表明,工业固体废物产量可能呈现“N型”轨迹,即在达到一定发展水平后增速放缓或阶段下降,但在更高阶段仍可能存在反弹。全国统计结果显示,工业固体废物亦呈现“高位-回落-再上升”的阶段性增长,其中一般工业固体废物产生量在2013年前后处于高位,2015至2016年略有回落,2017年后再次回升并继续增长,表明“拐点”更可能对应节奏换挡而非终局性峰值^[5]。预测研究进一步强化了该判断,21世纪10年代中期以来增速明显放缓,但未来一段时间总量仍可能维持上升,从而强化了“拐点而非终点”的判断^[22-23]。

在机制解释上,现有研究已形成相对明确的“规模-强度”张力框架:经济扩张的规模效应通常是工业固废总量上升的首要推动因素,而单位产出废物生成强度下降能够抵消部分增量^[24-26]。与此相比,产业结构因素更具尺度依赖性:跨区域比较表明工业结构更高级的地区固废生成强度更低,但在城市年度波动层面,结构占比变化较小且

可能存在非线性或滞后性,使得结构变量难以在短期线性框架中保持稳定^[4, 20, 27]。空间差异方面,研究普遍认为全国存在相对一致的时间骨架,但不同区域在强度水平、增长幅度与治理成效上并不同步。我国东部在固废强度水平和增长幅度上显著低于西部与东北等地区,并且固废构成与资源能源型行业高度耦合,钢铁、煤炭、有色等行业贡献突出^[4, 28-29]。

尽管既有研究已从时间趋势、脱钩与分解等角度分析了工业固体废物演化的阶段性特征及其驱动机制,但仍存在两方面关键不足:第一,现有证据多停留在描述阶段或跨期平均分解,尚缺少将阶段结构识别、分阶段驱动分解与城市异质性检验置于同一框架的系统化对照,因而对于“阶段换挡时驱动机制是否发生实质性转变”问题,难以得到明确结论^[30]。第二,关于阶段演化过程中空间再分配与集中度趋势的量化讨论相对不足,尤其缺少能够在同一框架下同时反映阶段变化与空间格局演化的经验证据,从而使阶段转折的成因解释容易混淆时间演化效应与空间结构调整效应^[31]。

基于此,本文从长期时间序列出发,在全国、区域与城市多尺度框架下,系统考察我国城市工业固体废物产生的阶段性演化结构及其驱动机制差异。研究整体遵循数据驱动与机制解释相结合的分析范式,在分析流程的关键环节引入机器学习方法,以增强阶段识别与信息筛选的客观性。需要说明的是,本文引入的机器学习方法并非用于预测或“黑箱”建模,而是分别采用非监督的时间序列结构学习和非参数的特征筛选方法,识别关键时间断点和城市内部更具可操作性的年度治理信号。在此框架下,首先通过非监督的时间序列结构学习方法,从数据中自动识别工业固体废物长期演化的关键阶段与时间断点,构建不依赖事前假设、可复现的长期演化时间骨架;在此基础上,结合可解释的分阶段分解方法,比较不同阶段规模扩张、产业结构调整与单位产出强度变化对工业固体废物净增量的相对贡献,识别主导驱动及其阶段性转变。进一步地,在城市尺度下,在剔除城市固定属性与全国同期共同冲击影响后,引入机器学习方法,在多指标同时竞争的条件下识别城市内部年际变化中更为稳定且具有现实可操作性的治理抓手。本文构建“AI驱动的阶段结构识别-机制导向的驱动分解-治理工具导向的城市

尺度识别”数据驱动分析链条,旨在从演化机制与治理实践两个层面,为理解我国工业固体废物的长期变化提供多尺度经验证据,并为分阶段、分区域、分尺度的控废政策设计奠定理论基础。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究构建城市尺度面板数据,数据来源包括两部分:(1)我国城市工业固体废物产生量数据^[32],用于反映工业固体废物产生的长期演化趋势。该数据库整合国家级、省级及城市层面的相关统计资料,并结合城市工业规模、产业结构和经济活动等特征信息,利用机器学习方法补充缺失和不完整数据,从而形成跨年份可比的工业固体废物产生量时间序列。该数据不依赖单一年份的官方统计口径,适合用于分析工业固体废物的长期演化过程。此外,2020年后受突发性外部冲击影响,部分经济与工业活动指标(如工业增加值、能源消费等)出现了明显的非趋势性年际波动与结构扰动,削弱了时间序列在刻画长期演化特征时的稳定性与解释力。因此,本文的核心分析年份聚焦于2003—2019年。(2)我国城市统计年鉴数据,涵盖人口、经济规模、产业结构及工业活动等指标,用于构建驱动分解与城市尺度分析所需的解释变量。为识别区域异质性,本文按城市所属省份将样本划分为东部、中部、西部与东北四大区域,并据此完成分区域汇总分析。

本文所指的工业固体废物,为工业活动过程中产生的非危险固体废弃物,包括来源于采矿、冶金、电力和建材等工业活动领域的冶金渣、粉煤灰、炉渣、煤矸石、尾矿和脱硫石膏6类固体废物,不包括危险废物、生活垃圾和建筑垃圾。该定义对应我国固体废物管理体系中长期稳定的非危险工业固体废物范畴,能够反映工业体系整体运行强度及其结构特征,而非具体工业部门或行业的产出行为。

1.2 变量定义与分析口径

以城市*i*在年份*t*的工业固体废物产生量为基本分析单元,记为 ISW_{it} 。在计量分析中,为解决零值与分布偏态问题,采用 $y_{it} = \ln(1 + ISW_{it})$ 为因变量,并在稳健性检验中替换为人均或强度口径。

解释变量围绕“规模-结构-效率”三类驱动构建。采用人口规模 Pop_{it} 与人均地区生产总值

$GDP_{pc,it}$ 刻画城市规模与经济富裕度;第二产业就业占比 $Struct_{it}$ 作为产业结构的代理变量,用于反映城市产业构成差异。工业二氧化硫排放量 $SO_{2,it}$ 作为工业活动强度及重工业化过程的综合代理指标,用于刻画城市内部工业活动变化的相关信号。需要说明的是,在减排政策持续强化背景下, SO_2 排放除受工业生产规模影响外,也会受到末端治理投入与技术升级等因素的共同作用,因此本文将其理解为“工业活动相关压力”的综合信号。在分析中该变量仅作为相关性证据,不被视为工业固体废物产生的直接来源。

1.3 长期阶段结构识别与空间集中度刻画

为识别全国尺度工业固体废物产生的阶段结构,本文在平衡样本条件下构建全国工业固体废物产生的长期时间序列,并引入非监督的时间序列结构学习方法进行阶段识别。具体而言,采用基于优化的变点检测算法(Binary Segmentation),在不预设断点年份的条件下,从数据中自动学习序列统计特征发生结构性变化的关键时间位置。该算法通过递归搜索使分段前后序列差异最大的时间切分点,并在已知复杂度约束下确定最优的阶段划分方案。

为避免阶段识别结果受到样本覆盖变化或短期波动的影响,本文在平衡城市样本基础上实施变点检测,并通过城市维度的重抽样(400次)检验断点定位的稳定性;同时,在候选断点数量不同的模型之间比较信息准则,以选择统计意义上最简单且充分的阶段结构。该过程确保阶段划分反映的是工业固体废物长期演化中的内生结构变化,而非由个别年份冲击或人为设定所驱动。

为检验全国趋势是否由少数城市集中驱动并刻画空间再分配特征,本文计算Top-*K*城市固废产生量占全国总量的比重,并用赫芬达尔-赫希曼指数(HHI)衡量城市间份额集中度。

$$HHI_t = \sum_{i=1}^N s_{it}^2 \quad (1)$$

$$s_{it} = \frac{ISW_{it}}{\sum_{j=1}^N ISW_{jt}} \quad (2)$$

式中: s_{it} 表示城市*i*在年份*t*的固废份额; N 表示年份*t*参与HHI计算的城市数量。HHI_{*t*}越高表示固废产生越集中于少数城市。为避免样本覆盖变化带来的机械波动,HHI的主报告基于与阶段识别

一致的平衡样本,并在稳健性中给出非平衡样本对照。

1.4 全国尺度阶段断点变化的驱动分解方法

为解释不同阶段之间工业固体废物净变化的来源,本文采用对数平均迪氏指数(Log Mean Divisia Index, LMDI)方法,对阶段间变化进行因素分解。在人口、富裕度、结构与强度的分析框架下,构建恒等式:

$$ISW = Pop \times GDP_{pc} \times Struct \times Intensity \quad (3)$$

式中: ISW 表示全国工业固体废物产生总量,万吨/年; Pop 表示全国人口规模,用于刻画人口扩张带来的规模效应; GDP_{pc} 表示人均地区生产总值,用于反映经济发展水平与富裕程度变化; $Struct$ 表示产业结构因素,刻画产业构成变化对工业固体废物产生的影响; $Intensity$ 表示单位经济活动水平下的工业固体废物综合强度项,用于反映单位固废产出强度的总体变化,并作为剩余项定义以保证恒等式闭合。对任意阶段起点与终点,工业固体废物净变化被精确分解为人口规模效应、经济富裕度效应、产业结构效应与综合强度效应之和,各分解项采用对数平均权重计算以保证无残差且可相加。

1.5 城市尺度相关识别与阶段比较

在城市尺度上,本文通过控制城市固定效应与全国共同冲击,重点考察在时间维度上城市内部仍与工业固体废物产生呈现稳定共变关系的驱动变量。为此,构建城市-年份双向固定效应基准模型(Two-Way Fixed Effects Model, TWFE):

$$y_{it} = \beta_1 \ln(SO_{2,it}) + \beta_2 \ln(GDP_{pc,it}) + \beta_3 Struct_{it} + \mu_i + \tau_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: y_{it} 表示城市 i 在年份 t 的工业固体废物产生水平。在基准回归中, y_{it} 采用工业固体废物产生量的对数形式,以缓解偏态分布并便于系数解释。 $\ln(SO_{2,it})$ 为城市 i 在年份 t 工业 SO_2 排放量的对数形式,用作工业活动强度及重工业化程度的代理变量,刻画城市内部工业生产活动变化的相关信号。 $\ln(GDP_{pc,it})$ 表示城市 i 在年份 t 的人均地区生产总值(GDP per capita)的对数形式,用以反映城市经济发展水平与富裕程度。 $Struct_{it}$ 表示城市 i 在年份 t 的产业结构变量,本文以第二产业就业占比作为代理指标,用于刻画城市产业构成及其变化特征。 μ_i 为城市固定效应以控制与时间无关的城市禀赋差异。 τ_t 为年份固定效应以控制共同宏观冲击,如宏观经济波动、全国性政策变化及统

计制度调整等。 ε_{it} 为随机扰动项,反映城市层面随时间变化但未被模型显式解释的剩余波动,包括未观测因素、短期冲击及测量误差等。本研究采用按城市聚类的稳健标准误,以应对同一城市内的序列相关性。

考虑到城市内部年际变化幅度相对有限,若某一变量在该设定下仍与工业固体废物产生的城市内部年际变化呈现显著相关,则可将该变量理解为在短期尺度上更具可观测响应的潜在调控信号;相反,非显著结果并不否定该变量在长期或跨城市层面的结构性作用。为检验城市内部相关关系是否随全国阶段结构发生系统性变化,在稳健性分析中引入阶段交互项,并通过Wald线性约束检验比较不同阶段系数差异,该检验主要用于验证相关关系的阶段稳定性,而非作为核心结论来源。

$$y_{it} = \sum_{k \in \{1,2,3\}} \beta_{ik} \ln(SO_{2,it}) \times I(Stage_k) + \dots + \mu_i + \tau_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中: $Stage_k$ 表示全国工业固体废物长期演化中识别出的第 k 个阶段, $k \in \{1,2,3\}$ 分别对应本文识别的3个稳定演化阶段; $I(Stage_k)$ 为阶段指示变量,当年份 t 属于第 k 阶段时取值为1,否则为0; $\ln(SO_{2,it}) \times I(Stage_k)$ 表示工业活动强度变量在不同阶段中的交互项,用以刻画其与工业固体废物产生之间的相关关系是否在不同阶段存在系统性差异; β_{ik} 表示在第 k 阶段内,工业活动强度(以 SO_2 排放表征)与城市工业固体废物产生之间的阶段特定相关系数。

1.6 基于随机森林的城市年度治理信号识别

基于前述城市尺度计量结果基础上,本文进一步引入随机森林方法,对城市年度尺度上可操作的控废治理工具进行筛选。该分析基于核心特征完备的城市年度面板数据,识别期限定为2012—2019年,以避免早期年份数据稀疏及部分治理指标覆盖不稳定对结果的干扰。因变量采用工业固体废物产生量的对数变换形式,候选解释指标围绕工业活动强度、经济规模、发展阶段、产业结构、治理与效率以及城市空间形态6类机制构建,并在同一模型中同时纳入以形成同类指标之间的竞争。为确保识别对象为城市内部的年际变化信号,本文对因变量及全部候选指标实施城市与年份双向去均值处理,使随机森林关注城市相对于自身历史水平的年度偏离。在模型设定上,随机森林采用较大的树数量并限制树深度与

叶节点样本规模,以降低对短期噪声的过拟合风险;模型在多组随机种子下重复训练,并通过训练期与测试期分离计算置换重要性,以评估指标重要性排序的稳定性。该分析的输出仅用于区分在城市年度治理尺度上更具稳定性和可操作性的指标,与长期结构性背景变量加以区分,不作预测性能或因果含义的进一步解释。

2 结果与讨论

2.1 我国城市工业固体废物产生的长期演化阶段

基于全国尺度工业固体废物产生量时间序列的结构变点识别结果表明,在不预设断点年份的条件下,我国城市工业固体废物产量在 2003—2019 年间呈现清晰且稳定的阶段性演化结构。分段回归与结构变点检测方法一致识别出 2007 年与 2012 年为显著断点,据此可将研究期划分为 2003—2007、2008—2012 与 2013—2019 三个阶段(图 1)。该阶段划分在平衡城市样本($n=213$)下具有良好的稳健性,表明其反映的是全国尺度工业固体废物长期演化中的内生时间节奏,而非由短期波动或样本选择所驱动。

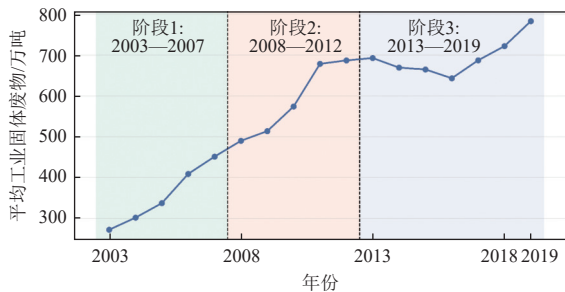


图 1 全国工业固体废物产量趋势及阶段划分

Fig. 1 Trend and stage division of industrial solid waste generation in China

在上述阶段结构下,全国工业固体废物总量在 2003—2019 年间的各个阶段均表现为净增长,但增长节奏在不同阶段之间存在显著差异,呈现持续上升背景下的阶段性转折与放缓特征。具体而言,2003—2007 年阶段对应我国加入世贸组织后工业化快速扩张、工业产出和大宗物料消耗快速增长的背景,伴随资源密集型产业扩张与“高增长、高排放”的产业模式,导致工业固体废物产生量快速增加,年化增长率约为 13.5%。该时期的工业政策侧重产能扩张和经济增长,而环保基础法规体系尚待完善,其中《固体废物污染环境防治法》作为早期监管框架已于 1995 年实施,但在

2000 年前后配套体系仍较初级,对工业固废管理的制度约束较弱。

第二阶段(2008—2012 年),在 2008 年国际金融危机后,我国推动产业升级和节能减排政策逐步强化,循环经济、清洁生产等政策取向由战略层面逐步转向推进实施,一系列行业落后产能淘汰、节能减排政策陆续推出(如“十一五”“十二五”规划中循环经济推进)。政策趋向促使一些高污染工业生产模式调整,进而导致工业固废总量增速明显回落(年化约 8.8%)。此外,自 2011 年起工业固体废物综合利用规划、清洁生产法和循环经济促进法等制度工具逐步落地,对工业固废排放要求和资源化利用发挥了引导作用。

2013 年后,生态文明建设被纳入国家战略,“十三五”“十四五”环境治理政策更加系统,强化工业绿色发展、资源循环利用、污染物减量化等要求。同时固废污染防治法及配套标准体系持续完善,强调企业主体责任、减量化和循环化利用。从政策制度层面分析,环境保护税法等制度工具引入经济杠杆,强化企业对固废排放的内部成本与管理激励。在制度环境下,我国工业固体废物总量继续上升,但增长节奏显著放缓,2013—2019 年年化增长率进一步下调至约 2.1%,表明固废产生受到更强约束与减量化政策效果的初步显现。

在空间维度上,全国工业固体废物的阶段性演化伴随着一定程度的空间再分配,但整体集中格局保持相对稳定。全国工业固体废物总量持续上升,但 Top-10 城市的贡献率长期稳定在 0.22~0.28 区间,HHI 始终维持在 10^{-2} 量级(图 2)。该结果表明,全国尺度上并未出现显著的空间极化或少数城市的持续强化,而是保持了较为稳定的“头部-长尾”结构。与此同时,高值城市并非长期为同一地区,而是在不同区域之间出现轮动,反映出全国工业固体废物阶段性演化更多体现为空间再

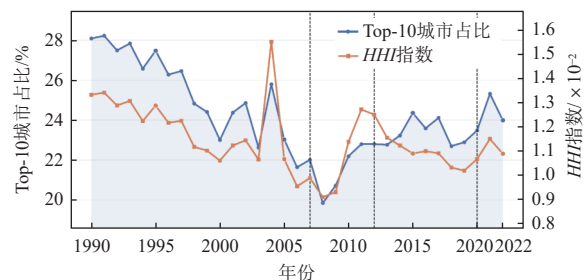


图 2 我国工业固体废物产量的空间集中度演化

Fig. 2 Evolution of the spatial concentration of industrial solid waste generation in China

分配与区域路径差异,而非由单一区域主导的集中化过程。

2.2 不同阶段工业固体废物变化的主导因素

为反映不同阶段工业固体废物变化的驱动结构,本文采用LMDI法对各阶段断点之间的工业固体废物净变化进行分解,将其拆解为人口规模、经济富裕程度(人均GDP)、产业结构以及单位产出固废综合强度4类效应。结果表明,在2003—2007、2008—2012与2013—2019 3个阶段中,全国尺度工业固体废物变化的驱动方向在各效应项上保持一致,但阶段间工业固体废物净增量的差异主要来源于各效应项贡献量级的变化,而非作用方向的改变。

从规模相关因素分析,由人口规模与经济富裕程度共同构成的规模效应在3个阶段中均表现为显著的正向贡献,且其贡献量随时间持续上升。具体而言,在2003—2007年阶段,规模效应

对工业固体废物变化的贡献为 6.16×10^4 万吨,在2008—2012年上升至 7.19×10^4 万吨,并在2013—2019年进一步增至 8.22×10^4 万吨。该结果表明,即使在全国工业固体废物净增量明显放缓的后期阶段,人口规模扩张与经济富裕度提升仍持续对工业固体废物总量形成显著的正向拉动。

在规模效应持续增强的背景下,全国工业固体废物在2013—2019年阶段的净增量(2.52×10^4 万吨)明显低于前2个阶段(平均约为 4.57×10^4 万吨),如图3(a)所示。分解结果显示,该差异并非由规模效应减弱所致,而主要来源于负向贡献项的效应显著增强。具体而言,产业结构效应在2003—2007年阶段仍表现为正向贡献($+1.13 \times 10^4$ 万吨),在2008—2012年阶段基本接近零(-7×10^2 万吨),而在2013—2019年阶段转变为显著的负向贡献(-2.90×10^4 万吨),成为后期阶段工业固体废物增长的主要抵消来源。

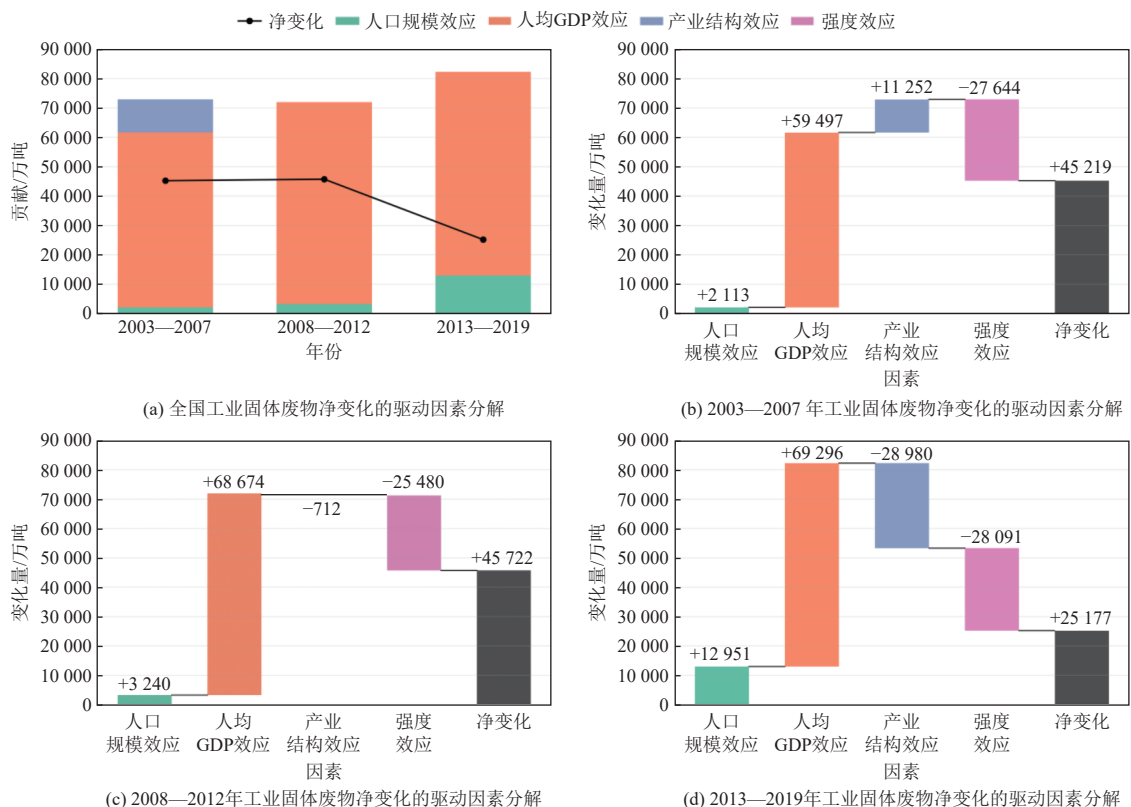


图3 全国分阶段工业固体废物产量的驱动因素

Fig. 3 Driving factors of industrial solid waste generation in China by stage

与此同时,单位产出固废综合强度在3个阶段中均表现为负向贡献,说明在控制人口与经济规模扩张之后,单位产出固废综合强度总体呈下降趋势,该效应在本文中作为综合强度变化项进

行解释。然而,该综合强度效应的负向贡献量级在阶段间变化相对有限,仅在后期阶段略有增强(由 -2.55×10^4 万吨增至 -2.81×10^4 万吨),其变化幅度明显小于产业结构效应。综合分析,产业结构

效应在后期阶段由正向贡献转为负向贡献并实现量级跃升,是导致工业固体废物净增量显著放缓的主要因素,而综合强度效应主要发挥稳定的背景抵消作用。

2.3 不同区域工业固体废物驱动结构的阶段差异

从长期演化路径分析,在全国尺度识别的阶段结构下,各区域工业固体废物产生在时间演化形态上具有一致性,但这种一致性主要体现在阶

段边界而非驱动构成。如图4(a)所示,东部、中部、西部和东北地区均在2008—2013年经历了快速增长,并在2013年后进入高位波动与再增长并存的后期阶段。该时间形态表明,全国尺度识别的阶段划分在区域层面具有普遍适用性。然而,进入后期阶段后,各区域工业固体废物变化的驱动构成开始出现明显分化。

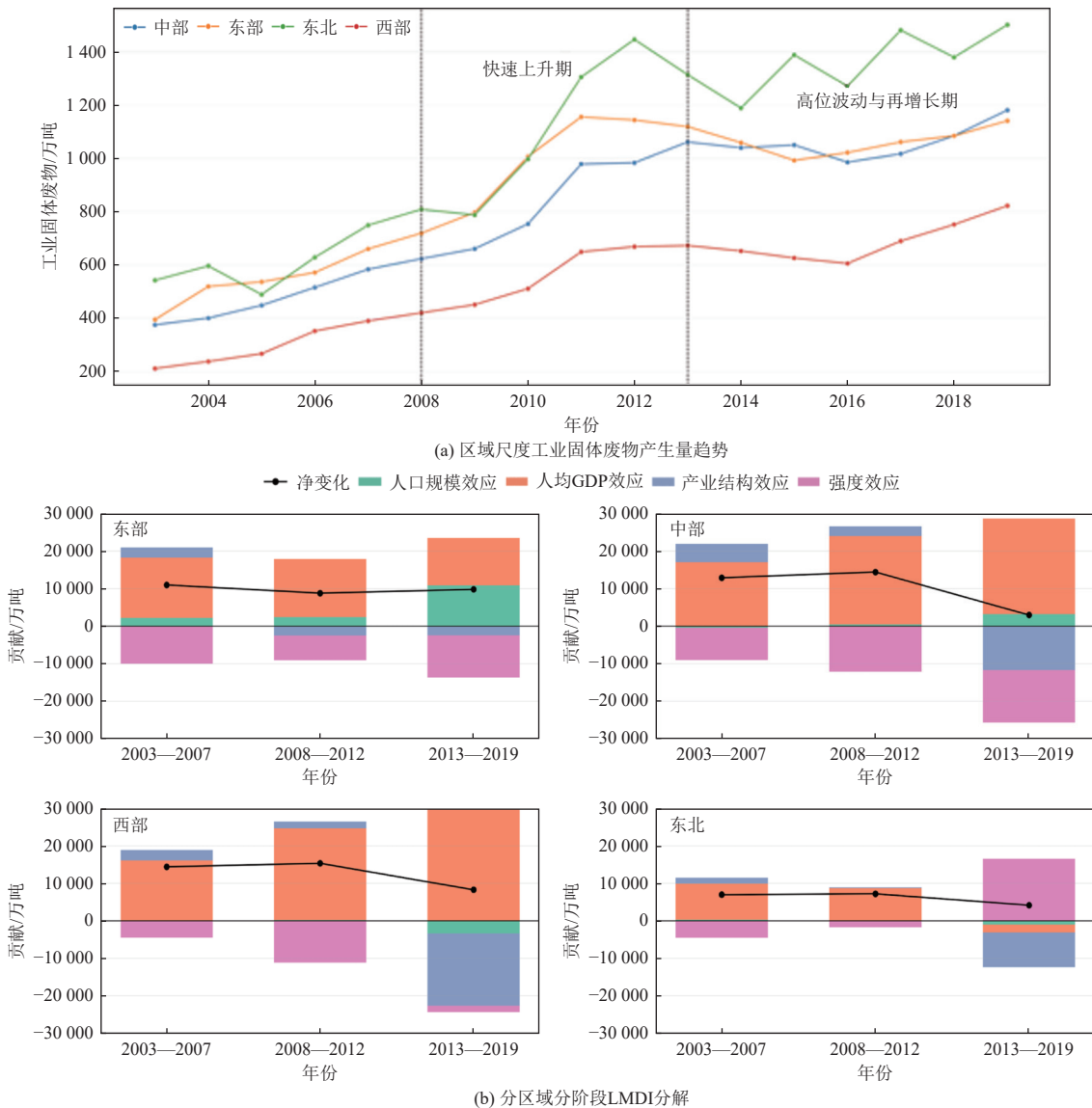


图4 区域尺度分阶段工业固体废物产生量及其驱动因素

Fig. 4 Regional-scale industrial solid waste generation and its driving factors by stage

在2013—2019年阶段,多数区域表现为规模效应主导拉动、结构效应与综合强度效应形成对冲的驱动结构,但对冲端的主导来源在区域之间存在差异。区域尺度的LMDI分解结果显示(图4(b)),中部地区的工业固体废物净增量主要

由规模效应驱动,同时受到产业结构效应与综合强度效应的双重负向抵消,整体呈现“拉动-对冲并存、净效应受控”的状态;东部地区规模效应仍为主要拉动项,但结构效应的负向贡献相对较弱,主要依赖综合强度效应实现对冲,因此后期阶段

工业固体废物净增量仍然较高;西部地区则以结构效应为主要抵消来源,产业结构调整在后期阶段对工业固体废物增长形成最为显著的抑制,而强度效应的对冲作用相对有限。这表明在相同阶段条件下,不同区域通过不同的内部对冲路径实现对规模拉动的部分抵消。

东北地区在 2013—2019 年阶段呈现与其他区域显著不同的驱动结构,其综合强度效应由负向贡献转为正向贡献,并在量级上主导了区域工业固体废物变化的净方向。在该阶段,东北地区的规模效应为负贡献,反映人口规模或经济活动变化对工业固体废物产生形成收缩性影响;产业结构效应同样为负贡献,延续了结构调整对工业固体废物增长的抑制作用。然而,与其他区域不同的是,东北地区的工业固体废物综合强度效应在该阶段转为显著正向,且其量级超过规模效应与结构效应的合计,从而在系统层面决定了区域工业固体废物变化的净方向。这一特征构成全国分解结果中的明显异常状态。从分解结果分析,将规模与结构贡献单独分解后,东北地区的单位产出固废强度出现了阶段性回升或下降趋势显著放缓。结合东北为资源型老工业基地的现实背景,该变化可能由 3 类机制共同主导。首先,重化工产业占比高且设备更新相对滞后,优先改善工艺效率,导致单位产出固废强度下降乏力甚至短期反弹;其次,在需求改善阶段,优先复产已停产或低负荷的既有生产线(尤其是老旧产线)、产能利用率回升快于技术改造,可能导致单位产出固废强度在短期内表现为正向贡献;最后,若同期开展了较集中的存量固废清理整治,对部分历史堆存固废进行清运、处置并形成统计入账,也会在分解中表现为强度项的正向贡献。基于上述多路径可能性,说明综合强度效应反映了单位产出固废强度的净变化项,其贡献方向的转变不宜直接解释为单一“技术进步/技术退步”的因果结论。

东北地区后期阶段的综合强度效应转为正向贡献在城市层面具有高度一致性,但在量级上呈现显著集中。在 2013—2019 年阶段,东北地区可计算结果的 24 个城市中,综合强度项均表现为正向贡献,表明该异常状态并非由个别城市的极端值触发,而是在区域内具有普遍的方向一致性。同时,城市层面的综合强度项贡献在量级上呈现明显头部集中,少数城市对区域正向综合强度效应的贡献占据主导地位,其中前 1、3、10 个城市

的贡献占比分别约为 33.7%、56.8% 和 82.7%。这表明东北城市后期阶段的综合强度效应异常同时具有方向一致、量级不均的特征。从机制含义看,综合强度贡献量级头部集中可能与少数城市在资源型产业比重、重化工业集中度、产能利用率回升幅度、设备更新与技改投入强度,以及存量清理整治任务集中度等方面的差异有关。

2.4 城市尺度工业固体废物驱动关系的阶段特征

城市尺度分析表明,在控制城市不变特征和年份共同冲击后,工业固体废物产生与多数宏观经济和结构变量之间未呈现稳定的城市内相关关系;相比之下,以 SO₂ 为排放表征的工业活动相关压力信号在城市内部变化尺度上表现出显著的正向共变特征,表明污染压力相关变化在一定程度上能够反映工业固体废物产生的同步变化。“城市-年份”双向固定效应模型预测结果显示(图 5),SO₂ 排放变量的回归系数为 0.078 7,且在 5% 显著性水平下通过统计检验($p=0.032$)。该结果表明,在同一城市内部,当 SO₂ 排放水平发生变化时,工业固体废物产生量亦呈现显著的同步变化关系。在相同模型设定下,产业结构变量(第二产业就业占比)的回归系数(0.035 2)虽大于 0,但未达到统计显著水平($p=0.378$),未能在城市内部变化尺度上形成可识别的稳定相关信号。

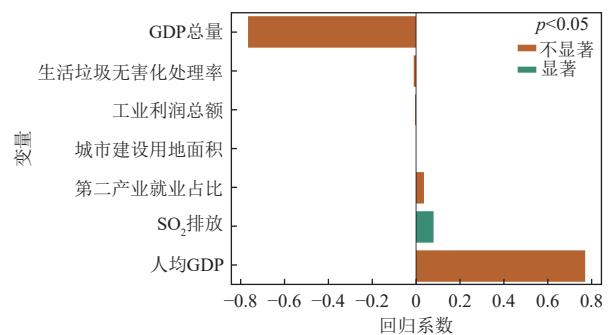


图 5 “城市-年份”双向固定效应模型在总体样本下的回归系数估计结果

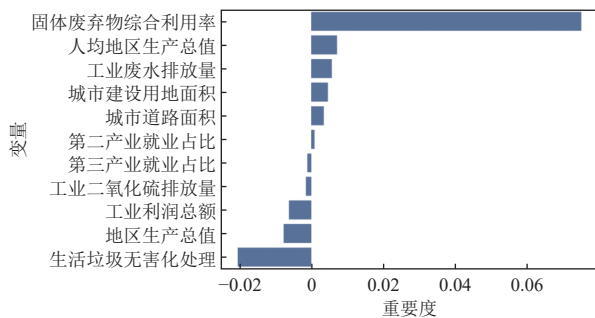
Fig. 5 Regression coefficient estimation results of the "city-year" two-way fixed effects model for the full sample

进一步地,治理与经济控制变量在该设定下同样未表现出显著相关性。生活垃圾无害化处理率、工业利润、建设用地规模等变量的回归系数均不显著(p 均大于 0.5),表明这些变量在城市内部的年际变化不足以对工业固体废物产生形成稳定的线性解释。需要注意的是,人均 GDP 与 GDP

总量在模型中均表现为系数不显著且标准误极大(标准误约为 36.4, p 约为 0.980),表明在同时控制城市固定效应与年份固定效应的条件下,宏观经济规模变量的有效信息已被高度吸收,且二者之间可能存在较强共线性。因此,本文不再讨论经济规模变量在城市内部变化尺度上的边际效应,而仅将其作为控制项纳入模型。

2.5 城市尺度工业固体废物治理信号

如图 6 所示,工业固体废物综合利用率在所有候选指标中具有显著领先的重要性,其置换重要性水平明显高于其他变量,并在多次重复训练中始终保持首位。这表明在控制城市长期结构差异后,综合利用率能够稳定刻画城市内部工业固体废物变化,是当前统计体系下最具可操作性的治理绩效信号。需要强调的是,此处的重要性排序反映了年度变化解释中的稳定性与信息贡献,并不构成对具体治理工具“效果大小”或“优先顺序”的因果评估依据。相比之下,工业废水排放量以及城市建设用地和道路面积等指标的重要性处于中等水平,反映其在部分城市或阶段中对工业固体废物变化具有指示意义,但整体稳定性弱于治理绩效类指标。



注:图中数值反映当单一指标的年度变化被随机打乱时,模型解释工业固体废物年际波动能力的变化幅度。数值越大,表示该指标的年际变化对解释工业固体废物变化越关键,越适合作为城市层面的操作型治理信号;接近零或为负的指标,表明其年度变化对城市固废治理的信息贡献有限,更可能体现长期结构或背景特征。

图 6 基于随机森林模型的城市尺度工业固体废物年度治理信号

Fig. 6 Annual governance signals of city-level industrial solid waste based on the Random Forest model

与此同时,经济规模与产业结构相关变量在城市年度尺度上的重要性整体较低。人均地区生产总值虽在排序中相对稳定,但其重要性水平有限,更适合作为城市发展阶段的分层变量;地区生产总值总量、工业利润及就业结构等变量的重要

性接近于零,显示其难以在年度尺度上提供独立、稳定的治理信号。总体而言,该结果在不改变前文长期驱动机制结论的前提下,进一步明确了城市层面治理手段的经验分工:治理绩效和过程性指标更适合作为年度管理与考核的操作型信号,而规模与结构性指标主要反映长期发展背景。

3 结 论

基于全国、区域和城市多尺度的阶段性分析,本文从长期演化事实、驱动结构差异及其空间异质性出发,总结工业固体废物控制的主要结论与政策启示。

第一,工业固体废物产生具有稳定且可复现的阶段结构,不同阶段的增长速度与变化特征显著不同。这表明固废治理政策不宜假定增长机制长期稳定,而应根据工业化阶段动态调整治理重点,避免以统一目标和强度覆盖所有时期。

第二,全国尺度分解结果显示,规模效应持续推动固废增长,而后期阶段净增量放缓主要源于产业结构效应由正向贡献转为负向贡献并显著增强。相比之下,强度效应虽持续为负向贡献,但边际贡献有限,说明在工业化中后期,产业结构调整比单纯依赖效率提升更具控废潜力,应作为宏观层面的关键政策杠杆。

第三,区域层面存在显著的驱动结构差异,且在后期阶段进一步加剧。不同区域中结构效应与强度效应的主导地位并不一致,东北地区后期强度效应转正贡献的结果提示,依赖单一路径的控废策略可能失效,区域治理需结合自身发展阶段与驱动特征差异加以设计。

第四,在城市内部的短期年际尺度上,工业固体废物对宏观规模和结构变量的响应有限,而对工业活动强度相关因素更为敏感。这意味着城市层面的短期治理更可能通过直接作用于生产过程和活动强度取得成效,而结构性调整应被视为中长期战略工具。

第五,城市年度治理中,长期驱动因素与可操作治理抓手应予以区分。结果表明,治理绩效和过程性指标在城市内部变化中更具稳定性,更适合作为年度监管与考核工具,而规模和结构变量主要反映长期背景,不宜直接承担短期调控职能。

总体而言,工业固体废物治理不存在适用于所有阶段和尺度的单一政策工具。有效的控废策略应在全国与区域层面侧重结构性转型,在城市

层面强化过程性精细管理,通过分层、分尺度的政策组合,应对工业固体废物长期演化带来的治理挑战。

参考文献 (References):

- [1] 李文强, 胡华龙, 林军, 等. 全国固体废物污染环境防治信息发布情况研究报告 [R]. 北京: 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 2024.
LI Wenqiang, HU Hualong, LIN Jun, et al. Research report on the disclosure of information on the prevention and control of environmental pollution by solid waste in China [R]. Beijing: Solid Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2024.
- [2] 宋小龙, 吴雯杰, 杨建新, 等. 工业固体废物环境管理模式及研究进展 [J]. 上海第二工业大学学报, 2015, 32(1): 12-18.
SONG Xiaolong, WU Wenjie, YANG Jianxin, et al. A review of environmental management model and research progress on industrial solid waste[J]. *Journal of Shanghai Second Polytechnic University*, 2015, 32(1): 12-18.
- [3] 2023年中国生态环境统计年报 [R]. 北京: 生态环境部, 2023.
China environmental statistics yearbook 2023 [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2023.
- [4] 陈瑛, 胡楠, 滕婧杰, 等. 我国工业固体废物资源化战略研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(4): 109-114.
CHEN Ying, HU Nan, TENG Jingjie, et al. A study on the resource utilization strategy for industrial solid waste in China[J]. *Engineering Science*, 2017, 19(4): 109-114.
- [5] LU Yonglong, ZHANG Yueqing, CAO Xianghui, et al. Forty years of reform and opening up: China's progress toward a sustainable path[J]. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaau9413.
- [6] 新华社. 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021)[2026-01-18]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zyygwj/202110/t20211024_957580.shtml.
Xinhua News Agency. Opinions of the CPC central committee and the state council on fully, accurately, and comprehensively implementing the new development philosophy to achieve carbon peaking and carbon neutrality[EB/OL]. (2021) [2026-01-18]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zyygwj/202110/t20211024_957580.shtml.
- [7] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发“无废城市”建设试点工作方案的通知 [EB/OL]. (2018)[2026-01-18]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/201901/t20190123_690456.shtml.
General Office of the State Council. Notice of the general office of the state council on issuing the work plan for the pilot program of "zero-waste cities"[EB/OL]. (2018) [2026-01-18]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/201901/t20190123_690456.shtml.
- [8] 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见 [EB/OL]. (2021) [2026-01-17]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk10/202103/t20210326_826255.html.
National development and reform commission. guiding opinions on the comprehensive utilization of bulk solid waste during the 14th Five-Year plan period[EB/OL]. (2021)[2026-01-17]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk10/202103/t20210326_826255.html.
- [9] 张雪梅. 中国工业固体废物产生量的时空变化及其驱动机制研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2021: 61.
ZHANG Xuemei. Spatiotemporal variation and driving mechanism of industrial solid waste generation in China[D]. Wuhan: Wuhan University, 2021: 61.
- [10] GUO Wei, XI Beidou, HUANG Caihong, et al. Solid waste management in China: Policy and driving factors in 2004-2019[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 173: 105727.
- [11] SU Biwei, HESHMATI A, GENG Yong, et al. A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 42: 215-227.
- [12] WANG Chaoqiang, CHENG Linxiao. Study on general industrial solid waste and carbon reduction in China: Coupling coordination model, life cycle assessment and environmental safety control[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2024, 39: 101557.
- [13] LI Zhenqiang, ZHOU Qiuyang. Research on the spatial effect and threshold effect of industrial structure upgrading on carbon emissions in China[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2021, 12(8): 3886-3898.
- [14] 姚婷, 曹霞. 中国工业固体废物的规制理路与完善路径——以1985—2020年政策法律为量化分析样本 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 9-14.
YAO Ting, CAO Xia. Regulation of China's industrial solid waste treatment and improvement options: A quantitative analysis of policies and laws[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(12): 9-14.
- [15] LIANG Sai, LIU Zhu, CRAWFORD BROWN D, et al. Decoupling analysis and socioeconomic drivers of environmental pressure in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(2): 1103-1113.
- [16] YU Yadong, ZHOU Li, ZHOU Wenji, et al. Decoupling environmental pressure from economic growth on city level: The Case Study of Chongqing in China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 27-35.
- [17] 刘彦花, 贾莉. 广西北部湾经济区工业三废排放与工业经济增长脱钩分析 [J]. 科技和产业, 2020, 20(10): 48-53+85.
LIU Yanhua, JIA Li. Decoupling between industrial wastes

- emission and industrial economic growth in Guangxi Beibu Gulf economic zone[J]. *Science Technology and Industry*, 2020, 20(10): 48–53+85.
- [18] 杨润林, 李霄, 任亚楠, 等. 中国一般工业固废治理政策的演变与特征——基于政策文本的分析 [J]. *资源科学*, 2025, 47(5): 922–934.
- YANG Runlin, LI Xiao, REN Yanan, et al. Evolution and characteristics of China's policies on non-hazardous industrial solid waste management: Analysis based on policy texts[J]. *Resources Science*, 2025, 47(5): 922–934.
- [19] TAN Zhixiong, REN Ying, HAN Jingwei, et al. Evolving pattern and improvement path of China's solid waste management policies[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2021, 19(4): 358–368.
- [20] 杨青如, 谢雪颖, 阎虎勤. 重庆市经济发展与工业污染关系研究——基于环境库兹涅茨曲线 [J]. *世界经济探索*, 2021(2): 31–38.
- YANG Qingru, XIE Xueying, YAN Huqin. Study on the relationship between economic development and industrial pollution in Chongqing—Based on environmental kuznets curve[J]. *World Economic Research*, 2021(2): 31–38.
- [21] KIM Y, TANAKA K, GE Chazhong. Estimating the provincial environmental Kuznets curve in China: A geographically weighted regression approach[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018, 32(7): 2147–2163.
- [22] LIU Hongmei, SUN Honghao, GUO Rong, et al. Prediction of China's industrial solid waste generation based on the PCA-NARBP model[J]. *Sustainability*, 2022, 14(7): 4294.
- [23] 邹庆芳, 胡广, 李朝阳, 等. 新能源固废资源化与污染控制研究进展和发展趋势 [J]. *能源环境保护*, 2024, 38(6): 25–35.
- ZOU Qingfang, HU Guang, LI Zhaoyang, et al. Status and development trends of resource utilization and pollution control of renewable energy waste[J]. *Energy Environmental Protection*, 2024, 38(6): 25–35.
- [24] ZHANG Xuemei, ZHOU Min, LI Jiahao, et al. Analysis of driving factors on China's industrial solid waste generation: Insights from critical supply chains[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145185.
- [25] MA Teli. Decomposition and decoupling analysis of industrial solid waste in the Yangtze River economic belt[J]. *E3S Web of Conferences*, 2021, 275: 02054.
- [26] 薛军, 徐淑民. 基于 LMDI 分解方法的中国工业固体废物排放影响因素分解模型及实证研究 [C]//中国环境科学学会. 2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集. 2018: 153–159.
- XUE Jun, XU Shumin. Decomposition model and empirical analysis of influencing factors of industrial solid waste emissions in China based on the LMDI Method [C]//Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of the 2018 Annual Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences. 2018: 153–159.
- [27] WANG Zhaogang. The interplay and feedback mechanism between environmental pollution and economic growth in China[J]. *Energy and Environment Research*, 2012, 2(2): 1–53.
- [28] GUAN Xinge, REN Fangrong, FAN Gao, et al. Dynamic evaluation and sensitivity analysis of China's industrial solid waste management efficiency based on ecological environment cycle perspective[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1462975.
- [29] TANG Jiexin, WANG Qunwei, CHOI G. Efficiency assessment of industrial solid waste generation and treatment processes with carry-over in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138274.
- [30] LUND R B, BEAULIEU C, KILLICK R, et al. Good practices and common pitfalls in climate time series change-point techniques: A review[J]. *Journal of Climate*, 2023, 36(23): 8041–8057.
- [31] 张帅, 周弋铃, 詹良通, 等. “无废城市”建设指标体系优化: 存量固体废物治理 [J]. *环境卫生工程*, 2025, 33(3): 1–11.
- ZHANG Shuai, ZHOU Yiling, ZHAN Liangtong, et al. Optimization of the "zero-waste city" construction indicator framework: With a focus on existing solid waste management[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2025, 33(3): 1–11.
- [32] JIA Qian, LIN Kunsen, ZHUANG Jiawei, et al. An inventory of industrial solid waste in 337 cities of China: Applying machine learning for data completion[J]. *Scientific Data*, 2025, 12: 1241.