



文章栏目：“无废城市”建设专题

DOI 10.12030/j.cjee.202112193 中图分类号 X32 文献标识码 A

王兆龙, 姚沛帆, 张西华, 等. 典型大宗工业固体废物产生现状分析及产生量预测[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 746-751. [WANG Zhaolong, YAO Peifan, ZHANG Xihua, et al. Current situation analysis and production forecast of typical bulk industrial solid wastes in China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(3): 746-751.]

典型大宗工业固体废物产生现状分析及产生量预测

王兆龙^{1,2}, 姚沛帆³, 张西华³, 侯琼^{1,✉}, 曹宏斌²

1. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029; 2. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190; 3. 上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海 201209

摘要 针对大宗工业固体废物产生量大、历史堆存量多的问题, 基于历史年份产废量和行业贡献度分析结果, 运用灰色 GM(1,1) 模型预测了 2021–2025 年特定行业典型大宗工业固体废物产生量。结果表明, 尾矿、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、炉渣、脱硫石膏等 6 种典型大宗工业固体废物普遍集中产生于 1~2 个特定行业, 且特定行业的贡献程度普遍超过 80%。到 2025 年, 我国金属矿采选业尾矿, 电力、热力生产和供应业粉煤灰, 煤炭开采和洗选业煤矸石, 黑色金属冶炼和压延加工业冶炼废渣, 电力、热力生产和供应业炉渣及脱硫石膏产生量将分别达到 13.46×10^{11} 、 6.45×10^{11} 、 15.86×10^{11} 、 6.21×10^{11} 、 2.57×10^{11} 和 2.50×10^{11} kg, 较 2019 年产生量分别增长 55%、39%、238%、73%、52% 和 131%。建议充分考虑以采矿、冶金、电力、热力等产废量较大的行业为治理重点, 并合理规划大宗工业固体废物利用处置设施布局和能力建设。本研究结果可为“十四五”时期深入开展“无废城市”建设, 科学制订产废行业环境管理政策提供参考。

关键词 典型大宗工业固体废物; “十四五”时期; GM(1; 1) 模型

大宗工业固体废物综合治理涉及行业层面广, 减污降碳潜力巨大, 是“十四五”时期“无废城市”建设的重要领域, 对促进固体废物治理体系和治理能力现代化影响深远^[1]。然而, 由于我国大宗工业固体废物产生量大、历史堆存多, 大宗工业固体废物综合利用面临着利用不充分、发展不均衡的严峻形势^[2]。科学评估和预测一定时期内大宗工业固体废物的产生量, 对于助力深入开展“无废城市”建设, 合理制订产废行业环境管理政策, 优化设施能力建设和布局具有重要意义。

对固体废物产生量进行预测, 已引起国内外研究者的广泛兴趣。朱云^[3]采用线性回归方法预测了广州市医疗废物的产生量。胡涛等^[4]采用多元回归分析模型预测了南方某市的城市垃圾产生量。刘炳春等^[5]基于 9 种特征变量, 构建了主成分分析-支持向量回归模型, 对我国工业固体废物产生量进行了预测, 并分析了与工业固体废物产生量相关的主要特征变量, 结果表明, 我国工业固体废物产生量与工业化进程具有直接关联。然而, 我国近年来的工业产能规模变化较大, 工业固体废物产废量的长期变化趋势复杂, 其预测结果误差较为明显。因此, 相对于我国工业固体废物产废量长期趋势, 短期趋势可较好地匹配我国工业化发展进程, 从而预测我国短期内工业固体

收稿日期: 2021-12-30; 录用日期: 2022-03-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2019YFC1908500)

第一作者: 王兆龙 (1987—), 男, 硕士, 工程师, wangzhaolong@meescc.cn; ✉通信作者: 侯琼 (1987—), 女, 硕士, 助理研究员, E-mail: houqiong@meescc.cn

废物产废量。其中，灰色系统预测模型可在数据样本较小的情况下，对非线性、不确定系统的数据样本进行预测，具有短期预测效果好、运算过程简单的优势^[6]。因此，部分研究者采用灰色系统预测模型来预测我国工业固体废物产生量。邓琪等^[7]的研究结果表明，对于基本符合线性关系的工业固体废物产生量数据，灰色 GM(1,1) 模型预测值与实际值一致性较好，其预测结果可为环境管理决策提供参考。王冬梅等^[8]的研究表明，基于 GM(1,1) 所建立的天津市工业固体废物产生量预测模型经检验符合精度要求，并基于预测结果提出了工业固体废物污染防治对策。

为分析“十四五”时期大宗工业固体废物污染防治形势，本研究在全面评估大宗工业固体废物产生现状的基础上，利用灰色 GM(1,1) 模型预测了“十四五”时期重点行业典型大宗工业固体废物产生情况，并提出了“十四五”时期相关行业的环境管理对策。

1 数据与方法

1.1 产生量

大宗工业固体废物是指我国各工业领域在生产活动中年产生量在 $1\ 000 \times 10^4$ t 以上、对环境和安全影响较大的固体废物^[9]。结合徐淑民等^[10]的研究成果可知，尾矿、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、炉渣等是我国产生量最大的工业固体废物。本研究重点针对采矿、电力、热力、冶金等传统行业，分别选取尾矿、煤矸石、粉煤灰、冶炼渣、工业副产石膏等典型大宗工业固体废物产生量作为研究对象。有关数据来自 2012–2020 年生态环境部发布的《中国环境统计年报》^[11]《全国大、中城市固体废物污染环境防治年报》^[12]。

1.2 产废贡献度

采用某一行业某类典型大宗工业固体废物产生量与同期全国该品类废物产废总量的百分比，表示某一行业对某类大宗工业固体废物的产废贡献度，具体计算公式见式 (1)。

$$C_{ij} = \frac{m_{ij}}{M_{ij}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： C_{ij} 为 i 行业对 j 类大宗工业固体废物的产废贡献度； m_{ij} 为某一时段 i 行业 j 类大宗工业固体废物的产废量，kg； M_{ij} 为相同时段全国 i 行业 j 类大宗工业固体废物的产废总量，kg。

1.3 GM(1,1) 模型

GM(1,1) 是常用的灰色系统预测模型^[13]，其所构建的微分方程具有随时间变化的系数，因此可为具有单调特性数列进行准确预测。

设原始数列为式 (2)。

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) \quad (2)$$

根据灰色理论建立白化形式的一阶一元微分方程 GM(1,1)，见式 (3)。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (3)$$

式中： $x^{(1)}$ 为原始数列的一次累加序列； a 为发展系数； u 为灰色作用量。

对方程 (3) 求解后，还原可得预测方程，见式 (4)。

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k), k = 2, \dots, n \quad (4)$$

式中： $\hat{x}^{(1)}$ 为求解序列； $\hat{x}^{(0)}$ 为求解序列一次累减还原所得到的预测序列。

1.4 级比检验

为确保 GM(1,1) 模型预测方法适用于目标数据列，可采用级比检验对原始数列 (2) 进行检验处理。计算数列的级比见式 (5)。

$$\lambda(k) = \frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)}, k = 2, \dots, n \quad (5)$$

若所有的级比都落在区间内, 则说明该原始数列具有规律性, 可以建立 GM(1,1) 模型进行预测^[14]。

2 结果与讨论

2.1 典型大宗工业固体废物总体产生情况的变化趋势

根据历年环境统计数据显示, 我国大宗工业固体废物的产生量占到一般工业固体废物产生量的70%^[11-12]。图1展示了2013–2019年全国重点调查企业尾矿、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、炉渣、脱硫石膏等6种典型大宗工业固体废物产生量的变化趋势。可以看出, 2013–2019年, 尾矿是产生量最大的固体废物品类, 年产生量约占6种典型大宗工业固体废物产生总量的40%。由于自2016年以来供给侧结构性改革的持续深化, 我国钢铁、煤炭、有色等行业“十三五”期间的产能规模变化趋势与“十二五”期间存在较大差异, 受不同年份尾矿产生量波动幅度较大影响, 2012–2019年, 以上6种典型大宗工业固体废物产生总量呈现出先减少后增长趋势, 并于2016年达到最低值 23.20×10^{11} kg。“十三五”期间, 6种典型大宗工业固体废物产生总量持续增长, 2019年产生总量为 29.10×10^{11} kg, 相较于2016年增幅达25.6%。分地域看, 2019年我国一般工业固体废物产生量排名依次是华北、华东、西南、西北、华中、东北、华南, 分别是 13.01×10^{11} 、 9.23×10^{11} 、 5.82×10^{11} 、 5.55×10^{11} 、 4.58×10^{11} 、 3.78×10^{11} 、 2.10×10^{11} kg; 其中, 华北地区的山西、内蒙古、河北3个地区一般工业固体废物产生量居全国前三位, 分别占全国产生量的11.8%、9.7%、7.4%^[11]。

2.2 典型大宗工业固体废物不同行业产废贡献程度分析

根据《2016–2019年全国大中城市固体废物污染环境防治年报》^[12], 采用某一特定行业尾矿、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、炉渣、脱硫石膏等典型大宗工业固体废物产生量占同期全国产生总量的比例, 评估不同行业对典型大宗工业固体废物产生量的贡献程度。如图2所示, 2016–2019年尾矿、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、炉渣、脱硫石膏等大宗工业固体废物普遍集中产生于1~2个特定行业, 且特定行业的贡献程度普遍超过80%。具体来看, 87%的尾矿产生于金属矿采选业, 97%的煤矸石产生于煤炭开采和洗选业, 91%的冶炼废渣产生于金属冶炼和压延加工业, 而电力、热力生产和供应业产生了87%的粉煤灰、52%的炉渣和81%的脱硫石膏。

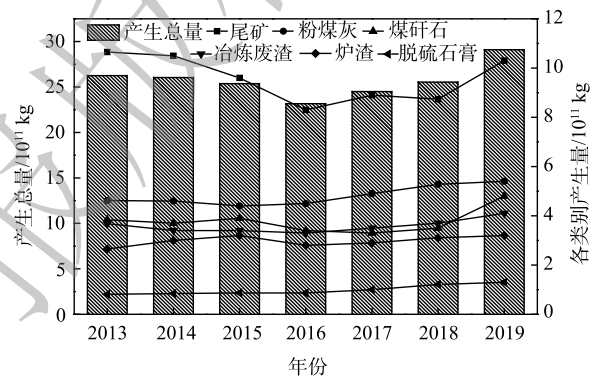


图1 2013—2019年典型大宗工业固体废物产生量

Fig. 1 Quantity of typical bulk industrial solid waste generated from 2013 to 2019

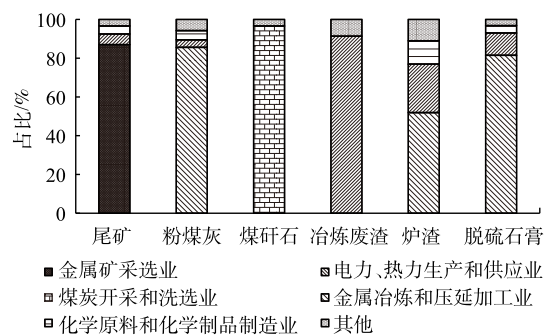


图2 2016–2019年典型大宗工业固体废物分行业产生情况

Fig. 2 Generation of typical bulk industrial solid waste by industries from 2016 to 2019

2.3 特定行业典型大宗工业固体废物产生情况的变化趋势

根据《2016–2019年全国大中城市固体废物污染环境防治年报》^[12]，基于不同行业产废贡献程度分析，图3显示了2016–2019年金属矿采选业、煤炭开采和洗选业等特定行业典型大宗工业固体废物产生情况变化趋势。可以看出，所选取的时段内，金属矿采选业尾矿，电力、热力生产和供应业粉煤灰、炉渣和脱硫石膏，煤炭开采和洗选业煤矸石，以及金属冶炼和压延加工业冶炼废渣产生量普遍呈现出稳步增长趋势。

2.4 “十四五”时期典型大宗工业固体废物产生量预测

选取“十三五”时期供给侧改革后，2016–2019年生态环境部公布数据作为产生量预测基础数据样本时段^[12]。同时，考虑到特定行业对某一品类大宗工业固体废物产生量贡献较大，且GM(1,1)模型较好的适用于线性数据样本预测，本研究选取金属矿采选业尾矿，电力、热力生产和供应业粉煤灰、炉渣和脱硫石膏，煤炭开采和洗选业煤矸石，以及金属冶炼和压延加工业冶炼废渣产生量等6种典型大宗工业固体废物产生量作为研究对象数据样本。具体数据见表1。

利用所建立的大宗工业固体废物产生量与年份的一阶微分方程模型，得到2021–2025年不同行业尾矿、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、脱硫石膏等典型大宗工业固体废物产生量预测结果，见图4。根据1.3给出的方法求解得到大宗工业固体废物产生量与年份关系的一阶微分方程模型。模型相对误差均少于0.1，证明模型达到较高要求。所有模型均通过后验差检验，可认为模型总体预测效果理想。

GM(1,1)模型预测结果显示，“十四五”时期我国冶金、电力等传统行业典型大宗工业固体废物产生量将持续增长；预计到2025年，我国金属矿采选业尾矿，电力、热力生产和供应业粉煤灰，煤炭开采和洗选业煤矸石，黑色金属冶炼和压延加工业冶炼废渣，电力、热力生产和供应业炉渣及脱硫石膏产生量将分别达到 13.46×10^{11} 、 6.45×10^{11} 、 15.86×10^{11} 、 6.21×10^{11} 、 2.57×10^{11} 和 2.50×10^{11} kg，较2019年产生量分别增长

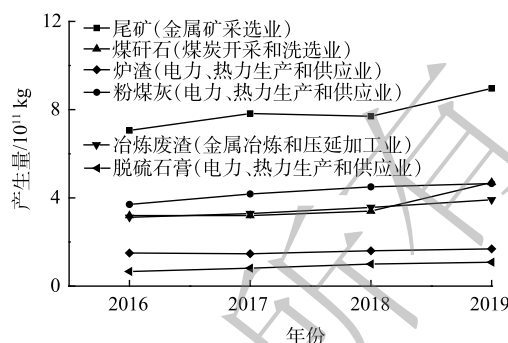


图3 2016–2019年典型大宗工业固体废物分行业产生情况

Fig. 3 Generation of typical bulk industrial solid waste by industries from 2016 to 2019

表1 2016–2019年全国典型大宗工业固体废物产生量数据样本

Table 1 2016–2019 National typical bulk industrial solid waste generation data sample 10^{11} kg

品类和产生行业及编号	2016年	2017年	2018年	2019年
金属矿采选业尾矿(X_1)	7.06	7.82	7.7	8.96
电力、热力生产和供应业粉煤灰(X_2)	3.70	4.17	4.50	4.65
煤炭开采和洗选业煤矸石(X_3)	3.20	3.20	3.40	4.70
黑色金属冶炼和压延加工业冶炼废渣(X_4)	2.90	3.00	3.30	3.60
电力、热力生产和供应业炉渣(X_5)	1.50	1.47	1.60	1.69
电力、热力生产和供应业脱硫石膏(X_6)	0.66	0.81	1.00	1.08

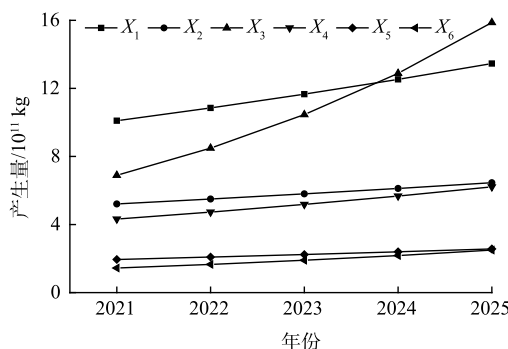


图4 2021–2025年典型大宗工业固体废物分行业产生情况

Fig. 4 Generation of typical bulk industrial solid waste by industry from 2021 to 2025

55%、39%、238%、73%、52%和131%。其中,产生量增长速度最快的煤炭开采和洗选业煤矸石年均增长率达40%,将于2025年超过金属矿采选业尾矿,成为产生量最大的大宗工业固体废物品类。

2.5 典型大宗工业固体废物综合治理前景分析

大宗工业固体废物综合治理是制约我国生态环境治理工作取得实效的重要瓶颈问题。从环境治理工作的风险和挑战来看,由于大宗工业固体废物年产生量和历史存量巨大,长期堆存的工业固体废物对大气扬尘、土壤和地下水环境污染问题突出,环境风险长期存在。同时,由于我国工业发展依赖资源和能源的持续投入,且钢铁、有色、电力等传统行业规模大,在经济结构和技术条件没有明显改善的情况下,在未来一段时间内资源需求的增长趋势将长期持续,尾矿、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、炉渣、脱硫石膏等大宗工业固体废物产生量保持在较高水平也将是客观现实。因此,如果能有效提高我国典型大宗工业固体废物的综合治理能力,将对我国经济社会发展的资源保障能力提供重要支撑。有研究表明,在我国现有技术条件下,可利用工业固体废物替代60%~70%的建材矿产资源,平均综合利用1 000 kg工业固体废物可产生370元的产值。据此,仅电力、热力生产和供应业脱硫石膏,2025年综合利用潜力可达 1.75×10^{11} kg,产值可达到 925×10^8 元^[15]。

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》^[16]明确提出,以尾矿和共伴生矿、煤矸石、粉煤灰、建筑垃圾等为重点,开展100个大宗固体废弃物综合利用示范。同时,作为“十四五”时期“无废城市”建设的重要领域,生态环境部已明确提出要在深入打好污染防治攻坚战和碳达峰碳中和等重大战略部署下,加快探索重点行业工业固体废物减量化和“无废矿区”“无废园区”“无废工厂”建设的路径模式^[17]。尤其是大宗工业固体废物综合治理对于减污降碳协同增效意义重大,有研究表明,利用粉煤灰等工业固体废物替代石灰石等碳酸盐类高载碳原料,可有效降低煅烧环节能耗和石灰石分解产生的二氧化碳排放,每综合利用1 000 kg粉煤灰可减少二氧化碳排放约850 kg。基于产废量预测估算,电力、热力生产和供应业粉煤灰如果全量利用,2025年减碳贡献可达 5.48×10^{11} kg。因此,开展“无废城市”建设,在工业领域系统推进大宗工业固体废物减量化、资源化和无害化,能够更好地推动能源结构根本改变和产业结构、交通运输结构、用地结构的优化调整,从而实现减污降碳、协同增效。

3 结论与建议

1) 2013–2019年全国重点调查企业尾矿、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、炉渣、脱硫石膏等6种典型大宗工业固体废物产生总量呈现出先减少后增长趋势,普遍集中产生于1~2个特定行业,且特定行业的贡献程度超过80%。

2) 模型预测结果显示,到2025年,我国金属矿采选业尾矿,电力、热力生产和供应业粉煤灰,煤炭开采和洗选业煤矸石,黑色金属冶炼和压延加工业冶炼废渣,电力、热力生产和供应业炉渣及脱硫石膏产生量较2019年产生量分别增长55%、39%、238%、73%、52%和131%。

3) 建议以采矿、冶金、电力、热力等产废量较大的行业为重点,按照《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》相关要求,合理规划大宗工业固体废物利用处置设施布局和能力建设。

4) 建议借助“十四五”时期“无废城市”建设试点工作,统筹利用政策、资金、技术全方位扶持清洁能源替代和大宗工业固体废物源头减量,持续打通大宗工业固体废物消纳利用渠道,充分发挥大宗工业固体废物治理助力减污降碳、协同增效的作用。

参考文献

[1] 张德江. 全国人民代表大会常务委员会执法检查组关于检查《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》实施情况的报告——2017年

11月1日在第十二届全国人民代表大会常务委员会第三十次会议上
[EB/OL]. [2021-10-11]. <http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/201711/974>

- 60620cdb74c89bfaa08483f907a52.shtml.
- [2] 杜根杰. 我国大宗工业固废产业存在的主要问题[J]. *资源再生*, 2019(11): 34-36.
- [3] 朱云. 广州市医疗废物处置现状及产生量预测[J]. *广东科技*, 2020, 29(9): 61-64.
- [4] 胡涛, 钱荫, 孙国芬, 等. 城市生活垃圾产生量预测研究: 以南方某市为例[J]. *环境卫生工程*, 2018, 26(2): 36-38.
- [5] 刘炳春, 齐鑫. 基于PCA-SVR模型中国工业固废产生量预测研究[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(1): 69-74.
- [6] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[J]. 华中科技大学出版社, 2002: 15-24.
- [7] 邓琪, 王琪, 黄启飞. GM(1, 1)在工业固体废物产生量预测中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(6): 138-141.
- [8] 王冬梅, 回蕴珉. 天津市工业固体废物产生量预测及对策研究[J]. *环境科学预与技术*, 2010, 33(12): 655-657.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 大宗工业固体废物综合利用“十二五”规划[EB/OL]. [2021-10-11]. https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/oldfile/miit/n1146290/n1146402/n7039597/c7062216/part/7062217.pdf, 2012.
- [10] 徐淑民, 陈瑛, 滕婧杰, 等. 中国一般工业固体废物产生、处理及监管(责任编辑: 金曙光)
- 对策与建议[J]. *环境工程*, 2019, 37(1): 180-183.
- [11] 中华人民共和国生态环境部. 2012—2019年生态环境统计年报[EB/OL]. [2021-11-11]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/>.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 2014—2020年全国大中城市固体废物污染环境防治年报[EB/OL]. [2021-10-11]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/gtfwwrfz/>.
- [13] 刘思峰, 曾波, 刘解放, 等. GM(1, 1)模型的几种基本形式及其适用范围研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(3): 501-508.
- [14] WANG Z X, LI D D, ZHENG H H. Model comparison of GM (1, 1) and DGM (1, 1) based on Monte-Carlo simulation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 542: 123341.
- [15] 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.
- [16] 中国政府网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [2021-10-11]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm?pc.
- [17] 生态环境部. 关于印发《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》的通知[EB/OL]. [2021-12-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202112/20211215_964275.html.

Current situation analysis and production forecast of typical bulk industrial solid wastes in China

WANG Zhaolong^{1,2}, YAO Peifan³, ZHANG Xihua³, HOU Qiong^{1,*}, CAO Hongbin²

1. Solid Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China; 2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai, 202109, China

*Corresponding author, E-mail: houqiong@meescc.cn

Abstract In view of the problems of large amount of production and historical stockpiles of bulk industrial solid waste, scientifically to predict the generation of typical bulk industrial solid waste during the “14th Five-Year Plan” period. Based on the analysis of waste production and industry contribution in historical years, the gray GM (1,1) model was used to predict the production of typical bulk industrial solid waste in specific industries from 2021 to 2025. The results showed that six typical bulk industrial solid wastes, such as tailings, fly ash, coal gangue, smelting waste residue, slag, and desulfurized gypsum, were generally concentrated in one or two specific industries, and the contribution of specific industries generally exceeds 80%. By 2025, the amount of tailings generated by metal mining and dressing industry, the amount of fly ash generated by the electricity and heat generation and supply industries, the amount of coal gangue generated by the coal mining and washing industry, the amount of smelting waste generated by the ferrous metal smelting and rolling processing industry, and the amount of slag and desulfurized gypsum generated by the power and thermal generation and supply industry will reach to 13.46×10^{11} , 6.45×10^{11} , 15.86×10^{11} , 6.21×10^{11} , 2.57×10^{11} , 2.50×10^{11} kg respectively in China, compared with 2019, the production increased by 55%, 39%, 238%, 73%, 52%, 131% respectively. The results of this study can provide a reference for the in-depth development of “zero waste city” during the “14th Five-Year Plan” period and the scientific formulation of environmental management policies for waste-producing industries. Full consideration should be given to industries that generate large amounts of waste, such as mining, metallurgy, electricity, and heat, and rationally plan the layout and capacity building of bulk industrial solid waste utilization and disposal facilities.

Keywords typical bulk industrial solid wastes; “14th Five-Year Plan” period; GM(1; 1) model