基于大气监督帮扶数据的中国生活垃圾焚烧发电厂环境问题特征与监管机制研究

李 刚[1]，王 晴[1,2,3]，徐 鑫[2,3]，伯 鑫[2,3]，杨小阳[1]，高元官[1*]

1. 中国环境科学研究院大气环境研究所，北京 100012
2. 北京化工大学环境科学与工程系，北京 100029
3. 北京化工大学，北化中国工业碳中和研究院，北京 100029

摘要：为改善大气质量并落实污染防治责任，生态环境部持续推进大气监督帮扶工作。基于 2018—2023 年大气监督帮扶数据，采用 TF-IDF(Term Frequency-Inverse Document Frequency) 数据挖掘算法分析生活垃圾焚烧发电厂环境问题特征。结果表明：①生活垃圾焚烧发电厂被发现的主要问题集中在环境管理记录和污染源在线监测两方面，2023 年问题企业改善率达 61%，表明大气监督帮扶工作可以有效解决生活垃圾焚烧发电厂的环境问题。②部分省份 (如河南省、河北省等) 生活垃圾焚烧发电厂被发现的环境问题较多，其中污染排放类问题占比均超过 55%，建议将此类地区作为重点监管区域，根据地方情况开展相对应的精细化环境管理措施。③中小规模生活垃圾焚烧发电厂被发现的环境问题多于大型垃圾焚烧发电厂，未来需加强对中小规模生活垃圾焚烧发电厂的环境管理、监督和技术帮扶。研究显示，生活垃圾焚烧发电厂的环境问题主要集中在环境管理记录与污染源在线监测方面，且存在区域和规模差异，因此，需精准施策，一方面强化对问题突出省份的监管，另一方面加强对中小规模焚烧厂的技术帮扶。

关键词：生活垃圾焚烧发电厂；大气监督帮扶；TF-IDF 算法；环境管理记录；在线监测
中图分类号：X32 **文章编号：**1001-6929(2026)01-0095-10
文献标志码：A **DOI：**10.13198/j.issn.1001-6929.2025.11.11

Research on the Environmental Problem Characteristics and Supervision Mechanism of China's Municipal Solid Waste Incineration Enterprises Based on Atmospheric Supervision and Assistance Data

LI Gang[1], WANG Qing[1,2,3], XU Xin[2,3], BO Xin[2,3], YANG Xiaoyang[1], GAO Yuanguan[1*]

1. Institute of Atmospheric Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
2. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China
3. BUCT Institute for Carbon-Neutrality of Chinese Industries, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

Abstract: In order to improve air quality and strengthen pollution prevention and control, the Ministry of Ecology and Environment has continuously promoted atmospheric supervision and assistance efforts across China. Using enterprise survey data collected during atmospheric supervision and assistance activities from 2018 to 2023, this study applies the TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) data mining algorithm to analyze the characteristics of environmental problems in municipal solid waste (MSW) incineration power enterprises. The results showed that: (1) The main problems identifies in MSW incineration power enterprises were concentrated in environmental management records and the online monitoring of pollution sources. In 2023, the improvement rate of problematic enterprises reached 61%, indicating that supervision and assistance efforts can effectively address environmental problems in MSW incineration power enterprises. (2) A large number of environmental problems in municipal solid waste incineration power enterprises

收稿日期：2025-06-03 **修订日期：**2025-11-21
作者简介：李刚(1989-)，男，河北邢台人，高级工程师，硕士，主要从事大气污染防治、大气污染来源解析研究，ligang01@craes.org.cn
* 责任作者：高元官 (1990-)，男，山西朔州人，中级工程师，硕士，主要从事大气污染防治、大气环境管理研究，gaoyg@craes.org.cn
基金项目：京津冀环境综合治理国家科技重大专项 (No.2025ZD1208400)；国家自然科学基金项目 (No.72174125)
Supported by National Science and Technology Major Project for Comprehensive Environmental Governance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China (No.2025ZD1208400); National Natural Science Foundation of China (No.72174125)

中国知网 https://www.cnki.net

were found in some provinces, such as Henan Province and Hebei Province, where pollution-emission-related problems accounted for more than 55% of all identified problems. Therefore, these regions should be designated as key regulatory zones and adopt refined environmental management measures based on local conditions. (3) More environmental problems were identified in small- and medium-sized MSW incineration enterprises than in large ones, suggesting the need to further strengthen environmental management, supervision, and technical assistance for small and medium-sized MSW incineration power enterprises in the future. In general, the study reveals that environmental issues in MSW incineration power enterprises mainly relate to environmental management records and online monitoring, with clear regional and enterprise-scale differences. Targeted supervision and technical support should be enhanced for provinces with prominent issues and for small and medium-sized incineration enterprises.

Keywords: municipal solid waste incineration enterprises; atmospheric supervision and assistance; TF-IDF algorithm; environmental management records; online monitoring

随着工业化和城镇化的发展,城市生活垃圾不断增加,2022 年我国生活垃圾清运量已达 2.44×10^8 t[1]。由于焚烧处理技术具有处理规模大、周期短、减量性高、占地小、能源回收效率高等优点,逐步成为处理城市生活垃圾的主流技术[2]。然而,垃圾焚烧过程中会产生大量的粉尘、HCl、SO_2、NO_x、二噁英及重金属等大气污染物,对环境造成一定的污染[3-6]。例如,二噁英为持久性有机污染物之一,已被国际癌症研究中心列为人类一级致癌物,其毒性、富集性、难以生物降解等特性会对环境和公众健康造成严重的威胁[7-9];同时,垃圾焚烧厂的兴起和长期运行也会造成“邻避效应”(民众对当地建设的环境污染性工厂、基础设施等的一种抵抗现象[10-11]),从而引起了更多的社会关注。为了确保生活垃圾焚烧发电厂(简称“垃圾焚烧厂”)的大气排放达到标准,保障公众健康和环境安全,我国政府采取了一系列严格的监管措施。

2017 年环境保护部正式启动大气污染防治强化督查行动,由环境保护部向重点区域城市派驻工作组,帮助地方发现企业环境问题,并督促问题的解决。2018 年该行动更名为“蓝天保卫战重点区域强化监督”,2019 年更名为“蓝天保卫战重点区域强化监督定点帮扶”,2021 年再次更名为“重点区域空气质量改善监督帮扶”[12-14],该行动历经 3 次更名并持续至今,在此统称“大气监督帮扶”。督查范围也从最开始的京津冀及周边地区“2+26”城市逐步扩展至汾渭平原、苏皖鲁豫交界地区、长三角等区域。大气监督帮扶工作效果显著,在整个“十三五”期间大气监督帮扶累计检查企业 210 万个,帮助地方发现问题 27.2 万个[12]。

近年来,大气监督帮扶相关研究日益丰富,研究成果已涵盖环境效益、经济影响及社会响应等多个层面。在环境质量改善方面,肖翠翠等[15]利用多元回归模型验证发现,大气监督帮扶政策对“2+26”城市的污染物浓度降低和空气质量改善有明显效果。王敏等[16]利用双重差分法分析太原市大气监督帮扶对空气质量改善的影响,结果表明,大气监督帮扶工作的开展对太原市 NO_2、$PM_{2.5}$、CO、SO_2 等污染物浓度的降低有明显影响。除此之外,关于大气监督帮扶的研究还涉及其他社会经济影响,如郝亮等[13]在研究中分析了大气监督帮扶制度的舆情走势,梳理了正面观点和负面观点,并基于负面舆情的来源和原因提出了政策实施的相关建议;贾如等[17]通过对太原市企业的问卷调查数据分析,评估了大气监督帮扶工作开展对企业环境守法的影响;王宇等[18]采用断点回归方法发现,大气监督帮扶工作对工业企业利润总额影响不显著,以此来评估大气监督帮扶工作的经济绩效。

综上,目前对大气监督帮扶的研究多集中在对重点区域大气监督帮扶工作开展后的环境改善和社会经济影响分析,而从行业视角出发、基于生活垃圾焚烧发电厂的大气监督帮扶数据开展系统研究的工作仍较为缺乏。因此,本研究从行业角度出发,基于我国垃圾焚烧厂的 2018—2023 年大气监督帮扶数据,通过数据挖掘算法,并结合问题分类、省份差异、规模大小等多角度展开分析,总结垃圾焚烧厂出现的环境问题特征,以期为垃圾焚烧厂更加精准、精细的环境管理提供决策依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 大气监督帮扶数据

本研究从大气监督帮扶数据中分析我国垃圾焚烧厂的环境问题,大气监督帮扶数据来源于大气监督帮扶平台,研究时段为 2018 年 1 月—2023 年 12 月,研究对象为垃圾焚烧厂。以垃圾焚烧厂自动监测数据公开平台中登记的垃圾焚烧厂为准,大气监督帮扶数据共涉及 203 家垃圾焚烧厂,分布于我国 23 个省份。研究期间,在大气监督帮扶平台中共收集到 521

中国知网 https://www.cnki.net

条垃圾焚烧厂监督帮扶信息, 涵盖了基础信息 (如污染源名称、地址、经纬度等)、检查信息 (如行业类别、生产状态、企业基本信息与线索核实等) 以及审核信息 (如问题类别、问题类型、问题处置情形与问题详述等)。经统计, 发现环境问题的垃圾焚烧厂共 149 家, 涉及 421 个环境问题, 约 2.7 万字问题详述, 包括治污设施安装与运行、污染源自动监控、粉尘无组织排放和环境管理等多方面问题。

1.2　研究方法

关键词提取是文本挖掘领域一个很重要的部分, 是对文本信息进行高度凝练的一种有效手段。对于文本数量较大的大气监督帮扶数据, 本研究通过高效的算法实现关键词提取, 之后将垃圾焚烧厂的环境问题信息可视化, 从而能够快速地获取大气监督帮扶数据中的关键环境问题信息。目前, 用于文本关键词提取的主要方法有 4 种, 分别为基于 TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) 的关键词抽取[19]、基于 TextRank 的关键词抽取[20]、基于 Word2 Vec 词聚类的关键词抽取[21] 以及多种算法相融合的关键词抽取[22], 其中 TF-IDF 算法简单高效, 是关键词提取中最常用的方法, 它通过计算词频和文档频率衡量词语的重要性[23-25]。本研究选择 TF-IDF 算法进行关键词提取, 主要原因如下: ①简单高效、计算速度快、易于实现, 适合处理本研究大规模文本数据; ②能有效识别文本中重要性高且区分度好的关键词语, 有助于发现环境问题描述中的核心词汇; ③作为经典算法, 结果直观易于解释。TF-IDF 算法的局限性在于主要依赖词频统计, 缺乏深层次语义理解, 如无法将同义词、近义词进行合并, 缺少上下文关联分析等。

TF-IDF 是一种用于信息检索与文本挖掘的常用加权技术, TF 是词频 (Term Frequency), IDF 是逆文本频率指数 (Inverse Document Frequency), TF 表示词条在文本中出现的频率, 通常进行归一化处理, 一般处理方式为词频除以文本总词数。IDF 表示关键词的普遍程度, 如果包含词条的文档越少, IDF 越大, 则说明该词条具有很好的类别区分能力。TF-IDF 的基本思路是词语的重要性与它在文件中出现的次数成正比, 但与它在语料库中出现的频率成反比。本研究使用 R 语言进行 TF-IDF 分析, 具体步骤包括: ①数据预处理, 对 421 条问题详述文本进行清洗, 去除无关符号、数字等, 之后进行分词, 将中文文本分割成词语; ②构建文档-词项矩阵, 将每条问题详述作为一个文档; ③应用式 (1)~(3) 计算每个词语在每个文档中的 TF-IDF 权重; ④汇总或按文档类别分析 TF-IDF 权重高的关键词。在完成 TF-IDF 计算后, 本研究进一步调用 WordCloud 绘图工具, 基于所计算的权重实现了数据的可视化, 图中文字的大小对应词语的 TF-IDF 权重值[24]。TF-IDF 关键词抽取算法的表达式[26] 如下:

$$\text{TF-IDF}_{i,j} = \text{TF}_{i,j} \times \text{IDF}_i \tag{1}$$

$$\text{TF}_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{\sum n_{k,j}} \tag{2}$$

$$\text{IDF}_i = \ln \frac{N}{n_i} \tag{3}$$

式中, $\text{TF-IDF}_{i,j}$为词语i在文档j中的最终权重分数, $\text{TF}_{i,j}$为词语i在文档j中的出现频率, $n_{i,j}$为词语i在文档j中所有文本中出现的次数, $\sum n_{k,j}$为文档j所有文本词语出现的次数之和, IDF_i为词语i的逆文档频率, N为数据集中的文本总数, n_i为包含词语i的文本数。

此外, 以 2018—2023 年我国生活垃圾焚烧厂大气监督帮扶内容为研究对象, 从环境问题的改善情况、省份差异、企业规模等不同角度对大气监督帮扶数据进行分析, 技术路线如图 1 所示。

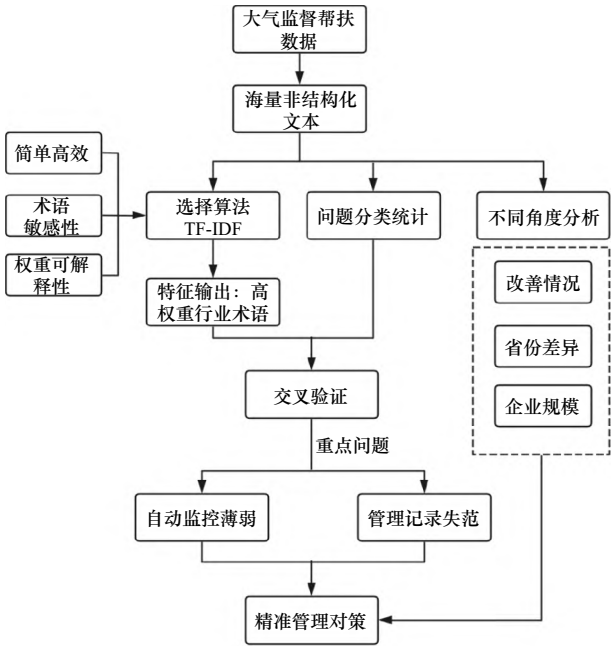


图 1　研究技术路线图

Fig.1 Technology roadmap

2　结果与讨论

2.1　我国生活垃圾焚烧发电厂环境问题整体情况

对大气监督帮扶发现的垃圾焚烧厂问题类别和问题类型进行分析, 在大气监督帮扶平台中共收集

中国知网　https://www.cnki.net

到 521 条垃圾焚烧厂大气监督帮扶信息，发现环境问题的共 421 条，涵盖 10 个一级问题类别，41 个二级问题类型。一级问题类别包括环评及排污许可制度类、污染源自动监控类、其他环境管理问题、粉尘无组织排放、治污设施安装与运行类、(专项) 自动监控设备建设运维不规范、应急预案合理性及其他问题等，其中，环评及排污许可制度类问题条数最多，为 117 条，占总问题条数的 27.8%；其次为污染源自动监控类、其他环境管理问题，分别为 105、79 条，分别占 24.9%、18.8%，三类问题共占总问题条数的 71.5% (见图 2)。在二级问题类型中排名前三的问题类型为自动监测设备运行维护不规范、其他环境问题以及未建立台账或台账记录不规范问题，问题数量分别为 83 条 (19.7%)、63 条 (15.0%) 和 42 条 (10.0%)。进一步分析，在大气监督帮扶发现环境问题的 149 家垃圾焚烧厂中，有 29 家垃圾焚烧厂同时存在环评及排污许可制度类、污染源自动监控类问题，占发现环境问题的垃圾焚烧厂数量的 19.5%。这说明垃圾焚烧厂普遍存在的环境问题主要在环境管理记录方面和污染源自动监控方面。

已有研究[27]指出，在线监测数据异常频发是垃圾焚烧厂环境管理中的一大问题，与本研究的发现基本一致。主要原因在于在线监测设备的故障率较高，一方面是由于不合理的结构布局与材质选择易使设备运行中承受额外应力或遭受腐蚀，影响长期运行稳定性；另一方面，高温、高湿、腐蚀性气体等恶劣运行环境也会损害设备结构与性能，因此需加强在线监测设备的日常维护与监管[28]。此外，一级问题类别中问题数量较多的环评及排污许可制度类以及其他环境管理问题也反映出了垃圾焚烧厂企业内部管理流程执行存在薄弱环节，一方面，部分企业尚未建立电子化台账系统，依赖人工记录易出现错漏；另一方面，台账管理与生产流程脱节，如焚烧工况参数与污染物排放记录不同步，暴露出企业环境管理责任未有效落实到生产环节。未来需通过责任制改革压实企业主体义务，并通过精准化监管引导管理升级，系统性提升环境管理的规范性与执行力。

进一步根据问题对环境影响的直接性和潜在严重性将发现的环境问题分为两大类：①涉及污染排放类问题 (32 个二级问题类型)，指可能直接导致污染物超标排放或增加环境风险的问题，如自动监测设备运行维护不规范、治污设施运行不规范、工业粉尘无组织排放、超标排污 (其他)、排污口设置不规范等；②不涉及污染排放类问题 (9 个二级问题类型)，主要指管理性、程序性问题，与污染排放没有直接关系，如未建立台账或台账记录不规范、排污许可证其他 (发证质量) 问题、其他环境问题、未设置“一厂一策”公示牌或内容错误等。

统计结果 (见表 1) 显示，涉及污染排放类问题共 265 条，占发现环境问题总数量的 62.95%，表明大气监督帮扶工作可以有效发现垃圾焚烧厂涉及排放污染风险的问题，在督促企业进行整改后，能够有助于减少垃圾焚烧厂的大气污染隐患。

2.2 大气监督帮扶数据关键词提取

对经筛选和关键词提取处理后的垃圾焚烧厂大气监督帮扶数据中的问题详述进行可视化，结果如

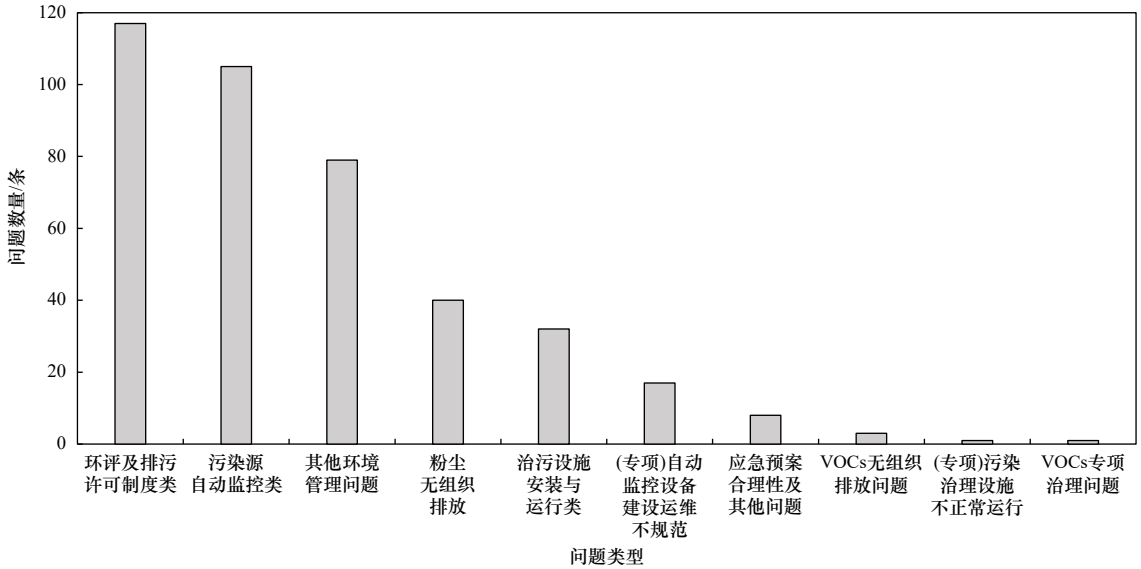


图 2 大气监督帮扶垃圾焚烧厂问题类别统计

Fig.2 Statistics of problem categories of waste incineration plants supported by atmospheric supervision

中国知网 https://www.cnki.net

表 1　大气监督帮扶垃圾焚烧厂问题类型统计

Table 1　Statistics of problem types of waste incineration plants supported by atmospheric supervision

项目	一级问题类别	二级问题类型	问题数量/条
涉及污染排放类	治污设施安装与运行类	治污设施运行不规范	20
		治污设施不正常运行(一般排放口)	5
		超标排污(其他)	3
		治污设施不正常运行(主要排放口)	3
		治污设施不正常运行	2
		超标排污或未执行超低排放标准	2
		通过旁路、暗管偷排污染物	1
	应急预案合理性及其他问题	清单中的减排措施与企业执行措施不一致	2
	污染源自动监控类	自动监测设备运行维护不规范	85
		自动监测设备不正常运行	15
		未按照排污许可要求安装自动监测设备或联网	3
		在线设备运行维护不规范	2
		未按照排污许可要求安装自动监控设施或联网	1
		自动监测数据弄虚作假	1
		在线监测数据弄虚作假	1
	其他环境管理问题	未落实重污染天气应急管控措施	1
	环评及排污许可制度类	未按许可证要求开展监测并保存原始记录	20
		排放口未纳入许可证或与许可证不一致	16
		排污口设置不规范	12
		实际建设情况与环评或排污许可不符	7
		设有旁路排口但未纳入日常监管	2
		未办理环评审批手续(未批先建)	1
	粉尘无组织排放	工业粉尘无组织排放	18
		物料堆场未落实扬尘治理措施	10
		未要求进行无组织管控(氨、异味等)	7
		建筑工地未落实“六个百分百”要求	7
	VOCs专项治理问题	未按照要求装载挥发性有机液体	1
	VOCs无组织排放问题	含VOCs工艺废气未按要求收集处理	2
		涉VOCs原辅料储存、输送等不符合要求	1
	(专项)自动监控设备建设运维不规范	自动监控设备技术性能不符合规范要求	7
		未按技术规范开展自动监控维护工作	6
	(专项)污染治理设施不正常运行	自动监测排口对应的治污设施不正常运行	1
不涉及污染排放类	应急预案合理性及其他问题	未设置“一厂一策”公示牌或内容错误	6
	其他环境管理问题	其他环境问题	63
		监测报告不实	16
		台账记录造假(其他)	2
		工业污染源未纳入清单或未制定“一厂一策”	2
	环评及排污许可制度类	未建立台账或台账记录不规范	42
		排污许可证其他(发证质量)问题	20
		排污许可证其他问题	1
	(专项)自动监控设备建设运维不规范	自动监控站房设施不完善	4

图 3 所示, 除“企业”“排污”“废气”“排放口”等无明显问题指向性的关键词外, “在线”“监测”“许可证”“设备”等关键词的 TF-IDF 值较高, 分别为 0.027、0.026、0.022 和 0.021, 出现频次分别为 151、185、96 和 121 次, 说明这些词语在整个垃圾焚烧厂环境问题详述中具有较高权重。“在线”“监测”关键词权重较高进一步说明了在线监测及污染源自动监控是大气监督帮扶发现的垃圾焚烧厂的核心问题之一; 此外,

中国知网　https://www.cnki.net

“许可证”“记录”“报告”等词也具有较高权重，与 **2.1** 节中一级问题类型“环评及排污许可制度类”问题数量最多相对应，说明企业内部管理问题是目前垃圾焚烧厂存在的另一普遍问题。虽然二级问题类别中“未建立台账或台账记录不规范问题”问题数量较多，但“台账”一词的权重并未排在前列，可能因其常以“台账记录”复合形式出现分散了词频，或因 TF-IDF 权重计算中 IDF 值相对较高。



注：文字的大小对应关键词的 TF-IDF 权重值大小。

图 3 垃圾焚烧厂大气监督帮扶问题详述数据关键词分析结果

Fig.3 Detailed data on supervision and assistance problems in domestic waste incineration power plants keyword analysis results

因此，综合关键词提取和详细分类统计结果，管理部门应着重推动垃圾焚烧厂加强两方面工作：①提升在线监测设备 (CEMS) 运营的规范性和有效性，确保数据真实可靠；②强化环境管理记录的完整性和规范性，垃圾焚烧厂内部可强化全流程精细化管理[29]。具体措施可包括推行电子化记录系统[30]，实现数据实时上传与共享；加强规范化运维培训，提高技术人员能力。

2.3 大气监督帮扶的改善效果

通过对比同一企业在多轮次大气监督帮扶检查中发现的环境问题变化，能够有效评估大气监督帮扶对企业环境问题整改的促进作用。2023 年共监督大气帮扶垃圾焚烧厂 160 家，与 2022 年大气监督帮扶的垃圾焚烧厂 (62 家) 重复 25 家 (重复率为 15.63%)。在重复的 25 家垃圾焚烧厂中有 12 家企业未再发现问题，有 2 家企业发现的问题数量减少，即共 14 家企业的问题状况得到了改善，本研究将重复检查企业中问题改善的企业占比定义为改善率，2023 年改善率为 60.87%。分析这 14 家企业的改善情况发现，问题减少或消除主要集中在环境管理记录类 (如台账记录规范化) 和在线监测设备运维规范性方面，这表明大气监督帮扶在督促企业加强内部管理流程和规范操作上取得了积极成效。

2.4 大气监督帮扶数据空间分布

对大气监督帮扶中的垃圾焚烧厂的空间分布进行分析，开展大气监督帮扶工作的垃圾焚烧厂主要分布在京津冀地区、河南省、山西省以及长三角地区，这主要与大气监督帮扶的工作范围有关。2018—2023 年垃圾焚烧厂的大气监督帮扶工作共涵盖 23 个省份，其中新疆维吾尔自治区、甘肃省、黑龙江省和吉林省的大气监督帮扶工作只涉及一家垃圾焚烧厂，且并未发现问题，所以对其余 19 个省份进行分析，结果如图 4 所示，垃圾焚烧厂出现问题较多的省份为河南省、河北省和山东省。2018—2023 年对河南省 36 家垃圾焚烧厂进行大气监督帮扶，发现环境问题的生活垃圾焚烧厂共 32 家 (占 88.89%)，检查出环境问题 91 条，平均每家企业发现 2.84 条问题，涉及污染排放类问题共 54 条 (占 59.34%)；对河北省 35 家垃圾焚烧厂进行大气监督帮扶，发现环境问题的垃圾焚烧厂共 29 家 (占 82.86%)，检查出 81 条环境问题，平均每家企业发现 2.79 条问题，涉及污染排放类问题共 45 条 (占 55.56%)；对山东省 26 家垃圾焚烧厂进行大气监督帮扶，发现环境问题的共 20 家 (占 76.92%)，检查出环境问题 60 条，平均每家企业发现 3.00 条问题，其中涉及污染排放类问题 46 条 (占 76.67%)。

河南省、河北省和山东省垃圾焚烧厂环境问题类别如图 5 所示。由图 5 可见：河南省垃圾焚烧厂环评及排污许可制度类问题数量最多，共 32 条 (占 35.2%)，其次为污染源自动监控类 (18 条，19.8%) 和其他环境管理问题 (18 条，19.8%)；河北省与山东省垃圾焚烧厂环境问题数量最多的问题类型均为污染源自动监控类，分别为 23 条 (占 28.4%) 和 18 条 (占 30.0%)。3 个省份垃圾焚烧厂环境问题类型基本与总体环境问题类型分布一致，进一步说明了环境管理记录方面和污染源自动监控方面问题在垃圾焚烧厂中的普遍性。

较高的问题企业比例主要与大气监督帮扶工作的精准性有关。大气监督帮扶工作的开展首先会利用卫星遥感、空气质量监测网络等技术手段，识别出“冒泡”站点，即空气质量监测中数据突然异常升高，超出正常水平或周边区域，能够表明该区域可能存在污染源或环境问题的监测站点，并溯源重点企业和污染源；之后执法人员拿着“冒泡”站点精准

中国知网 https://www.cnki.net

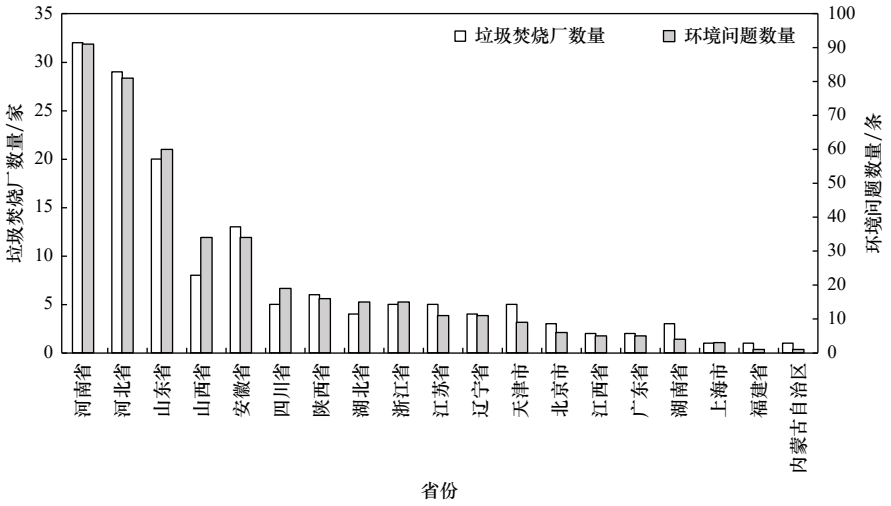


图 4　2018—2023 年各省份大气监督帮扶区域垃圾焚烧厂数量及环境问题数量统计

Fig.4 Statistics on the number of municipal solid waste incineration enterprises and environmental issues in the atmospheric supervision and assistance areas of each province from 2018 to 2023

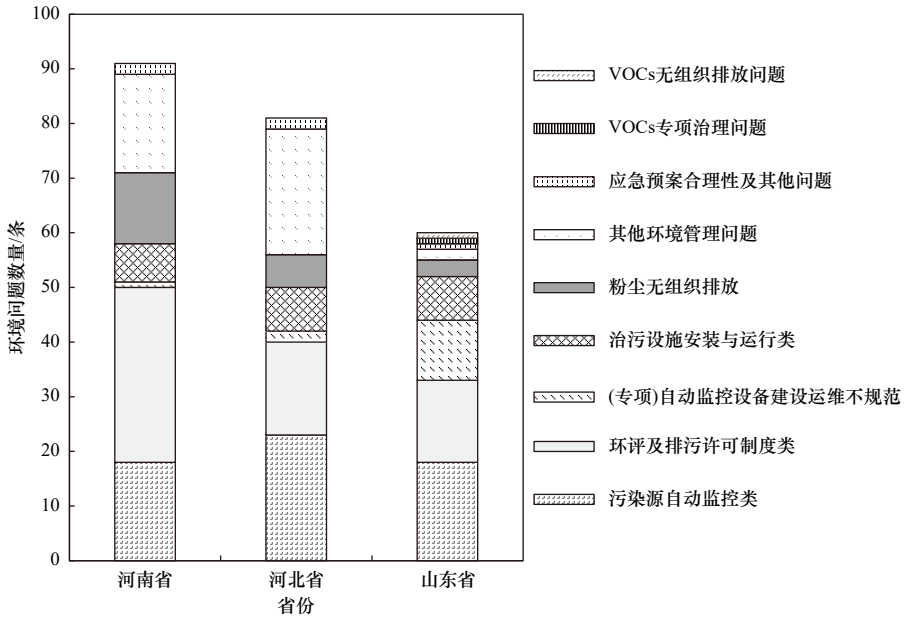


图 5　2018—2023 年河南省、河北省和山东省垃圾焚烧厂环境问题类别统计

Fig.5 Statistics on environmental problem categories of municipal solid waste incineration enterprises in Henan Province, Hebei Province, and Shandong Province

溯源识别到的重点行业、排放大户等线索清单, 带着问题去现场开展检查帮扶工作[31-32]。较高的问题企业发现率说明线索识别和现场核查较为有效。河南省、河北省和山东省作为大气监督帮扶的重点区域, 3 个省份现有的垃圾焚烧厂均超过 70 家, 数量较多, 且发现的环境问题也较多, 其中及污染排放类问题数量占各省份环境问题总数量的比例均超过 55%。针对这些重点省份, 有必要根据各省份垃圾焚烧厂情况来开展相对应的管理措施, 如山东省企业平均问题数量相对较高, 可关注重点问题企业, 相关环境部门根据本省份垃圾焚烧厂的问题特点, 制定更精细化的环境管理指南、核查清单或专项帮扶行动。优化大气监督帮扶策略, 对重点省份、问题高发区域适当增加大气监督帮扶的频次和深度, 探索“一厂一策”的精准帮扶模式。

2.5　不同规模企业环境问题特征分析

中国知网　https://www.cnki.net

本研究根据垃圾焚烧厂全厂总焚烧能力将垃圾焚烧厂共分为四类规模，特大类垃圾焚烧厂 (≥2 000 t/d)、Ⅰ类垃圾焚烧厂 (1 200~<2 000 t/d)、Ⅱ类垃圾焚烧厂 (600~<1 200 t/d) 和Ⅲ类垃圾焚烧厂 (150~<600 t/d)。对大气监督帮扶中发现环境问题的生活垃圾焚烧厂按规模进行分析，大气监督帮扶中特大类、Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类垃圾焚烧厂分别为 39、49、90 和 25 家，其中发现环境问题的四类垃圾焚烧厂分别为 27 家 (69.2%)、34 家(69.4%)、71 家(78.9%) 和17 家(68.0%)。垃圾焚烧厂自动监测数据公开平台中的数据显示，截至 2023 年，特大类和Ⅰ类，Ⅱ类、Ⅲ类垃圾焚烧厂数量分别为 130、212、460、181 家，Ⅱ类垃圾焚烧厂占比为 46.8%，600~<1 200 t/d 为目前主要的垃圾焚烧厂规模，进行大气监督帮扶工作的垃圾焚烧厂规模分布与总体规模分布基本一致。

从不同规模垃圾焚烧厂的环境问题数量 (见图 6) 来看，特大类垃圾焚烧厂发现的环境问题总数为 66 条，平均 2.40 条/家；Ⅰ类垃圾焚烧厂发现的环境问题总数为 88 条，平均 2.59 条/家；Ⅱ类垃圾焚烧厂发现的环境问题总数为 213 条，平均 3.00 条/家；Ⅲ类垃圾焚烧厂发现的环境问题总数为 213 条，平均 3.18 条/家，Ⅲ类垃圾焚烧厂环境问题较多。总体上看，Ⅱ类和Ⅲ类垃圾焚烧厂这种中小规模的垃圾焚烧厂环境问题相对较多，这可能与中小规模垃圾焚烧厂的技术水平、污染治理措施和运营成本有关。大规模焚烧炉能够降低设备故障率、提高稳定性，烟气更容易达标排放。相比较而言，小规模焚烧炉炉膛小、垃圾少、热稳定性差，炉温波动大，烟气成分波动也大，更容易出现环境问题，且小规模企业受资金限制，在运营成本上压力较大，管理水平落后于大规模企业。

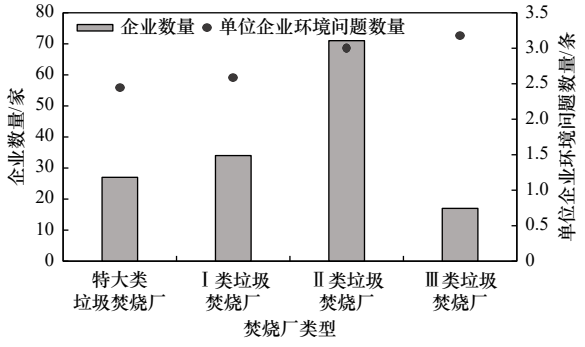


图 6 存在环境问题的各规模垃圾焚烧厂企业数量及环境问题数量统计

Fig.6 The statistics of the number of waste incineration power plants with environmental problems and the number of environmental issues respectively for each scale

基于上述发现，针对中小规模垃圾焚烧厂环境问题较多现象，建议相关环境部门完善其环境管理政策和技术帮扶体系；加大对中小规模垃圾焚烧厂的环境监管力度和大气监督帮扶覆盖，帮助其提升污染治理设施效率、运行管理水平。

2.6 不确定性分析

本研究对我国垃圾焚烧厂的大气监督帮扶数据分析存在一定的不确定性：①现场执法人员个体差异性。在对垃圾焚烧厂的大气监督帮扶工作中，现场执法人员在检查手段、检查重点、专业知识和能力素质方面存在个体差异性，在平台记录问题时使用的语句也未进行统一，存在表述偏差。未来可加强执法人员标准化培训和考核，使用统一的问题记录模板和填报指南。②企业代表性。本研究的研究对象为大气监督帮扶工作中实际检查的垃圾焚烧厂，受大气监督帮扶的范围 (重点区域为主)、频次和线索精准度影响，并未覆盖全国所有省份的全部垃圾焚烧厂，未来研究可结合全覆盖的自动监测平台数据进行补充分析。③大气监督帮扶政策。本研究的大气监督帮扶数据时段为 2018—2023 年，随着时间的推移大气监督帮扶政策可能会进行调整和变化，这些变化可能导致数据分析的基准和依据发生变化，从而影响数据分析结果的准确性和可比性。④数据收集和处理误差。在数据收集、预处理和计算过程中可能存在误差，文本描述的模糊性或歧义性也可能影响关键词提取和问题归类的准确性。本研究采用规范的数据处理流程，进行人工抽样校验，未来探索结合更先进的语义分析技术进行分析。

3 结论与建议

a) 综合大气监督帮扶数据中垃圾焚烧厂环境问题分类分析和关键词提取结果来看，环评及排污许可制度类、污染源自动监控类问题较多，且在大气监督帮扶中发现环境问题的垃圾焚烧厂中，19.5% 的垃圾焚烧厂同时存在环评及排污许可制度类、污染源自动监控类问题。问题详述中“在线”“监测”“许可证”“设备”等关键词权重较高，说明垃圾焚烧厂的普遍问题在环境管理记录和污染源在线监测两方面。2023 年问题企业改善率为 61%，说明大气监督帮扶工作在垃圾焚烧厂规范运行上具有成效。此外，建议管理部门精准化监管引导企业管理升级，推行电子化记录系统，实现数据实时上传与共享，同时加强规范化运维培训，提高技术人员能力，提升在线监测设备运营的规范性和有效性。

b) 大气监督帮扶工作中河南省、河北省和山东

中国知网 https://www.cnki.net

省垃圾焚烧厂发现的环境问题相对较多,其中每个省份涉及污染排放类问题占环境问题总数的比例均超过 55%。针对这些重点省份,建议相关管理部门根据各省份垃圾焚烧厂环境问题情况来开展相对应的管理措施,可关注重点问题企业,探索“一厂一策”的精准帮扶模式。

c) 从企业规模来看,中小规模的垃圾焚烧厂被发现的环境问题较多,平均每个企业出现的环境问题数量大于等于 3 条。建议相关部门完善针对中小规模垃圾焚烧厂的管理政策和技术帮扶体系。

参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴 [M].北京:中国统计出版社,2023.

[2] 张洁涵,康国俊,宋杨,等.焚烧技术在城乡生活垃圾处理中的应用现状与进展 [J].环境化学,2023,42(9):2978-2992
ZHANG J H,KANG G J,SONG Y,et al.Application status and progress of incineration technology for treatment of municipal and rural solid waste[J].Environmental Chemistry,2023,42(9):2978-2992.

[3] BO X,GUO J,WAN R X,et al.Characteristics,correlations and health risks of PCDD/Fs and heavy metals in surface soil near municipal solid waste incineration plants in Southwest China[J].Environmental Pollution,2022,298:118816.

[4] 汤铃,郭静,郭朋恒,等.山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放清单及其环境影响 [J].中国环境科学,2023,43(2):735-747
TANG L,GUO J,GUO P H,et al.PCDD/Fs emission inventory and environmental impact of municipal solid waste incineration plants in Shandong Province[J].China Environmental Science,2023,43(2):735-747.

[5] MA W C,CUI J C,ABDOULAYE B,et al.Air pollutant emission inventory of waste-to-energy plants in China and prediction by the artificial neural network approach[J].Environmental Science & Technology,2023,57(2):874-883.

[6] 李唯实,李丽,文卓钰,等.低温热处理生活垃圾焚烧飞灰中二噁英的降解机理 [J].环境科学研究,2023,36(6):1227-1235
LI W S,LI L,WEN Z Y,et al.Degradation mechanism of dioxins in municipal solid waste incineration fly ash by low-temperature thermal treatment[J].Research of Environmental Sciences,2023,36(6):1227-1235.

[7] HAN Y,XIE H T,LIU W B,et al.Assessment of pollution of potentially harmful elements in soils surrounding a municipal solid waste incinerator,China[J].Frontiers of Environmental Science & Engineering,2016,10(6):7.

[8] TANG L,GUO J,WAN R X,et al.Air pollutant emissions and reduction potentials from municipal solid waste incineration in China[J].Environmental Pollution,2023,319:121021.

[9] 杨立新,王静涵.环境污染物复合暴露毒性和健康风险评价方法研究进展 [J].环境科学研究,2025,38(2):419-427
YANG L X,WANG J H.Advances in toxic effects and health risk assessment of combined exposure to multiple pollutants[J].Research of Environmental Sciences,2025,38(2):419-427.

[10] 黄缪,陈尧.垃圾焚烧设施“邻避效应”及其应对机制 [J].城市管理与科技,2012,13(4):28-32.

[11] 黄朝雄.我国垃圾焚烧厂邻避效应实证研究 [D].北京:清华大学,2014.

[12] 王璇,郝亮,李一倬,等.大气监督帮扶制度发展历程及建设情况研究 [J].环境保护科学,2021,47(6):6-10
WANG X,HAO L,LI Y Z,et al.Study on formulation and institutional development of intensified inspection on air pollution[J].Environmental Protection Science,2021,47(6):6-10.

[13] 郝亮,贾如,王璇,等.大气监督帮扶的社会影响分析:基于 2017—2020 年网络舆论观察 [J].环境保护科学,2021,47(6):16-20
HAO L,JIA R,WANG X,et al.Social impact of intensified inspection on air pollution:based on online public opinion from 2017 to 2020[J].Environmental Protection Science,2021,47(6):16-20.

[14] 王璇,朱丽瑛,郭红燕.持续推进大气监督帮扶 助力深入打好蓝天保卫战 [J].环境保护,2024,52(12):49-52
WANG X,ZHU L Y,GUO H Y.Continuing to promote atmospheric supervision and assistance to help deepen the campaign to protect the blue sky[J].Environmental Protection,2024,52(12):49-52.

[15] 肖翠翠,郭培坤,常杪,等.大气污染防治督查结果特征分析与政策效果评估:以京津冀及周边地区大气污染传输通道城市为例 [J].干旱区资源与环境,2019,33(11):42-48
XIAO C C,GUO P K,CHANG M,et al.Characteristics and effect evaluation of air pollution prevention and control inspection results:taking Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas as an example[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2019,33(11):42-48.

[16] 王敏,冯相昭,梁启迪,等.太原市强化监督定点帮扶对空气质量改善的作用 [J].环境与可持续发展,2020,45(1):160-166
WANG M,FENG X Z,LIANG Q D,et al.Effect of enhanced supervision and designated assistance on improving the air quality in Taiyuan[J].Environment and Sustainable Development,2020,45(1):160-166.

[17] 贾如,王璇,郝亮,等.大气监督帮扶对企业环境守法的影响分析:基于太原市企业问卷调查 [J].环境保护科学,2021,47(6):11-15
JIA R,WANG X,HAO L,et al.Impact of intensified inspection on air pollution on corporate environmental compliance:based on questionnaire survey in Taiyuan[J].Environmental Protection Science,2021,47(6):11-15.

[18] 王宇,王勇,俞海,等.蓝天保卫战重点区域强化监督的环境与经济绩效评估 [J].环境与可持续发展,2020,45(2):60-64
WANG Y,WANG Y,YU H,et al.Environmental and economic performance evaluation of strengthening supervision in the specific region of blue sky defense[J].Environment and Sustainable Development,2020,45(2):60-64.

[19] 张爱华,孙嘉鸿.基于 TF-IDF 算法的运营商客户投诉原因研究 [J].北京邮电大学学报 (社会科学版),2024,26(2):39-49

中国知网　https://www.cnki.net

ZHANG A H,SUN J H.Reasons for customer complaints in operators based on TF-IDF algorithm[J].Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications (Social Sciences Edition),2024,26(2):39-49.

[20] FAKHREZI M F,BIJAKSANA M A,HUDA A F.Implementation of automatic text summarization with TextRank method in the development of Al-qur´an vocabulary encyclopedia[J].Procedia Computer Science,2021,179:391-398.

[21] SHARMA A,KUMAR S.Ontology-based semantic retrieval of documents using Word2Vec model[J].Data & Knowledge Engineering,2023,144:102110.

[22] TU S Z,HUANG M L.Mining microblog user interests based on TextRank with TF-IDF factor[J].The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications,2016,23(5):40-46.

[23] 唐家渝,刘知远,孙茂松.文本可视化研究综述 [J].计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(3):273-285
TANG J Y,LIU Z Y,SUN M S.A survey of text visualization[J].Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics,2013,25(3):273-285.

[24] 李昌兵,赵玲,李晓光,等.基于 TF-IDF 加权的卷积神经网络文本情感分类模型 [J].重庆理工大学学报 (自然科学),2021,35(11):109-115
LI C B,ZHAO L,LI X G,et al.Text sentiment classification model based on TF-IDF weighted convolutional neural network[J].Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science),2021,35(11):109-115.

[25] HAVRLANT L,KREINOVICH V.A simple probabilistic explanation of term frequency-inverse document frequency (tf-idf) heuristic (and variations motivated by this explanation)[J].International Journal of General Systems,2017,46(1):27-36.

[26] 王媛,朱荣杰,伯鑫,等.中国钢铁企业环保舆情大数据分析 [C].南昌:中国环境科学学会 2022 年科学技术年会,2022:431-437.

[27] 关亚军.生活垃圾焚烧厂运营的环境监管制度研究 [D].苏州:苏州大学,2021.

[28] 林俊,姜友春.垃圾焚烧发电在线监测设备故障分析与维护 [J].重庆电力高等专科学校学报,2023,28(1):30-34
LIN J,JIANG Y C.Fault analysis and maintenance of the continuous emission monitoring system for the MSW incineration power plant[J].Journal of Chongqing Electric Power College,2023,28(1):30-34.

[29] 柳青,马云峰,陈潇玲,等.浅析省域生活垃圾焚烧企业精细化管理影响因素:以浙江省为例 [J].环境卫生工程,2024,32(3):110-116
LIU Q,MA Y F,CHEN X L,et al.Analysis of the impact factors of fine management of provincial municipal solid waste incineration enterprises:a case study of Zhejiang Province[J].Environmental Sanitation Engineering,2024,32(3):110-116.

[30] 吴建华,罗志雄.垃圾焚烧厂信息化系统的研究与应用 [J].电力信息化,2012,10(4):52-55
WU J H,LUO Z X.Research and application of waste incineration information system[J].Electric Power Information Technology,2012,10(4):52-55.

[31] 中国环境报.重点区域空气质量改善监督帮扶有何亮点?[EB/OL].北京:中国环境报社,(2023-07-20)[2025-04-14].https://epaper.cenews.com.cn/html/2023/20230720/20230720_002/20230720_002_4814.html#1.

[32] 赵虎,薛军,徐淑民,等.“互联网+”在垃圾焚烧发电环境监管执法中的创新应用研究 [J].环境与可持续发展,2021,46(4):111-114
ZHAO H,XUE J,XU S M,et al.Research on the innovative application of ‘Internet+’ in the environmental enforcement and supervision of waste incineration power generation[J].Environment and Sustainable Development,2021,46(4):111-114.

(责任编辑:刘 方)

中国知网 https://www.cnki.net