

范可欣,高健,陕亮,等.工业源大气污染物排放、检测和监管现状及展望[J].环境工程技术学报,2025,15(1):193-202.

FAN K X,GAO J,SHAN L,et al.Status and prospects of emission, detection, and supervision of air pollutants from industrial sources[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(1): 193-202.

工业源大气污染物排放、检测和监管现状及展望

范可欣¹,高健¹,陕亮²,陈嘉翊²,马彤¹,高锐¹,陈建华^{1*},刘翰青^{1*}

1.环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院

2.国网商用大数据有限公司

摘要 为有效应对生态环境挑战并实现“双碳”目标,我国实施了一系列的生态环境保护策略,为重点行业制定了更为严格的治理标准,对工业源的监管提出了新要求。回顾了我国工业源大气污染排放现状及其对环境空气质量的影响,综合评价了当前采用的固定源污染排放检测手段以及相应的排放监管方法。结果表明,在加强工业源管控的背景下,污染状况已得到明显改善。未来通过多源数据融合,有望进一步提升工业源污染监测的准确性和时效性,从而实现工业源排放更为精准和实时的监管。随着信息技术的发展,物联网、大数据在工业源监管领域的应用越来越广泛,在一定程度上弥补了目前工业源监管精准性和时空分辨率上的不足。企业用电数据覆盖面广、实时性强、数据质量高,可设计开发用电监管指标,作为工业污染源排放的辅助监管手段推广应用。

关键词 工业源;大气污染;排放检测;监管技术;用电数据

中图分类号:X51 文章编号:1674-991X(2025)01-0193-10 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20240170

Status and prospects of emission, detection, and supervision of air pollutants from industrial sources

FAN Kexin¹, GAO Jian¹, SHAN Liang², CHEN Jiayi², MA Tong¹, GAO Rui¹, CHEN Jianhua^{1*}, LIU Hanqing^{1*}

1.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.State Grid Commercial Big Data Co., Ltd.

Abstract In order to effectively address eco-environmental challenges and achieve the "dual carbon" goals, China has implemented a series of environmental protection strategies. These strategies set stricter governance standards for key industries and propose new requirements for supervising industrial sources. The authors reviewed the current status of industrial air pollutant emissions in China and their impacts on ambient air quality. Additionally, they comprehensively evaluated the emission detection methods for current stationary source emissions and the corresponding supervision methods. The results indicated that the pollution situation had improved under the control of industrial sources. In the future, it was expected that the accuracy and timeliness of industrial source emissions monitoring would be further enhanced through the integration of multi-source data, thereby achieving more accurate and real-time supervision of industrial source emissions. With the development of information technology, the application of the Internet of Things and big data in industrial sources supervision is becoming increasingly widespread, which could compensate for the shortcomings in the precision and spatiotemporal resolution of current industrial sources supervision. Industrial electricity consumption data, which has broad coverage, strong real-time capabilities, and high data quality, could be used to design and develop electricity monitoring indicators. These indicators could serve as an auxiliary means for supervising industrial source emissions.

Key words industry sources; air pollution; emission detection; regulatory technology; electricity consumption data

党的二十大报告提出“要推进美丽中国建设”“深入推进污染防治。坚持精准治污、科学治污、依法治污,持续深入打好蓝天、碧水、净土保卫战。加强污染物协同控制,基本消除重污染天气。”^[1]

收稿日期:2024-03-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3703400)

作者简介:范可欣(2000—),女,硕士研究生,主要从事大气科学研究, fankx_china@163.com

*通信作者:1.陈建华(1970—),女,研究员,博士,主要从事大气环境化学研究, chenjh@craes.org.cn

2.刘翰青(1992—),男,工程师,硕士,主要从事大气环境科学研究, liuhanqing@craes.org.cn

在当前形势下,我国部分地区仍存在复合型污染现象,秋冬季在不利的天气条件下依旧可能发生中重度污染事件^[2]。2023 年全国环境空气质量状况显示,全国 339 个地级及以上城市平均空气质量达到优良水平的天数比例为 85.5%,京津冀及周边地区、长三角地区和汾渭平原等重点区域的优良天数比例均低于全国平均水平,重度及以上污染天数比例同比都有所增加^[3]。因此,应深入贯彻生态文明理念,持续打好污染防治攻坚战。

目前,工业废气排放是造成大气污染的重要原因之一,工业企业的减排措施动态调整是污染治理的重要主体,直接影响我国生态文明建设与绿色转型进程^[4]。自 2013 年实施《大气污染防治行动计划》到 2021 年收官的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,中国工业排放得到了一定的缓解,但是主要的措施集中在末端防治上,如制定排放标准,排口安装治污设施等^[5]。为有效应对中重度大气污染现象的发生,削弱大气污染峰值,缩短重污染天气持续的时间,生态环境部门出台了重污染天气应急预案,对工业企业的管控措施进行落实,做到了涉气企业全覆盖。对重污染天气应急管控效果评估的结果表明,相比于不采取措施,采取重污染应急措施可以有效降低污染等级,显著提高空气质量^[6]。如京津冀地区 2020—2021 年秋季采取应急措施治理后,5 种大气污染物排放量和高位累积浓度都有下降趋势^[7]。

由于违法生产排污屡禁不止,重污染应急期间依旧存在许多应急管控落实不到位的问题^[8]。在“2+26”城市联合防治行动中,地区之间对于管控措施的落实情况并不均衡,由于地方政府管控力度和监管方式各不相同,且区域间存在检测技术的差异,一些企业的管控情况相对薄弱,存在偷排漏排问题,导致部分地区颗粒物浓度不降反增^[9-10]。本研究梳理了中国工业源大气污染排放现状及其对环境空气质量的影响,探讨了工业源监管对污染减排的重要性。进一步通过对现有污染物检测技术和监管手段的深入研究,阐述了其工作原理及适用场景,并对比分析了它们的优劣。这些分析结果为优化和完善不同区域、不同类别工业源的排放监管方法提供依据。

1 我国工业源大气污染排放现状及对空气质量的影响

1.1 工业源大气污染排放现状

近年来有多项研究揭示了各个国家及地区的污染物排放现状。Lonsdale 等^[11]对北美、东亚和欧洲

的 54 个城市中 NO_x 的排放量进行分析,结果表明,相较于北美和欧洲城市,2019—2022 年东亚城市的 NO_x 平均排放量通常更高,且对减排措施的反应更为显著。Xu 等^[12]的研究表明,由于中国的工业化进程以煤炭为主导,中国黑炭排放量在全球排名靠前,且黑炭排放量 1960—2017 年整体呈现上升趋势。此外,Dou 等^[13]对 2021 年全球 CO_2 空间分布的研究表明,中国东南部地区是全球 CO_2 浓度高值区之一。

中国正面临着快速城市化带来的空气污染问题。许多地区的空气污染物浓度较高,特别是在靠近工业园区的区域,原料运输和烟囱排放的污染物进一步加剧了这一问题。尽管中国政府为了防止空气质量恶化已经采取了较多措施,并且在近 10 年来取得了历史性的空气质量改善成果,但冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染问题依然严峻, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的复合污染现象日益受到关注^[14]。2022 年生态环境部发布的环境统计年报中显示,工业源废气中 SO_2 、 NO_x 、PM 和 VOCs 排放量分别为 183.5 万、333.3 万、305.7 万和 195.5 万 t,分别占对应废气排放总量的 75.4%、37.2%、61.9% 和 34.5%^[15]。清华大学碳核算数据库团队发表的《新兴经济体二氧化碳排放报告 2023》^[16]中指出,2010—2020 年中国工业化和城市化造成的化石能源消耗产生的 CO_2 排放量一直在上升,电、热、燃气和水生产行业、黑色金属冶炼和压延、非金属矿物制品业 2020 年能源消耗产生的排放量为 781 910 万 t,占化石能源产生的碳排放总量的 79%。可见,工业活动在全国大气污染排放中具有重要作用,工业源减排具有很大的潜力。

从各地区来看,中国不同地区的工业源污染排放水平存在显著差异^[17],全国超过 1/2 取得排污许可证企业聚集在京津冀及周边地区,重点行业污染物最大允许排放量均占全国对应行业排放总量的 25% 以上,就该区域 SO_2 而言,排放量呈逐年下降的趋势,且总排放量越大的地区,减排速度越快,但工业烟尘排放水平仍是需要控制的重点^[18-19]。在长三角、珠三角等重点地区,工业部门的 SO_2 、CO、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 排放量同样较大,占各污染物总量的比例较高^[20-22]。例如以浙江为代表的工业发展迅速的地区,电力和热力生产、纺织、非金属矿产品工业的排放量更是占据了污染物总排放量的 50% 以上^[23]。Zhou 等^[24]对山东省的大气污染排放分析表明,工业燃烧和发电厂排放的 SO_2 和 NO_x 对全省相应污染物排放贡献率超过 60%,工业过程排放的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 分别占全省相应污染物总排放量的 67.6% 和 78.7%。这些数据进一步强调了工业

源在区域污染物排放中的重要性,但不同地区由于工业结构和能源使用的差异,污染物排放的具体情况有所不同,因此减排政策制定和执行时需要考虑地区差异性。

1.2 工业源排放对空气质量的影响

工业化是深刻影响空气质量的因素之一,Zhang 等^[25]对不同收入等级的各个国家在城市化发展进程中的空气污染状况进行分析表明,城市发展所需要的能源消耗和工业发展是环境空气质量退化的主要原因,随着工业化水平的发展,空气污染的严重性和类型也会发生相应改变,因此作为发展中国家,我国的空气污染事件常发生在人口密集、工业较为发达的城市和地区。马瑞等^[26]对 2022 年北京市 2 次较大的污染过程区域颗粒物的来源进行分析,发现 4 月的污染过程 PM₁₀ 的工业源贡献占比超过 50%,在 11 月的 PM_{2.5} 污染过程中,工业源对污染物浓度的贡献也呈显著升高的趋势。以邯郸为代表的华北平原地区工业源对 PM 浓度的贡献在污染程度轻的时候更大^[27]。Wang 等^[28]采用轨迹聚类、潜在源贡献和浓度轨迹分析方法,探讨了辽宁中部城市群 2015—2020 年污染物浓度时空分布,发现秋冬季颗粒物的污染过程主要归因于周边地区工业源的区域传播。Yang 等^[29]的研究也表明工业排放不仅会对本地的颗粒物污染产生贡献,同时对周边的空气质量有负面影响。这些研究结果表明,有效的空气污染控制需要综合考虑工业源的排放、区域传播的影响以及季节性变化等因素。

企业关停和工业源减排措施能在极大程度上改善空气质量。美国国家航空航天局发布的中国上空 NO₂ 数据表明,在新型冠状病毒感染暴发后观察到作为工业污染示踪剂之一的 NO₂ 浓度大幅度下降,NO₂ 污染从武汉开始减少,然后扩展到全国其他地区,在中部地区 NO₂ 的排放量减少 30%^[30]。京津冀地区作为我国重要的工业城市聚集区,空气质量受工业源影响极大,许多学者对京津冀地区“十三五”期间污染情况分析表明,对工业源实施减排措施可以有效降低各类污染物浓度水平,关停落后企业、整治“散乱污”企业、实施超低排放、对重点企业采用脱硫脱硝治理等减排措施使得京津冀地区重污染天数有所减少,空气质量明显改善^[31-32]。同时珠江三角洲在全国和地方的减排政策下,工业源排放量显著减少,PM 年平均浓度在 2006—2020 年下降了 58% 以上^[33]。企业关停及工业源减排过程中,持续的政策支持和对政策的有效执行是确保空气质量持续改善的关键因素。

2 工业源排放检测手段

2.1 常规检测手段

为了实现对污染源排放的有效管理,执法人员会定期对企业进行现场手工采样监测,GB/T 16157—1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》规范了固定污染源有组织排放的采样分析方法,HJ 836—2017《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》规定了测定固定污染源废气中低浓度颗粒物的称量方法。对烟道、烟囱、排气口等固定污染源的大气污染物排放监测进行规范,规定了采样的工况、位置和采样点布设方法,提供了采样装置和仪器的原理以及对应采集样品的颗粒物或气态污染物测定和分析计算标准^[34-35]。

由于现场手工采样时效性较差,并且需要对采集的样品进行称重和计算,难以对工业源进行高时间分辨率的监测,部分地区部分行业对排污企业重点管控环节安装监控或监测污染物的传感器,并将实时获取企业的生产及排污状况并上传至网络。如烟气排放连续监测系统(continuous emissions monitoring system, CEMS)可以连续采集企业的现场污染物排放数据,对污染源的排放情况进行远程监控,制定工业源动态排放清单,具有连续监测和高精度的优点。HJ 75—2017《固定污染源烟气(SO₂、NO_x、颗粒物)排放连续监测技术规范》对固定源的连续监测系统的安装、运行、维修和数据处理问题进行规范^[36]。Bo 等^[37-38]采用 CEMS 的各项污染物实时测量数据,对中国发电厂、钢铁、水泥和石灰生产等行业的排放系数进行估算,构建出高时空分辨率的各项污染物排放清单。马婧怡^[39]基于重点污染源的 CEMS 在线监测数据对长治市钢铁行业的各类污染物排放量以及 2021 年相较 2020 年的变化情况进行分析,对当地钢铁行业是否完成超低排放等整改措施进行判断。CEMS 作为生态环境保护手段,在火力发电厂、钢铁、水泥和锅炉等重点排污行业应用较为普遍^[40]。

2.2 移动式传感器检测手段

一些研究人员通过便携式检测仪器如离子化检测仪、VOC 检测仪和风速仪等,对固定污染源排放的气态污染物浓度进行灵活检测。通过不同的颗粒物采样仪器和模拟技术,可以对企业的污染物排放进行现场分析和处理,根据具体情况对企业的排放量做出科学明确的判断,从而进一步制定整体工厂减排策略,提高工业排放源的管控能力^[41]。执法人员通过携带移动式传感器对污染源排放现场进行随

机抽查,对定期人工采样检测进行有效补充,极大提高了工业源排放检测的时效性和灵活性,实现散乱污企业的识别,燃煤电厂超低排放改造情况的监控,为工业源监管提供科技武装^[42-43]。

将污染物传感器搭载于移动设备上,可以辅助构建较为完整的区域污染物实时监控系統,由此了解污染物的分布和时空变化、重污染区域的分布与污染源定位^[44]。将质谱仪安装在车辆上,可以对城市路段进行移动观测,对区域大气污染情况进行线路分析,对于高污染地区或固定站无法覆盖的地区可以重点排查,实现对高污染园区的高效灵活管理,还可以对工业园区进行连续走航,对目标区域污染物排放浓度高值区和企业位置进行对应分析,确定异常排污企业^[45-46]。

由于无人机制造业以及便携式探测器建设领域的快速发展,无人机在大气污染探测中的应用不断发展。无人机走航不受地形限制的影响,且小型无人机易于操作、观测灵活,可以准确测量空气中选定污染物的浓度,以生成高质量的浓度图,定位其主要来源,甚至量化这些来源的排放率^[47-48]。Qiu 等^[49]提出了应用无人机监测平台对高质量浓度的污染物进行采样,采用大气扩散模拟工具训练的人工神经网络对排放源进行量化,对化工园区排放的空气污染物进行来源分析,定位排放异常偏高的工业源。

2.3 遥感技术监测手段

自 1960 年以来,卫星观测开始取得进展,基于对卫星资料的反演,可以对大气中的多种污染物进行全球尺度上的观测,且不受站点分布的影响,在对大范围地表空气污染的实时监控和空气质量模型构建方面做出巨大贡献。随着卫星载荷仪器的不断发展,国内外遥感技术的时空分辨率也在不断提升,极大增强了卫星遥感技术在精确识别和定位局部大气污染源方面的应用潜力^[50-51]。Wan 等^[52]通过稳定小波统计和平滑扫描统计方法,基于卫星数据和工业物联网的集成,建立了一个检测工业园区污染浓度和定位污染区域的方法,并将该方法成功应用于污染过程检测中,提升了工业污染的检测和定位能力。

激光雷达目前已成为一种成熟的大气污染探测技术,可以对大气成分进行远程监控识别,高灵敏度、高时间分辨率的激光雷达可以对大范围大气污染情况进行实时准确的检测。Gong 等^[53]通过调节中红外激光雷达波长,成功对不同污染物进行观测,对 NO_x 和 SO_2 的最低检出限分别达到 0.07 和 0.31 mg/m^3 ,高时间分辨率可以保证对污染物浓度进行实时预警。Kuang 等^[54]使用的激光雷达有效范围在 5

km 左右,可以有效探测大气污染物的分布情况以及区域污染的垂直分布,通过地面垂直探测、地面扫描探测等多平台、多维度探测,实现边界层大气的三维探测,为气象研究和环境监测提供探测数据。王艳琪^[55]利用激光雷达垂直扫描与平面扫描相结合的观测方法,通过平面扫描反演获得山东临沂和济南地区的大气边界层污染物分布情况,并基于该检测结果对污染物过高的区域进行标定,为进一步排查提供参考。

随着电子、计算机和通信工程的进步,地面测量、数据收集和处理变得更加可靠、高效,污染物排放检测手段也越来越多,这些手段相互配合,相互弥补不足之处,可以作为掌握工业源排放水平的有效辅助方法。

2.4 空气质量站点评估

根据 GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[56],规定了环境空气功能区分类、标准分级、污染物监测方法等内容,将 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_x 、 CO 、 O_3 和 SO_2 等作为评估指标,反映空气质量的变化。当 6 项指标超出一定阈值时,人体暴露于空气污染中的健康风险提升。

通过离散的监测站点数据,可以对区域大气的平均水平进行评估,识别空气质量异常情况。目前,我国建成国控城市站点超过 1 700 个,建成具备 6 种污染物参数识别能力的非国控城市站点超过 3 500 个,监测站点数据结合不同天气分型下的气象数据,利用源解析方法可以对大气污染物的分布和传输进行更精确的把握,从多角度确定污染各组分的占比、各类污染源的贡献、不同地区来源的占比以及确定污染水平高值地区的分布和潜在源区^[57]。谭琼^[58]根据自动监测站点,结合地理信息系统等技术建立了一个工业园区自动检测大气污染物系统,可以对监测站点附近的污染超标情况进行及时反馈和溯源分析。薛四社等^[59]提出了一种主要针对工厂数量庞大的大型工业园区的污染识别系统,通过空气质量监测站对区域污染状况进行实时监控,当监测站显示某子区域污染物浓度异常偏高时辅以无人机对标记定位进行进一步排查,可以最终确定污染源的具体位置。

目前污染源识别和检测手段日益增加,各种技术的准确率和时空分辨率也在不断提高,单一检测手段的优缺点如表 1 所示,随着未来多源数据融合的技术不断发展,可以促进污染源识别检测的多手段协同互补,从而对污染源的排放量进行实时高效的评估。

表 1 污染源检测技术优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of stationary source detection technologies

检测技术	优点	缺点
常规检测	现场手工采样,有规范的采样分析标准,数据准确度高,可用作企业违规判定的依据;CEMS对高排放行业企业实现污染源排放连续检测	现场手工采样时效性差,需要耗费大量人力物力,偏远地区“散乱污”企业无法覆盖;CEMS安装维护成本高,无法覆盖规模小、分布散的小型企业,且存在数据造假的可能
移动式传感器检测	时间空间上较为灵活,可以针对可疑地区重点排查;无人机航测不受地形影响,观测灵活	依赖于检测仪器的精确性,无法对污染源进行长时间尺度下的连续检测,对环境因素变化敏感,对仪器进行动态校准困难 ^[60] ;需要考虑航拍管制、恶劣天气等问题,受负载能力和飞行时长的局限
遥感技术检测	卫星观测尺度大,时效性高,不受地形和观测场地的影响;激光雷达可以对有效范围内污染情况进行远程实时三维观测	地表非均一性、云量和大气变化容易对卫星观测的准确性产生干扰,存在空间分辨率的问题;激光雷达仅对平扫范围内有效探测
空气质量站点识别	站点数量多、分布广,可以覆盖全国大部分地区并对区域大气质量进行评估,为污染溯源提供依据	对污染源的确定依赖于站点的分布是否具有足够的时空代表性,只表征区域大气污染平均状态,实际定位定量观测还需要进行排查,且容易受到风向、风速等外部因素影响

3 工业源排放监管技术

对工业源进行污控管理和减排治理能有效减少污染物的排放,显著提高空气质量。因此,不仅要着眼于工业源污染排放末端的治理,也应加强对企业的监管,对治污水平落后的企业进行停限产管控;同时为防止企业管理者出于利益的考虑对减排的忽视,要求当地政府对企业的违规超排行为进行识别和清查。

3.1 常规监管技术

环境执法部门依照 HJ 606—2011《工业污染源现场检查技术规范》,定期对工业污染源开展生产设施、工艺过程、生产工况和排污状况的巡查工作,检查排污单元是否遵守污染物排放标准,对排污企业的管控措施落实情况进行现场排查并以此对违法企业进行处罚^[61]。固定污染源现场检查是目前唯一依法对违反环境保护法律法规的行为进行判决和处罚的监管方法。但由于企业数量庞大、排口众多,现场监管需要严格按照标准执行,耗时耗力,且在时效上存在局限性,难以实现对海量企业的实时监管^[62]。

CEMS 烟气在线监测系统是由采样系统、分析仪器、数据采集与处理系统以及通信模块共同构成的,对工业源排口进行气态污染物和颗粒物 24 h 连续监测并将实时信息上传至生态环境部门的一种辅助监管工具。CEMS 系统的污染物监测子系统和颗粒物监测子系统将观测到的污染物浓度和排放量各项参数进行实时上传分析,由此对可能存在异常的工业企业进行标定识别。王彦琦等^[63-64]针对火电、水泥等行业,制定出基于 CEMS 监测数据的企业排污水平达标判定方法。

3.2 物联网大数据监管技术

随着信息技术的发展,模式模拟技术也被广泛应用于异常排放的识别中,Cheng 等^[65]提出了一种

针对密集工业园区中异常排放源的定位方法,通过在稀疏监测网络中引入等效源来表征真实源,从而识别超标排放的来源。同时物联网技术与多源数据的融合也逐渐加深,将不同大气污染物排放监管信息实时整合,可以构建执法监管系统,刘柏音等^[66]将车载机载等移动设备和手持移动终端数据上传至物联网,进行综合处理,作为企业违法行为识别的辅助方法。

大数据技术以统计学为基础,辅以数据挖掘和机器学习等分析方法,为政府部门在生态环境文明建设中提供了强大的数据处理能力,进而构成大气监管的大数据体系。为了采取针对性行动对美国的电力行业实现电网脱碳,Miller 等^[67]表示以年为单位的排放量或排放系数已经不够精确,需要获取尽可能接近实时的高质量部门测量数据,建议通过建立公开数据集来获取美国电力行业的小时发电量、燃料消耗量和大气污染物的直接排放量。晁昆等^[68]采用运营商大数据,通过用户画像和数据挖掘等技术,获取包含企业开工、停工时用户群体的聚集状态、业务软件使用频率时间和业务数据特征等大数据,即可初步判断企业的开停工状态。

大数据在大气污染防治中的应用日益广泛,多源数据融合技术已成为提升监管效率的关键。结合多种辅助手段共同识别的方法,极大提升了工业源监管的范围和企业覆盖率,有效解决了“散乱污”企业监管难题。这种方法可以初步判断违规企业,有助于提前确定人工巡查的重点区域,进而大幅度节省人力资源和物质资源。

3.3 工业用电大数据监管技术

在过去的 50 年里,支撑工业发展的电力需求在世界各地激增,特别是作为发展中经济体的中国。同时用电数据监管具有以下优点:用电数据是实时

产生的,通过安装在企业生产设施和环保设施上的用电采集设备,可以实时收集并传输到后台监控系统平台,相比传统的排放物监测方式,用电数据的获取更加便捷;无论是大型企业还是小微企业,只要涉及电力消耗,都能纳入监管范围;用电数据的监测和分析过程高度自动化,无须大量的人力投入。

自 20 世纪 80 年代中期始,电能消耗数据便已成为工业生产预测领域的关键要素, Marchetti 等^[69]的研究揭示了电力消耗的三次趋势模型与工业生产情况的近似性,结合意大利国家商业周期分析研究所调查数据可以很好地对工业产出进行预测。吴力波等^[70]进一步通过建立企业用电量和产量的关系,构建企业用电量与产量之间的直接联系,并借助行业污染排放系数估算法,间接地构建起用电量与污染排放之间的量化关系,基于此模型,成功计算了上海市若干代表性企业的单位用电量污染排放系数。王兆敏等^[71]通过历史数据将企业用电量和环境污染物浓度建立相关关系,当环境污染物浓度异常时,利用企业实时用电量监管可以有效判定周边企业的违规超排状况。对于难以对 VOC_s 排放进行监管的小微印染企业,吴建明^[72]通过企业生产和治污设施的运行电气参数对企业非正常生产或不正常排放废气等行为进行排查。值得注意的是,部分企业出于节约成本或逃避监管的动机,在生产过程中违规关停环保设施。针对这一现象,研究者们^[73-75]指出,通过分析企业的生产用电特征,可以低成本、高效地监测企业环保设施的异常运行情况,为环保政策的执行提供强有力的技术支持。基于用电量对同类别大量企业进行离群分析或对目标企业的历史数据进行对应分析,可以识别出生产状况异常的企业,实现企业用电量的日常监管^[76-79]。陈建华等^[80]进一步强调了用电数据在大气污染防治领域中的广泛应用前景,基于用电数据构建精细化大气污染源排放清单,实现对小微企业在特殊管控期间污染物排放的精准监管。

为了有效应对重污染天气,生态环境部门对重点排污企业实施了“一企一策”停限产措施。鉴于企业众多且工艺各异,政府难以精确掌握管控措施的执行情况。然而,从用电角度看,工业生产的波动往往直接映射在企业用电量的变化上,形成一种可量化且易获取的识别指标。因此,通过深度挖掘与分析企业的用电数据,不仅能够实时、动态地掌握企业在特殊管控期间的运营状态,还能科学研判各企业对减排政策的响应程度与效果。这种方法克服了传统监管方式中信息滞后、精确度不足的难题,为实现

更加精细化、智能化的环境管理提供了有力支撑。

目前企业用电数据已经开始应用于企业生产状况的监管中,并且部分学者提出了一些监管指标方法(图 1)^[81-84],一定程度上弥补了目前对于小微企业监管手段的不足。但是由于发展时日较短,用电数据在工业源监管中的应用还不够完善,尚未针对目前重污染应急方案建立基于用电数据的企业监管指标。

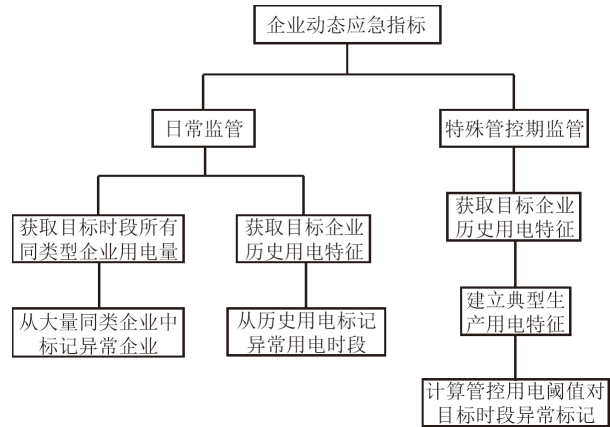


图 1 基于用电监控的企业监管指标建立方法

Fig.1 Method for establishing enterprise regulatory indicators based on electricity monitoring

4 生态环境保护政策和政府监管对企业的影响

为了应对气候变化和重污染天气,2020 年,我国在联合国大会上提出二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和,制定并实施一系列污染控制措施和减排指标政策,主要目的在于对人为排放行为进行干预。工业企业在严格的环境保护政策和政府监管下都会有所响应,并在生产和排污 2 个方面产生相应影响。

环境政策是政府参与对污染治理的手段,例如排放权交易政策是对工业生产和污染排放的有效控制方法之一,最早应用于美国的酸雨排放问题中, Huang 等^[85]对中国 283 个城市 24 年以来的排放权交易政策对经济和环境的影响进行验证,发现排放权交易政策可以在不影响工业企业产出,甚至提高工业产出的情况下,对污染物排放产生负向影响,达到在保持高质量经济发展的同时实现减排的效果。从产业结构、能源优化等层面实现的环境经济政策对于我国促进企业环境友好型发展具有重要意义^[86]。对欧洲和北美洲 23 个经合组织采取相关环境保护政策(主要包括提升直接成本渠道如增加污染排放税收和排污许可等,提高间接成本如新能源补贴)可以促进企业进行环保投资,控制污染物排放,环境政

策越严格,区域 CO₂、SO₂ 和 NO_x 污染程度越低^[87]。

环境监管对污染物排放的影响机制十分复杂, Yin 等^[88] 研究发现,环境监管对碳排放的影响大致呈现倒“U”型曲线关系,即当环境监管水平较低时,主要呈现绿色悖论效应,而当监管达到一定阈值后产生碳减排效果。地方政府环境监管执法与环境监管强度对污染密集型产业转移会产生影响,京津冀及其周边地区的环境监管强度和政府执法力度可能会削弱其他地区对本地的产业转移^[89]。

科学管理工业源污染对于改善空气质量至关重要。环境保护政策对企业的减排起到一定的正向作用,可以促进企业在不影响自身生产的前提下提高环保投资,控制排污水平。政策越严格,可能对企业影响越大。地方政府应该在环境监管方面承担主导地位,加强对企业环境政策的监管行为,约束和引导社会的生态环境保护意识,加强对违规企业的监督和处罚。“APEC 蓝”等成功案例也表明当政府和生态环境部门发挥其监管职能、加强对工业企业的实时管理时,可以有效降低污染物的浓度。

5 结论与展望

我国大气污染问题依然严峻,公众对空气质量的关注不断增强,对污染物排放监测与管理技术的需求也随之提高。对工业源的全面监测和实时获取污染排放数据仍面临挑战。检测技术正向多样化和高精度发展,监管体系逐步完善。物联网和大数据技术为识别工业源非正常排放行为提供了新视角,用电数据的高覆盖和高时效性在指示污染物排放方面潜力巨大。尽管这些技术在大气污染防治领域的应用尚处于初期,研究方法和手段仍需进一步成熟,未来提升可以从以下几个方面着手。

(1)综合运用多种监测手段,系统性、科学性地对工业源的污染排放进行高效检测,充分利用各种手段的优势,构建一个不受企业规模和分布限制的、具有高时空分辨率的排放监测系统。

(2)深化大数据的研发与应用,开发基于物联网大数据的大气污染物排放监测网络,实现数据的多源融合,提升企业排污监管的智能化水平和响应速度,实现对工业源的数字化管理和实时在线监控。

(3)深入探究电力数据在反映企业生产活动及环保表现方面的潜力,开发更加高效、精准的异常排污预警与管理辅助方案,利用电力数据的实时性为企业的监管提供参考意见。

(4)强化政府在监督企业异常排污行为中的引导作用,特别是在特殊管控时期,应加强对企业减排

措施实施过程的全面监督与效果评估,确保环保政策的有效落地与执行,共同推动环境质量的持续改善。

参考文献

- [1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗: 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告 [M]. 北京: 人民出版社, 2022: 45.
- [2] GREENSTONE M, HE G J, LI S J, et al. China's war on pollution: evidence from the first 5 years[J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2021, 15(2): 281-299.
- [3] 生态环境部. 生态环境部公布 2023 年 12 月和 1—12 月全国环境空气质量状况 [A/OL]. [2024-05-20]. https://wzql.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202401/t20240125_1064784.shtml.
- [4] 张杰, 王晓晶. 生态文明建设对城市碳排放的影响: 基于生态文明先行示范区的准自然实验 [J]. *生态经济*, 2024(5): 214-222.
- [5] ZHAO Y H, ZHANG Z H, WANG S, et al. Linkage analysis of sectoral CO₂ emissions based on the hypothetical extraction method in South Africa[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 916-924.
- [6] 曾景海, 王灿. 重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 [J]. *环境科学*, 2022, 43(5): 2436-2447. ZENG J H, WANG C. Assessment of "differentiated response requirement based on performance grading" policy during heavy air pollution alert[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(5): 2436-2447.
- [7] 贺亚楠, 康怡. 大气细颗粒物重污染天气过程应急措施效果评估研究 [J]. *环境科学与管理*, 2023, 48(4): 189-194. HE Y N, KANG Y. Effectiveness of emergency control measures during heavy atmospheric fine particle pollution[J]. *Environmental Science and Management*, 2023, 48(4): 189-194.
- [8] 汲奕君, 吴建会, 孟伟庆, 等. 我国重污染天气应急管理的问题与对策 [J]. *环境保护*, 2017, 45(9): 52-54. JI Y J, WU J H, MENG W Q, et al. Problems and countermeasures of China's environmental emergency management over severe air pollution[J]. *Environmental Protection*, 2017, 45(9): 52-54.
- [9] 王恰, 郑世林. “2+26”城市联合防治行动对京津冀地区大气污染物浓度的影响 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(9): 51-62. WANG Q, ZHENG S L. Impact of joint prevention and control action on atmospheric pollutant concentration in "2+26" cities[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(9): 51-62.
- [10] 贺震. 治理“散乱污”需要壮士断腕的决心 [J]. *环境经济*, 2017(14): 28-29.
- [11] LONSDALE C R, SUN K. Nitrogen oxides emissions from selected cities in North America, Europe, and East Asia observed by TROPOMI before and after the COVID-19 pandemic[J]. *EGUsphere*, 2023, 2023: 1-30.

- [12] XU H R, REN Y A, ZHANG W X, et al. Updated global black carbon emissions from 1960 to 2017: improvements, trends, and drivers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(12): 7869-7879.
- [13] DOU X Y, HONG J, CIAIS P, et al. Near-real-time global gridded daily CO₂ emissions 2021[J]. *Scientific Data*, 2023, 10: 69.
- [14] SONG C B, WU L, XIE Y C, et al. Air pollution in China: status and spatiotemporal variations[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 334-347.
- [15] 生态环境部. 2022 年中国生态环境统计年报 [A/OL]. [2024-05-20]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202312/t20231229_1060181.shtml.
- [16] 清华大学碳中和研究院. 新兴经济体二氧化碳排放报告 2023[R]. 迪拜: 清华大学中国碳核算数据库团队, 2023.
- [17] ZHANG X D, LI B, LU J, et al. Analysis on the causes of the change in the north-south gap of industrial pollution discharge in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(21): 31578-31596.
- [18] YUAN Q M, LIU S L. Study on industrial pollution discharge and environmental control in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 440(4): 042026.
- [19] 高庆先, 王宁, 高文康, 等. 2020 年春节期京津冀及周边地区 2 次大气重污染过程分析 [J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(4): 517-530.
- GAO Q X, WANG N, GAO W K, et al. Analysis of two atmospheric heavy pollution processes in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas during the Spring Festival of 2020[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(4): 517-530.
- [20] FU X, WANG S X, ZHAO B, et al. Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 70: 39-50.
- [21] ZHENG J Y, ZHANG L J, CHE W W, et al. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta Region, China and its uncertainty assessment[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(32): 5112-5122.
- [22] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征 [J]. *环境科学*, 2018, 39(12): 5344-5358.
- ZHOU Z H, DENG Y, TAN Q W, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan Province[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5344-5358.
- [23] WU J, WEN C, YI L, et al. The emission inventory of atmospheric industrial pollution sources of the five cities in Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2014, 12(2): 185-188.
- [24] ZHOU M M, JIANG W, GAO W D, et al. Anthropogenic emission inventory of multiple air pollutants and their spatiotemporal variations in 2017 for the Shandong Province, China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117666.
- [25] ZHANG X Y, HAN L J, WEI H Y, et al. Linking urbanization and air quality together: a review and a perspective on the future sustainable urban development[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 346: 130988.
- [26] 马瑞, 陈莎, 樊守彬, 等. 北京市空气质量特征与典型区域污染源贡献分析 [J]. *环境科学学报*, 2024, 44(3): 317-326.
- MA R, CHEN S, FAN S B, et al. Analysis of air quality characteristics and contribution of typical regional pollution sources in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(3): 317-326.
- [27] CHEN C R, ZHANG H X, LI H Y, et al. Chemical characteristics and source apportionment of ambient PM₁₋₀ and PM_{2.5} in a polluted city in North China Plain[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 242: 117867.
- [28] WANG J, ZHONG Y, LI Z Q, et al. Temporal and spatial analysis of PM_{2.5} and O₃ pollution characteristics and transmission in central Liaoning urban agglomeration from 2015 to 2020[J]. *Sustainability*, 2022, 14(1): 511.
- [29] YANG W Y, CHEN H S, WU J B, et al. Characteristics of the source apportionment of primary and secondary inorganic PM_{2.5} in the Pearl River Delta Region during 2015 by numerical modeling[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267: 115418.
- [30] DUTHEIL F, BAKER J S, NAVEL V. COVID-19 as a factor influencing air pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263(Pt A): 114466.
- [31] 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 等. 京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM_{2.5} 污染影响 [J]. *环境科学*, 2021, 42(9): 4095-4103.
- SHAO X Y, WANG X Q, ZHONG Y S, et al. Impacts of anthropogenic emission reduction and meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in typical cities of Beijing-Tianjin-Hebei in winter[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(9): 4095-4103.
- [32] 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 等. 京津冀典型城市冬季工业源排放与 PM_{2.5} 污染关系 [J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(增刊 1): 141-149.
- [33] ZHANG J L, HUANG Y Y, ZHOU N, et al. Contribution of anthropogenic emission changes to the evolution of PM_{2.5} concentrations and composition in the Pearl River Delta during the period of 2006-2020[J]. *Atmospheric Environment*, 2024, 318: 120228.
- [34] 国家环境保护总局. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法: GB/T 16157—1996[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [35] 环境保护部. 固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法: HJ 836—2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [36] 环境保护部. 固定污染源烟气排放连续监测技术规范: HJ/T 75—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [37] BO X, LI Z L, QU J B, et al. The spatial-temporal pattern of sintered flue gas emissions in iron and steel enterprises of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266: 121667.
- [38] GAO Y, ZHANG L, HUANG A S, et al. Unveiling the spatial

- and sectoral characteristics of a high-resolution emission inventory of CO₂ and air pollutants in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 847: 157623.
- [39] 马婧怡. 钢铁行业大气排放监测大数据分析 & 政策影响研究[J]. *山西化工*, 2022, 42(5): 165-167.
MA J Y. Research on big data analysis and policy impact of air emission monitoring in steel industry[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2022, 42(5): 165-167.
- [40] 郜武. 烟气连续监测系统 (CEMS) 技术及应用[J]. *中国仪器仪表*, 2009(1): 43-47.
GAO W. Continuous emission monitoring system(CEMS) technologies and application[J]. *China Instrumentation*, 2009(1): 43-47.
- [41] LEE S W, HERAGE T, HE I, et al. Particulate characteristics data for the management of PM_{2.5} emissions from stationary combustion sources[J]. *Powder Technology*, 2008, 180(1/2): 145-150.
- [42] 陈宇, 赵斌, 张永强, 等. 环保督察制度对内蒙古自治区生态环境改善的积极作用[J]. *环境与发展*, 2022, 34(9): 95-100.
CHEN Y, ZHAO B, ZHANG Y Q, et al. Effect of environmental protection supervision system on ecological environment in Inner Mongolia[J]. *Environment and Development*, 2022, 34(9): 95-100.
- [43] RAHMAN M M. Recommendations on the measurement techniques of atmospheric pollutants from *in situ* and satellite observations: a review[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2023, 16(5): 326.
- [44] 郑明兰. 大气环境污染物监测问题研究[J]. *资源节约与环保*, 2017(4): 57-58.
- [45] 周旺. 基于移动监测系统的化工园区大气污染溯源研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [46] 陈刚, 童颂颖, 王旭涛, 等. VOCs 走航观测在化工园区污染源排查中的应用: 以江苏省如东园区为例[J]. *环境科技*, 2023, 36(3): 66-70.
CHEN G, TONG S Y, WANG X T, et al. Application of VOCs cruise observation in pollution sources investigation of chemical Parks: take Rudong Park in Jiangsu Province as an example[J]. *Environmental Science and Technology*, 2023, 36(3): 66-70.
- [47] JOŃCA J, PAWNUK M, BEZYK Y, et al. Drone-assisted monitoring of atmospheric pollution: a comprehensive review[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18): 11516.
- [48] HOSSEIN MOTLAGH N, KORTOÇI P, SU X, et al. Unmanned aerial vehicles for air pollution monitoring: a survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(24): 21687-21704.
- [49] QIU S H, CHEN B, WANG R X, et al. Estimating contaminant source in chemical industry park using UAV-based monitoring platform, artificial neural network and atmospheric dispersion simulation[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(63): 39726-39738.
- [50] ZHOU C L, LIN X Q, WANG R H, et al. Real-time carbon emissions monitoring of high-energy-consumption enterprises in Guangxi based on electricity big data[J]. *Energies*, 2023, 16(13): 5124.
- [51] JU T Z, LIANG Z H, LIU W J, et al. Monitoring of air pollution by remote sensing in Lanzhou city from 2010 to 2019[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2022, 233(9): 359.
- [52] WAN L T, SUN Y C, LEE I, et al. Industrial pollution areas detection and location via satellite-based IIoT[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3): 1785-1794.
- [53] GONG Y, BU L B, YANG B, et al. High repetition rate mid-infrared differential absorption lidar for atmospheric pollution detection[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2211.
- [54] KUANG Z Q, LIU D, WU D C, et al. Parameter optimization and development of mini infrared lidar for atmospheric three-dimensional detection[J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 892.
- [55] 王艳琪. 基于激光雷达的山东地区大气气溶胶污染检测研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2022.
- [56] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [57] 李同固. “十三五”期间吉林省主要城市大气污染特征及 PM_{2.5} 的污染传输研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [58] 谭琼. 工业园区大气污染物自动监控系统研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- [59] 薛四社, 秦立栋, 葛毅. 一种环保污染监测方法、系统、设备及介质: CN114755367B[P]. 2023-07-25.
- [60] NICKLIN D, GOHARI DARABKHANI H. Techniques to measure particulate matter emissions from stationary sources: a critical technology review using multi criteria decision analysis (MCDA)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296: 113167.
- [61] 环境保护部. 工业污染源现场检查技术规范: HJ 606—2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [62] 孙彩萍, 孙启宏, 王维, 等. 固定源大气污染物监管技术框架及应用研究[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(6): 741-747.
SUN C P, SUN Q H, WANG W, et al. Technical framework and application of site-inspection and enforcement for air pollutants from stationary sources[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(6): 741-747.
- [63] 王彦琦, 周舟, 王宗爽, 等. 基于 CEMS(连续排放监测系统) 监测数据的火电厂 SO₂ 达标判定方法研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(5): 1063-1070.
WANG Y Q, ZHOU Z, WANG Z S, et al. Assessment method of compliance with SO₂ emission limits of thermal power plants based on CEMS data[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(5): 1063-1070.
- [64] 周舟, 张孟琪, 王宗爽, 等. 基于连续排放监测数据的水泥工业 NO_x 达标判定方法研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(6): 1371-1377.
ZHOU Z, ZHANG M Q, WANG Z S, et al. Assessment method of compliance with NO_x emission limits of cement industry based on CEMS data[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(6): 1371-1377.
- [65] CHENG K, ZHAO X Y, ZHOU W, et al. Excess emission sources identification via sparse monitoring networks[J]. *IEEE*

- Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(10) : 10309-10321.
- [66] 刘柏音, 刘孝富, 孙启宏, 等. 基于物联网的固定源大气污染物排放现场执法监管信息系统设计与应用 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(5): 1687-1694.
- LIU B Y, LIU X F, SUN Q H, et al. Design and application of on-site law enforcement and supervision information system for air pollutants emission from stationary sources based on IoT[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(5): 1687-1694.
- [67] MILLER GREGORY J, GAILIN P, SHI W B, et al. Evaluating the hourly emissions intensity of the US electricity system[J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(4): 044020.
- [68] 晁昆, 高洁, 贾玉玮, 等. 基于运营商大数据的大气污染防控研究及应用探讨 [J]. 邮电设计技术, 2018(10): 6-10.
- CHAO K, GAO J, JIA Y W, et al. Research and application of air pollution prevention and control based on big data of operators[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2018(10): 6-10.
- [69] MARCHETTI D J, PARIGI G. Energy consumption, survey data and the prediction of industrial production in Italy: a comparison and combination of different models[J]. Journal of Forecasting, 2000, 19(5): 419-440.
- [70] 吴力波, 周阳, 陈海波, 等. 基于智能电网大数据的工业企业大气污染排放特征研究 [J]. 中国环境管理, 2016, 8(4): 37-42.
- WU L B, ZHOU Y, CHEN H B, et al. Emission characteristics of industrial air pollution by using smart-grid big data[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2016, 8(4): 37-42.
- [71] 王兆敏, 陈小鹏, 付云磊, 等. 一种基于电力数据的环境监控分析方法、系统: CN114943409A[P]. 2022-08-26.
- [72] 吴建明. 涉 VOCs 小微印染化工企业的用电监控系统 [J]. 化工管理, 2020(19): 60-61.
- WU J M. Electricity monitoring system of small and micro printing and dyeing chemical enterprises involving VOCs[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(19): 60-61.
- [73] 陆晓东, 董钦, 金建舟, 等. 基于环保设施用电异常的告警方法和装置: CN114742667A[P]. 2022-07-12.
- [74] 张逸, 陈锦涛, 姚文旭, 等. 基于用电数据的污染企业环保工况异常识别方法: CN115291006A[P]. 2022-11-04.
- [75] 张逸, 姚文旭, 刘雄飞. 一种基于用电数据的污染源企业违规生产监控方法: CN113298422B[P]. 2023-01-31.
- [76] 严嘉慧, 张禄, 段大鹏, 等. 目标企业的识别方法以及装置: CN114202179A[P]. 2022-03-18.
- [77] 顾斌, 蔡冬阳, 顾巍, 等. 基于用电数据的管控状态下排污企业停或限产监测方法: CN113988711A[P]. 2022-01-28.
- [78] 金叶, 史双双, 房玉川, 等. 一种基于电力大数据的用电监测系统及方法: CN114759666A[P]. 2022-07-15.
- [79] 刘颖, 陈霄, 裴子霞, 等. 基于电力大数据的高危企业违规生产识别方法: CN113705229A[P]. 2021-11-26.
- [80] 陈建华, 李政, 刘翰青, 等. 基于企业用电数据的大气污染防治工作研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 510-516.
- CHEN J H, LI Z, LIU H Q, et al. Research progress of air pollution prevention and control based on enterprise electricity consumption data[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 510-516.
- [81] 李科峰, 刘畅, 罗晓伊, 等. 基于 90 用电分布特征指标的环保管控监测及评价方法: CN111210170A[P]. 2020-05-29.
- [82] 靳旦, 唐伟, 李科峰, 等. 一种基于企业用电数据的环保响应量化方法及装置: CN111524032B[P]. 2020-11-10.
- [83] 唐伟, 李科峰, 滕予非, 等. 基于污染排放企业用电特性的环保管控措施响应研判方法: CN111523794B[P]. 2020-11-24.
- [84] 王立斌, 王雨帆, 马浩, 等. 一种基于用电规律的污染企业违规生产监控方法 [J]. 电力大数据, 2019, 22(8): 35-39.
- WANG L B, WANG Y F, MA H, et al. A method for monitoring illegal production of polluting enterprises based on the law of electricity consumption[J]. Power Systems and Big Data, 2019, 22(8): 35-39.
- [85] HUANG J R, SHEN J, MIAO L, et al. The effects of emission trading scheme on industrial output and air pollution emissions under city heterogeneity in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 315: 128260.
- [86] 张志麒, 张保留, 罗宏. 工业大气污染治理的环境经济政策体系研究 [J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(3): 311-319.
- ZHANG Z Q, ZHANG B L, LUO H. Research on environmental economic policy system of industrial air pollution control[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(3): 311-319.
- [87] WANG K, YAN M Y, WANG Y W, et al. The impact of environmental policy stringency on air quality[J]. Atmospheric Environment, 2020, 231: 117522.
- [88] YIN K D, LIU L, GU H L. Green paradox or forced emission reduction-the dual effects of environmental regulation on carbon emissions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(17): 11058.
- [89] ZHANG G X, LIU W, DUAN H B. Environmental regulation policies, local government enforcement and pollution-intensive industry transfer in China[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 148: 106748. □