

成。成都市及其毗邻的平原区已成为区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的绝对高值和单极核心。重庆虽呈现较高浓度,但其强度与辐射范围均明显弱于成都极核。四川西部高原和南部山区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均处于低水平,核心与外围的梯度差异巨大。2010-2015年, $\text{PM}_{2.5}$ 污染格局剧烈演变,成都单极核的污染强度持续加剧,但高浓度范围开始收缩,周边地级市污染开始下降,初步形成了“核心-缓冲区”的圈层结构,重庆的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也开始下降。2020-2022年, $\text{PM}_{2.5}$ 污染出现反弹迹象,成都极核的污染强度仍维持在最高水平,但周边地级市如遂宁、内江、自贡等地浓度值普遍提升,重庆的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度又恢复至 05 年水平,而四川西部的甘孜、阿坝高原地区以及凉山州等南部山区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度始终维持在全区最低水平,与中东部高值区形成鲜明对比。

3.3 碳排放浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的协同效应分析

2000-2022 年川渝地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 & 碳排放总量的耦合度值。从时间序列上看,川渝地区多数地级市的耦合度值呈现出明显的下降趋势。如自贡市从 2000 年的 0.048 持续降至 2022 年的 0.022; 德阳市从 0.030 降至 0.021; 南充市从 0.023 降至 0.015, 有些城市甚至降到了 0。但下降趋势并不持续, 2020-2022 年, 部分城市出现了耦合度回升或趋于稳定的迹象。如攀枝花市就从 2020 年的 0.114 显著上升至 2022 年的 0.123; 成都市在 2010 年达到峰值 0.314, 在 2015 年后开始下降, 但 2020 至 2022 年间趋于稳定, 处于 0.227-0.228 之间。绵阳市从 2020 年的 0.142 跃升至 0.192, 显著升高。泸州市在 2022 年出现小幅回升, 由 0.073 上升至 0.082; 广安市在 2022 年也出现类似小幅回升的迹象, 由 0.074 上升至 0.078。呈现出川渝地区碳排放与 $\text{PM}_{2.5}$ 的耦合关系为“总体趋弱、局部反弹、差异显著”的典型特征。

从空间序列上看,川渝地区各地级市间的耦合度存在显著的空间异质性,呈现“中部高、四周低”的分布格局。成都、重庆两地作为双城经济圈的核心城市,一直是耦合度最高的极核,其中重庆市的耦合值最高,常年高于 0.5,成都市其次,耦合值常年高于 0.3。绵阳市、宜宾市作为重要的工业城市,耦合度也长期处于高位,其均值在 0.15-0.22 之间,攀枝花市作为重工业城市,其耦合度在后期显著增强,成为另一个突出增长点,这些地级市构成了川渝地区碳排放总量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高强度协同区,反映出巨大的能源消费、交通流量和工业生产导致的碳排放与大气污染问题高度协同。盆地内其余的地级市如泸州、德阳、乐山、内江、广安、达州等,耦合值相对较低,且耦合度随时间下降的趋势最为明显,基本处于 0.01-0.1 之间。构成了川渝地区碳排放总量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度中低强度协同区,反映出较为迟缓的城市化发展速度与相对落后的经济、工业发展水平对碳排放与大气污染协同效应的有限影响。最后,位于盆地外围的川西、川北的生态敏感区及经济发展相对滞后区由于耦合值最低,基本等于 0,构成了川渝地区碳排放总量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低协同区,反映出以生态功能为主且经济发展水平较低,人类活动强度弱的地区对碳排放与大气污染协同效应的影响相对偏低。

4 结论

本研究以川渝地区为研究区,在地级市尺度上,基于 2000、2005、2010、2015、2020、2022 六个年份的碳排放面板数据与的 $\text{PM}_{2.5}$ 面板数据,分析川渝地区碳排放总量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空分布特征,并构建耦合协调度模型 (CCD) 用以揭示碳排放与 $\text{PM}_{2.5}$ 二者的耦合协调关系,最终得出如下结论:碳排放总量的时空格局呈现出类似的分布特征。从空间格局上来看,川渝地区呈现“两边高、中间低”的格局;从时间序列上来看,川渝地区则呈现出明显的“双极核强化—外围蔓延”的动态过程。无论是空间还是时间角度,川渝地区碳排放最高的区域都集中于以成都平原经济区和重庆市为核心的中部与东部地区,反映出双城经济圈核心城市的经济发展、能源消费与工业生产对碳排放总量有着正向作用,并不断向其周边地级市蔓延。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空格局与碳排放的时空格局类似但又有所不同。从空间格局上来看,川渝地区呈现“中东部高、西部低”的格局,从时间序列上来看, $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度区域与碳排放类似,依旧集中于以成都平原经济区和重庆市为核心的中部与东部地区。与碳排放总量格局不同的是, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度无论是时间还是空间格局,高浓度区与低浓度区界限明显且基本保持不变,两个区域空间异质性显著且基本不随时间变化而出现重大变化。初步反映出两者具有高度一致的协同变化趋势,共同受到区域人类活动、经济发展等因素的影响。川渝地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与碳排放总量的耦合协同效应表现出极高的正相关性 (皮尔逊相关系数 $r > 0.997$, $p < 0.001$),证实了两者具有高度一致的协同变化趋势。从空间格局上来看,区域整体呈现“核心-边缘”的空间分异格局,成都、重庆两地作为双城经济圈的核心城市,其协同效应与耦合系数占据第一梯队,绵阳市、宜宾市、攀枝花市作为西部重要的工业城市,其协同效应与耦合系数长期处于高位,与成渝两市共同构成了高强度协同区;盆地内其余的地级市耦合值相对较低,构成了中低强度协同区;位于盆地外围的川西、川北的生态敏感区及经济发展相对滞后区由于耦合值最低,构成了低协同区。从时间序列上来看,川渝地区多数地级市碳排放与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的协同效应呈总体减弱态势,但下降趋势并不持续,后期出现了反弹迹象,呈现出“总体趋弱、局部反弹、差异显著”的典型特征。

参考文献

- [1] 赵彦彦,陆香怡,王汶. 低碳城市的CO2与PM2.5减排协同效应分析[J].中国环境科学,2023,43(01):465-476.DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20221010.003.
- [2] 唐先腾,唐章英,宋超,等. 1997—2021年川渝地区区县尺度碳排放时空格局特征分析[J].西华师范大学学报(自然科学版),2025,46(04):358-366.DOI:10.16246/j.issn.1673-5072.2025.04.004.
- [3] 韦彦汀,李思佳,张华. 成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素[J].中国环境科学,2022,42(10):4807-4816.DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0169.
- [4] 曾德珩,陈春江. 成渝城市群PM2.5的时空分布及其影响因素研究[J].环境科学研究,2019,32(11):1834-1843.DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2019.05.13.

Characteristics and Control Technology Analysis of Pollutant Emissions from Sludge Incineration Waste Gas

Mengjun Jiang

Sichuan Guohuan Environmental Engineering Consulting Co., Ltd., Neijiang Branch, Neijiang, Sichuan, 641000, China

Abstract

Sludge incineration, as an important approach for municipal wastewater treatment and disposal, has significant advantages in terms of reduction and harmlessness. However, the issue of flue gas pollutant emissions during the incineration process has become increasingly prominent. The flue gas contains particulate matter, heavy metals, acidic gases, and organic pollutants, whose formation mechanisms are complex, and emission characteristics are significantly influenced by sludge properties, combustion temperature, and process conditions. If not effectively controlled, these pollutants can cause damage to the atmospheric environment, trigger ecological imbalance, and pose health risks. In recent years, various technological pathways and control measures have been developed domestically and internationally for particulate and heavy metal capture, acidic gas removal, and the control of dioxins and other organic pollutants. Through process optimization, synergistic treatment, and the improvement of standards and regulations, efficient control of multiple pollutants can be achieved, providing strong support for the green and sustainable development of sludge incineration.

Keywords

sludge incineration; flue gas pollutants; emission characteristics; control technology; environmental management

污泥焚烧废气污染物排放特征及控制技术分析

蒋孟君

四川省国环环境工程咨询有限公司内江分公司, 中国 · 四川 内江 641000

摘要

污泥焚烧作为城镇污水处理处置的重要途径,在减量化和无害化方面具有显著优势,但焚烧过程中伴随的废气污染物排放问题日益突出。废气中包含颗粒物、重金属、酸性气体和有机污染物,其生成机理复杂,排放特征受污泥性质、焚烧温度及工艺条件影响明显。未经有效控制的污染物排放不仅会对大气环境造成破坏,还可能引发生态系统失衡和健康风险。近年来,针对颗粒物与重金属的捕集、酸性气体的脱除以及二噁英等有机污染物的控制,国内外已形成多种工艺路径和治理手段。通过工艺优化、协同治理与标准规范完善,可实现对多类污染物的高效控制,为污泥焚烧过程的绿色化与可持续发展提供保障。

关键词

污泥焚烧; 废气污染物; 排放特征; 控制技术; 环境治理

1 引言

随着城市化和工业化进程加快,污水处理规模不断扩大,污泥产量呈现持续增长趋势。如何科学处置污泥已成为环境管理亟需解决的重要课题,其中焚烧方式因其减量效果突出和处置效率高而被广泛采用。然而,污泥焚烧在带来体积极减与稳定化效益的同时,也会产生多种大气污染物,包括粉尘颗粒、重金属蒸气、酸性气体和二噁英类有机物等。这些污染物排放具有多组分、多相态和高毒性的特点,若缺乏有效控制,极易对大气质量、区域生态与公众健康造成不

良影响。当前,污染控制技术正不断更新,协同治理和全过程管理逐渐成为趋势。对污泥焚烧废气污染物的排放特征及控制技术进行系统分析,不仅有助于丰富环境工程理论研究,也为污泥处置的规范化和清洁化发展提供了技术支撑与政策参考。

2 污泥焚烧废气污染物的组成与排放特征

2.1 颗粒物及重金属的排放特性

污泥焚烧过程中会产生大量细颗粒物,其粒径多集中在 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 范围内,颗粒物中富集的无机盐、未完全燃烧的碳质物和重金属离子具有较强的环境活性。由于污泥中常含有铜、锌、铅、镉等元素,在高温作用下部分会挥发并凝结于颗粒物表面,增加了颗粒物的毒性和迁移性。这

【作者简介】蒋孟君(1989-),女,本科,工程师,从事污染防治、环境污染治理技术咨询、环境影响评价等研究。

类颗粒物不仅能够长距离扩散,还容易在呼吸系统沉积,引发健康风险。颗粒物的排放浓度与焚烧炉温度、进料含水率及燃烧条件密切相关,当燃烧不充分时,排放水平会显著升高。部分重金属具有低挥发点,在焚烧过程中更易进入烟气,最终形成二次污染。对颗粒物和重金属排放特征的研究,有助于为后续除尘和净化设备的设计提供依据。

2.2 酸性气体污染物的生成机理与分布

污泥焚烧过程中产生的酸性气体主要包括二氧化硫、氯化氢、氟化氢和氮氧化物,它们来源于污泥中硫、氯、氟等元素的热分解与氧化反应。硫元素在高温下被氧化形成二氧化硫,而含氯有机物和无机盐在焚烧过程中释放氯离子,与氢结合生成氯化氢。氮元素则在高温燃烧条件下通过热力型、燃料型和快速型反应转化为氮氧化物。酸性气体排放量受到污泥化学成分、焚烧温度和氧气浓度的影响,不同反应路径会导致分布差异。二氧化硫和氮氧化物往往在燃烧室和尾气系统均可检测到,而氯化氢和氟化氢浓度则受燃料氯、氟含量波动影响较大。酸性气体排在空间和时间上具有不均匀性,对下游脱酸工艺提出了更高要求 [1]。

2.3 有机污染物与持久性有机物的释放特征

污泥中含有一定量的有机质,在焚烧过程中会因热裂解和不完全燃烧而生成一系列有机污染物,其中包括挥发性有机物和半挥发性有机物。更为严重的是二噁英类持久性有机物的生成,这类物质在高温下由有机质、氯元素及金属催化作用共同作用而产生,具有强致癌性和环境持久性。二噁英排放的浓度与焚烧炉内的温度分布和停留时间密切相关,当温度区间处于 200 至 450 摄氏度时最易形成。持久性有机污染物易吸附在飞灰颗粒表面,增强其在大气中的迁移能力。由于焚烧条件的波动性和污泥成分的复杂性,这类污染物的排放具有不确定性和高风险特征,若控制不当会对生态环境和人体健康造成深远危害。

3 污泥焚烧废气排放的环境影响

3.1 对大气环境质量的影响路径

污泥焚烧废气中的颗粒物、酸性气体和有机污染物排放到大气中后,会通过物理扩散、化学反应和沉降过程改变空气质量。颗粒物的弥散会导致区域内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度升高,引发雾霾和能见度降低等大气环境问题。二氧化硫和氮氧化物在大气中易发生二次反应,生成硫酸盐和硝酸盐颗粒,增加空气中细颗粒物的比例。氯化氢和氟化氢的存在会导致局部酸沉降,对土壤和植被产生腐蚀作用。有机污染物特别是二噁英类化合物能在大气中长时间停留,并通过远距离传输作用影响更大范围的空气质量。废气排放的影响路径往往具有叠加效应,不仅改变局部大气环境,还可能跨区域影响空气环境安全 [2]。

3.2 对区域生态系统的累积效应

污泥焚烧废气中的多种污染物经过沉降与迁移,最终

会进入土壤、水体和植被,从而在区域生态系统中产生累积效应。重金属颗粒沉降后会逐渐富集于土壤中,改变土壤理化性质,并通过根系吸收影响植物生长。酸性气体及其衍生物沉降到水体,会造成水体酸化和营养盐平衡破坏,进而影响水生生物的存活与繁殖。有机污染物的长期沉积则会在食物链中逐步放大,通过生物富集作用进入更高营养级生物体内。生态系统的累积效应具有隐蔽性和长期性,短期内可能不易显现,但长期作用会导致生态服务功能下降,甚至引发生态退化和系统失衡,对区域可持续发展带来威胁。

3.3 对人体健康的潜在危害

污泥焚烧废气中排放的颗粒物能够进入呼吸道深部并沉积在肺泡,引起呼吸系统疾病,长期暴露还可能诱发慢性支气管炎和心血管疾病。重金属如铅、镉等具有较强的毒性,吸入后会在人体内累积,对神经系统、肾脏和血液系统造成损伤。酸性气体如二氧化硫和氮氧化物会刺激呼吸道黏膜,引起气道炎症和过敏反应,还可能导致哮喘发作和呼吸功能下降。有机污染物特别是二噁英类物质具有致癌性和致畸性,通过吸入或食物链富集进入人体后,会对内分泌系统和免疫系统造成严重危害。人体健康风险不仅与污染物浓度有关,还与暴露时间和个体差异密切相关,因此废气排放控制与健康风险评估必须得到高度重视。

4 污泥焚烧废气污染物控制技术现状

4.1 颗粒物与重金属的捕集与去除技术

污泥焚烧废气中颗粒物和重金属的排放是环境管理的重点难题,常用的控制方法主要依赖高效除尘与吸附技术。布袋除尘器在低温条件下表现出较高的捕集效率,能够有效拦截细颗粒物并降低金属离子的排放水平。电除尘装置通过静电场作用捕获不同粒径的颗粒,在大规模工程中应用广泛。喷雾干燥和活性炭喷射等工艺也常与除尘系统耦合,利用物理吸附与化学结合方式降低金属蒸气浓度。部分工艺还通过投加石灰或硅酸盐吸附剂,使金属元素固化于灰渣中,减少其随废气迁移的风险。针对纳米级颗粒的控制,研究者尝试采用膜分离和新型纳米材料吸附剂,以提高深度净化能力。这些技术的应用使颗粒物和重金属的去除率在多数情况下能达到 90% 以上,但设备运行成本和维护要求依旧较高 [3]。

4.2 酸性气体的脱除工艺及应用模式

酸性气体脱除是污泥焚烧烟气治理的关键环节,常见工艺包括干法、半干法和湿法脱酸。干法工艺通过高温段喷入碳酸钙或氢氧化钠粉末,与酸性气体发生中和反应,设备简单且投资较低。半干法工艺结合了雾化吸收与反应产物捕集,常以氢氧化钙浆液作为吸收剂,在反应塔内形成较高的去除效率,适用于中等规模焚烧设施。湿法工艺通常采用石灰石浆液或碱性溶液吸收酸性成分,脱除率可达 95% 以上,但会产生二次废水处理问题。随着工艺升级,喷雾干燥与布袋除尘的组合模式逐渐普及,实现了酸性气体与颗粒