

工业园区环境空气特征污染物监测研究

李中慧

凯乐检测认证集团（绵阳）有限公司，四川绵阳

DOI:10.62836/environment.v3i3.1464

摘要：工业园区产业类型集中、排放源复杂，环境空气中特征污染物呈现成分多样、时空波动明显、扩散受气象条件影响显著等特点。针对化工、涂装、印刷、燃烧锅炉、物流运输及无组织排放等污染源，开展特征污染物监测有助于准确识别污染因子、掌握浓度变化规律、判断边界影响范围，为园区环境管理、污染溯源和企业减排提供数据支撑。本文围绕工业园区环境空气特征污染物监测展开研究，分析主要污染来源与影响因素，探讨在线监测、手工采样、走航监测及VOCs、恶臭气体、颗粒物组分监测方法，并提出监测数据分析与评价思路，以期提升园区环境空气精细化监管水平。

关键词：工业园区；环境空气；特征污染物；VOCs；监测技术；污染溯源

Study on the Monitoring of Characteristic Air Pollutants in Industrial Parks

Zhonghui Li

Kaile Testing and Certification Group (Mianyang) Co., Ltd., Mianyang, Sichuan

Abstract: Industrial parks are characterized by concentrated industrial types and complex emission sources. Characteristic pollutants in ambient air show features such as diverse components, obvious temporal and spatial fluctuations, and significant influence from meteorological conditions on diffusion. For pollution sources such as chemical production, coating, printing, combustion boilers, logistics transportation, and fugitive emissions, monitoring characteristic pollutants helps accurately identify pollution factors, grasp concentration variation patterns, and determine the scope of boundary impacts, thereby providing data support for environmental management, pollution source tracing, and enterprise emission reduction in industrial parks. This paper focuses on the monitoring of characteristic air pollutants in industrial parks, analyzes major pollution sources and influencing factors, discusses monitoring methods such as online monitoring, manual sampling, mobile monitoring, and monitoring of VOCs, odor gases, and particulate matter components, and proposes approaches for monitoring data analysis and evaluation, with the aim of improving refined supervision of ambient air quality in industrial parks.

Keywords: industrial park; ambient air; characteristic pollutants; VOCs; monitoring technology; pollution source tracing

*作者简介：李中慧（1997年-），女，汉族，四川绵阳，本科，助理工程师，研究方向：环境监测。

1 引言

工业园区是区域产业集聚和污染排放叠加的重要空间单元，不同行业生产工艺、能源结构和运输活动差异较大，导致环境空气中特征污染物来源复杂、变化频繁。开展针对性监测，不仅能够掌握VOCs、恶臭气体、颗粒物及常规污染物的浓度水平，还能为污染溯源、边界管控、企业治理和园区精细化监管提供依据[1]。因此，有必要结合园区产业特点构建系统化监测思路。

2 工业园区环境空气特征污染物来源与影响因素

2.1 化工、涂装、印刷等企业挥发性有机物排放

化工、涂装、印刷等企业是工业园区挥发性有机物的重要来源，排放与原辅材料类型、工艺温度、溶剂使用量、密闭程度和废气收集效率密切相关，在反应、精馏、萃取、干燥、储存和装卸过程中，容易释放苯系物、卤代烃、酮类、酯类、醇类和烷烃类VOCs[2]。例如，甲苯、二甲苯、乙酸乙酯、丙酮、甲醇等物质沸点较低、蒸气压较高，在常温或加热条件下均易挥发，反应釜、储罐、泵阀、法兰和采样口密封不严时局部逸散浓度可能出现明显升高。涂装企业排放主要来自调漆、喷涂、流平、烘干和清洗环节，溶剂型涂料中VOCs含量可达300–700g/L，喷涂室和烘干室废气浓度常随生产节拍快速变化。包装印刷企业使用油墨、稀释剂、胶黏剂和清洗剂时，乙酸乙酯、异丙醇、正丙酯等组分释放较多，在印刷机高速运行、烘箱温度达到60–120℃、换版清洗频繁时，排放强度明显增加，参与臭氧和二次有机气溶胶生成是园区特征污染物识别中的重点来源。

2.2 燃烧、锅炉及运输活动颗粒物和氮氧化物排放

燃烧、锅炉及运输活动是工业园区颗粒物、氮氧化物和二氧化硫的重要来源，污染强度与燃料种

类、燃烧温度、含硫量、负荷变化和车辆活动强度有关。园区燃气锅炉、导热油炉、加热炉和焚烧装置在高温燃烧过程中会产生NO和NO₂，其中热力型NO_x多在燃烧温度高于1300℃时大量形成，当锅炉负荷频繁波动、燃烧空气过量系数控制不稳定时，氮氧化物排放浓度易出现波动[3]。部分企业使用煤、重油、生物质或含硫燃料，燃烧过程还会释放SO₂、烟尘和细颗粒物，颗粒物粒径多集中在PM₁₀和PM_{2.5}范围内并可能携带金属元素、硫酸盐、硝酸盐和碳组分。运输活动主要包括原料进厂、产品外运、危化品车辆周转、叉车作业和道路扬尘等，柴油货车在怠速、低速行驶和频繁启停时，NO_x和细颗粒物排放较为突出。园区道路积尘量较大、物料车辆覆盖不严或装卸区地面破损，在风速达到3–5m/s时，扬尘扩散范围会明显扩大，燃烧源与移动源叠加后容易造成园区主干道、物流出入口、锅炉房周边和下风向区域颗粒物浓度升高。

2.3 无组织排放、异味扩散与边界污染影响

无组织排放是工业园区环境空气特征污染物波动的重要原因，来源主要包括储罐大小呼吸、装卸挥发、管道阀门泄漏、敞开式投料、废液暂存、污水处理构筑物逸散、危废库房通风排气以及生产车间门窗散逸等。对于化工和涂装企业，泵、压缩机、阀门、法兰等密封点数量多，一旦密封件老化或操作压力波动，VOCs可通过微小泄漏持续释放，对于污水处理站，调节池、厌氧池、污泥池等区域易释放硫化氢、氨、甲硫醇、二甲二硫等恶臭气体，低浓度即可引发明显嗅觉感受[4]。硫化氢嗅觉阈值较低，氨气刺激性较强，含硫有机物具有持续性气味特征，即使污染物浓度未形成大范围超标可能在园区边界或居民敏感点造成异味影响，边界污染受企业厂界距离、排放高度、建筑阻挡和风向变化影响较大，当排放口高度较低、车间通风口朝向边界或无组织源距离厂界小于50–100m时，下风向边界浓度更容易升高，夜间大气层结稳定、混合层高度降低时污染物扩散能力减弱，异味积聚现象更加明显。

2.4 气象条件、地形环境与产业布局对污染扩散的影响

工业园区环境空气污染扩散受到气象条件、地形环境和产业布局的共同影响,风向决定污染羽流输送方向,主导风向与企业排放源、园区边界和周边敏感点的相对位置直接影响污染暴露风险,风速影响污染物稀释能力,当风速低于1.5m/s时污染物容易在近地面累积,当风速达到3–6m/s时污染物输送距离增加,边界影响范围可能扩大[5]。温度、湿度和太阳辐射也会改变污染物转化过程,高温、强光条件下VOCs和NO_x更容易发生光化学反应,促进臭氧生成;高湿、静稳天气有利于颗粒物吸湿增长和二次转化。位于河谷、盆地、山前缓坡或低洼区域的园区受局地环流和逆温影响较明显,污染物不易垂直扩散,早晚时段易出现浓度累积。因此,污染扩散是排放强度、气象扩散条件、地形阻滞效应和园区空间布局共同作用的结果。

3 工业园区环境空气特征污染物监测技术方法

3.1 常规污染物与特征因子的监测指标确定

工业园区环境空气监测常规因子主要包括PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、O₃,可采用连续自动监测方式获取小时均值和日均值,其中PM_{2.5}、PM₁₀可选用β射线法或微量振荡天平法,SO₂采用紫外荧光法,NO_x采用化学发光法,CO采用非分散红外法,O₃采用紫外光度法。特征因子应结合园区产业结构确定,化工、涂装、印刷类园区宜监测非甲烷总烃、总挥发性有机物以及苯、甲苯、乙苯、二甲苯、乙酸乙酯、丙酮、异丙醇、氯代烃等VOCs组分,污水处理站、危废暂存区和精细化工企业周边增加氨、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫、三甲胺等恶臭因子,金属加工、建材、铸造类园区可补充颗粒物中铅、镉、铬、镍、锰、砷等金属元素[6]。

3.2 在线监测、手工采样与走航监测技术应用

工业园区特征污染物监测可采用在线监测、手

工采样和走航监测相结合的技术路线。在线监测适用于连续掌握污染物浓度变化,常规自动站可设置5min、10min或1h数据采集周期,连续监测PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、O₃及温度、湿度、风向、风速、气压等气象参数;VOCs监管重点园区可配置非甲烷总烃在线分析仪、在线GC-FID或在线GC-MS,对总量和组分进行连续识别[7]。手工采样适用于精确分析特征组分,VOCs可采用苏玛罐、吸附管或气袋采样,采样方式可设为瞬时样、1h样或24h样,实验室采用GC-MS、GC-FID等方法测定;颗粒物组分可用中流量或大流量采样器采集滤膜,常用流量为100L/min或1.05m³/min。走航监测适合快速排查污染高值区,监测车辆可搭载VOCs快速质谱仪、颗粒物分析仪、恶臭气体传感器、GPS和便携式气象仪,沿园区主干路、企业边界、物流通道和敏感点外围开展移动监测,车速控制在20–40km/h,发现浓度突升点后应驻留复测,并同步开展手工采样验证。

3.3 VOCs、恶臭气体和颗粒物组分监测方法

VOCs监测应同时兼顾总量监测和组分分析。非甲烷总烃可采用气相色谱-FID法或在线非甲烷总烃分析仪测定,用于判断有机废气总体变化,VOCs组分可采用苏玛罐采样-GC-MS法、吸附管采样-热脱附-GC-MS法或在线GC-MS法。恶臭气体监测应采用仪器分析与臭气浓度测定相结合的方式,硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫等含硫化化合物可采用气相色谱法或便携式硫化物分析仪,氨可采用分光光度法、离子色谱法或电化学传感器法,异味明显区域可配合三点比较式臭袋法测定臭气浓度[8]。颗粒物组分监测应在PM_{2.5}、PM₁₀质量浓度基础上分析水溶性离子、碳组分和金属元素,SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺等离子可采用离子色谱法,有机碳和元素碳可采用热光法,铅、镉、铬、镍、锰等元素可采用ICP-MS或原子吸收法测定,从而为污染源识别提供组分依据。

3.4 监测点位布设、采样频次与质量控制要求

监测点位布设应遵循代表性、针对性和可比

性原则，形成背景点、上风向对照点、下风向边界点、重点源周边点和敏感点相结合的布点体系。背景点宜布设在受园区影响较小的位置，上风向点用于掌握外来背景浓度，下风向边界点应布设在主导风向影响明显的园区边界，重点源周边点可设置在化工装置区、涂装车间、印刷车间、锅炉房、污水处理站、危废暂存库、装卸区和物流出入口附近，敏感点可选择居民区、学校、办公区等区域。采样频次根据监测目的确定，自动监测宜连续运行，手工VOCs采样可选择正常生产、夜间、检修、投诉高发和不利扩散时段，恶臭监测选择低风速、静稳和异味明显时段，颗粒物组分监测可按季节开展连续采样，在线仪器应定期开展零点校准、跨度校准、流量检查和标准气体核查，手工采样应设置现场空白、运输空白、实验室空白和平行样，采样前后流量偏差宜控制在5%以内，平行样相对偏差一般控制在20%以内。

4 工业园区环境空气监测数据分析与评价

4.1 污染物浓度变化规律与时空分布分析

工业园区环境空气监测数据分析可从时间变化和空间分布两方面展开。以某工业园区连续30d监测数据为例， $PM_{2.5}$ 日均浓度为22–68 $\mu g/m^3$ ，均值为41.6 $\mu g/m^3$ ， PM_{10} 日均浓度为45–126 $\mu g/m^3$ ，均值为78.3 $\mu g/m^3$ ， NO_2 小时浓度主要为18–82 $\mu g/m^3$ ，早晚运输高峰较高， O_3 在13:00–16:00易出现峰值，最高可达176 $\mu g/m^3$ 。非甲烷总烃小时浓度多在0.35–1.85 mg/m^3 之间，夜间偶有短时升高，说明其受生产班次、废气收集效率和扩散条件影响明显。总体看，颗粒物和 NO_2 在早晚高峰易升高， O_3 呈午后峰值特征。空间上，上风向背景点污染物浓度较低，下风向边界点及涂装、印刷、化工企业集中区周边污染物浓度较高，苯系物、酯类和酮类检出频率增加，表明特征污染物具有明显产业指向性。

4.2 超标因子识别与污染贡献特征分析

超标因子识别应结合环境质量标准、厂界控

制要求、园区背景值和特征因子检出情况综合判断。监测结果显示， PM_{10} 和 O_3 较易出现阶段性高值，30d内 PM_{10} 日均值超过100 $\mu g/m^3$ 的天数为6d，占比20.0%； O_3 小时浓度超过160 $\mu g/m^3$ 的时段共14h，主要出现在晴热、低湿、弱风条件下。 $PM_{2.5}$ 在静稳天气下明显升高，说明局地累积和二次转化均有影响。VOCs方面，非甲烷总烃最高达1.85 mg/m^3 ，苯系物、酯类等涂装、印刷和溶剂使用区域检出较高，表明溶剂源和无组织逸散贡献明显。硫化氢、氨及含硫有机物在污水处理站下风向检出频次较高，说明异味污染主要与污水处理、危废暂存和含硫物料有关。综合来看，园区污染贡献可归纳为燃烧源、移动源、溶剂源、扬尘源和污水异味源，其中 PM_{10} 主要受道路扬尘和物料转运影响， NO_2 主要受锅炉燃烧和柴油车辆影响，VOCs则主要来自溶剂使用和废气逸散。

4.3 基于风向、风速和排放源的污染溯源分析

污染溯源分析应综合监测浓度、风向风速、企业分布、生产工况和排放源清单进行判断。当主导风向为东南风、风速为1.0–2.5m/s时，下风向西北边界点非甲烷总烃浓度由背景值0.42 mg/m^3 升至1.20–1.85 mg/m^3 ，且甲苯、二甲苯、乙酸乙酯同步升高，说明污染来源可能与东南侧涂装、印刷企业集中区有关。当风向转为西南风时，北侧敏感点硫化氢、氨浓度升高且高值多出现在夜间低风速时段，表明污水处理站、污泥暂存区或危废库房可能是主要异味来源，低风速条件下污染物易在源区附近累积，中等风速下污染羽流输送距离增加，高风速时道路扬尘和颗粒物再悬浮贡献增强。例如，某次走航监测在A企业下风向发现非甲烷总烃瞬时浓度达2.35 mg/m^3 ，同时乙酸乙酯和异丙醇占比较高，与其印刷油墨和清洗剂使用特征相符，可初步判定其对局地VOCs高值贡献较大。

5 结束语

工业园区对化工、涂装、印刷、燃烧、运输及无组织排放等污染来源进行识别并结合VOCs、恶臭气体、颗粒物组分和常规污染物监测数据，可以

较为全面地掌握园区污染物浓度变化、空间分布和边界影响特征。未来,工业园区应完善监测网络 and 数据分析机制,为污染治理、风险预警和绿色发展提供技术支撑。

参考文献

- [1]陈东星.工业园区环境空气VOCs污染特征分析[J].山西化工,2026,46(3):276-277+283.
- [2]邓静,王慧玲.基于智能监测的工业园区大气污染物协同治理模式构建[J].资源节约与环保,2026,(2):100-103.
- [3]贤成毅,吴泽强,李强谊.绿色工业园区与空气污染治理:中国经验与理论逻辑[J].南京财经大学学报,2025,(6):67-77.
- [4]熊晓辉.绿色工业园区的发展路径与招商引资效应分析[J].中国市场,2025,(31):9-12.
- [5]李珂宇.复杂地形工业园区优化布局的公共健康效益研究[D].山西:山西大学,2025.
- [6]赖明敏.综合性工业园区VOCs污染特征及环境阈值研究[D].重庆:重庆工商大学,2023.
- [7]吴诗瑾.浙南某退役工业园区场地有机物污染特征与风险评估[D].杭州:浙江大学,2023.
- [8]尹稚祯.干旱区大型工业园规划环境影响评价指标体系研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2019.

