

# 基于无人机多参数监测的湿垃圾处理厂 污染气体分布及环境因子研究

陈泽成<sup>1</sup>, 司君<sup>1</sup>, 孔龙<sup>2</sup>, 王罗春<sup>1</sup>, 楼紫阳<sup>2,\*</sup>

(1. 上海电力大学环境与化学工程学院, 上海 200090; 2. 上海交通大学环境与科学工程学院  
上海市固体废物处理与资源化工程研究中心, 上海 200240)

**摘要:** 湿垃圾处理厂在运行过程中释放甲烷( $\text{CH}_4$ )、硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )、氨气( $\text{NH}_3$ )及挥发性有机物(VOCs)等污染物, 这些物质对周边环境与人体健康构成威胁。为了解决传统监测方法在空间覆盖、时效性及安全性不足的问题, 基于无人机搭载多参数传感器, 构建了一套气体监测系统, 并在上海某湿垃圾处理厂开展了实地监测。研究分析了不同功能区污染气体的水平分布异质性、垂直浓度梯度及与环境因子的相关性。结果显示,  $\text{CH}_4$  浓度在全厂范围内整体显著高于其他气体, 达到  $1860 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 是主要的环境污染压力来源;  $\text{H}_2\text{S}$  与  $\text{NH}_3$  浓度高值区与餐余车间、厨余车间、干化车间和卸料大厅等处理工艺环节密切相关, 呈现出明显的区域差异和点源性排放特征; 尽管 VOCs 浓度相对较低, 但其成分复杂使其具有潜在环境风险。垂直剖面监测表明,  $\text{CH}_4$  在各高度均维持高浓度( $1800\sim1900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 而  $\text{NH}_3$  主要在设施的上层空间聚集,  $\text{H}_2\text{S}$  浓度随高度缓慢上升, VOCs 则在垂直方向上分布相对均匀。污染物的扩散趋势可能导致  $\text{NH}_3$  加剧恶臭污染, 影响空气质量并危害居民健康; VOCs 则可能增强臭氧生成和二次有机气溶胶形成, 加剧光化学烟雾问题。相关性分析结果表明, 湿度与气压是影响气体释放与扩散的关键因子, 特别是湿度对  $\text{NH}_3$  与 VOCs 的调节作用最为显著。验证了无人机多参数监测在复杂场景下对污染气体监测方面的有效性, 为湿垃圾处理厂污染气体的精准监测、环境风险评估及差异化管控策略的制定提供科学依据。

**关键词:** 湿垃圾处理厂; 无人机监测; 甲烷( $\text{CH}_4$ ); 硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ ); 氨气( $\text{NH}_3$ ); 挥发性有机物(VOCs); 环境因子

中图分类号: X83

文献标识码: A

## Pollutant Gas Distribution and Environmental Factors in a Wet Waste Treatment Plant Based on Multi-Parameter UAV Monitoring

CHEN Zecheng<sup>1</sup>, SI Jun<sup>1</sup>, KONG Long<sup>2</sup>, WANG Luochun<sup>1</sup>, LOU Ziyang<sup>2,\*</sup>

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai Engineering Research Center of Solid Waste Treatment and Resource, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The emission of atmospheric pollutants such as methane ( $\text{CH}_4$ ), hydrogen sulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ), ammonia ( $\text{NH}_3$ ), and volatile organic compounds (VOCs) from wet waste treatment plants poses serious environmental and health risks. Conventional monitoring methods, which rely on fixed stations or manual sampling, often face various challenges regarding limited spatial coverage, delayed data collection, and operational safety hazards. To address these limitations, this study developed a gas

收稿日期: 2025-08-31

修回日期: 2025-11-10

接受日期: 2025-11-12

DOI: [10.20078/j.eep.20251114](https://doi.org/10.20078/j.eep.20251114)

基金项目: 内蒙古研究院资助项目(SA1600213); 上海交通大学四川研究院资助项目(G2022037007L); “科技兴蒙”上海交通大学行动计划专项资助项目(2021PT0045-02-01)

第一作者: 陈泽成(2001—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要研究方向为填埋场污染物控制。E-mail: [m19933585281@163.com](mailto:m19933585281@163.com)

\*通讯作者: 楼紫阳(1980—), 男, 上海人, 教授, 主要研究方向为生活垃圾填埋场稳定化及二次污染控制。E-mail: [louworld12@sjtu.edu.cn](mailto:louworld12@sjtu.edu.cn)

monitoring system utilizing a multi-parameter sensor integrated with an unmanned aerial vehicle (UAV). Field monitoring was conducted at a wet waste treatment plant in Shanghai to assess pollutant distribution, vertical concentration gradients, and correlations with environmental factors across different functional areas. The results revealed that CH<sub>4</sub> concentrations were significantly higher than those of other gases, reaching up to 1 860 μg/m<sup>3</sup> throughout the plant, making CH<sub>4</sub> the primary contributor to the total emission load. In contrast, H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub> exhibited distinct point-source characteristics, with high concentrations closely associated with specific processing stages, including the kitchen waste workshop, catering waste workshop, drying workshop, and unloading hall. Although VOC concentrations were relatively low, their complex composition presented potential environmental risks. Vertical profile monitoring showed that CH<sub>4</sub> maintained high concentrations at all heights (1 800 – 1 900 μg/m<sup>3</sup>) and NH<sub>3</sub> tended to accumulate in the upper sections of the facility, while H<sub>2</sub>S concentrations gradually increased with height. Conversely, VOCs exhibited a relatively homogeneous vertical distribution across the plant. These diffusion trends suggest that NH<sub>3</sub> could intensity odor pollution, while VOCs may enhance ozone formation and the generation of secondary organic aerosols. Correlation analysis indicated that humidity and air pressure were key environmental factors influencing the release and dispersion of these gases. Among them, humidity demonstrated the most significant influence on NH<sub>3</sub> and VOC levels, suggesting its critical role in determining their atmospheric residence time and transport behavior. This study demonstrates the effectiveness of UAV-based sensing for detecting pollutant gases in complex industrial settings. By enabling precise monitoring and real-time data acquisition, this approach improves environmental risk assessment and supports the creation of targeted pollution control strategies for wet waste treatment plants. Our findings confirm that UAV-mounted systems provide significant advantages over conventional methods, specifically in terms of expanded spatial coverage and enhanced operational safety. Consequently, this study highlights the transformative potential of UAV technology in environmental monitoring, offering critical insights for air quality management and evidence-based policymaking in waste treatment sectors.

**Keywords:** Wet waste treatment plant; Unmanned aerial vehicle (UAV) monitoring; Methane (CH<sub>4</sub>); Hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S); Ammonia (NH<sub>3</sub>); Volatile organic compounds (VOCs); Environmental factors

## 0 引言

随着我国城市化进程的持续加快,城市生活垃圾产量迅速增长。其中,湿垃圾因具有高含水率、高有机质含量的特点,已成为城市环境管理中的重点与难点<sup>[1]</sup>。在卸料、贮存、预处理及生化处理等过程中,湿垃圾易发酵产生大量的挥发性物质<sup>[2]</sup>,释放以CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>、VOCs等为代表的恶臭与温室气体,对周边环境与人体健康构成显著威胁。在湿垃圾处理厂等典型场景中,H<sub>2</sub>S的嗅觉阈值极低,短期暴露极可能引发头痛、眩晕等不适症状,在较高浓度下更会对人体造成急性健康损害<sup>[3]</sup>。CH<sub>4</sub>作为一种强效温室气体<sup>[4]</sup>,其潜在环境影响亦不容忽视。湿垃圾处理厂作为城市固废处理体系的关键环节,当前部分处理厂因设施管

理不善、废气收集效率低、污染物控制措施缺乏针对性等原因,导致恶臭气体持续逸散<sup>[5]</sup>,使得其成为城市大气环境中一类复杂的复合污染源。因此,对该类场景的污染气体进行准确监测,是科学评估其环境影响、制定有效防控策略的先决条件,也已成为当前城市环境治理领域的一项重要课题。

传统的恶臭监测技术应对此类复杂场景时存在明显局限。以三点比较式臭袋法<sup>[6–7]</sup>和动态嗅觉测定法<sup>[8]</sup>等为代表的嗅觉感知法,虽可用于评估综合臭气浓度,但主观性强、时效性差,且采样过程难以实现实时反馈。此外,基于固定点位的传统地面仪器监测,由于布点数量有限,难以实时追踪恶臭污染的动态变化过程,也无法准确捕捉广阔厂区内的污染物的空间分布特征以及由生产活动引发的阵发性或无组织排放<sup>[9]</sup>。更重要的是,这

类地面监测手段无法获取污染物中垂直维度的扩散特征,且难以安全进入高浓度或者存在安全隐患的核心区域进行作业,导致监测存在盲区,无法全面掌握污染物空间扩散范围。

近年来,无人机遥感与传感技术的发展为突破传统监测方法的局限性提供了全新的技术路径。无人机搭载气体监测技术因其独特的工作覆盖能力和机动性优势,能够有效应对恶臭污染空间分布监测的难题。与传统方法相比,该技术具备原位响应能力,可灵活规划监测路线与点位,操作便捷,有效解决常规监测方法中工作量大、数据反馈滞后的问题<sup>[10]</sup>。该技术不仅能实现数据的现场实时获取与传输,大幅提升监测效率与应急响应速度,还通过非接触式测量方式有力保障了作业人员的安全<sup>[11]</sup>。鉴于此,本研究通过无人机搭载甲烷传感器、恶臭传感器及气相五参数传感器,构建一套多参数环境监测系统,并将其应用于湿垃圾处理厂污染气体的分布特征研究。通过在典型厂区开展水平测绘与垂直探测,拟实现以下目标:(1)揭示CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>及VOCs在不同功能区的空间分布规律;(2)解析主要污染物在近地面空间的垂直分层特征;(3)分析关键环境因子与气体浓度的统计相关性。本研究有望为湿垃圾处理厂的环境监管、风险评估和精细化治污提供高效可靠的技术手段参考与科学依据。

## 1 仪器和方法

### 1.1 选 址

监测点为上海市某湿垃圾处理厂,该厂的设计处理规模为530 t/d,具体包括餐饮垃圾150 t/d、家庭厨余垃圾350 t/d以及废弃食用油脂30 t/d。该湿垃圾处理厂主体工艺流程为“预处理+联合湿式厌氧消化+沼气发电利用”。针对不同类型的垃圾,采用差异化的预处理技术:餐饮垃圾通过精分制浆工艺处理,厨余垃圾采用生物淋滤工艺处理,浆液经过湿式厌氧工艺进一步处理。根据不同工艺环节的功能,湿垃圾处理厂的预处理工艺被划分为5个主要功能区,包括卸料大厅、厨余车间、餐饮车间、气浮车间及干化车间。

### 1.2 仪 器

本研究选取四旋翼无人机(大疆经纬M350 RTK)作为监测载体,搭载红外负载(大疆禅思H30T)、电池(TB65智能飞行电池)、气体传感器(灵嗅mini2)、甲烷检测模块(TDLAS)和气象监

测系统(五参数气象站)。在气体监测应用中,传感器模块直接安装在无人机下方的传统方法存在明显不足。KALISZEWSKI等<sup>[12]</sup>发现气流干扰导致H<sub>2</sub>S浓度测量误差高达±28%,传统检测方法在低空作业时目标气体易被风吹散,造成测量结果失真;在复杂地形环境中作业时,该安装方式易磕碰设备。为此,本研究将传感器装在无人机顶部以避开气流干扰,实现不同高度的连续监测,具体配置如图1所示。

表1为无人机关键参数,四旋翼无人机作为核心飞行平台,水平位置精度1.0 cm、浓度精度±1 mg/m<sup>3</sup>,垂直位置精度1.5 cm、浓度精度±1 mg/m<sup>3</sup>,最大水平飞行速度23 m/s,可承受12 m/s风压,工作温度范围−20~50 °C。在气体监测方面,灵嗅mini2可监测VOCs、H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>等气体,同时集成的TDLAS甲烷监测模块基于可调谐半导体激光吸收光谱技术,相较传统监测更灵敏高效,能精准锁定异味来源、实时追踪扩散范围,其响应时间1 s、检出限1 mg/m<sup>3</sup>、量程0~15 000 mg/m<sup>3</sup>。气象参数采集依托外接的气象五参系统,风速测量范围0~50 m/s(分辨率0.1 m/s,准确度±2%),风向测量范围0~360.0°(分辨率1.0°,准确度±1.0°)。此外,搭载无人机运动补偿算法,在无人机运动过程中同步测量真实风速风向,整体为各类监测数据与气体扩散规律分析提供稳定、精准的支撑。

### 1.3 实验操作

为精准捕捉目标区域的气体分布特征,本次无人机气体监测作业聚焦预先划定的矩形区域展开。如图2所示,针对区域下风侧,对厂区中的5个功能区(a餐余车间、b厨余车间、c气浮车间、d干化车间、e卸料大厅、f厂区外围道路)采用Z字形水平采样方式,该采样方式在无人机任务规划中能够保证覆盖完整性的同时,实现时间效率提升<sup>[13]</sup>。水平维度上对每个功能区分别布设多条平行飞行航线,确保监测范围无遗漏且数据采集密度均匀。飞行过程中,每条航线均以1~2 m/s的低速巡航,同时沿航线每1 m设置1个采样点,通过高频次采样提升水平方向数据的精细度。为揭示厂区不同高度的大气污染物浓度分布特征,本研究按照既定飞行方式,在2、17、22和25 m 4个关键高度层开展监测,并在各功能区进行多次取样。其中,2 m高度主要监测低矮工业排放口及近地面的气体逸散情况;17 m高度设置依据厂房最低高度确定,22 m高度设置依据其中厂房最高高



图 1 无人机多参数监测系统

Fig. 1 UAV-based multi-parameter monitoring system

表 1 无人机关键参数及监测范围精度

Table 1 Key parameters and monitoring ranges/accuracy of the UAV system

| 设备类别   | 设备名称             | 核心参数   | 监测范围                       | 精度/分辨率  |
|--------|------------------|--|----------------------------|---|
| 核心飞行平台 | 大疆经纬 M350 RTK 套装 | 展开尺寸 810 mm×670 mm×430 mm, 折叠尺寸 430 mm×420 mm×430 mm; 最大起飞重量 9.2 kg, 最大水平飞行速度 23 m/s, 抗风压 12 m/s | 工作温度: -20~50 °C            | 水平: 1 cm, 垂直: 1.5 cm                          |
| 多气体传感器 | 可飞灵嗅 mini2       | 主动式进气, 内置 4G/3G 通信, 支持断点续传; 监测 TVOC、H <sub>2</sub> S、NH <sub>3</sub>                             | —                          | 需标准气体校准                                       |
| 甲烷监测模块 | 可飞 TDLAS 甲烷监测模块  | TDLAS 原理, 吸入式定量, 重量 250 g, USB Type-C 连接(灵嗅接口)   | 0~15 000 mg/m <sup>3</sup> | 分辨率 1 mg/m <sup>3</sup>                       |
| 气象监测系统 | 可飞外接气象五参系统       | 超声波测量, 具备无人机运动补偿算法, USB Type-C 连接(灵嗅接口)  | 风速 0~50 m/s, 风向 0~360°     | 风速分辨率 0.1 m/s、准确度 ± 2%; 风向分辨率 1.0°、准确度 ± 1.0° |

度, 而 25 m 即为监测厂房高度上空气体逸散情况, 旨在保证飞行路径与厂区实际空间结构相匹配, 更准确地反映厂房周边空间的污染物分布差异。

## 2 结果与讨论

本节基于无人机多参数环境监测系统, 对上海某湿垃圾处理厂的污染气体浓度进行了系统监测与分析, 并重点阐释了污染气体在垂直方向上的分布特征。最后, 讨论了影响无人机监测结果的环境因素, 并对本系统进行了稳定性分析。

### 2.1 典型气体污染物空间分布特征

监测结果显示, 厂区各类污染气体浓度均未超过上海市地方污染物排放标准限值<sup>[14]</sup>, 表明该湿垃圾处理厂在现行环境监管下总体运行规范。然而, 不同功能区的浓度分布存在显著差异, 局部区域的气体排放特征反映了工艺流程和操作条件对污染物释放的影响。为了深入揭示这些差异及其成因, 进一步分析了湿垃圾处理厂不同功能区 H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>、CH<sub>4</sub> 和 VOCs 的空间分布特征, 结果如图 3 所示。

厂区内的 H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>、CH<sub>4</sub> 及 VOCs 浓度分布呈现显著的空间分布差异。其中, CH<sub>4</sub> 浓度相较于

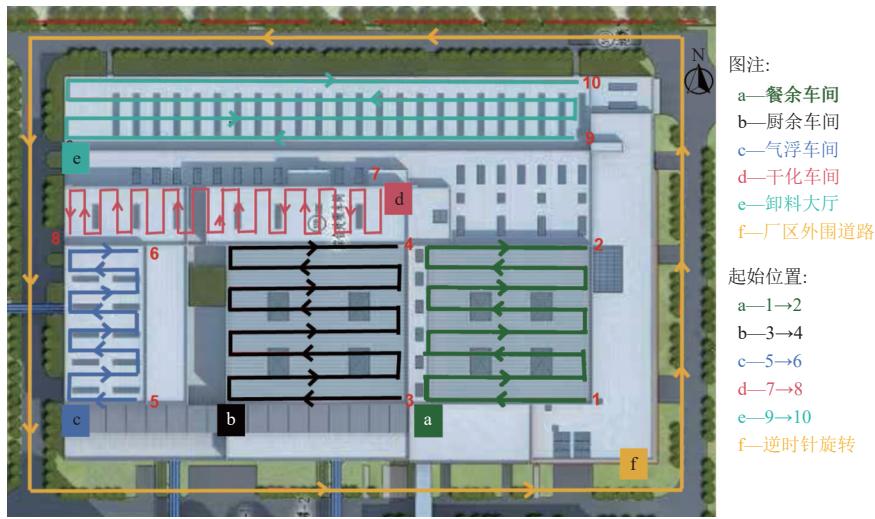


图 2 湿垃圾处理厂不同区域飞行路线图

Fig. 2 Flight route map across different zones of the wet waste treatment plant

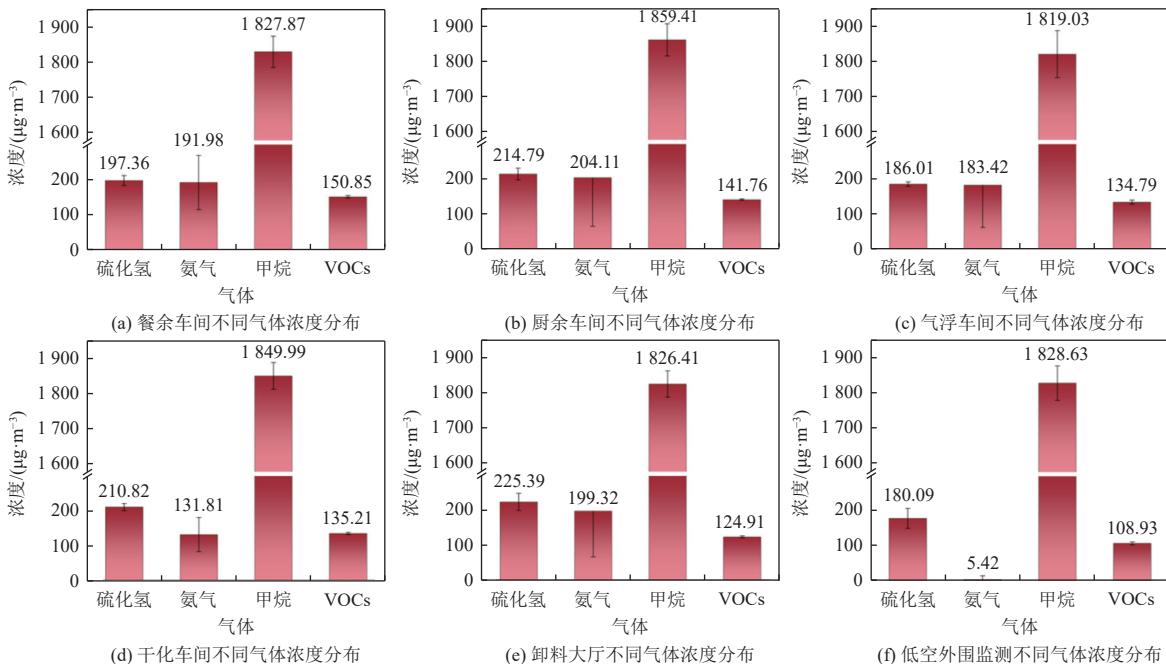


图 3 湿垃圾处理厂各区域不同气体浓度分布图

Fig. 3 Concentration distribution of various gases in different zones of the wet waste treatment plant

其他气体污染物浓度处于较高水平, 最高值接近  $1860 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (图 3(b)), 这源于湿垃圾在厌氧发酵和有机质降解过程产生<sup>[15]</sup>,  $\text{CH}_4$ 也因此成为厂区主要的大气污染压力源及潜在温室气体贡献者。 $\text{H}_2\text{S}$  与  $\text{NH}_3$  的分布则表现出较强的区域特征, 在餐余车间(图 3(a))、厨余车间(图 3(b))、干化车间(图 3(d))和卸料大厅(图 3(e))区域浓度较高。在这些环节中, 垃圾扰动频繁、有机物初期分解活跃, 硫化物与含氮恶臭气体大量释放, 因此

$\text{H}_2\text{S}$  与  $\text{NH}_3$  水平均相对较高。

DI 等<sup>[16]</sup>结果显示预处理车间厌氧发酵释放的  $\text{H}_2\text{S}$  是主要恶臭源, 且气味强度与垃圾扰动程度正相关。然而, 气浮车间(图 3(c))和低空厂区外围区域(图 3(f))的  $\text{H}_2\text{S}$  与  $\text{NH}_3$  浓度明显降低。在 6 种不同的功能区, VOCs 整体浓度都较低, 普遍低于  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。尽管如此, 考虑其组分复杂性及参与二次污染形成的潜势, 其环境风险仍需予以关注。JIA 等<sup>[17]</sup>研究发现 VOCs 对二次污染的

贡献率达 43%，其组分复杂性导致单一控制策略难以全面降低风险。以上结果表明，在湿垃圾处理厂区  $\text{H}_2\text{S}$  与  $\text{NH}_3$  的分布特征与其处理环节密切相关，尤其是在餐余车间、厨余车间、干化车间和卸料大厅等环节，这些区域由于湿垃圾在厌氧发酵和有机物初期分解过程中，容易释放大量的  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_3$  和  $\text{CH}_4$ 。在恶臭控制中需要基于不同处理环节的特点，采取针对性地控制措施，尤其是对  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_3$  和  $\text{CH}_4$  的排放源进行精准管理，以降低环境污染风险。

## 2.2 典型气体污染物垂直分布特征

湿垃圾处理厂的污染气体( $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{NH}_3$ )扩散行为直接关系厂区环境安全及周边居民健康。尽管已有研究对气体成分及水平迁移规律进行了探索<sup>[18]</sup>，但垂直分布特征尚未得到充分关注。本研究采用无人机搭载高精度传感器，于厂区及外围 0~25 m 高度范围内对  $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_3$  及 VOCs 浓度进行了垂直剖面监测。

由图 4 可知，各污染物浓度垂直分布特征差异显著。其中， $\text{CH}_4$  作为湿垃圾厌氧分解的主要产物，其浓度在各高度均维持在较高水平(1 800~1 900  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )，且随相对高度变化呈现一定波动，其波动反映出覆盖层  $\text{CH}_4$  氧化与气象扰动对气体扩散过程的复合影响<sup>[19~20]</sup>。 $\text{NH}_3$  与  $\text{H}_2\text{S}$  作为湿垃圾处理的典型恶臭污染物，其浓度整体低于  $\text{CH}_4$ 。 $\text{NH}_3$  在低空( $\leq 17 \text{ m}$ )受地表吸附与化学反应抑制<sup>[21]</sup>，浓度相对较低；而在 17~25 m 高度区间，因含氮有机物分解增强， $\text{NH}_3$  密度低于空气，倾向于在设施中上层聚集<sup>[22]</sup>，其浓度显著上升。 $\text{H}_2\text{S}$  浓度随高度呈缓慢上升趋势，这可能与在微生物

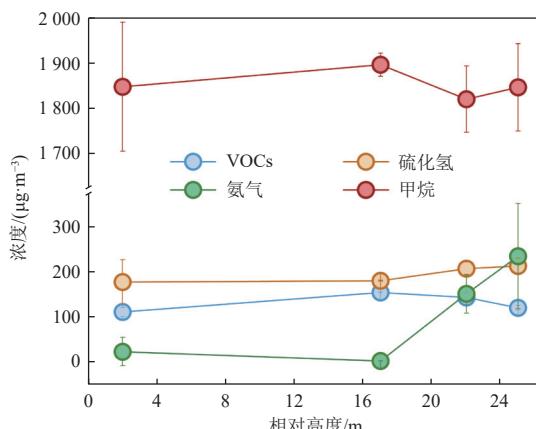


图 4 湿垃圾处理厂气体垂直分布关系图

Fig. 4 Vertical distribution of gases in the wet waste treatment plant

降解过程中含硫化合物持续释放的特性，以及其较高分子量导致的扩散迟滞效应有关<sup>[23]</sup>。VOCs 因挥发性强、易于扩散<sup>[24]</sup>，在整个垂直剖面中分布较为均匀，垂直梯度不显著。

上述分布特征揭示了湿垃圾降解过程中微生物代谢产气与大气物理过程(扩散-沉降平衡)的耦合，污染物的扩散趋势可能对周围环境造成不同程度的影响。其中， $\text{NH}_3$  的上升趋势可能导致设施上层区域的恶臭污染加剧<sup>[25]</sup>，影响空气质量，并可能引发周边居民的健康问题。而 VOCs 的均匀分布可能增加臭氧生成潜力和二次有机气溶胶的形成，进而加剧区域的光化学烟雾问题<sup>[26]</sup>。此外，气象条件(风速、温度和湿度等)对污染物的扩散和沉降有重要影响。较高的风速有助于污染物的稀释和扩散，而低风速可能导致污染物在局部区域的积聚，从而对周围环境产生更大影响。因此，基于不同垂直高度的气体污染分布变化的精准监测，对于精细化污染源管控与大气污染治理策略的优化提供了重要的理论支持与实践指导。

## 2.3 多参数监测环境因子分析

湿垃圾处理厂污染气体的排放不仅与物料性质和处理工艺环节密切相关，还受到温度、湿度、气压和风速等环境因子的显著影响。这些因子一方面通过改变有机质降解速率、气体溶解度和扩散条件，直接作用于污染物的释放与迁移过程<sup>[27]</sup>；另一方面也会对无人机的飞行稳定性和传感器采样效率产生干扰<sup>[28]</sup>。AFSHAR MOHAJER 等<sup>[29]</sup> 研究发现当风速>5 m/s 时，气体羽流空间分布呈现显著拉伸效应，监测路径需调整为逆风螺旋轨迹以减小数据波动性，采样效率下降约 30%。因此，单纯从浓度水平对气体分布进行描述尚不足以全面反映其形成机制和监测特征，需要结合环境因子的变化进行稳定性分析。基于此，本研究进一步采用 Spearman 相关性分析的方法，系统评估环境因子与主要污染气体之间的统计学相关性，结果如图 5 所示。

结果显示，环境因子对湿垃圾处理厂内污染气体的释放与分布具有显著影响。 $\text{H}_2\text{S}$  与湿度( $r=0.583 0, p<0.001$ )呈显著正相关趋势，说明湿度升高能够促进  $\text{H}_2\text{S}$  的积聚，与气压呈现一定负相关( $r=-0.206 7, p<0.05$ )，气压升高可能在一定程度上抑制其浓度扩散；而  $\text{H}_2\text{S}$  与温度和风速的相关性较低( $r=0.064 8, p>0.05; r=0.038 9, p>0.05$ )，表明风

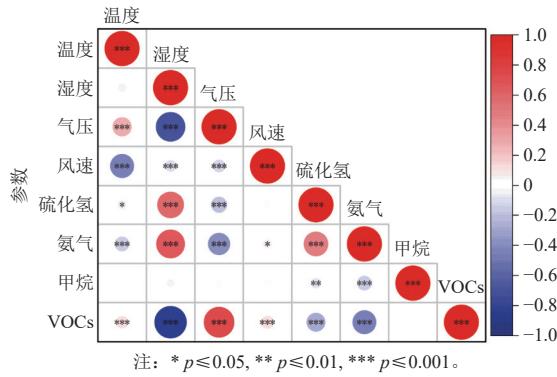


图 5 气体污染物与环境因子相关性分析图

Fig. 5 Correlation analysis between gas pollutants and environmental factors

速及温度对无人机监测 H<sub>2</sub>S 影响并不显著。NH<sub>3</sub> 则表现出对环境条件的敏感性, 其与湿度和气压均呈现显著相关性( $r=0.666\ 0, p<0.001$ ;  $r=0.402\ 4, p<0.01$ ), 与温度呈弱相关( $r=0.176\ 2, p<0.05$ ), 在高温高湿环境下微生物活动增强<sup>[30]</sup>, 加速含氮有机物分解释放 NH<sub>3</sub>, 而与风速相关性较弱( $r=0.067\ 7, p>0.05$ ), 无显著影响。CH<sub>4</sub> 与气象因子的相关性普遍较低, 其与温度( $r=-0.015\ 4, p>0.05$ )、湿度( $r=-0.044\ 9, p>0.05$ )、气压( $r=-0.032\ 5, p>0.05$ )及风速( $r=0.055\ 5, p>0.05$ )的相关系数均接近零, 其浓度主要由排放源强度决定, 气象条件对其扩散作用有限<sup>[31]</sup>。相比之下, VOCs 表现出显著的相关性特征, 与湿度呈强烈负相关( $r=-0.844\ 7, p<0.001$ ), 说明高湿度降低表面 VOCs 挥发速率, 抑制其在大气中积聚<sup>[32]</sup>, 与气压呈强烈正相关( $r=0.759\ 7, p<0.001$ ), 说明高气压有利于 VOCs 在大气中富集。而与温度和风速的相关性较弱, 均未达到显著水平( $r=0.122\ 9, p>0.05$ ;  $r=0.130\ 5, p>0.05$ )。从整体上看, 风速对整个监测过程的气体污染物浓度数据的相关性较弱, 影响较为有限, 如图 6 所示。尤其是在无人机监测的情况下, 风速变化对 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub> 及 VOCs 等气体浓度的影响不显著, 其在风速变化范围内(3.0~6.0 m/s)基本保持稳定, 变化幅度较小。这可能是因为无人机传感器搭载在无人机上方, 该设置减小了气流的干扰<sup>[12]</sup>, 从而使无人机监测更加稳定, 气体污染物数据更加准确。湿度和气压则是影响 NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S 及 VOCs 气体分布的关键气象因子, 其中湿度对氨气和 VOCs 的调节作用尤为突出。

### 3 结论与展望

本研究基于无人机搭载多参数传感器的环境

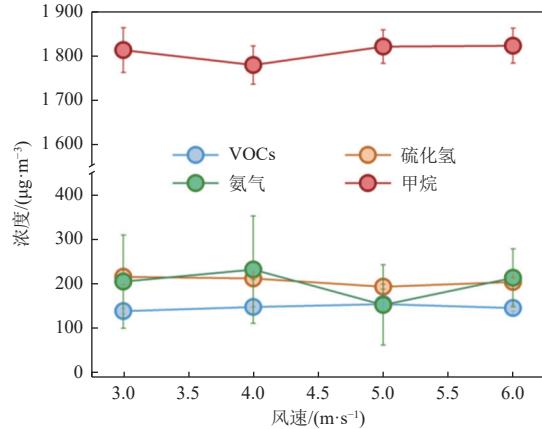


图 6 气体污染物浓度与风速的关系

Fig. 6 Relationship between gas pollutant concentrations and wind speed

监测系统, 对上海某湿垃圾处理厂的典型污染气体进行了系统性调查与分析, 并探究了气体在不同功能区的水平/垂直分布特征及其与环境因子的统计相关性。研究结果表明, 湿垃圾处理厂逸散气体呈现显著的空间与垂直分布差异, 其中 CH<sub>4</sub> 是主要的环境压力源, 浓度显著高于其他污染物(最高值接近 1 860 μg/m<sup>3</sup>); H<sub>2</sub>S 与 NH<sub>3</sub> 的分布特征受工艺环节和垃圾扰动影响显著, 特别是在餐余车间、厨余车间、干化车间和卸料大厅等环节, VOCs 虽浓度水平较低, 但存在不容忽视的潜在的环境与健康风险; 垂直剖面分析进一步揭示了 CH<sub>4</sub> 高度稳定积聚状态、NH<sub>3</sub> 表现出明显的上层富集趋势、H<sub>2</sub>S 浓度随高度缓升, 而 VOCs 在各垂直层次中分布较为均匀的。环境因子关联分析显示, 湿度和气压是影响气体释放与扩散的关键因子, 其中湿度对 NH<sub>3</sub> 和 VOCs 的浓度变化具有最为显著的调节作用。

无人机多参数监测技术在空间覆盖范围、数据实时性与安全性方面具有显著优势, 为湿垃圾处理厂的环境风险评估与差异化治理提供可靠依据。同时, 本研究也发现该方法在长期连续监测、复杂气象条件下的适应性以及多源数据融合方面仍有提升空间。未来研究应进一步优化传感器精度、飞行策略开发及扩散模型构建, 以推动其在城市环境治理中的规模化应用。

### 参考文献 (References) :

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 餐厨垃圾处理技术规范: CJJ 184—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the

- People's Republic of China. Technical code for food waste treatment: CJJ 184—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [2] 王攀, 黄燕冰, 袁传胜, 等. 国内成功运营的餐厨垃圾处理厂臭气排放特征研究 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(2): 624–630.
- WANG Pan, HUANG Yanbing, YUAN Chuansheng, et al. Study on characterization of odors from successful food waste treatment plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(2): 624–630.
- [3] BATTERMAN S, GRANT ALFIERI A, SEO S H. Low level exposure to hydrogen sulfide: A review of emissions, community exposure, health effects, and exposure guidelines[J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2023, 53(4): 244–295.
- [4] FOSCO D, DE MOLFETTA M, RENZULLI P, et al. Progress in monitoring methane emissions from landfills using drones: An overview of the last ten years[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 945: 173981.
- [5] 易伟雄, 程益锋, 张斌. 污水处理和固废处理行业臭气治理技术 [J]. 中小企业管理与科技, 2019(8): 153–154.
- YI Weixiong, CHENG Yifeng, ZHANG Bin. Odor treatment technology in sewage treatment and solid waste treatment industry[J]. Management & Technology of SME, 2019(8): 153–154.
- [6] 谭颖仪. 三点比较式臭袋法测定臭气的应用与改进 [J]. 能源与环境, 2023(2): 99–101.
- TAN Yingyi. Application and improvement of the three-point comparison odor bag method for odor measurement[J]. Energy and Environment, 2023(2): 99–101.
- [7] 张鑫. 恶臭监测测定评价方法的比较与研究进展 [J]. 中国环保产业, 2018(11): 63–65.
- ZHANG Xin. Comparison and research progress on determination and evaluation methods of odor monitoring[J]. China Environmental Protection Industry, 2018(11): 63–65.
- [8] 安慧, 赵东风, 张庆冬, 等. 恶臭嗅觉测定研究性实验教学设计 [J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(7): 196–199.
- AN Hui, ZHAO Dongfeng, ZHANG Qingdong, et al. Experimental teaching design for odor olfactory detection[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(7): 196–199.
- [9] JOŃCA J, PAWNUK M, BEZYK Y, et al. Drone-assisted monitoring of atmospheric pollution—A comprehensive review[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18): 11516.
- [10] 曾伟男. 无人机搭载气体监测仪监测准确性研究 [J]. 化工安全与环境, 2025, 38(3): 83–87.
- ZENG Weinan. Study on the monitoring accuracy of gas monitoring instruments mounted on drones[J]. Chemical Engineering Safety and Environment, 2025, 38(3): 83–87.
- [11] 王伟. 基于无人机激光检测的气体泄漏分布重建算法研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023: 1–7.
- WANG Wei. Research on gas leakage distribution reconstruction algorithm based on UAV laser detection[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023: 1–7.
- [12] KALISZEWSKI M, WŁODARSKI M, MŁYŃCZAK J, et al. The multi-gas sensor for remote UAV and UGV missions—Development and tests[J]. *Sensors*, 2021, 21(22): 7608.
- [13] YAN Xiaohong, CHEN Renwen, JIANG Zihao. UAV cluster mission planning strategy for area coverage tasks[J]. *Sensors*, 2023, 23(22): 9122.
- [14] 上海市环境保护局. 恶臭(异味)污染物排放标准: DB31/1025-2016[S]. 上海: 上海市环境保护局, 2016.
- Shanghai Municipal Environmental Protection Bureau. Emission standard for odorous ( malodorous ) pollutants: DB31/1025-2016[S]. Shanghai: Shanghai Municipal Environmental Protection Bureau, 2016.
- [15] 孙义, 王黎, 胡宁, 等. 餐厨垃圾厌氧干发酵处理产甲烷潜力及动力学研究 [J]. 工业安全与环保, 2016, 42(4): 27–31.
- SUN Yi, WANG Li, HU Ning, et al. Methane potential and kinetics of kitchen waste via dry anaerobic fermentation[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(4): 27–31.
- [16] DI Yanqiang, LIU Jiemin, LIU Siyuan, et al. Characteristic analysis for odor gas emitted from food waste anaerobic fermentation in the pretreatment workshop[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013, 63(10): 1173–1181.
- [17] JIA Jia, WANG Jin, JIN Weiye, et al. Inter-annual variability and health risk assessment of summer VOCs in a plain city of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2024, 337: 120790.
- [18] LIU Jianguo, WANG Xiaowei, NIE Xiaoqin, et al. In-situ emission characteristics of odorous gases from two food waste processing plants[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2013, 15(4): 510–515.
- [19] WU Tao, CHENG Jiankang, WANG Shifang, et al. Hotspot detection and estimation of methane emissions from landfill final cover[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(11): 1598.
- [20] WANG Di, LI Yushuang, PU Yu, et al. Vertical distribution mapping for methane fugitive emissions using laser path-integral sensing in non-cooperative open paths[J]. *Sensors*, 2024, 24(4): 1307.
- [21] XU Mao, MATSUMOTO R, CHANONMUANG P, et al. Vertical profile measurements for ammonia in a Japanese deciduous forest using denuder sampling technique: Ammonia emissions near the forest floor[J]. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2024, 18(1): 21.
- [22] NARUKI HIRANUMA, SARAH D BROOKS, DANIEL C O THORNTON, et al. Atmospheric ammonia mixing ratios at an open-air cattle feeding facility[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2010, 60(2): 210–218.

- [23] XU Qiyong. Hydrogen sulfide emissions and control strategies at construction and demolition debris landfills[D]. Gainesville: University of Florida, 2005: 11–23.
- [24] 薛璇璇. 青藏高原夏季挥发性有机物空间分布特征及来源解析 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024: 1–6.
- XUE Xuanxuan. Spatial distribution and source analysis of volatile organic compounds over the Qinghai-Tibet Plateau in summer[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2024: 1–6.
- [25] MCCUBBIN D R, APELBERG B J, ROE S, et al. Livestock ammonia management and particulate-related health benefits[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(6): 1141–1146.
- [26] WANG Feng, ZHANG Zhongcheng, WANG Gen, et al. Machine learning and theoretical analysis release the non-linear relationship among ozone, secondary organic aerosol and volatile organic compounds[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 114: 75–84.
- [27] PRASANNA KUMAR D J, MISHRA R K, CHINNAM S, et al. A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends[J].
- [28] THIELICKE W, HÜBERT W, MÜLLER U, et al. Towards accurate and practical drone-based wind measurements with an ultrasonic anemometer[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(2): 1303–1318.
- [29] AFSHAR MOHAJER N, WU Changyu. Use of a drone-based sensor as a field-ready technique for short-term concentration mapping of air pollutants: A modeling study[J]. *Atmospheric Environment*, 2023, 294: 119476.
- [30] LIM J H, CHA J S, KONG B J, et al. Characterization of odorous gases at landfill site and in surrounding areas[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 291–303.
- [31] FLORES JIMÉNEZ D E, CARBAJAL N, ALGARA SILLER M, et al. Atmospheric dispersion of methane emissions from sugarcane burning in Mexico[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 922–933.
- [32] ZHU Yingrui, GUO Shan, LIANG Weihui. A literature review investigating the impact of temperature and humidity on volatile organic compound emissions from building materials[J]. *Building and Environment*, 2024, 262: 111845.