

# 填埋场垃圾恶臭异味气体特征及控制研究进展

崔莹<sup>1</sup>, 王志杰<sup>1</sup>, 成兆文<sup>2</sup>, 王罗春<sup>1</sup>, 楼紫阳<sup>3,\*</sup>

(1. 上海电力大学 环境与化学工程学院, 上海 200090; 2. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 3. 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:** 作为一个典型的点、线、面多场景集合的释放源, 垃圾填埋场的恶臭异味气体具有组分杂、性质多变且难以控制等特征, 而基于组分特征的精准处理是实现其有效管控的基础。梳理了填埋场中典型垃圾组分(如餐厨垃圾、污泥、废弃塑料等)在不同状态稳定化过程中异味物质的释放特征, 探究了不同垃圾组分之间的相互作用关系以及对复杂的挥发性有机化合物(VOCs)释放的影响。对于填埋场的恶臭异味气体, 需要针对其多组分垃圾特征、不同填埋时间、不同环境条件等开展有针对性的异味气体与作用关系研究, 揭示填埋场的恶臭气味来源和形成机制。针对恶臭的变动性, 可以通过人工神经网络(ANN)与电子鼻等的耦合, 利用多层感知器(MLP)中的向前传播公式  $h_i = \sigma(W_i h_{i-1} + b_i)$  辅助模型处理等方法, 提升不同填埋垃圾恶臭在线精确响应能力。基于实时监测和反馈, 利用源头组分分类控制、过程化学靶向捕集以及末端生物处理保障等手段, 实现垃圾填埋场恶臭异味气体有效控制。

**关键词:** 填埋场; 恶臭异味控制; 易腐垃圾; 塑料垃圾; 在线监测

中图分类号: X705

文献标识码: A

## Recent advances in identification of odors emitted from landfills and their potential reduction and control methods

CUI Ying<sup>1</sup>, WANG Zhijie<sup>1</sup>, CHENG Zhaowen<sup>2</sup>, WANG Luochun<sup>1</sup>, LOU Ziyang<sup>3,\*</sup>

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Resource, Environment and Safety Engineering, South China University, Hengyang 421001, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Solid Waste Treatment and Resource, School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Landfills are typical point, line, and area odor pollution sources, characterized by the complex components, variable properties, and the difficulty of control. Accurate processing based on component characteristics is crucial for achieving effective control. This paper sorts out the release characteristics of typical waste components (e.g., kitchen waste, sludge, waste plastics, etc.) during stabilization in different states. The study explores the interaction between different waste components and the influences of complex volatile organic compounds (VOCs) release. To understand the source and formation mechanism of landfill odor, research is needed on the relationship between odor gas and the landfill's multi-component waste characteristics, different landfill time, and varying environmental conditions. To address the variability of landfill odor, the study utilizes artificial neural networks (ANN) coupled with electronic nose, employing the forward propagation formula  $h_i = \sigma(W_i h_{i-1} + b_i)$  in multilayer perceptrons (MLP) to enhance the model's ability to accurately respond to odor changes. Real-time monitoring and feedback enable effective odor control through source component

收稿日期: 2024-05-20

修回日期: 2024-07-09

DOI: 10.20078/j.eep.20240714

基金项目: “科技兴蒙”上海交通大学行动计划专项资助项目(2021PT0045-02-01); 国家自然科学基金委面上资助项目(42077111); 内蒙古研究院资助项目(SA1600213)

作者简介: 崔莹(2000—), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要研究方向为填埋场污染物控制。E-mail: cyiinnng@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

classification control, process chemical targeting, and end-of-pipe biological treatment.

**Keywords:** Landfill; Odor control; Perishable waste; Plastic waste; Online monitoring

## 0 引言

经过四十余年的城镇化发展,我国建设了大量的填埋场,目前仍然是垃圾处理的重要场所。到2023年,全国垃圾填埋量仍高达1.5亿t<sup>[1]</sup>。填埋场中,有机成分在高温厌氧环境中被细菌迅速降解,加剧恶臭释放。2012年我国有超过一千万人受填埋场恶臭的影响<sup>[2]</sup>,根据环保热线“12369”的最新纪录<sup>[3]</sup>,垃圾处理是近三年投诉最多的行业,占全部恶臭/异味投诉的11.3%,严重影响了当地居民的生活。

填埋场作为不同固废的重要处置场所,包括城市中常规的生活垃圾以及临时无法处理的固废,如污泥、建筑垃圾等。这些垃圾进入填埋场后,受到生物场、温度场、水力场和压力场等共同作用(图1)<sup>[4]</sup>。生物场中微生物发挥关键作用,微生物通过分解有机物质,产生填埋气体(如甲烷和二氧化碳)以及各种异味气体。过酸或过碱的pH会抑制微生物,减少恶臭气体。溶解氧浓度不足会导致厌氧微生物数量增加,进而促进硫化氢的生成。生物反应释放了大量的热量,产生高达50~80℃的温度场,不仅影响微生物的活性<sup>[5]</sup>,也提高代谢反应的速率,增加异味气体的扩散范围。大型废物堆叠形成的大型压力场形成巨大的内部压力,促进异味气体从废物堆中逸出,加快其释放速度,并影响异味气体的释放路径,导致气体从非预期的位置逸出,增加异味气体的控制难度。渗滤液的下渗和填埋气的上升又产生了动态的水力场<sup>[6]</sup>,其中渗滤液下渗携带有机物质和营养进入废物深处,促进微生物活动,增加异味气体。同时,渗滤液流动影响异味气体迁移,使其向上扩散并通过裂缝和排气系统逸出。在多个场相互作用、共同调控下,保证了填埋场稳定、高效地运作。

填埋场在稳定化过程中释放了大量的异味气体,主要来自于两个方面:一是非生物组分降解。主要源于生活垃圾中混杂的各种药剂、药品和塑料制品等受到环境条件的影响<sup>[7]</sup>,挥发性化学成分在特定条件下挥发,这也是塑料袋类释放异味的原因<sup>[8]</sup>;二是部分有机物在微生物作用下厌氧分解而成。在垃圾中,易降解的有机物含量较高,如高蛋白质、高淀粉和高糖类物质等,在微生物的

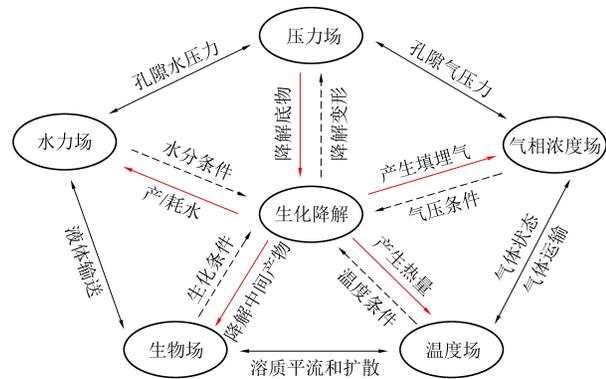


图1 填埋场多场耦合作用理论模型<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Theoretical modelling of multi-field coupling in landfills<sup>[4]</sup>

作用下分解并释放出包括氧化合物、硫化合物、部分烃类以及有机胺等异味气体<sup>[9-10]</sup>,这两部分气味共同构成了垃圾填埋场释放的恶臭。目前国内外异味控制技术主要分为三大类:物理法(稀释法和掩蔽法)、生物法、物理化学法(吸附、燃烧等)。对于填埋场异味气体,需要深入探究恶臭气味的来源和特性,结合有效的控制技术和策略,以降低填埋场异味对周边环境和人类健康的影响。

## 1 填埋场异味气体与垃圾组分溯源

我国填埋垃圾中餐厨垃圾占50.0%~60.0%<sup>[11]</sup>,橡胶和塑料比例为9.9%~19.1%<sup>[12]</sup>,同时还混杂大量的建筑和拆除废物。

### 1.1 典型垃圾类型恶臭释放特征

#### 1.1.1 易腐垃圾的恶臭释放特征

填埋场异味气体组成中,氨(89.2%)和硫化氢(7.9%)占主导地位<sup>[13]</sup>,浓度范围分别为520.00~4 020.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和56.58~514.52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。填埋场中恶臭贡献最大的组分还有还原性硫,占比82%<sup>[14]</sup>。因此,填埋场异味成为了一个亟待解决的重要问题。易腐垃圾分解会释放特定的挥发性有机化合物(VOCs),如2-丁酮、乙酸乙酯在不同类型的食物残渣中占有突出地位;二甲基硫和二甲基二硫化物也具有显著性。在易腐垃圾分解中,微生物群落对恶臭挥发性有机化合物的排放起关键作用<sup>[15]</sup>。易腐垃圾主要包括餐厨垃圾和污泥,餐厨垃圾中高有机成分和高含水量,极易生成并释放VOCs和生物气溶胶<sup>[16-17]</sup>,对环境和公

众健康构成潜在的威胁。污泥释放的恶臭气体中通常包含数十至上百种 VOCs, 其中仅有少数物质是主要的恶臭源。我国学者测定了 40 种典型恶臭物质的嗅觉阈值<sup>[18]</sup>, 见表 1。LOU 等<sup>[19]</sup>在针对不同组分生物质和垃圾产生气体的特性研究中发现, 餐厨垃圾是填埋场垃圾降解过程中产生恶臭

气体的主要源头。具体来说, 餐厨垃圾在气体释放方面, 硫化氢 (H<sub>2</sub>S) 和氨气 (NH<sub>3</sub>) 的释放潜力分别高达 48.40 μg/kg 和 4 742.00 μg/kg。尤其当餐厨垃圾与生活垃圾进行混合卫生填埋时, 不仅会导致渗滤液处理量显著增加, 还会使有机污染物的浓度大幅上升, 进而成为主要的恶臭污染源。

表 1 污泥处置中主要的恶臭物质嗅觉阈值及气味特征

Table 1 Odor thresholds and sensory properties during sludge treatment and disposal

分类	物质名称	分子式	感官性质	嗅阈值/(mg · m <sup>-3</sup> )
含硫化物	硫化氢	H <sub>2</sub> S	臭鸡蛋味	0.001 8
	甲硫醇	CH <sub>3</sub> SH	烂菜心味	0.000 1
	二甲基硫醚	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> S	海鲜腥味	0.005 5
	二甲基二硫醚	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	洋葱味	0.046 3
含氮化合物	氨	NH <sub>3</sub>	强烈刺激性气味	0.227 7
	三甲胺	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N	鱼腥味	0.002 4
酸类	丙酸	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH	刺激性气味	0.028 8
	正丁酸	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> COOH	汗味、酸臭味	0.005 1
醛类	乙醛	CH <sub>3</sub> CHO	刺激性气味	0.035 4
	丙醛	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO	水果香味	0.041 5
苯系物	甲苯	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	芳香气味	0.403 1
	乙苯	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	芳香气味	0.085 3
	苯乙烯	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	塑料味	0.158 1
	对二甲苯	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	芳香气味、水果香味	0.568 7

### 1.1.2 塑料垃圾的恶臭释放特征

塑料垃圾的恶臭源于降解和回收过程, 包括污染物质的吸收、塑料自身的降解和添加剂的分解。回收塑料树脂散发的刺鼻气味来自 VOCs, 其在接近室温时从树脂中挥发或升华, 温度越高, 气味越浓烈<sup>[20]</sup>。在回收过程中, 塑料还会受到其他物质(如清洁剂)气味的影响<sup>[21]</sup>。聚焦塑料的转化过程中产生的恶臭特征<sup>[22]</sup>, 关注 vHDPE 颗粒、rHDPE 颗粒以及 rHDPE 薄片的形成机制。针对 vHDPE 颗粒, 发现其中脂肪族烃含量最突出, 占比 64.7%, 其次为醇类、芳香烃和来自聚乙烯瓶的羟基三甲基硅烷、六甲基环三硅氧烷和八甲基环四硅氧烷。同样, rHDPE 颗粒中脂肪烃占比最高 (31.0%), 其次为芳烃和烯烃 (16.7%)。然而 rHDPE 薄片的组成与前者不同, 其中含有酮类物质, 并且烯烃比例最高为 35.7%, 脂肪烃、芳烃、醇类等成分也显著存在。总体而言, rHDPE 薄片的萘烯、芳烃和酯类的综合百分比为 48.5%, rHDPE 颗粒则为 40.5%。VERA 等<sup>[23]</sup>在食品包装的多层塑料中检测到 16 种气味活性化合物, 包括聚醋酸乙烯酯和丙烯酸黏合剂等材料。这些化合物会产

生如水果味、泥土味和樟脑味等不同的异味, 从而证实塑料垃圾异味问题的复杂性和多样性。

### 1.1.3 建筑垃圾的恶臭释放特征

建筑垃圾的成分较为复杂, 主要包括石膏板、混凝土和金属等惰性成分, 以及木材、墙纸和油漆等有机成分。有机组分在厌氧环境下会进行生物降解, 产生各种具有气味的物质, 含硫化物是重要的源头, 这些化合物包括无机硫化物和有机硫化物。例如, H<sub>2</sub>S 等无机硫化物是通过硫酸盐还原和含硫有机物的分解形成<sup>[24]</sup>, 如二甲基二硫化物和二甲基硫化物。有机硫化物的排放率与残留有机物的比例密切相关, 较高的有机物含量会导致这些化合物的排放率增加。NH<sub>3</sub> 也是异味排放的来源之一, 会与 H<sub>2</sub>S 等其他气味化合物协同作用, 引发眼睛和呼吸道的刺激。含氧化合物如醇和酮<sup>[25]</sup>也会在填埋场产生难闻的气味, 其排放量随有机成分的引入而增加。这些元素的存在凸显了管理垃圾填埋场中有机物含量的重要性, 对减轻气味污染至关重要。H<sub>2</sub>S 的产生不仅源于有机硫成分, 还源自垃圾中其他含硫有机物的分解代谢过程<sup>[26]</sup>, 以及硫酸盐还原菌 (SRB) 对无机硫酸

盐或亚硫酸盐进行异化还原的过程<sup>[27]</sup>。

## 1.2 混合垃圾的恶臭释放特征

### 1.2.1 易腐垃圾与塑料垃圾混合

混合填埋场中易腐垃圾和塑料垃圾的气味问题更复杂。在厌氧环境下,浓缩污泥与其他有机废物混合填埋会分解并释放异味气体,主要成分包括甲烷和二氧化碳,还会产生醇类、烃类、卤代化合物和二硫化碳等复杂成分的 VOCs。尽管这些 VOCs 在总体排放量中的体积分数通常低于 1%,但仍会引发恶臭<sup>[28-29]</sup>。由塑料垃圾与餐厨垃圾混合形成微塑料(MPs)等新型污染物,会导致严重的气味问题。主要由含硫化合物如H<sub>2</sub>S、甲硫醇(MM)和二甲基硫醚(DMS)释放引起<sup>[30]</sup>。这些化合物由微生物降解有机废物时释放,是造成周边难闻气味、影响空气质量的主要因素。

### 1.2.2 易腐垃圾与建筑垃圾混合

建筑垃圾主要通过促进易腐垃圾的降解而增加恶臭异味气体的释放。当这些建筑垃圾被填埋时,SRB 利用石膏中的硫酸盐作为电子供体,生成 H<sub>2</sub>S。直接将含有石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)成分的建筑垃圾进行填埋,是产生 H<sub>2</sub>S 异味污染的重要原因<sup>[31]</sup>。有机物的存在影响了 pH、SRB 的活性和

H<sub>2</sub>S 的挥发。混凝土等材料中的碱性物质(pH 为 9.0~11.2)会抑制 SRB 活性和 H<sub>2</sub>S 挥发<sup>[32]</sup>,表明废物成分与 pH 之间存在复杂的相互作用,受有机物含量和废物特性的影响。数据表明,混合填埋区的恶臭浓度(2.487 μg/m<sup>3</sup>)明显高于生活垃圾填埋区(0.512 μg/m<sup>3</sup>)和建筑垃圾填埋区(0.246 μg/m<sup>3</sup>)<sup>[33]</sup>。当易腐垃圾与建筑垃圾混合填埋时,产生的异味更加显著。这种混合填埋所产生的异味中,含硫化合物是主要的恶臭组分,同时还伴随着其他含氧化合物和芳香烃等污染物质,使得其恶臭程度远高于单一生活垃圾或建筑垃圾填埋所产生的异味。同时,恶臭组分之间还存在复杂的相互作用效应,如添加剂效应、拮抗效应和协同效应等,这使得混合填埋区的异味问题更加复杂。

## 2 填埋场恶臭异味识别

在填埋场中如垃圾成分、填埋工艺、填埋时间、气象条件等因素,均会影响恶臭气体的组分和浓度,且多数恶臭物质的嗅阈值较低<sup>[34]</sup>。识别与分析垃圾填埋场的恶臭污染是关键且繁琐的工作,一般分为感官分析和仪器分析两大类,见表 2。

表 2 各类恶臭气体分析方法的比较

Table 2 Comparison of methods for analyzing various types of odorous gases

分类	识别方法	原理	优点	缺点
仪器分析	GCMS	采用色谱柱及物质检测仪对恶臭气体的组分进行定性和定量分析	实现精准防控,方便理解异味气体的产生机理	使用费用高,耗时长,不能直接将浓度与臭气强度直接挂钩
	电子鼻	运用化学传感器阵列检测和分析气味样品,通过模式识别算法定性和定量分析	实现现场监测和在线实时监测,操作简便且携带方便	传感器疲劳后检测准确性降低,同时检测精度也易受环境条件的影响。此外,该方法无法检测气体成分,更不能识别未知气体
感官分析	三点式臭袋比较法	使用洁净气体将恶臭样品稀释至刚好无臭时的稀释倍数,随后由嗅辨员进行鉴别,所得稀释倍数即为臭气浓度。	操作简单,使用范围广泛	测定存在一定的主观性,因此误差较大,且该方法无法实现在线监测
	动态嗅觉仪	由嗅辨员区分气味强度和特性	反映直观且实施简便	误差大,主观性强

### 2.1 电子鼻

电子鼻(Enose)是一种仿效人类嗅觉感知系统的装置,运用化学传感器阵列检测和分析气味样品中的 VOCs 及其他气体成分。基于化学传感器的电子鼻具有成本低、便携、功耗低等优点,已应用于环境<sup>[35]</sup>、食品<sup>[36]</sup>、农业<sup>[37]</sup>等多个领域。OLENEVA 等<sup>[38]</sup>发现电子鼻在识别塑料玩具气味

毒性方面的准确率达到 96%。CANGIALOSI 等<sup>[39]</sup>在研究中对比多感官电子鼻和 H<sub>2</sub>S 连续分析仪,证明电子鼻技术在垃圾填埋场气味监测方面的优势。气体传感器的响应信号依赖于目标气体分子与所使用的传感材料之间的化学相互作用。具有强氧化性或还原性的无机气体(如 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>和 NH<sub>3</sub>)会表现出明显的响应特征,有利于通过电子

鼻进行后续的识别。然而由于有机分子(如 VOCs)化学性质相似,通常表现出相似的响应信号,因此需要使用合适的识别算法提取有用信息<sup>[40]</sup>。

## 2.2 电子鼻与经典识别算法结合

经典识别算法包括决策树(DT)、支持向量机(SVM)、K最近邻(KNN)等。

DT通常用于解决分类和回归问题,SCHROEDER等<sup>[41]</sup>提出了一种气体识别决策树,用于区分奶酪、葡萄酒和食用油,其识别准确率达到91.0%。SVM是监督学习算法,用于查找数据特征空间中的最大区间。QIU等<sup>[42]</sup>结合电子鼻和SVM分类器实现了食品添加剂的气体识别。KNN也属于监督学习算法,广泛用于分类和回归的非参数统计方法。MIRZAE GHALEH等<sup>[43]</sup>使用电子鼻耦合模糊K最近邻(F-KNN)算法,以95.8%的准确率成功识别新鲜冷藏和解冻的鸡肉。

## 2.3 电子鼻与人工神经网络结合

人工神经网络(ANN)代表了模式识别技术的重要进展,可以将其与电子鼻整合,从而提升气味感知的能力。在电子鼻应用中,第一步是从传感器阵列的原始瞬态电阻/电压系列中获取数据集。高质量的数据集有助于模型训练和气体识别的准确性<sup>[44]</sup>。在MICONE和GUY的研究中<sup>[45]</sup>,研究多层神经网络(MLP)(最佳结构:16-19-14-1)和径向基函数神经网络(RNFNN)(最佳结构:16-19-45-1)之间的比较。研究共测试155组数据(75%用于训练,25%用于验证),目标输出为1~200  $\text{OU}_E/\text{m}^3$ 之间的气味浓度范围。通过评估输入层和隐藏层中不同数量的神经元以及两种结构(即MLP和RBFNN)的不同训练算法,提出了寻找最佳ANN的不同途径,并为ANN更准确地异味识别提供可能性。HEREDIA等<sup>[46]</sup>也曾通过ANN模型成功分类10个不同种类的气味,准确率介于77.68%和99.95%之间。极限学习机(ELM)是一种基于前馈神经网络的机器学习方法。FALEH<sup>[47]</sup>在金属氧化物半导体(MOS)传感器阵列上应用ELM进行气体(臭氧、乙醇和丙酮)识别,实现了90.00%的分类准确率。将ELM的高效特性与MOS传感器阵列的交叉灵敏度结合,提高电子鼻系统识别精度,其性能也优于传统分类或回归方法。

MLP的优点在于能有效地对数据中的非线性关系进行建模,同时消除对数据预处理的需求。

基于ANN的模式识别算法能够对电子鼻特征进行更高维度的处理,但由于其独立处理每个元素,因此无法捕捉时间序列中连续性信息<sup>[48]</sup>。

## 3 填埋场的恶臭异味控制

异味控制涉及多个关键步骤。首先是源头控制,包括两个方面:一方面通过清洁生产、源头替代和工艺改进等措施,减少恶臭物质的使用和产生,降低异味风险;另一方面合理规划恶臭源的位置,确保在源头与受体之间设置足够的防护距离,有效隔离异味的扩散。其次在过程减排中,通过合理配置生产工艺设备和集气通风设备,减少恶臭物质的挥发量,并采用经济高效的方法控制其散发,以确保生产过程中异味的最小化。最后通过末端治理,对收集的气体进行除臭处理后再排放,确保异味控制效果。

### 3.1 源头恶臭的隔离覆膜削减

覆膜法是通过覆盖天然或人工合成材料来阻止恶臭气体扩散,从而有效减少垃圾填埋场臭味散发的治理方法。吴传东等<sup>[49]</sup>的研究显示,在北京某生活垃圾填埋场,使用覆膜的作业面在夏、秋、冬季明显减少了气体污染物总化学含量(12.4%、30.7%、43.6%)和臭气含量(61.8%、62.1%、78.6%)。在一项研究中<sup>[50]</sup>评估4种垃圾填埋场覆盖材料(木炭污泥堆肥(CSC)、最终覆盖土(FCS)、老化垃圾(AR)和黏土(CS))的隔离效果。CSC作为替代覆盖材料控制最有效,在实验室条件下,它能将 $\text{H}_2\text{S}$ 浓度降低约88.0%,在现场应用中可达到82.0%。相比之下,其他3种覆盖材料在控制气味方面的表现并不稳定,其中CS的差异最为显著,其效果仅为22.0%。DING等<sup>[51]</sup>实验发现,使用含生物炭的剩余污泥堆肥作填埋场覆盖材料,能高效处理 $\text{NH}_3$ 和含硫VOCs,削减量高达80.0%以上。随着材料技术的发展,介孔吸附剂显著降低了复合材料中挥发性有机化合物的总排放量,并对聚丙烯(PP)、低密度聚乙烯(LDPE)、线性低密度聚乙烯(LLDPE)聚合物展现出最佳的除臭效果,分别达到了69.6%、81.3%和91.1%<sup>[52]</sup>。

### 3.2 恶臭的集中收集与燃烧处置

燃烧法是通过高温焚烧技术处理恶臭气体,使有机废气在高温环境中发生氧化反应,将废气中的有害物质转化为无害物质,从而达到净化废气的目的。燃烧法分为直接燃烧、催化燃烧和蓄

热燃烧(RTO),见表3。催化燃烧法是一种高效的异味气体处理方法,适用于处理浓度较高、有机成分含量较多的异味气体,且二次污染问题可控。CeMOF 催化剂表现出优异的催化燃烧活性,实现低温高效去除 VOCs 中的甲苯——185 °C 时去除率为 10.0%, 198 °C 时为 50.0%, 206 °C 时为 90.0%<sup>[53]</sup>。RTO 技术常被用于工业源 VOCs 气体的处理和净化,其原理是将臭气升温至 850 °C 以

上,保持1 s的停留时间,其中的有机可燃组分被氧化分解为 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>O。上海老港综合填埋场已建成处理量高达 3 000 m<sup>3</sup>/h 的设施,该工程专门用于处理作业面表层覆膜后所收集的恶臭气体,其净化效果通常可以达到 90.0%<sup>[54]</sup>。总体上,燃烧法的异味去除率可达 85.0%~100.0%,是一种高效且可靠的异味处理方法<sup>[55]</sup>。

表 3 燃烧法处理技术对比

Table 3 Comparison of treatment technologies by combustion

方法	恶臭去除效率	优点	缺点
直接燃烧法	最高可达 95.0%	工艺简单,易于实施	运行成本较高,不能回收热力资源,能源浪费
催化燃烧法	最高可达 98.0%	适用于高浓度有机异味气体,转化效率高	需要使用催化剂,增加成本
RTO 技术	最高可达 99.0%	节省燃料消耗,降低运行成本,提高能源利用效率,适用于处理大流量的低浓度 VOCs 废气	初始投资较高,需要专业的操作和维护,技术要求较高

### 3.3 逸散性恶臭的生物氧化

生物处理技术因其低成本、性能稳定、处理能力较强等特点,已成为处理异味的主要方法之一。生物滤池对垃圾填埋异味气体的去除效率可达 99.84%,特别对脂肪族化合物和含氮化合物去除可达 100%<sup>[56]</sup>,而对于甲苯或丁酮等有机污染物的去除效率报道为 82.0%~99.9%<sup>[57]</sup>和 98.9%~99.5%<sup>[58]</sup>,对氨去除率也可达到 94.0%~99.0%<sup>[59]</sup>。生物除臭效果依赖于滤池中生物的多样性以及生物活性。生物洗涤法压降小、操作易控制,对易溶于水的气体有较好的去除效果。NISHIMURA 等<sup>[60]</sup>使用生物洗涤技术,有效去除厌氧沼气中的 H<sub>2</sub>S,将浓度从 3 043 mg/m<sup>3</sup>降至 30 mg/m<sup>3</sup>以下。生物滴滤法设备精简,填料不易堵塞,且污染物去除效率高。上海市某化工园区污水处理厂<sup>[61]</sup>利用生物滴滤与化学洗涤技术治理臭气与有机废气。运行期监测数据表明,生物滴滤塔臭气净化率大于 80.0%,VOCs 净化率大于 60.0%。

## 4 结论与展望

填埋场异味气体的来源、成分和强度因地理位置、垃圾成分、气候条件及管理方式的不同而产生差异,需开发更灵活、适应性强的异味控制技术,以满足不同填埋场的具体需求。

(1) 填埋场异味来源主要包括垃圾腐败、生化反应和挥发性有机化合物直接释放等过程。易腐垃圾由于其富含高有机成分和高含水量,以及释

放的多种 VOCs,其恶臭释放特征较为显著。在后续研究中深入探讨混合填埋产生异味气体的排放和扩散规律。针对异味气体的排放特点,需要发展良好的在线监测设施以实现恶臭的实时反馈,为管理者提供及时、准确的数据支持。

(2) 为了全面解决恶臭问题,需要从源头减量、过程控制、末端治理以及排放管理四个方面进行综合考虑,构建一条完整的填埋场恶臭控制技术路线。在末端治理环节进行严格的监测和评估,确保各项指标均达到排放标准。对于不达标的异味气体,采用进一步的治理措施,如深度处理、稳定化处理等,以降低其环境风险。

(3) 电子鼻结合 ANN 在填埋场异味监测与管理中的应用仍有发展空间。针对 MLP,需优化网络参数和引入正则化技术以提高模型的泛化能力。在自监督学习中,通过设计预训练任务,模型利用数据内在规律学习特征表示,无须人工标注,为异味识别提供强大基础,在小型数据集上实现良好性能。扩大数据集并且增加气味样本的多样性,将有助于模型更好地泛化到不同的环境条件中。实现电子鼻与其他传感器的数据融合,能够提升系统的鲁棒性和适应性,并且有助于电子鼻更好应对环境干扰,提高在复杂环境下的检测稳定性。

### 参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2023[M]. 北

- 京: 中国统计出版社, 2023.
- [2] CAI Bofeng, LOU Ziyang, WANG Jinnan, et al. CH<sub>4</sub> mitigation potentials from China landfills and related environmental co-benefits[J]. *Science Advances*, 2018, 4(7): eaar8400.
  - [3] 生态环境部. 2021年12369环保热线举报案件处理情况[EB/OL]. (2021-07-26). [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/sthjbs/202108/t20210802\\_853623.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/sthjbs/202108/t20210802_853623.html).
  - [4] XIAO D K, CHEN Y M, XU W J, et al. Biochemical-thermal-hydro-mechanical coupling model for aerobic degradation of landfilled municipal solid waste[J]. *Waste Management*, 2022, 144: 144-152.
  - [5] KUMAR G, KOPP K B, REDDY K R, et al. Influence of waste temperatures on long-term landfill performance: Coupled numerical modeling[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2021, 147(3): 04020158.
  - [6] KUMAR G, REDDY K R. Comprehensive coupled thermo-hydro-bio-mechanical model for holistic performance assessment of municipal solid waste landfills[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 132: 103920.
  - [7] CHIRIAC R, CARRE J, PERRODIN Y, et al. Characterisation of VOCs emitted by open cells receiving municipal solid waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149(2): 249-263.
  - [8] JASSO GASTINEL C F, SOLTERO MARTÍNEZ J F A, MENDIZÁBAL E. Introduction[M]//Modification of Polymer Properties. Amsterdam: Elsevier, 2017: 1-21.
  - [9] 李元元. 垃圾卫生填埋场臭气排放规律及现场除臭效果和方案研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 12-13.  
LI Yuanyuan. Study on the emission rules of landfill malodorous gases and program planning for efficient deodorization[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 12-13.
  - [10] 纪华. 垃圾填埋场恶臭气体产气机制及其动态变化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 39-41.  
JI Hua. Malodor producing mechanism and the study on its dynamic changes in landfill[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004: 39-41.
  - [11] 陈倩倩, 杨栋, 黄颖, 等. 宁波市不同区分类垃圾组成与理化特性研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(3): 1064-1070.  
CHEN Qianqian, YANG Dong, HUANG Ying, et al. Composition and physicochemical properties of classified municipal solid waste in different districts of Ningbo City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(3): 1064-1070.
  - [12] CANOPOLI L, FIDALGO B, COULON F, et al. Physico-chemical properties of excavated plastic from landfill mining and current recycling routes[J]. *Waste Management*, 2018, 76: 55-67.
  - [13] DING Ying, CAI Chuanyu, HU Bin, et al. Characterization and control of odorous gases at a landfill site: A case study in Hangzhou, China[J]. *Waste Management*, 2012, 32(2): 317-326.
  - [14] WU Chuandong, LIU Jiemin, ZHAO Peng, et al. Evaluation of the chemical composition and correlation between the calculated and measured odour concentration of odorous gases from a landfill in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 164: 337-347.
  - [15] ZHANG Yuna, LIANG Zhishu, TANG Changcheng, et al. Malodorous gases production from food wastes decomposition by indigenous microorganisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137175.
  - [16] RANDAZZO A, ZORZI F, VENTURI S, et al. Degradation of biogas in a simulated landfill cover soil at laboratory scale: Compositional changes of main components and volatile organic compounds[J]. *Waste Management*, 2023, 157: 229-241.
  - [17] LIAO Hanpeng, LIU Chen, AI Chaofan, et al. Mesophilic and thermophilic viruses are associated with nutrient cycling during hyperthermophilic composting[J]. *The ISME Journal*, 2023, 17(6): 916-930.
  - [18] 张伟军, 戴巧芸, 杨晓芳, 等. 污水处理厂污泥处理处置过程中的恶臭污染特征与恶臭物质减排控制措施[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(2): 351-367.  
ZHANG Weijun, DAI Qiaoyun, YANG Xiaofang, et al. Odor characteristics of wastewater treatment plant sludge during treatment and disposal and emission reduction control measures: A short review[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(2): 351-367.
  - [19] LOU Ziyang, WANG Mingchao, ZHAO Youcai, et al. The contribution of biowaste disposal to odor emission from landfills[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 2015, 65(4): 479-484.
  - [20] OLIVERO VERBEL J, PAJARO CASTRO N, CABALLERO GALLARDO K. Identification of volatile organic compounds (VOCs) in plastic products using gas chromatography and mass spectrometry (GC/MS)[J]. *Revista Ambiente & Água*, 2014, 9(4): 610-620.
  - [21] FULLER J, WHITE D, YI Huijun, et al. Analysis of volatile compounds causing undesirable odors in a polypropylene-high-density polyethylene recycled plastic resin with solid-phase microextraction[J]. *Chemosphere*, 2020, 260: 127589.
  - [22] ZENG Shaofu, ZENG Yan, GUO Pan, et al. Characterization of odors and volatile organic compounds changes to recycled high-density polyethylene through mechanical recycling[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 208: 110263.
  - [23] VERA P, CANELLAS E, NERÍN C. Migration of odorous compounds from adhesives used in market samples of food packaging materials by chromatography olfactometry and mass spectrometry (GC-O-MS)[J]. *Food Chemistry*, 2014, 145: 237-244.
  - [24] EUN S, REINHART D R, COOPER C D, et al. Hydrogen sulfide flux measurements from construction and demolition debris (C&D) landfills[J]. *Waste Management*, 2007, 27(2): 220-227.
  - [25] LÓPEZ A, LOBO A. Emissions of C&D refuse in landfills: A European case[J]. *Waste Management*, 2014, 34(8): 1446-1454.

- [26] KO J H, XU Qiyong, JANG Y C. Emissions and control of hydrogen sulfide at landfills: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 45(19): 2043–2083.
- [27] PLAZA C, XU Qiyong, TOWNSEND T, et al. Evaluation of alternative landfill cover soils for attenuating hydrogen sulfide from construction and demolition (C&D) debris landfills[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 84(3): 314–322.
- [28] CONTI C, GUARINO M, BACENETTI J. Measurements techniques and models to assess odor annoyance: A review[J]. *Environment International*, 2020, 134: 105261.
- [29] DUAN Zhenhan, SCHEUTZ C, KJELDSEN P. Trace gas emissions from municipal solid waste landfills: A review[J]. *Waste Management*, 2021, 119: 39–62.
- [30] XIE Wei, ZHU Tao, JIN Xinrui, et al. Degradation of mixed typical odour gases *via* non-thermal plasma catalysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 440: 129751.
- [31] MONTERO A, TOJO Y, MATSUO T, et al. Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 175(1–3): 747–753.
- [32] YANG K, XU Qiyong, TOWNSEND T G, et al. Hydrogen sulfide generation in simulated construction and demolition debris landfills: Impact of waste composition[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 2006, 56(8): 1130–1138.
- [33] NANDA S, BERRUTI F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: A review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(2): 1433–1456.
- [34] FANG Jingjing, YANG Na, CEN Danyan, et al. Odor compounds from different sources of landfill: Characterization and source identification[J]. *Waste Management*, 2012, 32(7): 1401–1410.
- [35] DENG Xuan, MENG Qinghao, JING Tao, et al. A portable E-nose endowed with subjective evaluation function of air quality in vehicles[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 2507911.
- [36] WIJAYA D R, SARNO R, ZULAIKA E. DWTLSTM for electronic nose signal processing in beef quality monitoring[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 326: 128931.
- [37] AMKOR A, MAAIDER K, EL BARBRI N. Mint treatment day prediction using a multi-sensors system and machine learning algorithms[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 328: 112787.
- [38] OLENEVA E, KUCHMENKO T, DROZDOVA E, et al. Identification of plastic toys contaminated with volatile organic compounds using QCM gas sensor array [J]. *Talanta*, 2020, 211: 120701.
- [39] CANGIALOSI F, INTINI G, COLUCCI D. On line monitoring of odour nuisance at a sanitary landfill for non-hazardous waste [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2018, 68: 127–132.
- [40] YANG Xingan, LI Meng, JI Xiaohua, et al. Recognition algorithms in E-nose: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(18): 20460–20472.
- [41] SCHROEDER V, EVANS E D, WU Y C M, et al. Chemiresistive sensor array and machine learning classification of food [J]. *ACS Sensors*, 2019, 4(8): 2101–2108.
- [42] QIU Shanshan, WANG Jun. The prediction of food additives in the fruit juice based on electronic nose with chemometrics[J]. *Food Chemistry*, 2017, 230: 208–214.
- [43] MIRZAEI GHALEH E, TAHERI GARAVAND A, AYARI F, et al. Identification of fresh-chilled and frozen-thawed chicken meat and estimation of their shelf life using an E-nose machine coupled fuzzy KNN[J]. *Food Analytical Methods*, 2020, 13(3): 678–689.
- [44] MICONE P G, GUY C. Odour quantification by a sensor array: An application to landfill gas odours from two different municipal waste treatment works[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 120(2): 628–637.
- [45] HEREDIA A P D, CRUZ F R, BALBIN J R, et al. Olfactory classification using electronic nose system *via* artificial neural network[C]//2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). *IEEE*, 2016: 3569–3574.
- [46] FALEH R, GOMRI S, AGUIR K, et al. A new combined transient extraction method coupled with WO<sub>3</sub> gas sensors for polluting gases classification[J]. *Sensor Review*, 2021, 41(5): 437–448.
- [47] ISMAIL FAWAZ H, FORESTIER G, WEBER J, et al. Deep learning for time series classification: A review [J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2019, 33(4): 917–963.
- [48] 吴传东, 刘杰民, 周鹏, 等. 垃圾填埋场覆膜与暴露作业区异味污染特征[J]. *环境化学*, 2015, 34(10): 1955–1957.
- [49] DING Ying, CAI Chuanyu, XIONG Junsheng, et al. Evaluation of alternative cover materials for reducing hydrogen sulfide emission from municipal solid waste (MSW) landfills [J]. *Transactions of the ASABE*, 2016, 59(4): 949–957.
- [50] DING Ying, XIONG Junsheng, ZHOU Bowei, et al. Odor removal by and microbial community in the enhanced landfill cover materials containing biochar-added sludge compost under different operating parameters[J]. *Waste Management*, 2019, 87: 679–690.
- [51] ZHANG Jiupeng, ZUO Jing, LIU Yang, et al. Universality of mesoporous coal gasification slag for reinforcement and deodorization in four common polymers[J]. *Nanotechnology*, 2022, 33(9): 095703.
- [52] LI Zhengjie, MA Chen, QI Miao, et al. CeO<sub>2</sub> from pyrolysis of MOFs for efficient catalytic combustion of VOCs[J]. *Molecular Catalysis*, 2023, 535: 112857.
- [53] 施庆燕, 李夏, 余毅, 等. 填埋作业面臭气收集处理系统设计[J]. *环境卫生工程*, 2016, 24(2): 59–60+63.
- SHI Qingyan, LI Xia, YU Yi, et al. Collection and treatment system design of malodorous gas from landfill operation surface

- [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2016, 24(2): 59–60+63.
- [54] LIN Chiwen, TSAI S L, LAI C Y, et al. Biodegradation kinetics and microbial dynamics of toluene removal in a two-stage cell–biochar–filled biotrickling filter[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117940.
- [55] PECORINI I, ROSSI E, IANNELLI R. Mitigation of methane, NMVOCs and odor emissions in active and passive biofiltration systems at municipal solid waste landfills[J]. *Sustainability*, 2020, 12(8): 3203.
- [56] ZHANG X L, YAN S, TYAGI R D, et al. Odor control in lagoons[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 124: 62–71.
- [57] LEBRERO R, RANGEL M G L, MUÑOZ R. Characterization and biofiltration of a real odorous emission from wastewater treatment plant sludge[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 116: 50–57.
- [58] HORT C, GRACY S, PLATEL V, et al. Evaluation of sewage sludge and yard waste compost as a biofilter media for the removal of ammonia and volatile organic sulfur compounds (VOSCs)[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 152(1): 44–53.
- [59] LEWKOWSKA P, CIEŚLIK B, DYMERSKI T, et al. Characteristics of odors emitted from municipal wastewater treatment plant and methods for their identification and deodorization techniques[J]. *Environmental Research*, 2016, 151: 573–586.
- [60] NISHIMURA S, YODA M. Removal of hydrogen sulfide from an anaerobic biogas using a bio-scrubber[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(6–7): 349–356.
- [61] 李水林. 生物滴滤与化学洗涤工艺在工业污水厂臭气治理中的应用[J]. *四川化工*, 2020, 23(1): 50–53.  
LI Shuilin. Application of biological drop filtration and chemical washing process in odour treatment of industrial sewage plant[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2020, 23(1): 50–53.