

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2022.04.004

生活垃圾填埋场恶臭污染的测定与控制技术研究进展

周正伟¹, 张椰鸣¹, 夏金雨², 姚凤根², 朱水元²

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 苏州市环境卫生管理处, 江苏 苏州 215007)

摘要: 针对生活垃圾填埋场的恶臭气体污染问题, 介绍了恶臭气体测定与控制技术的研究进展, 指出了暴露的作业面是填埋场恶臭气体最主要的来源, 比较了感官分析法和仪器分析法在测定恶臭污染方面的原理、优点和不足。还综述了覆盖法、喷药除臭法和燃烧净化法等恶臭污染控制技术的原理和应用, 并针对中国目前在恶臭污染控制方面的不足提出了建议。

关键词: 生活垃圾填埋场; 恶臭污染; 来源; 测定; 控制技术

中图分类号: X 51

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2022)04-0026-09

Detection and Control Technologies of Odor Pollution in Municipal Solid Waste (MSW) Landfills

ZHOU Zhengwei¹, ZHANG Yeming¹, XIA Jinyu², YAO Fenggen², ZHU Shuiyuan²

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;
2. Suzhou Environmental Sanitation Administration Agency, Suzhou 215007, China)

Abstract: In the light of odor pollution in municipal solid waste (MSW) landfills, this paper reviews the research progress of analytical methods and control technologies of odorous gas. It was pointed out that the open operation areas were the major source of odorous gas in landfills. Besides, the olfactory method and instrumental method in the analysis of odor pollution were compared in terms of their principles, advantages and disadvantages. In addition, the principles and applications of several odor pollution control technologies, including the covering method, the spraying of anti-odor liquid and the combustion method, were also presented. Above all, recommendations were suggested in according to the limitations of current situation in the odor pollution control in China.

Key words: municipal solid waste (MSW) landfill; odor pollution; source; detection; control technologies

近年来, 恶臭异味污染已经成为中国环境投诉的一个焦点问题, 根据数据统计, 2018 年恶臭投

收稿日期: 2022-02-22。

基金项目: 苏州市 2019 年度科技发展计划(民生科技)资助项目(SS2019008)。

作者简介: 周正伟(1985—), 男, 江苏扬中人, 博士, 副教授。E-mail: zwzhou@cczu.edu.cn

引用本文: 周正伟, 张椰鸣, 夏金雨, 等. 生活垃圾填埋场恶臭污染的测定与控制技术研究进展[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2022, 34(4): 26-34.

诉占到所有环境投诉的 23%，成为仅次于噪声污染的第二大投诉源^[1]。作为大气中恶臭气体的重要来源之一，长久以来，生活垃圾填埋场产生的恶臭气体污染严重影响了周边的大气环境质量，以及填埋场工作人员与周边居民的身心健康^[2-4]，成为激化“邻避效应”的主要原因之一。根据中国住房和城乡建设部发布的《2018 年城市建设统计年鉴》显示，2018 年中国存在无害化处理厂（场）1 091 座，其中卫生填埋场 1 091 座；无害化处理能力 766 195 t/d，其中卫生填埋 373 498 t/d；无害化处理量为 22 565.36 万 t，其中卫生填埋 11 706.02 万 t^[5]。可见，虽然近些年来占比有所下降，但填埋仍是中国生活垃圾无害化处理的主要手段。因此，针对生活垃圾填埋场恶臭污染测定和控制技术的研究已成为中国环境保护的一项重要内容。

1 生活垃圾填埋场恶臭污染源

生活垃圾在微生物好氧及厌氧分解过程中会产生大量填埋气体，至少可持续产气 10~40 a^[6]。填埋气体主要包括 CH₄（体积分数 55%~60%）、CO₂（体积分数 40%~45%）和微量气体（体积分数 0~2%）^[7-9]。这些微量气体虽然占比较小，但多含有硫基（—S）、巯基（—SH）、羟基（—OH）、醛基（—CHO）、羰基（—CO）、羧基（—COOH）、酯基（—COOR）等发臭基团^[10]，属于恶臭物质。中国生活垃圾中厨余果皮等有机成分较高，这部分垃圾对恶臭污染的贡献较大^[11]。垃圾的填埋作业，包括垃圾的收集、中转、运输、倾卸、堆填和压实等过程，均会有恶臭气体产生^[12-14]。其中，暴露的作业面和露天的渗滤液收集和处理设施是填埋场恶臭气体的主要来源^[15-17]。垃圾填埋场恶臭气体的影响范围通常较广，CAI 等^[18]针对中国 1 955 座垃圾填埋场的调查显示，填埋场产生的恶臭气体的平均影响半径是 796 m，影响范围达 8 374.76 km²，占中国国土面积的 0.09%。

2 生活垃圾填埋场恶臭污染分析与测定

垃圾填埋场恶臭气体产生过程复杂，种类繁多，一般可分为含氮化合物、含硫化合物、芳香烃、饱和与非饱和烃、卤代物、酸性烃等 6 大类^[19]。垃圾填埋场恶臭气体的组分和浓度受到垃圾成分、填埋工艺、填埋时间、地形、季节、气象条件等诸多因素的影响^[20-23]，且多数恶臭物质的嗅阈值较低^[24]。因此，对垃圾填埋场恶臭污染的分析与测定是一项重要且复杂的工作。总体上，恶臭污染的分析与测定技术可以分为感官分析法、仪器分析法以及仪器与感官分析相结合的方法等 3 大类（表 1）。

表 1 恶臭污染常用的分析和测定方法
Table 1 Commonly used analytical methods for odorous pollution

分析与测定方法		原理	优点	不足
感官分 析法	臭气强度法	由嗅辨员闻嗅后将恶臭气体进行分级	实施简便、反映直观	主观性强，误差大
	臭气浓度法	由嗅辨员进行鉴别，使用洁净气体将恶臭样品稀释至刚好无臭时的稀释倍数即为臭气浓度	使用范围宽、不需要复杂操作	测定存在一定的主观性，在检测嗅阈值较低的恶臭气体时误差较大，不能在线监测 ^[25]
仪器分 析法	GC, GC-MS 等	通过色谱柱及后续的物质检测仪对恶臭气体的组分进行定性和定量分析	有助于理解恶臭气体的产生机理，实现精准防控	分析费用较高，分析时间较长，恶臭物质的浓度无法与臭气强度直接挂钩 ^[26]
	电子鼻	内含一系列半导体气体传感器，经过识别训练后，基于模式识别算法进行计算和检测臭气浓度 ^[27]	操作简单，携带方便，可以实现现场监测和在线实时监测 ^[28]	无法检测气体成分；不能识别未知气体；检测精度易受环境条件影响；传感器疲劳后检测准确性降低 ^[29-30]
仪器-感 官结合分 析法	GC-MS/O	原理与 GC/MS 相同，区别在于气体经过 GC 分离有一半的气流由嗅辨员进行感官检测 ^[31]	对恶臭物质进行定性和定量的同时，可以提供恶臭气体的化学性质和感知气味之间的相关性 ^[32]	嗅辨员无法感知混合气体的协同效应 ^[33]

2.1 感官分析法

恶臭作为一种感官污染,通常以人的嗅觉感知作为判断标准,主要包括臭气的强度和浓度 2 个指标。臭气强度是指恶臭气体在未经稀释的情况下对人体嗅觉器官的刺激程度。目前,中国采用的 6 级臭气强度表示法将臭气强度分为 0~5 级,其中 0 级为无臭,臭味越强烈,数字越大^[34-35],但 0~5 级并不呈现线性关系^[36]。臭气强度测定法具有简便、直观、无需仪器等优点,但也存在着主观性强,不适用于高浓度恶臭气体的判定等缺点。

不同于臭气强度对恶臭污染简单的感官描述,臭气浓度是对恶臭气体污染的一种数量化的表示方法。臭气浓度测定方法主要有静态稀释法(三点比较式臭袋法)和动态稀释法(动态嗅觉仪测定法)2 种。中国主要采用静态稀释法,即依据《空气质量 恶臭的测定 三点比较式臭袋法》(GB/T 14675—1993)来进行臭气浓度的测定^[37]。动态稀释法在欧美国家应用较多,它与静态稀释法的主要区别在于其采用动态稀释仪对臭气样品进行连续稀释,因而在自动化程度和实验质量控制等方面具有一定的优越性^[38-39]。

臭气强度和臭气浓度等感官分析指标对恶臭气体的分析是一种表面化、综合化的描述,为了更好地研究恶臭气体的物质组成、浓度、分布以及扩散特征,近些年来仪器分析法被较多地应用于恶臭气体的测定和组分鉴别。

2.2 仪器分析法

仪器测定法包括采用气体传感器(即电子鼻)进行臭气浓度的监测,以及使用气相色谱仪(GC)和气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)等分析仪器测定恶臭气体的组分与浓度 2 类。电子鼻使用方便,可以实现臭气浓度的在线连续监测,监测不同区域内臭气浓度的时空变化^[40]。GC 和 GC-MS 则可以提供恶臭气体中化合物的组成与浓度相关方面的信息,在理解恶臭污染的机理以及采取针对性的防控措施等方面具有优势。尤其是近年来在气体采样、预处理、浓缩和检测等技术上的进步,使用 GC 和 GC-MS 在填埋场周边大气中检测出的化合物已多达上百种。表 2 比较了中国部分地区垃圾填埋场恶臭气体中化合物的组分和浓度,可见含硫化合物(如 H_2S)、含氮化合物(如 NH_3)和芳香烃类化合物(如 BETX,即苯、甲苯、乙基苯和二甲苯等)是填埋场恶臭气体中 3 类主要的恶臭物质,这也是中国填埋场恶臭气体控制的重点污染物。

但是,GC 和 GC/MS 测定技术无法提供人类的嗅觉感知信息,因此无法提供量化物质嗅觉刺激的线性相关性^[41]。其中一种改进方法是采用 GC-MS/O 技术,即在使用 GC-MS 测量加上嗅觉检测,原理与 GC/MS 相同,区别在于气体经过 GC 分离有一半的气流由嗅辨员进行感官检测,这种方法兼备 GC 的分离能力和人类嗅觉的高度敏感及辨别能力,能够更好地分析恶臭气体的污染程度。

表 2 中国部分地区生活垃圾填埋场恶臭气体的组分与浓度对比

Table 2 The comparison of contents and concentrations of odorous gases detected in some MSW landfills of China

地点	分析方法	化合物检出数量	典型化合物及质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	参考文献
北京	低温冷阱浓缩+GC-MS	145	H_2S (ND~39 100); 对二甲苯 (84~32 800); 乙苯 (34~18 500); 苯 (14~8 600); 甲苯 (59~6 250)	[42]
上海	低温冷阱浓缩+GC; 固相微萃取 (SPME)+GC	35	NH_3 (900~70 000); 乙酸 (469~2 250); 苯乙烯 (12.8~555); 对二甲苯 (4.2~279); 丙酮 (16.2~139)	[43]
杭州	SPME+GC-MS	68	NH_3 (520~4 020); H_2S (56.58~514.52); 二氯乙烯 (8.06~65.18); 甲苯 (1.92~60.04); 乙苯 (0.84~23.30)	[44]
广州	吸附-热脱附+GC-MS	60	甲基-异丁基苯 (0.1~1 667); 1, 2, 4-三甲苯 (0.1~614); 甲苯 (1.7~202); 苊烯 (0.1~162); α -蒎烯 (0.5~121)	[45-46]

3 垃圾填埋场恶臭污染控制技术

传统的恶臭污染控制技术主要包括吸收法、吸附法、生物除臭法、燃烧法等,不同的恶臭控制技术适用范围不同,治理效果也受到恶臭物质组分、浓度、排放参数等因素的影响。对生活垃圾源的恶臭污染控制而言,目前普遍认为应对垃圾从收运至末端处置的全流程进行控制,控制手段主要包括垃圾收集源头恶臭减量、垃圾中转和运输过程的恶臭控制、填埋场恶臭控制与处理3个方面^[47]。具体到垃圾填埋场的末端控制,需要加强填埋场日常运行的精细化管理,例如最小作业面控制、进场道路平整、场区环境清洁等,垃圾填埋场目前采用较多的恶臭控制技术包括覆盖法、喷药除臭法和燃烧净化法3大类。

3.1 覆盖法

覆盖法是在垃圾堆体上覆盖天然或人工合成材料以达到吸收、降解或阻隔恶臭气体的方法,通常包括日覆盖、中场覆盖和封场覆盖。黏土是一种使用最为广泛的天然覆盖材料。高密度聚乙烯(HDPE)膜除了作为封场的覆盖材料外,近些年来也常被用作填埋场最小作业面控制的覆盖材料,即在每日作业完毕时使用HDPE膜对作业面进行覆盖,以达到阻隔或减缓恶臭气体扩散的目的。吴传东等^[48]研究了北京某生活垃圾填埋场作业面覆膜的效果,结果表明,相比于裸露的作业区域,覆膜区在夏、秋和冬季的气体污染物总化学含量分别减少了12.4%,30.7%和43.6%,臭气含量同比分别下降了61.8%,62.1%和78.6%。不过,需要注意的是,填埋场作业面夜间覆膜后,会发生恶臭气体在膜下不断集聚,继而在次日作业启动时集中释放恶臭气体的现象^[49]。因此,在作业区域覆膜的同时,如果配合膜下穿孔管负压抽气并进行臭气处理,则可以更好地控制填埋场作业面的臭气释放。

近些年来,一些利用废物进行资源化的生物覆盖材料被较多地用作填埋场替代覆盖材料的研究,例如垃圾堆肥产物^[50]、矿化垃圾^[51-53]、蚯蚓粪^[54]、剩余活性污泥处理产物及与其他材料的混合物^[55-57]等。生物覆盖材料内部一般富含微生物菌群,对部分恶臭物质具有较好的降解效果^[58-60]。DING等^[61]比较了添加生物炭的剩余污泥堆肥产物、矿化垃圾和黏土作为覆盖材料对削减填埋场H₂S效果的实验和现场试验,结果显示添加木炭的剩余污泥堆肥产物效果最好,对H₂S的削减量分别达到88%(实验室)和82%(现场试验)。进一步试验表明,添加生物炭的剩余污泥堆肥产物作为填埋场覆盖材料时,对NH₃和含硫挥发性有机物同样具有较好处理效果,最高可以削减80%以上^[62]。

对生物覆盖材料中微生物菌种进行鉴别与测定对理解其削减恶臭气体组分的机理具有重要意义。LEE等^[63]模拟了生物覆盖材料(m (托勃莫来石型硅酸钙): m (黏土): m (蚯蚓粪)=2:1:1)在抑制甲烷、三甲胺和二甲基硫醚中微生物的组成,结果发现虽然覆盖层上层甲烷菌的组成基本没有变化,但是覆盖层的中下部分对三甲胺和二甲基硫醚有关的微生物含量增多。继而,LEE等^[64]采用一种生物覆盖材料(V (黏土): V (珍珠岩): V (蚯蚓粪): V (堆肥产物)=6:2:1:1)的中试装置,相比于常规填埋覆土,其对恶臭气体的削减量可达85%以上,相应的臭气强度也大幅降低。XIA等^[60]研究了填埋场H₂S去除与覆盖材料中微生物菌群的关系,结果发现,与普通覆土相比,生物覆土材料中硫代谢细菌(*Ochrobactrum*, *Paracoccus*, *Comamonas*, *Pseudomonas*和*Acinetobacter*)占主导,其对H₂S的去除率也较高。DING等^[62]的研究也发现*Alicyclobacillus*和*Tuberibacillus*与H₂S、芳香烃、有机硫化物、有机酸的去除呈正相关,而*Rhodanobacter*, *Gemmatimonas*, *Flavisolibacter*和*Sphingomonas*与NH₃去除的相关性较强。总体而言,关于生物覆盖材料中微生物菌种与恶臭物质削减之间联系的研究仍处于起步阶段,且选择的目标污染物仍集中于NH₃, H₂S和部分芳香烃等恶臭物质,对于其他恶臭物质特征降解菌群的分离与鉴别也有待研究。

3.2 喷药除臭法

通过喷洒除臭剂可以对垃圾填埋场的恶臭气体起到掩蔽、中和、吸收或降解的作用,从而削减或消除恶臭污染。除臭剂包括化学除臭剂、植物除臭剂、微生物除臭剂以及复合除臭剂等。其中,植物除臭剂是从天然植物中提取汁液,经微乳化后和水形成的一种无毒无污染试剂,对酸性、碱性和中性恶臭气体均起作用,是一种环境友好的除臭剂^[65]。植物提取液的原料来源广泛,除臭机理主要是提取液中的活性成分可以与恶臭物质发生加成反应、降解反应、氢键吸附或物理吸附反应^[66],从而实现恶臭污染的削减及去除。例如,茶叶提取液中的表儿茶素(EC)、没食子表倍儿茶素酸酯(EGCg)、表倍儿茶素(EGC)等活性成分^[67-68],对甲硫醇等含硫化合物就具有较好的去除效果。

喷药除臭法应用范围广,可以在垃圾的倾卸过程、道路两侧、填埋气导气管出口、作业面以及填埋场厂界等区域进行喷洒。除臭液喷洒的方式也多种多样,可以进行人工喷洒,或采用喷雾立杆,以及使用固定式或移动式的风炮车等工具进行喷洒。张彦敏等^[69]在深圳市下坪生活垃圾填埋场作业面进行试验,选用某微生物型除臭剂,采用长管车喷洒,喷洒后,周边监测点区域 H_2S 和 NH_3 含量分别降低 78.2%~92.9% 和 38.5%~58.3%,效果较好。上海市老港填埋场将除臭药剂通过输药管线输送到各个喷头,经专用喷嘴或雾化器喷洒成雾状,在场区边界形成一道“水幕”来截断臭气的传播与扩散^[70]。杭州天子岭垃圾填埋场对场区各工段、道路、污水处理区等采用智能化设备于工作时间内不间断喷洒除臭药剂,同时,在填埋区也设置大功率除臭风炮,场区的监测人员与嗅辨员会实时根据场区的实际恶臭污染情况调整药剂的用量,除臭效果较为显著^[71]。

总体而言,喷药除臭法使用方便、应用方式灵活、除臭效果较好,是一种垃圾异味气体的全流程控制技术。目前,对于除臭药剂除臭机理的研究仍集中于少数常见的恶臭物质,其与以苯系物为代表的挥发性有机物(VOCs),以及与多种恶臭物质的协同与拮抗作用等过程的机理仍有待研究。

3.3 燃烧净化法

燃烧净化法是将填埋场收集的恶臭气体通过燃烧氧化的方式,将有害物质气化燃烧或高温分解,转化为无害物质的方法,通常需要燃料油(气)进行辅助燃烧。燃烧法主要包括直接燃烧法、催化燃烧法和蓄热燃烧法(RTO),目前应用较多的主要是直接燃烧法。其中,作为一种敞开式直接燃烧法,火炬燃烧法工艺简单、净化效率高,但是存在运行成本高、不能回收热力资源以及二次污染的问题,已不被推荐为恶臭污染的治理技术。RTO 技术通常应用于工业源 VOCs 气体的治理,在控制垃圾填埋场恶臭气体方面仍处于初始阶段。RTO 技术除臭的原理是将臭气升温至 850 °C 以上,停留时间 1 s,其中的有机可燃组分被氧化分解为 CO_2 和 H_2O ,而氧化产生的热量用于预热系统中新进入的臭气,从而可以节省燃料消耗,降低运行成本。上海老港综合填埋场建设了处理量为 3 000 m^3/h 的 RTO 示范工程,用于处理作业面表层覆膜后收集的恶臭气体,净化效果一般可达 90%^[72]。

燃烧净化法净化效率高,恶臭物质可以被完全燃烧分解,主要适用于中高浓度有机恶臭气体的处理。但是,燃烧法净化设备投资大,一般需要添加助燃燃料,处理成本高,且容易形成二次污染。因此,垃圾填埋场恶臭气体控制的重点应集中在实行垃圾分类的基础上,优化填埋工艺,在源头减少恶臭物质的产生,并结合填埋场精细化管理,从而实现对垃圾填埋场恶臭污染的有效管控。

4 垃圾填埋场恶臭物质排放标准

作为世界上较早制定恶臭排放标准的国家,日本于 1966 年发布了以食盐水平衡法测定恶臭浓度为基础的《宫城公害防止条例》,而后在 1971 年颁布了《恶臭防止法》,规定了 5 种常见恶臭污染物的排放标准;1995 年,《三点比较式臭袋法》被正式写入《恶臭防止法》,恶臭物质监管对象也增加至 22 种。美国于 1971 年颁布了《清洁空气法》,之后全美各州陆续规定了各自的法律法规。在欧洲,

荷兰于1971年发布了《空气质量大纲》，该法是欧盟国家的第一个国家级臭气排放标准。德国于1980年制订出台了《联邦侵害防治法》和《有关空气质量的控制的技术指针》，对恶臭污染物质的排放浓度进行了限制。2003年4月，欧盟颁布EN 13725:2003标准，以替代以往欧盟各国的国家恶臭环境标准。目前，西方发达国家已经建立了包括国家和地方法规、测试方法、操作人员认证制度和质量控制标准的一套完整的恶臭控制体系。

中国目前涉及恶臭污染控制的法律法规主要是2018年修订的《中华人民共和国大气污染防治法》，以及1993年颁布的《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)和1996年颁布的《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)2项国家标准。其中，作为恶臭污染物监测和排放主要依据的《恶臭污染物排放标准》仅规定了氨、硫化氢、三甲胺、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫、二硫化碳和苯乙烯共8种恶臭物质的排放限值。随着人们对环境质量要求的不断提高，其已不能完全适应中国当前和今后生态环境保护的需要。2018年，生态环境部发布《恶臭污染物排放标准（征求意见稿）》，加严了恶臭污染物的排放限值和周界浓度限值，完善了污染物排放控制要求和监测要求，并强化了恶臭污染物排放单位的主体责任。随着恶臭污染物监测和控制技术的不断提高，并按照新修订的标准限值要求，生活垃圾填埋场运营和管理单位通过“源头削减、过程控制、末端治理”等措施，可以实现对填埋场恶臭气体排放的有效管理。

5 总 结

生活垃圾填埋场的恶臭污染会严重影响周边的大气环境质量，容易引发“邻避效应”。填埋场臭气污染状况受到诸如环境、地形、气候等多方面因素的影响，对其的监测与控制是一项综合性、系统性的工程。

1) 需要研究填埋场恶臭气体的排放和扩散规律，开发可靠性和精确度较高的现场监测体系，建立垃圾填埋场恶臭污染预警机制，并完善针对恶臭污染的应急处置方案，从而减少垃圾填埋场恶臭气体对周边大气环境的影响。

2) 在对垃圾填埋场实现精细化管理和恶臭污染末端治理的基础上，需要进一步将恶臭污染控制措施前移，注重在垃圾收运、中转和运输等环节的恶臭污染控制，从而实现生活垃圾恶臭控制的全流程管理。

3) 中国的《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)中仅对氨、甲硫醇等8种恶臭污染物进行了控制，而《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)中规定的部分恶臭物质的控制限值也不完全符合人们对恶臭物质的嗅觉感知，因此会出现恶臭物质的排放达标，但仍被附近居民投诉的现象。随着《恶臭污染物排放标准（征求意见稿）》的发布，结合恶臭污染监测能力的提升和生活垃圾全流程管理理念的执行，生活垃圾填埋场恶臭污染物的控制水平将得到稳步提升，并进一步减少对周边环境的影响。

参考文献:

- [1] 王雯,晏利扬. 恶臭投诉成第二大环境投诉源[N]. 中国环境报, 2019-11-07(7).
- [2] PALMIOTTO M, FATTORE E, PAIANO V, et al. Influence of a municipal solid waste landfill in the surrounding environment: toxicological risk and odor nuisance effects[J]. Environment International, 2014, 68: 16-24.
- [3] YU Y J, YU Z L, SUN P, et al. Effects of ambient air pollution from municipal solid waste landfill on children's non-specific immunity and respiratory health[J]. Environmental Pollution, 2018, 236: 382-390.
- [4] CHENG Z W, SUN Z T, ZHU S J, et al. The identification and health risk assessment of odor emissions from waste landfilling and composting[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 1038-1044.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2018年城市建设统计年鉴[EB/OL]. [2020-03-27]. <http://www.mohurd.gov.cn/>

gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/.

- [6] EL-FADEL M, FINDIKAKIS A N, LECKIE J O. Environmental impacts of solid waste landfilling[J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 50(1): 1-25.
- [7] MOSHER B W, CZEPIEL P M, HARRISS R C, et al. Methane emissions at nine landfill sites in the northeastern United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(12): 2088-2094.
- [8] SARAL A, DEMIR S, YILDIZ S. Assessment of odorous VOCs released from a main MSW landfill site in Istanbul-Turkey via a modelling approach[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(1): 338-345.
- [9] GALLEG0 E, PERALES J F, ROCA F J, et al. Surface emission determination of volatile organic compounds (VOC) from a closed industrial waste landfill using a self-designed static flux chamber[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470/471: 587-599.
- [10] 胡冠九, 高占敏, 张涛, 等. 环境空气中异味物质的监测、评价与溯源[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(4): 10-19.
- [11] LOU Z Y, WANG M C, ZHAO Y C, et al. The contribution of biowaste disposal to odor emission from landfills [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2015, 65(4): 479-484.
- [12] TAN H B, ZHAO Y, LING Y, et al. Emission characteristics and variation of volatile odorous compounds in the initial decomposition stage of municipal solid waste[J]. *Waste Management*, 2017, 68: 677-687.
- [13] ZHAO Y, LU W J, WANG H T. Volatile trace compounds released from municipal solid waste at the transfer stage: evaluation of environmental impacts and odour pollution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 300: 695-701.
- [14] CHANG H M, TAN H B, ZHAO Y, et al. Statistical correlations on the emissions of volatile odorous compounds from the transfer stage of municipal solid waste[J]. *Waste Management*, 2019, 87: 701-708.
- [15] CHIRIAC R, CARRÉ J, PERRODIN Y, et al. Study of the dispersion of VOCs emitted by a municipal solid waste landfill[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(11): 1926-1931.
- [16] 刘杰云, 况福虹, 唐傲寒, 等. 不同排放源周边大气环境中 NH_3 浓度动态[J]. *生态学报*, 2013, 33(23): 7537-7544.
- [17] LIU Y J, LU W J, WANG H T, et al. Odor impact assessment of trace sulfur compounds from working faces of landfills in Beijing, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 220: 136-141.
- [18] CAI B F, WANG J N, LONG Y, et al. Evaluating the impact of odors from the 1955 landfills in China using a bottom-up approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 164: 206-214.
- [19] ALLEN M R, BRAITHWAITE A, HILLS C C. Trace organic compounds in landfill gas at seven U. K. waste disposal sites[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31(4): 1054-1061.
- [20] 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.
- [21] LU W J, DUAN Z H, LI D, et al. Characterization of odor emission on the working face of landfill and establishing of odorous compounds index[J]. *Waste Management*, 2015, 42: 74-81.
- [22] LIU Y J, LU W J, LI D, et al. Estimation of volatile compounds emission rates from the working face of a large anaerobic landfill in China using a wind tunnel system[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 111: 213-221.
- [23] GUO H W, DUAN Z H, ZHAO Y, et al. Characteristics of volatile compound emission and odor pollution from municipal solid waste treating/disposal facilities of a city in Eastern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(22): 18383-18391.
- [24] 沈培明, 陈正夫, 张东平, 等. 恶臭的评价与分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [25] BOKOWA A. Ambient odour assessment similarities and differences between different techniques[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, 30: 313-318.
- [26] NICOLAS J, ROMAIN A C. Establishing the limit of detection and the resolution limits of odorous sources in the environment for an array of metal oxide gas sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, 99(2/3): 384-392.
- [27] SANKARAN S, KHOT L R, PANIGRAHI S. Biology and applications of olfactory sensing system: a review[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 171/172: 1-17.

- [28] 苏爱华,周俊杰. 电子鼻在垃圾填埋场的恶臭在线监测系统中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(4): 129-131.
- [29] SOHN J H, ATZENI M, ZELLER L, et al. Characterisation of humidity dependence of a metal oxide semiconductor sensor array using partial least squares[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 131(1): 230-235.
- [30] CAPELLI L, SIRONI S, DEL ROSSO R, et al. A comparative and critical evaluation of odour assessment methods on a landfill site[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(30): 7050-7058.
- [31] ZHANG S C, CAI L S, KOZIEL J A, et al. Field air sampling and simultaneous chemical and sensory analysis of livestock odorants with sorbent tubes and GC-MS/olfactometry[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2010, 146(2): 427-432.
- [32] AGUS E, ZHANG L F, SEDLAK D L. A framework for identifying characteristic odor compounds in municipal wastewater effluent[J]. Water Research, 2012, 46(18): 5970-5980.
- [33] LEBRERO R, BOUCHY L, STUETZ R, et al. Odor assessment and management in wastewater treatment plants: a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, 41(10): 915-950.
- [34] 邹梓,林剑,陈娟,等. 垃圾填埋场臭气评价方法研究[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 75-78.
- [35] 耿静,韩萌,王亘,等. 臭气强度与臭气浓度间的定量关系研究[J]. 城市环境与城市生态, 2014, 27(4): 27-30.
- [36] 李春芸. 关于臭气浓度和臭气强度两种表示法的探讨[C]//第四届全国恶臭污染测试与控制技术研讨会. 淄博: [出版者不详], 2012.
- [37] 国家技术监督局. 空气质量 恶臭的测定 三点比较式臭袋法: GB/T 14675—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [38] 张鑫,许漂致. 现场嗅辨测定仪在三点比较式臭袋法测定中的应用[J]. 能源与节能, 2019(4): 84-85, 192.
- [39] CAPELLI L, SIRONI S, DEL ROSSO R, et al. Improvement of olfactometric measurement accuracy and repeatability by optimization of panel selection procedures[J]. Water Science and Technology, 2010, 61(5): 1267-1278.
- [40] PENZA M, SURIANO D, CASSANO G, et al. A case-study of microsensors for landfill air-pollution monitoring applications[J]. Urban Climate, 2015, 14: 351-369.
- [41] NICOLAS J, ROMAIN A, DELVA J, et al. Odour annoyance assessment around landfill sites: methods and results [J]. Chemical Engineering Transactions, 2008, 15: 29-36.
- [42] 路鹏,苏昭辉,王亘,等. 填埋场大气中化合物分析与恶臭指示物筛选[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 936-942.
- [43] FANG J J, YANG N, CEN D Y, et al. Odor compounds from different sources of landfill: characterization and source identification[J]. Waste Management, 2012, 32(7): 1401-1410.
- [44] DING Y, CAI C Y, HU B, 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.
- [45] ZOU S C, LEE S C, CHAN C Y, et al. Characterization of ambient volatile organic compounds at a landfill site in Guangzhou, South China[J]. Chemosphere, 2003, 51(9): 1015-1022.
- [46] 邹世春,张淑娟,张展霞,等. 垃圾填埋场空气中微量挥发性有机物的组成和分布[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1): 77-81.
- [47] 王瑟澜,原子能,陈奕,等. 垃圾填埋场恶臭气体控制研究进展[J]. 环境卫生工程, 2016, 24(3): 13-15.
- [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] 邵俊,羌宁,袁文祥. 大型填埋场覆膜收集恶臭气体变化规律研究[J]. 环境卫生工程, 2015, 23(6): 47-51.
- [50] CAPANEMA M A, CABANA H, CABRAL A R. Reduction of odours in pilot-scale landfill biocovers[J]. Waste Management, 2014, 34(4): 770-779.
- [51] LOU Z Y, WANG L, ZHAO Y C. Consuming un-captured methane from landfill using aged refuse bio-cover[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2328-2332.
- [52] 白秀佳,张红玉,王桂琴,等. 填埋场陈腐垃圾综合利用研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(12): 43-47.
- [53] 刘景龙,张毅,张后虎,等. 矿化垃圾生物覆盖层减少垃圾填埋场 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 释放的效应研究[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(1): 15-20.

- [54] YUN J, JUNG H, RYU H W, et al. Odor mitigation and bacterial community dynamics in on-site biocovers at a sanitary landfill in South Korea[J]. *Environmental Research*, 2018, 166: 516-528.
- [55] LI Y L, LIU J W, CHEN J Y, et al. Reuse of dewatered sewage sludge conditioned with skeleton builders as landfill cover material[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, 11(1): 233-240.
- [56] HYUN J, KIM M G. Field testing of conversion of sewage sludge to daily landfill cover material[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2012, 14(1): 14-18.
- [57] ROSLI N A, AZIZ H A, SELAMAT M R, et al. A mixture of sewage sludge and red gypsum as an alternative material for temporary landfill cover[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263: 110420.
- [58] SU Y, PEI J S, TIAN B H, et al. Potential application of biocover soils to landfills for mitigating toluene emission[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 299: 18-26.
- [59] BOGNER J E, CHANTON J P, BLAKE D, et al. Effectiveness of a Florida landfill biocover for reduction of CH₄ and NMHC emissions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1197-1203.
- [60] XIA F F, ZHANG H T, WEI X M, et al. Characterization of H₂S removal and microbial community in landfill cover soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(23): 18906-18917.
- [61] DING Y, CAI C Y, XIONG J S, 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.
- [62] DING Y, XIONG J S, ZHOU B W, 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.
- [63] LEE E H, MOON K E, CHO K S. Long-term performance and bacterial community dynamics in biocovers for mitigating methane and malodorous gases[J]. *Journal of Biotechnology*, 2017, 242: 1-10.
- [64] LEE Y Y, JUNG H, RYU H W, et al. Seasonal characteristics of odor and methane mitigation and the bacterial community dynamics in an on-site biocover at a sanitary landfill[J]. *Waste Management*, 2018, 71: 277-286.
- [65] 袁为岭, 黄传荣. 植物提取液处理恶臭气体的研究进展[J]. *化工环保*, 2005, 25(6): 441-445.
- [66] NEGISHI O, NEGISHI Y, OZAWA T. Effects of food materials on removal of allium-specific volatile sulfur compounds[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(13): 3856-3861.
- [67] NEGISHI O, OZAWA T. Effect of polyphenol oxidase on deodorization[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1997, 61(12): 2080-2084.
- [68] YASUDA H, ARAKAWA T. Deodorizing mechanism of (-)-epigallocatechin gallate against methyl mercaptan[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1995, 59(7): 1232-1236.
- [69] 张彦敏, 王刚, 吕丹丹, 等. 除臭剂对填埋场作业面臭气去除效果的试验研究[J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(4): 50-52.
- [70] 陈善平, 余召辉, 王晓东, 等. 大型生活垃圾填埋场恶臭综合控制措施及效果分析[J]. *环境卫生工程*, 2017, 25(5): 74-76, 80.
- [71] 王菲菲, 于干, 吴晔昶, 等. 生活垃圾填埋场恶臭综合防控措施与效果分析: 以杭州某填埋场为例[J]. *资源节约与环保*, 2020(3): 85-86.
- [72] 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.

(责任编辑:谭晓荷)