

# 生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究

羌宁<sup>1</sup>, 王红玉<sup>1,3</sup>, 赵爱华<sup>2</sup>, 袁文祥<sup>2</sup>, 邵俊<sup>2</sup>, 陈檬<sup>1</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市环境工程设计科学研究院, 上海 200232; 3. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

**摘要:** 采用风洞采样方式以挥发性有机物、H<sub>2</sub>S 和恶臭浓度为指标研究了生活垃圾填埋堆体类恶臭面源的污染散发率。结果表明, 生活垃圾填埋堆体表面的恶臭散发率与季节和表面吹扫风速等密切相关。高温季节挥发性有机物和恶臭浓度计的污染散发率可较低温季节高出 6 倍以上, 在 0.6~4 m·s<sup>-1</sup> 的测试吹扫风速范围内, 恶臭污染物的释放率随风速增加而近似呈线性增加的趋势。夏季生活垃圾表面的挥发性有机物(PID 测定以异丁烯计)的散发率为 385~680 μg·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>S 散发率为 4~7 μg·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>, 恶臭浓度散发率为 46.5~136 OU·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>。持续通风实验结果表明, 采用洁净空气吹扫得到的散发率是面源的最大可能散发率, 在进行采样时间 10 min 以上的恶臭浓度或作业面散发量估算时, 需对散发率进行适当修正。

**关键词:** 垃圾填埋; 面源; 填埋作业面; 恶臭散发率; 风洞采样; 电子鼻

中图分类号: X512 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0513-07

## Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area

QIANG Ning<sup>1</sup>, WANG Hong-yu<sup>1,3</sup>, ZHAO Ai-hua<sup>2</sup>, YUAN Wen-xiang<sup>2</sup>, TAI Jun<sup>2</sup>, CHEN Meng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Design and Research on Environmental Engineering, Shanghai 200232, China; 3. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Emission rates of volatile organic compounds (VOCs), H<sub>2</sub>S and odor unit from the surface of a municipal solid waste (MSW) landfill working area were measured with a wind tunnel sampler. The results show that the emission rate of odor from the non-point source of landfill is the function of environmental temperature and surface sweeping velocity. The emission rate measured in the high temperature season can be 6 times higher of that in the low temperature season. Within the experimental range of 0.6~4 m·s<sup>-1</sup> wind sweeping velocity, the emission rate shows a linear relationship with wind sweeping velocity. In summer, the emission rates of VOCs (measured by PID as isobutylene), H<sub>2</sub>S and odor unit are 385~680 μg·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>, 4~7 μg·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>, and 46.5~136 OU·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup> respectively. The continuous sweeping experiment shows that the emission rate measured with clean air sweeping is the maximum possible emission rate, which needs to be adjusted when it is used to estimate the odor concentration of more than 10 min sample time or an area emission load.

**Key words:** MSW landfill; non-point source; working area; odor emission rate; wind tunnel sampler; electrical nose

随着经济的发展和水平的提高,我国生活垃圾的产生量持续上升,2010年垃圾清运量达1.58亿t,得到卫生处置的有1.23亿t,其中约79%进行了填埋处置<sup>[1]</sup>。由于我国很多地区的垃圾中有机质和水分的含量较高,垃圾清运和填埋过程所产生的恶臭问题已成为公众反应强烈的公害。国内外已有不少研究者对垃圾填埋场恶臭开展了研究讨论<sup>[2~5]</sup>,主要是集中在恶臭气体成分的化学分析<sup>[6~11]</sup>,填埋场各点位恶臭物质的浓度及对周边环境的影响等<sup>[5,12]</sup>。填埋库区的暴露作业面和填埋堆体是填埋场最主要的恶臭来源<sup>[4,13]</sup>,属于敞开式的无组织面源。科学地掌握这类恶臭面源的散发规律,是控制填埋场恶臭污染的关键。

填埋场面源恶臭散发量除取决于垃圾本身的特性外还主要受到天气条件的影响<sup>[8,9]</sup>,前述的大多

数研究采用的是瞬时环境空气采样或短时间富集管采样,测得的恶臭物质浓度受取样期间气象条件的影响很大,且难以归纳或推演出填埋场恶臭面源的散发量数据。部分研究者在填埋场下风向进行恶臭测定,再通过模型反演的方式来确定恶臭源强<sup>[14,15]</sup>,但该方法涉及到的现场测试工作量大,且数据质量受到采样期间气象条件稳定性的影响。还有些研究者采用静态风罩法和风洞法开展了农业土壤、污水表面和畜牧饲养场等的面源散发强度的研究<sup>[16~22]</sup>,但关于垃圾填埋作业暴露面恶臭散发强度的系统研究不多<sup>[13]</sup>,且未考虑表面吹扫风速对恶臭

收稿日期: 2013-05-02; 修订日期: 2013-07-04

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”2010年度社会发展领域重大项目(10DZ120010A,10DZ1200103)

作者简介: 羌宁(1965~),男,博士,副教授,主要研究方向为大气污染控制与空气质量管理,E-mail: tj1926@126.com

散发量的影响. 本研究采用模拟垃圾表面吹扫气流的 风洞采样方式, 借助于便携式挥发性有机物测定装置、硫化氢测定装置及人工嗅辨和电子鼻分析相结合的臭气浓度测定方式, 开展了上海老港固体废弃物综合处置基地生活垃圾填埋作业表面不同季节恶臭物质散发率的测定分析, 结合暴露面积数据的统计即可估算面源的散发源强, 以为评估不同气象条件下的恶臭影响及有针对性地控制恶臭公害提供指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 风洞采样系统

因面源散发率与表面风速、温度等密切相关, 本研究采用带风量调节和指示的风洞采样系统在不同季节进行了生活垃圾表面恶臭散发强度的测定. 风洞系统构成如图 1 所示.

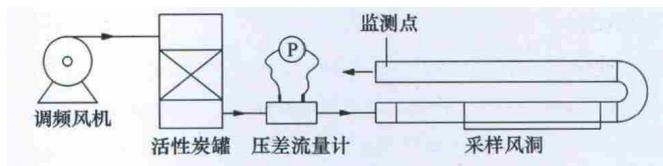


图 1 风洞采样装置系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel sampler system

通过调频风机可在风洞断面形成  $0 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的吹扫风速. 活性炭罐主要用来去除环境背景空气中的恶臭物质, 以产生洁净的吹扫空气. 标定后的压差流量计用于指示风洞断面风速. 采样风洞由不锈钢材料制造, 如图 2 所示, 包括: 进气管、渐扩管、风洞主体、渐缩管、弯头、出气管. 渐扩管内设置 3 块导流片, 使气流在风洞横断面均匀分布; 风洞主体为下开口式长方体, 开口处多出 20 mm 加深钢板以便于插入垃圾表层内, 制造相对密闭的断面吹扫环境, 下开口边缘还设置了 50 mm 宽的外翻翼板, 以控制风洞下开口面与垃圾表面总体齐平, 风洞下开口覆盖垃圾表面积为  $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 采样风洞吹扫垃圾表面时垂直断面面积为  $100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ , 携卷的污染物质经过渐缩管、弯头和出气直管段后, 均匀分布于吹扫出气的气流中, 在出气管末端设置监测采样点.

### 1.2 样品分析

#### 1.2.1 恶臭浓度

实验中臭气浓度的测定采用三点比较式臭袋法和电子鼻法相结合的测定方法. 每次现场实验中的所有恶臭浓度均通过电子鼻进行测定, 同时选择 6

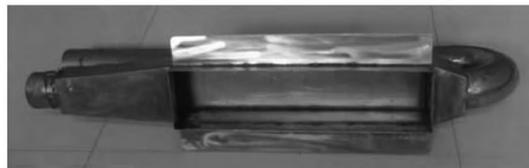


图 2 采样风洞照片

Fig. 2 Photograph of wind tunnel sampler

个样品测定时刻按 GB/T 14675 方法同步进行气瓶采样, 送交专业测定机构进行人工嗅辨测定. 后期数据处理时将人工嗅辨结果数据作为电子鼻的学习样本进行驯化建立模型, 进而将现场电子鼻所测试信号数据经过模式识别确认后转化为人工嗅辨浓度值. 研究中采用的电子鼻是德国 Airsense 公司出产的 Pen3 电子鼻. 该电子鼻由 10 个不同的金属氧化物传感器组成的传感器阵列、气路控制系统及分析软件 3 部分组成. 人工嗅辨浓度为无量纲的稀释比, 参考欧盟 EN13725:2003 《动态嗅辨仪法测定恶臭浓度》标准的说明<sup>[23]</sup>, 为便于计算恶臭散发率, 本研究中测定恶臭的浓度单位 (odor unit) 取为  $\text{OU} \cdot \text{m}^{-3}$ .

#### 1.2.2 VOCs (volatile organic compounds)

鉴于生活垃圾恶臭物质的复杂性和多样性, 本研究分别采用便携式 PID 和 FID 测定仪进行了 VOCs 的测定. PID 传感器对芳香烃、酮类、萜烯类及部分有机硫、有机胺物质具有较好响应, 对烷烃类响应较差, 同时易受高湿度气体影响; FID 传感器主要对碳氢类烃类、部分卤代烃、酮类物质具有较好的响应, 但对醛、醇类物质响应相对较小, 基本不受气体湿度的影响. 本研究采用的 PID 测定仪为美国 REA 公司的 PGM-7240 PID 检测器, 检测范围  $(0.001 \sim 200) \times 10^{-6}$  (体积分数), 浓度以异丁烯计. FID 测定仪采用美国 PHOTOVAC 公司出产的 micro FID 检测仪进行测定, 检测范围  $(1 \sim 50\,000) \times 10^{-6}$  (体积分数), 浓度以甲烷计. 每次现场测试前均采用异丁烯和甲烷标准气体对仪器进行标定.

#### 1.2.3 $\text{H}_2\text{S}$

采用美国 Arizona 公司的 Jerome 631-X 测定, 检测范围体积分数  $(0.003 \sim 50) \times 10^{-6}$ . 测试前进行传感器再生、归零及标定, 测试后及时进行传感器再生.

### 1.3 环境空气样品测试

本研究中的环境空气样品均在距地面 1.5 m 处采样测定. 根据有关规范和标准, 1.5 m 高度处的环境中污染物浓度能够更好地反映人类活动所受到

的污染影响。

#### 1.4 面源散发率采样测试

选取不同季节进行现场测试,每次测试期间选取 100 m<sup>2</sup> 垃圾作业面作为测试区域,每个表面风速测试工况时,在垃圾表面选取 3 个点位进行采样测

试,并取 3 次测试的平均值作为该工况的测试值。

现场实验分别选取了 1 a 中的 3 个时间段进行,分别是春季(4 月)、夏季(7 月)和冬季(11 月),地点为上海老港固体废弃物综合处置基地的生活垃圾填埋作业面。采样期间气象情况如表 1 所示。

表 1 现场采样期间气象参数

Table 1 Meteorological parameter during field experiment

季节	天气	温度/℃	气压/hPa	湿度/%	昼夜温差/℃	风向	风速/m·s <sup>-1</sup>
春	多云	19.9	1 009.4	80.5	8.2	东南风	1.9
夏	多云	29.9	1 001.6	74.1	5.1	东南风	5.6
冬	阴	3.6	1 028.4	71.9	4.4	西北风	3.9

#### 1.5 面源散发率估算方法

面源散发率可表示为样品浓度和采样器内空气流率的乘积:

$$SER = Q \times c/A$$

式中, SER 为单位面积恶臭散发率, mg·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup> 或 OU·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>; Q 为吹扫气体流量, m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>; c 为恶臭物质浓度, mg·m<sup>-3</sup> 或 OU·m<sup>-3</sup>; A 为采样器覆盖的面源表面面积, m<sup>2</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同风速条件下恶臭源环境空气浓度变化情况

分别选择了风向相对稳定的填埋作业时段测定填埋场作业区域和边界下风向 100 m 处不同风速下环境空气中 VOCs (PID 异丁烯计) 的浓度, 所得结果如图 3 所示。

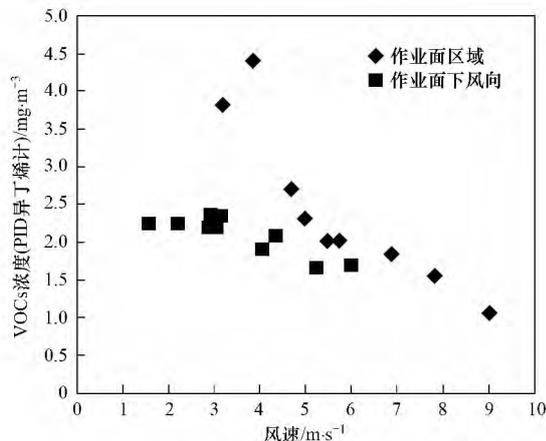


图 3 填埋作业期间不同风速时 VOCs 浓度

Fig. 3 VOCs concentration as a function of wind velocity during landfill operation

从图 3 可见,在气候温度、垃圾成分、填埋作业方式等条件基本相同的情况下,无论是在作业区域内还是作业区域的下风向,环境空气中的 VOCs 浓度均随风速的增大有明显下降的趋势。在作业区域

内的 1.5 m 高度处,风速由 3 m·s<sup>-1</sup> 升高到 6 m·s<sup>-1</sup> 时,测定的 VOCs 浓度下降了 50%;而在下风向 100 m 处,风速由 3 m·s<sup>-1</sup> 升高到 6 m·s<sup>-1</sup> 时,测定的浓度值下降了约 30%,说明环境风速对垃圾表面这类的面源的散发和扩散具有很大的影响,且不同点位处的影响程度不尽相同。因此采用微气象模型法反演方式确定面源散发强度时,采样点位布置和样品采集时间等的设计对估算结果将影响很大。

### 2.2 不同季节和风速条件下恶臭类物质的散发率

#### 2.2.1 VOCs 散发率

春、夏、冬这 3 个季节中采用采样风洞法测定的生活垃圾填埋作业面恶臭类物质散发率情况如图 4~7 所示。

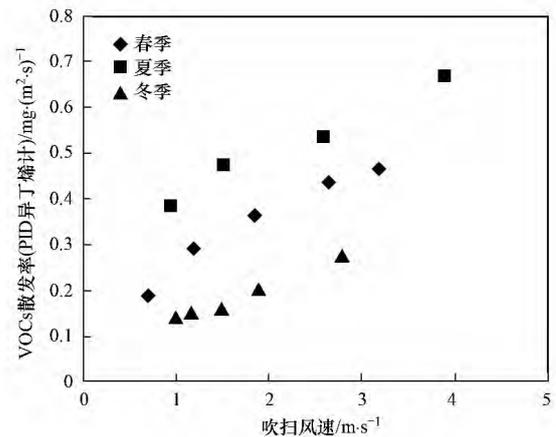


图 4 VOCs (PID 以异丁烯计) 散发量随表面吹扫风速变化情况

Fig. 4 Emission rate of VOCs (PID as Isobutylene) from landfill working area

由图 4 和图 5 可知,在测试表面吹扫风速 0.6 ~ 4 m·s<sup>-1</sup> 范围内,垃圾表面的挥发性有机物散发率均随风速的增加而增大。从春、夏、冬这 3 个季节来看,相同表面风速时,垃圾表面有机物的散发率总体随气温的升高而增大,且 PID 测得的散发率从数值上要远低于 FID 的测定值。

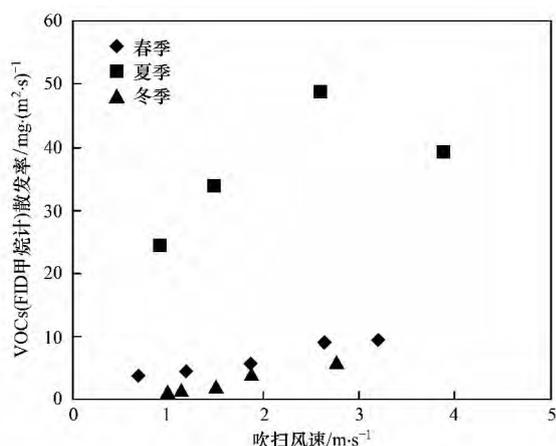


图5 VOCs(FID以甲烷计)散发量随表面风速变化情况

Fig. 5 Emission rate of VOCs (FID as methane) from landfill working area

垃圾表面恶臭的散发率取决于垃圾中恶臭物质的成分、含量及这些恶臭物质向表面的传质途径。

垃圾恶臭气体成分在好氧和厌氧条件下均可产生,但主要的致臭物质来自于厌氧过程。当氧气充足时,垃圾中的有机成分如蛋白质等,在好氧细菌的作用下产生刺激性气体 $\text{NH}_3$ 等;当氧气不足时,厌氧细菌将有机物分解为未完全降解的碳氢、碳氢氧类产物和一些含硫、含氮的化合物,如烯烃、小分子挥发性脂肪酸、醇类、醛酮类、硫醇、硫醚类、胺类、酰胺类等<sup>[5~11]</sup>,有机质深度厌氧进入产气阶段时还会产生大量的甲烷。由于垃圾中固体占相当比例但又存在液体,既具有较多空隙,又存在一些密闭或半密闭的袋装垃圾,因此很多情况下,与相对均匀的污水、污泥类有机液体不同,垃圾的不同部位往往处于不同的好氧或厌氧降解阶段,填埋作业面处垃圾的降解过程呈现出非常高的复杂性和组合型,可能散发的代谢产物的种类也非常多。总体而言,填埋作业面的恶臭来源有两处。一是已填埋压缩后的铺底垃圾,这部分垃圾的厌氧程度相对较高,部分已进入厌氧产气阶段。另一部分是正在被填埋的垃圾,该部分垃圾被收集转运的时间通常在1~2 d,其降解程度取决于环境温度和清运方式<sup>[24]</sup>。气温较高的季节如夏季,填埋作业面所处置的垃圾因温度及含水量均较高而生化反应速度快,主要是处于水解产酸及以后的阶段;而冬季因气温低等因素,被填埋的垃圾和填埋场垃圾表面处的生化反应速度较慢,主要处于水解产酸以前的阶段。

恶臭气体产生后,根据其性质的不同,部分会被水和固体吸收吸附,部分则从垃圾内部向外扩散,其

扩散速率取决于空隙率、通道长度和浓度梯度推动力。垃圾表面风速较低时,恶臭物质在垃圾表面的扩散传递较慢,垃圾表面恶臭物质浓度较高,传质推动力较小,限制了恶臭物质向外界扩散,表现为表面散发速率较小;当垃圾表面的风速增大时,垃圾表面恶臭浓度降低,增加了垃圾内部与外界空气中恶臭浓度梯度,同时垃圾表面的层流边界层变薄,造成垃圾内部向外传质速率变大,表现为散发率增加。

图4中用PID测定表征的VOCs主要是一些好氧和厌氧初期产生的一些有机物,对甲烷无响应。FID检测仪对烃类有机物响应很好而对含氧类有机物响应相对较低,而垃圾填埋过程中产生的填埋气中主要为甲烷和二氧化碳,其他气体占比很小<sup>[24]</sup>,因此FID的测定值更多是体现了包括甲烷在内的烃类物质的情况。从图5中也可看出,FID测得的VOCs表面散发率较PID测得的散发率高出大约两个数量级,且夏季时因温度高,厌氧程度高,甲烷产率高,因此测得的散发率也要远高于春、冬季的散发率。

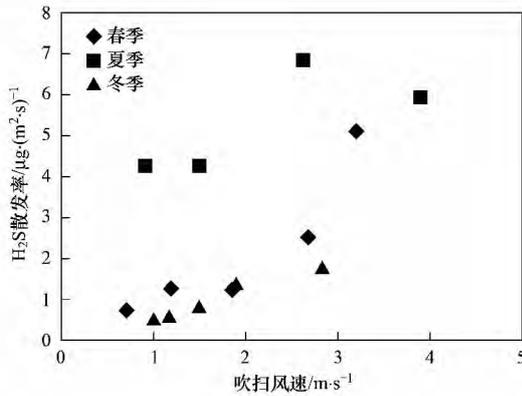
在 $0.6 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 吹扫风速范围内,不含甲烷的挥发性有机物在夏季的填埋作业表面的散发率在 $385 \sim 680 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,而冬季的散发率则在 $140 \sim 280 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,且基本与风速变化呈线性关系。

### 2.2.2 $\text{H}_2\text{S}$ 散发率

$\text{H}_2\text{S}$ 作为一种重要的恶臭物质,一直受到研究者的关注。本研究测定的垃圾填埋作业区表面硫化氢的散发率如图6所示。在实验表面风速 $0.6 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,垃圾表面的 $\text{H}_2\text{S}$ 散发量也呈现随风速的增加而增大,随温度升高而升高的情况。与前述VOCs相比,垃圾表面 $\text{H}_2\text{S}$ 的散发率要小很多,为PID测定的异丁烯计VOCs的百分之一左右。从生成过程来看,填埋区 $\text{H}_2\text{S}$ 的产生也是深度厌氧后的产物。国外研究表明,填埋气中的 $\text{H}_2\text{S}$ 浓度约为 $54 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右<sup>[25]</sup>,与甲烷的质量浓度比例约为8 000左右。从图5和图6的比较可以看出,填埋作业面甲烷与 $\text{H}_2\text{S}$ 的散发率比值与上述数值相近。在夏季 $0.6 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的表面吹扫速度下,填埋场作业面 $\text{H}_2\text{S}$ 散发率基本上在 $4 \sim 7 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,对于作业面积约 $10\,000 \text{ m}^2$ 的大型填埋场,在夏季风速 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下, $\text{H}_2\text{S}$ 的表面释放率约为 $234 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

### 2.2.3 恶臭浓度散发率

由图7可见,在3个季节实验表面风速 $0.6 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,垃圾填埋作业面的恶臭散发率变化

图6 H<sub>2</sub>S 散发率随表面风速变化情况Fig. 6 Emission rate of H<sub>2</sub>S from landfill working area

范围是  $3.6 \sim 141 \text{ OU} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 总体与前面的 VOCs 和 H<sub>2</sub>S 情况一样, 呈现出气温越高, 表面风速越大, 散发率越大的特点. 以  $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的吹扫风速为例,  $29^\circ\text{C}$  气温时的恶臭散发率约为气温  $20^\circ\text{C}$  时的 2.3 倍和气温  $3.6^\circ\text{C}$  时约 6.7 倍. 总体而言夏季恶臭散发率范围为  $46.5 \sim 136 \text{ OU} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ; 冬季为  $8.5 \sim 16.2 \text{ OU} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ . Sironi 等<sup>[13]</sup> 报道的新鲜填埋垃圾的恶臭浓度散发率为  $59 \text{ OU} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , Sarkar 等<sup>[18]</sup> 的报道值为  $25.91 \text{ OU} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 这些结果均未说明是在多少吹扫风速情况下的数值.

图 7 表明, 在测试的风速范围内, 垃圾表面的恶臭散发率随表面风速的变化近似呈线性关系. 春、夏季恶臭散发率随风速变化的斜率要大于冬季情况下的斜率. 原因可能在于低温情况下, 恶臭物质产生速率慢, 而在温度较高的夏季, 恶臭物质的产生量及传质速率均较大, 吸附吸收容量又相对较小, 表现出随吹扫风速增大较快增大的现象, 因此在春夏季节尤其是高温季节, 如何降低垃圾表面吹扫风速对控制垃圾填埋场的恶臭散发率起到至关重要的作用.

### 2.3 通风时间对垃圾表面恶臭散发率的影响

如前所述, 垃圾表面的散发率除取决于表面风速外, 还与垃圾本身的恶臭物质含量及向表面的传质情况有关, 因此在前述实验中采用的是测定一个工况更换一个采样面的方式. 为考察在表面风速持续作用下, 垃圾表面恶臭散发率的可能变化情况, 分别在夏季和冬季进行了风洞持续通风测定其散发率随时间的变化. 对同一垃圾表面持续通风并对排气按时间节点采样测定, 得到的垃圾表面恶臭散发率随通风时间的变化关系结果如图 8 所示.

盛夏季节实验风速为  $3.88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而秋冬季节

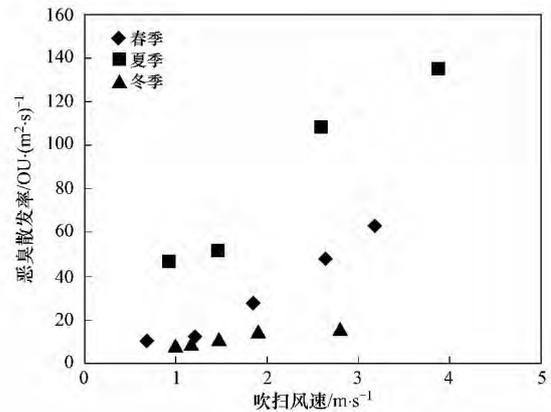


图7 恶臭散发量随表面风速变化情况

Fig. 7 Emission rate of odor unit from landfill working area

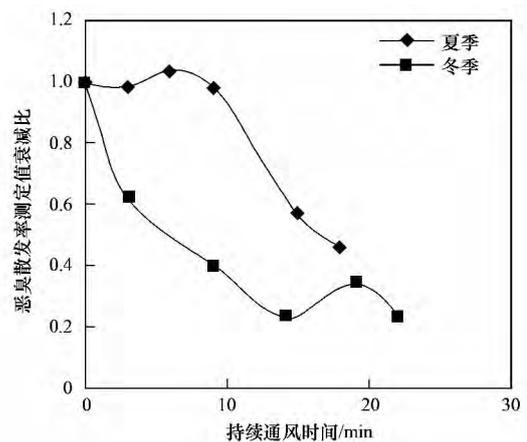


图8 通风时间对垃圾表面恶臭散发率的影响

Fig. 8 Effects of sweep time on the odor emission rate

实验风速为  $1.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 由图 8 可见, 随着清洁空气通风吹扫时间的延长, 测定得到的垃圾表面恶臭散发率总体呈下降趋势. 夏季在前 9 min 内的 3 次测定值总体下降不多, 但其后呈快速下降趋势, 通风 20 min 时恶臭散发率下降了 39%; 而冬季测定的恶臭散发率数值从一开始就呈快速下降的趋势, 15 min 时就下降了约 76%. 盛夏季节的恶臭散发率下降程度和水平均小于秋冬季节. 这是因为垃圾填埋作业面的恶臭散发率主要由垃圾生化降解过程中恶臭成分的生成速率及其从垃圾向空气扩散传递的速率两方面所决定的. 由于夏季气温度高, 垃圾恶臭的生成速率较大, 垃圾中恶臭物质含量高, 恶臭物质由垃圾内部向外扩散的速率也较大, 能在前期维持较高的散发量, 然后散发率才开始下降; 而冬季气温较低, 表层垃圾温度低, 恶臭产生量较小, 深层垃圾的温度较表层高些, 但深层垃圾产生的恶臭物质向外扩散的过程中需要一定的时间, 因此当垃圾表面通过清洁空气吹扫时, 其散发率从一开始就下降,

直至达到一个相对平衡点。

该实验结果表明采用新鲜空气吹扫方式测定得到的表面散发率是最大可能的散发率,在用来计算采样时间 10 min 以上的恶臭平均浓度时,需要进行适当的修正,夏季所需修正的幅度较小,而对低温的冬季所需修正的幅度较大。这有待今后进一步深入地研究。

### 3 结论

(1) 采用风洞采样方式测定得到的生活垃圾填埋作业面挥发性有机物(PID 异丁烯计)在  $0.6 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  吹扫风速范围内的散发率夏季为  $385 \sim 680 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,而冬季的散发率则在  $140 \sim 280 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,且基本与风速变化呈线性关系。

(2) 采用风洞采样方式测定得到的生活垃圾填埋作业面  $\text{H}_2\text{S}$  在  $0.6 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  吹扫风速范围内的散发率夏季为  $4 \sim 7 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,而冬季的散发率则在  $0.5 \sim 1.8 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 。

(3) 通过风洞采样,采用电子鼻结合人工嗅辨法方式测定得到的生活垃圾填埋作业面恶臭浓度在  $0.6 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  吹扫风速范围内的散发率夏季为  $46.5 \sim 136 \text{ OU}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ; 冬季为  $8.5 \sim 16.2 \text{ OU}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 。且夏季散发率随风速增长的速率要高于冬季的情况。

(4) 采样风洞持续通风实验结果表明,采用洁净空气吹扫得到的散发率是面源的最大可能散发率。

#### 参考文献:

- [1] Tian H Z, Gao J J, Hao J M, *et al.* Atmospheric pollution problems and control proposals associated with solid waste management in China: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **252-253**: 142-154.
- [2] EL-Fadel M, Findikakis A N, Leckie J O. Environmental impact of solid waste landfilling [J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, **50**(1): 1-25.
- [3] Capelli L, Sironi S, Del Rosso R, *et al.* A comparative and critical evaluation of odor assessment methods on a landfill site [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(30): 7050-7058.
- [4] Romain A C, Delva J, Nicolas J. Complementary approaches to measure environmental odours emitted by landfill areas [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, **131**(1): 18-23.
- [5] Chiriac R, Carre 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.
- [6] Davoli E, Gangai M L, Morselli L, *et al.* Characterization of odorants emissions from landfills by SPME and GC/MS [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(5): 357-368.
- [7] Zou S C, Lee S C, Chan C Y. Characterization of ambient volatile organic compounds at a landfill site in Guangzhou, South China [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(9): 1015-1022.
- [8] Dincer F, Odabasi M, Muezzinoglu A. Chemical characterization of odorous gases at a landfill site by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2006, **1122**(1-2): 222-229.
- [9] Chiriac R, Carre J, Perrodin Y, *et al.* Characterization of VOCs emitted by open cells receiving municipal solid waste [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149**(2): 249-263.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Sironi S, Capelli L, Céntola P, *et al.* Odour emission factors for assessment and prediction of Italian MSW landfills odor impact [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(26): 5387-5394.
- [14] Nicolas J, Craffe F, Romain A C. Estimation of odor emission rate from landfill areas using the sniffing team method [J]. *Waste Management*, 2006, **26**(6): 1259-1269.
- [15] Chemel C, Riesenmey C, Batton-Hubert M, *et al.* Odour-impact assessment around a landfill site from weather-type classification, complaint inventory and numerical simulation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **93**(1): 85-94.
- [16] Van der Weerden T J, Moat J F, Martinez J, *et al.* Evaluation of the wind-tunnel method for measurement of ammonia volatilization from land [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, **64**(1): 11-13.
- [17] Wang X, Jiang J, Kaye R. Improvement of wind-tunnel sampling system for odour and VOCs [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(9): 71-77.
- [18] Sarkar U, Hobbs S E. Landfill odour: assessment of emissions by the flux footprint method [J]. *Environmental Modeling & Software*, 2003, **18**(1): 155-163.
- [19] Hudson N, Gies A, Duperouzel D. Assessment of permeable covers for odour reduction in piggery effluent ponds. 2. Field-scale trials [J]. *Bioresource Technology*, 2006, **97**(16): 2015-2023.
- [20] Hudson N, Ayoko G A, Dunlop M, *et al.* Comparison of odour emission rates measured from various sources using two sampling devices [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(1): 118-124.
- [21] Sironi S, Capelli L, Céntola P, *et al.* Odour emission factors for the prediction of odour emissions from plants for the mechanical and biological treatment of MSW [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(39): 7632-7643.
- [22] Capelli L, Sironi S, Rosso R D, *et al.* Predicting odour

- emissions from wastewater treatment plants by means of odour emission factors [J]. *Water Research*, 2009, **43**(7): 1977-1985.
- [23] EN 13725, Air quality-determination of odour concentration by dynamic olfactometry[S].
- [24] Staley B F, Xu F X, Cowie S J, *et al.* Release of trace organic compounds during the decomposition of municipal solid waste components [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(19): 5984-5991.
- [25] Powell J, Jain P, Kim H, *et al.* Changes in landfill gas quality as a result of controlled air injection [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(3): 1029-1034.

## 关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部