

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征

何晶晶^{1,2,3}, 蒋宁羚^{1,2}, 徐贤^{1,2}, 韦顺艳^{1,2}, 邵立明^{2,3}, 吕凡^{1,2*}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092; 3. 住房和城乡建设部农村生活垃圾处理技术与培训中心, 上海 200092)

摘要: 鉴于目前尚缺乏主发酵堆肥产物储放和土地利用的恶臭风险评估数据, 本文基于 21 d 恶臭释放潜力实验, 描述了果蔬类垃圾主发酵堆肥产物在此过程中的恶臭释放源强特征, 并据此评估其在储放和利用时的恶臭释放特征。结果表明, 主发酵堆肥产物在实验过程中持续释放氨气、硫化物、苯系物和萜类物质, 并以氨气为主; 醇类物质、醛类物质的释放随时间逐渐减少, 而酮类物质在整个过程中持续释放但释放量很少。通过模拟封闭环境和自然场地两个场景, 本文从恶臭风险角度计算出在封闭环境中每平方米内可接受的主发酵产物的暂存或直接利用量, 以及主发酵产物能够在自然场地中直接利用的使用量和最小防护距离要求。

关键词: 果蔬垃圾; 堆肥; 堆放; 直接利用; 恶臭污染物

中图分类号: X512; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3452-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712017

Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application

HE Pin-jing^{1,2,3}, JIANG Ning-ling^{1,2}, XU Xian^{1,2}, WEI Shun-yan^{1,2}, SHAO Li-ming^{2,3}, LÜ Fan^{1,2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China; 3. Centre for the Technology Research and Training on Household Waste in Small Towns & Rural Area, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Shanghai 200092, China)

Abstract: The direct application of fresh compost is frequent in practice and might cause odor pollution. The present study investigated the characteristics of odor emissions and aimed to estimate the environmental effect of odor over the course of storage and application. An odors emission potential test lasting 21 days was conducted using primarily fermented fruit and vegetable waste compost. The results showed that the fresh compost primarily emitted ammonia, as well as sulfur compounds, benzenes, and terpenes throughout the experiment. Alcohol and aldehyde emissions decreased over time, whereas ketone emissions were consistently low. By simulating two scenarios—one in an enclosed space and one in open air—the quantity of fresh compost could be applied or stored, and the protective distance was calculated from the point of odor potential.

Key words: fruit and vegetable waste; compost; storage; application; odor pollutants

我国混合收集生活垃圾中生物可降解组分占比可达 50% 以上^[1]。近年来, 我国大力推行生活垃圾的分类收集制度^[2], 分类所得的生物可降解组分宜采用好氧堆肥等生物处理技术实现资源化利用^[3]。好氧堆肥技术在实现有机组分稳定化、无害化的同时, 产生可农用的土壤改良剂, 具有低成本、环境友好等优势^[4, 5]。堆肥过程由主发酵与次发酵阶段组成, 但由于场地、经济条件的限制, 主发酵产物往往尚未完全腐熟化和稳定化就直接进行土地利用。

恶臭问题是堆肥工程中的重要问题, 现有研究一般认为主发酵阶段是恶臭物质释放的主要时期^[6, 7], 因此, 多数堆肥恶臭研究仅考虑主发酵阶段, 即堆肥约 20 d 以内, 有机酸、脂类、含氧化合物、硫化氢、氨气等被认为是过程中主要的致臭物质^[8~13], 并得出在堆肥初期及高温阶段挥发性有机物及其它恶臭物质都基本释放完毕的结论^[4, 14~17]。但是, 由于这些

研究的实验设计直接假设主发酵阶段之后的恶臭释放可忽略不计, 因此, 从其研究结果中无从获知主发酵产物在储放和利用过程中的恶臭释放情况。

Eitzer 等^[18]研究了 8 个采用不同技术堆肥厂的不同操作场所的恶臭释放, 发现在腐熟堆体车间中, 除酮类外的恶臭物质的质量浓度基本低于主发酵堆体车间浓度。但是, 酮类在很低的质量浓度下就会产生极强的不良气味^[19], 并对健康带来影响^[20]。因此, 酮类等低嗅阈值恶臭物质的质量浓度不能直接等同于环境影响, 低质量浓度时仍可能产生恶臭污

收稿日期: 2017-12-04; 修订日期: 2018-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51622809); 2015 年度国家环境保护标准项目(2015-4); 上海市绿化和市容管理局项目(B169909, DB31ZB5-15043)

作者简介: 何晶晶(1962~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为固体废物处理处置与资源化利用过程、技术和理论, E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lvfan.rhodes@tongji.edu.cn

染. Moreno 等^[21]和邵珠泽等^[22]也都注意到,表观稳定的堆肥产品仍会进一步地腐熟和降解,释放致臭物质.由此可知,主发酵产物在储放或直接利用时仍存在恶臭污染风险.但是,目前尚未有研究明确定量表征主发酵产物的恶臭源强,评估其不同场景中(储放或直接利用)的恶臭风险.

因此,本文基于主发酵产物的恶臭释放潜力实验,监测过程中的恶臭物质释放规律,估算其在储放和直接应用场景中的恶臭释放特征,评估其恶臭污染水平并提出各场景中合适的应用方法,以期为主发酵产物储放和直接利用过程中的恶臭污染控制提供依据.

1 材料与方法

1.1 恶臭释放潜力实验(odors emission potential, OEP)

本实验所用堆肥样品取自上海某堆肥厂条垛式一次发酵堆肥堆体,堆肥时间为12~13 d,堆肥厂处理对象为集贸市场和居民区分类收集的果蔬类垃圾.该堆肥样品的含固率(TS)为37.8%,挥发性固体(VS)含量为86.6%(以干基计),表征生物稳定性^[23]的4 d好氧呼吸量(AT₄)值为23.9 mg·g⁻¹(以干基计),表明该样品已初步达到生物稳定.在恶臭释放潜力实验^[24]中,将30 g样品平铺在1.4 L的锥形反应瓶底部,物料厚度不超过5 mm.反应瓶放置在20℃的恒温环境中,每小时通风1 min,通风速率为0.3 L·min⁻¹,保证气体出口的氧气质量浓度超过18%,以此模拟一种较蓬松、通风良好的物料堆积状态.气体通过黑色泰德拉气袋进行收集,气袋每日更换1次,在第1、2、3、5、6、8、10、12、15、17、19、21 d分析测试所收集到的气体.恶臭释放潜力实验设置两个平行组,共持续21 d.

1.2 分析测试方法

1.2.1 固相指标

采用105℃恒重和600℃灼烧2 h的方法,测定样品的含固率和挥发性固体含量^[25].样品的4 d好氧呼吸量(AT₄)根据文献^[26]进行测量和计算.经冷冻干燥(-38℃,48 h)后的样品用球磨机(MM400, Retsch,德国)研磨至400目以下,再采用元素分析仪(Vario EL III, Elementar Analysensysteme GmbH,德国)分析其C、H、N元素含量.

1.2.2 水相浸出液指标

取4 g固体样品,按质量比1:10与蒸馏水混合后,于振荡培养箱内室温振荡萃取20 min后静置,取2 mL上清液离心(21 200 g, 10 min),离心后的

上清液采用TOC-V分析仪(TOC-V CPH, Shimadzu, 日本)测定其总碳、无机碳和总氮.有机碳由总碳与无机碳的差值得得.采用离子计(PXSJ-216F, 雷磁,中国)测试液体样品的pH.

1.2.3 气相指标

检测气相样品的氨气、醛类(甲醛、乙醛、丙醛、正丁醛、异丁醛、正戊醛、异戊醛、丙烯醛)、醇类(甲醇、乙醇、正丙醇、异丙醇、正丁醇、2-丁醇、异丁醇)、酮类(丙酮、丁酮、2-戊酮、3-戊酮、甲基异丁基酮)、苯系物(苯、甲苯、乙苯、邻/间/对二甲苯、苯乙烯)、萜类(α -蒎烯、 β -蒎烯、 α -蒎烯、3-蒎烯、月桂烯、 α -蒎烯、柠檬烯、伞花烯)、硫化物(硫化氢、羰基硫、二硫化碳、甲硫醇、乙硫醇、丙硫醇、二甲基硫醚、二甲基二硫醚、二乙基硫醚、二乙基二硫醚、二甲基三硫醚、烯丙基甲基硫醚)含量,共6大类47种化合物.采用3种方法^[27]测定分析以上物质:①氨气采用比色管法测定;②气体样品经过冷冻浓缩预处理后,用氢离子火焰-气相色谱法(GC-450, Varian,美国)检测醛类、醇类、酮类、苯系物及萜类物质,用脉冲火焰光度-气相色谱法(GC-450, Varian,美国)检测硫化物(除硫化氢外);③硫化氢由检知管法测定.由于甲醇和甲醛、异戊醛和异丙醇、月桂烯和3-蒎烯的出峰时间重合,无法两两分离,考虑到每种物质都可能是有机物降解产生的中间产物,故在计算中将甲醇和甲醛、异戊醛和异丙醇各取相应的峰面积的一半进行计算,而将月桂烯和3-蒎烯视为1种物质进行计算和讨论.

依据固体样品的挥发性有机酸含量评估挥发性有机酸的释放潜力.固体样品按臭气释放潜力实验的参数装瓶,第1、2、3、5、8、12、15、17、19、21天各取1~3 g固体样品和蒸馏水按质量体积比1:10振荡萃取20 min后静置,取上清液离心(21 200 g, 10 min),分离上清液并稀释,用氢离子火焰-气相色谱法(6890N-FID, 安捷伦,美国)测定挥发性有机酸(乙酸、丙酸、异丁酸、正丁酸、异戊酸、己酸).色谱柱为DB-WAXetr毛细色谱柱(美国安捷伦公司, 30 m×0.53 mm ID×1 μ m).仪器运行条件参照文献^[28].

2 结果与分析

2.1 OEP实验过程中6类恶臭物质的总体释放特征

图1呈现了OEP实验过程(21 d)中6类恶臭物质的释放质量变化规律.

图1(a)以恶臭物质总质量/添加VS量为计量

基准,实验开始的第1 d便释放了 $13 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的恶臭物质,从第2 d起恶臭物质的日总释放量迅速下降,但从第12 d起,恶臭物质的日总释放量急剧上升超过 $10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,这是源于实验12~20 d 氨气的大量释放.挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)的释放量逐天减少,在实验第1 d到第10 d的质量贡献率为22%~60%,之后不到每天总量的10%.

图1(b)以恶臭物质含碳量/添加VS量为计量

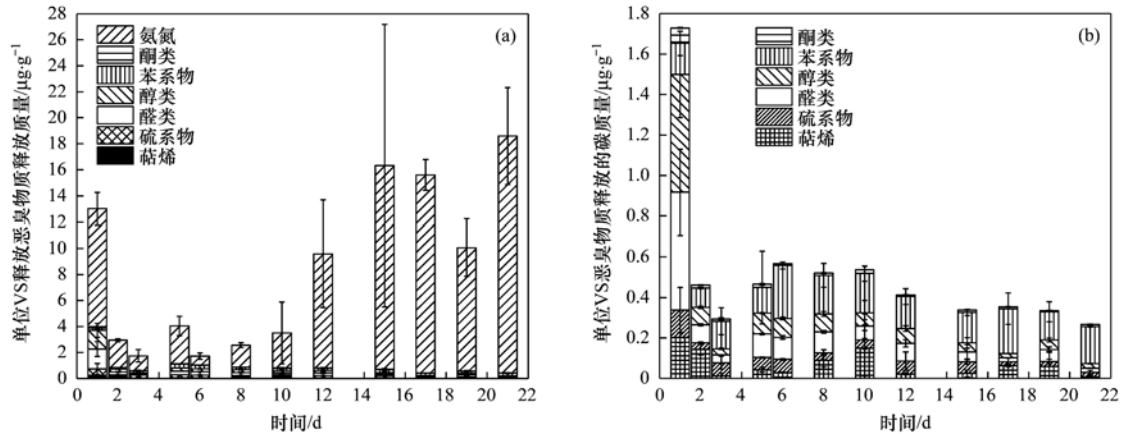


图1 21 d恶臭物质释放变化趋势及物质组成特征

Fig. 1 Total emission amount and composition of odor pollutants during 21 day odors emission potential test

在整个 OEP 实验过程中,未检测出硫化氢、二甲基三硫醚、二乙基硫醚、二乙基二硫醚、烯丙基甲基硫醚、丙酮、2-戊酮、3-戊酮和甲基异丁基酮,因此在实验结果及讨论中未作分析.从实验结果平行性看,醇类和羰基类(醛类和酮类)物质测试结果的平行性较好,而硫化物、苯系物和萜类物质测试结果的平行性较差.

2.2 OEP 实验过程中羰基类和醇类恶臭物质的组成特征

图2(a)表示羰基类 VOCs(醛、酮)释放特征.

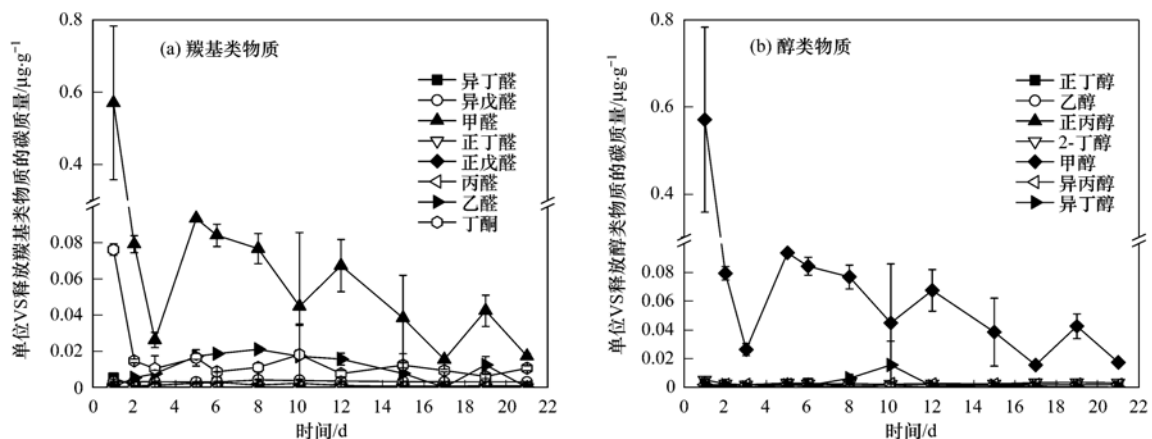


图2 羰基类物质和醇类物质日碳释放量变化规律

Fig. 2 Daily carbon emission amount of carbonyls and alcohols during the 21 days of the study period

基准,反映了 VOCs 的组成特征.从总含碳量来看,实验第1 d的日碳释放量最多,为 $1.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,迅速下降后在第5和第6 d小幅回升,直至实验结束一直缓慢下降.从物质组成比例看,第1 d的日释放含碳量中醛类和醇类为主导.从第2 d起,虽然日释放总碳量介于 $0.29 \sim 0.59 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 范围,但其组成随时间波动.实验第1 d以醛类物质、醇类物质为主,但随时间逐渐减少释放甚至不再释放,而苯系物在整个实验过程中持续稳定释放.

醛类化合物的释放量主要是甲醛和乙醛,其中甲醛日碳释放量最大值 $0.57 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 出现在第1 d.乙醛在第1~2 d释放很少,随后缓慢上升,于第8 d到达峰值 $0.021 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 后缓慢下降.酮类化合物只检测到丁酮,在整个实验过程中持续缓慢释放,日均碳释放量为 $0.027 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (范围 $0.0078 \sim 0.12 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$).

图2(b)为醇类物质释放特征.其中,甲醇日碳释放量最大,尤其在第1 d远高于其它醇类,达到 $0.57 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,第2、3 d迅速减少,在第5 d略微回升

后在 $0.015 \sim 0.077 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 区间内波动, 总体为下降趋势. 其它醇类日碳释放量在整个实验过程仅为 $0 \sim 0.062 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$.

2.3 OEP 实验过程中硫化物、苯系物及萜类恶臭物质的组成特征

图 3 表示了硫化物、苯系物及萜类物质在 21 d 中的日释放量变化规律.

由图 3(a) 可知, 在大部分实验时间段, 硫化物碳释放量主要源于二甲基硫醚, 最长达 $0.061 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (实验组 I 第 12 d). 甲硫醇主要于第 1~6 d 释放, 后期释放量少. 二硫化碳和羰基硫在整个过程中持续缓慢释放.

如图 3(b) 所示, 样品产生的苯系物中甲苯日碳释放量明显高于其它的苯系物, I 组峰值 $0.13 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 出现在第 3 d 和 21 d 共释放 $0.63 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; II 组在实验 15~18 d 释放较多甲苯, 峰值 $0.13 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 出现在第 15 d 和 21 d 共释放 $0.71 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. 虽然两实验组释放甲苯的趋势有所不同, 但总碳释放量相当. 其它苯系化合物的碳释放量平行性较好, 苯的碳释放量最小, 最大值仅为 $4.7 \times 10^{-3} \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. 乙苯、苯乙烯及邻/间/对二甲苯的碳释放量相当, 均表现出第 5 d 出现峰值并在整个过程中持续释放的特征.

萜类物质除了可能来自于家用芳香剂之外, 还

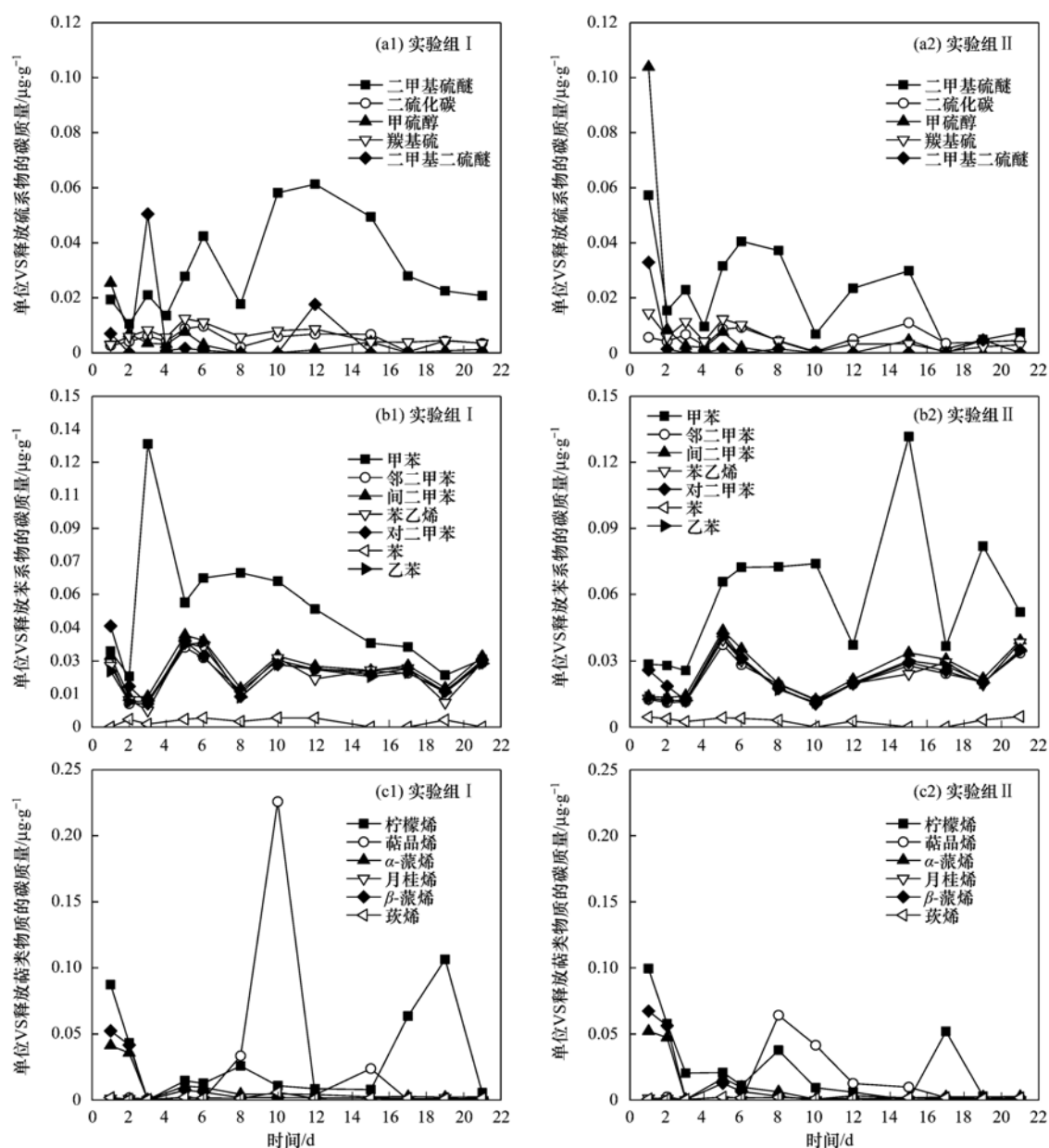


图 3 I、II 实验组的硫化物、苯系物和萜类物质的日释放量变化规律

Fig. 3 Daily emission amount of sulfur compounds, benzenes, and terpenes in each experiment group over 21 days

可能来自于植物和蔬菜类垃圾组分在有机物降解过程中的释放^[7, 28]。如图 3(c) 所示,柠檬烯在整个过程中均有释放,释放峰值主要出现在第 1 d 及第 17~19 d。萜品烯基本只在第 6~10 d 有较多释放,峰值是 II 组在第 8 d 释放 $0.064\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。 α -蒎烯和 β -蒎烯只在第 1~2 d 释放,月桂烯和苧烯在整个过程中基本无释放。在本实验中,由于实验对象为已经基本完成一次发酵的堆肥样品,非生物源的挥发性有机物应已经挥发完毕。因此,在本实验过程中产生的萜类化合物应源于有机物的生物降解。

2.4 固体样品中挥发性脂肪酸的释放特征

如图 4 所示,在整个实验过程中,固相样品只检测出乙酸和丙酸,乙酸含量高于丙酸,第 1 d 固相样品中所含的乙酸达到峰值 $1.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。随生物降解的进行,酸含量逐渐减少。

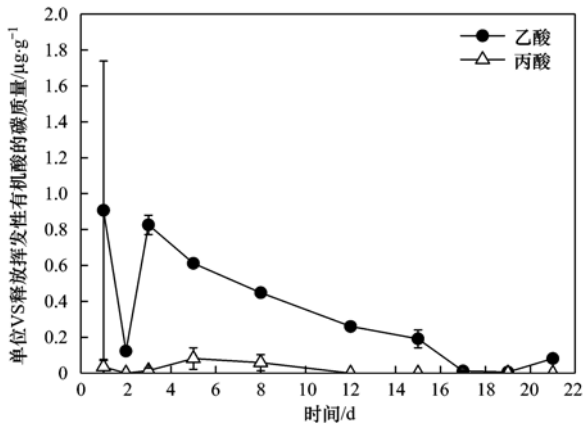


图4 挥发性脂肪酸的日释放量变化规律
Fig. 4 Daily emission amount of volatile fatty acids in 21 days

3 讨论

根据本实验结果,主发酵产物仍会释放多种恶臭物质,其直接利用的使用环境和用量共同影响环境恶臭水平。由于每种恶臭物质能被人辨识到的浓度不同,质量浓度不能直接反映其恶臭风险,研究者们提出了阈稀释倍数的概念^[29],阈稀释倍数为恶臭物质的物质质量浓度或体积浓度与该物质相应的嗅阈值之比。恶臭物质嗅阈值取自于已有的研究结果^[12, 30~32]。恶臭单元(odor unit, OU)常采用总和模型法,即恶臭单元为各组分恶臭物质的阈稀释倍数之和。尽管该方法未考虑各成分的气味加成和掩蔽作用,但可以初步评估恶臭对人体造成的嗅觉影响^[12]。

本文将以封闭环境和自然场地这两种基本利用场景为例,以恶臭单元为基准讨论主发酵产物合适的使用方式。

3.1 主发酵产物在封闭环境中的使用条件

在封闭环境中利用主发酵产物的情况主要可分为两类,一是少量暂时储存,另一类是作为室内绿植等的营养补给使用。假设每天进行一次空气净化,恶臭物质的扩散不存在梯度,环境浓度即源强质量与空间体积之比。在此假设上,以恶臭单元不超过 1 及每种恶臭物质阈稀释倍数不超过 1 为基准,估算了在单位空间内可以保证无异味影响的主发酵产物使用量。表 1 列出了主发酵产物最大使用量及 7 种限制主发酵产物使用量的主要恶臭物质。主发酵产物的最大使用量越小,说明对应物质的恶臭贡献越大。从表中可以看到,硫化物、氨气和萜类物质是主发酵产物在密闭环境中释放的恶臭特征物质。若全过程中所有恶臭物质均不产生臭味影响,每立方米内最多能放置 1 g 主发酵产物,主要限制因素为甲硫醇。而即使是到实验的第 15~21 d,氨气成为主发酵产物使用量的最大限制因素之一(以恶臭单元不超过 1 为基准,第 21 d 至多可使用 20 g 主发酵产物)。这说明主发酵产物在少量暂时储存的情况下会产生可察觉的臭味,需通过密封或覆盖等手段防止恶臭散发。而如果作为营养补给,则需要注意使用量的控制,或通过增强通风、土壤覆盖等措施以减少恶臭物质的环境浓度。

表 1 主发酵产物在密闭环境中的使用量及恶臭特征物质

Table 1 Characteristic odor substances emitted by fresh compost in the enclosed environment and the maximum application amount of fresh compost in the enclosed environment

恶臭物质	基于恶臭单元/该物质嗅阈值的 主发酵产物可使用量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	恶臭峰值 出现时间
全部恶臭物质	1.0	第 1 d
甲硫醇	2.5	第 1 d
氨气	29.6	第 21 d
二甲基硫醚	103.1	第 12 d
α -蒎烯	332.3	第 1 d
异丁醛	525.0	第 1 d
异戊醛	548.7	第 8 d
二甲基二硫醚	843.3	第 1 d

3.2 主发酵产物在自然场地中的施用条件

自然场地中使用主发酵产物需确定住宅区与场地相距的安全距离,以保证人们的生活质量不受影响^[33]。在自然环境中,恶臭污染扩散受物质物化性质、风场、大气稳定度、温度梯度、降雨、地形地物等多种因素的影响^[33~36]。本文提出一种理想的简化应用场景,即在一块平坦无起伏的自然场地(正方形边长为 a)上均匀施用主发酵产物,假设主发酵产物堆体高 h 取 0.05 m 以保证有氧条件,产物容重

取 $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。假设恶臭物质释放均匀持续, 周遭无建筑物遮挡影响。此处仅考察在实验过程中源强与嗅阈值之比均值最大的 7 种物质(甲硫醇、氨气、二甲基硫醚、 α -蒎烯、异丁醛、异戊醛、二甲基二硫醚), 不考虑释放的恶臭物质在空气中的氧化、相互作用、溶解或分解, 也不考虑因恶臭物质物化性质不同导致的扩散能力的区别。此处考虑最不利于恶臭物质扩散的气象情况, 即大气稳定度级别按 P-T 分类法分级为 F(稳定), 风场为静风条件^[37, 38]。基于以上假设, 以主发酵产物堆体为连续释放体源, 根据施用堆体的质量和尺寸来确定住宅区与该场地相距的最小防护距离。

静风状态的恶臭物质水平散布无明显方向性, 可假定铅直方向扩散服从高斯分布, 而水平方向是均匀的全方位扩散。根据文献[39]中的计算模型得到此场景中在 $(x, y, 0)$ 坐标出的恶臭浓度 c 如式(1)所示。

$$c(x, y, 0) = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \gamma_{02} (x^2 + y^2)} \times \left(1 - e^{-\frac{W^2}{2}}\right) \quad (1)$$

其中: $W = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{t_0 \gamma_{01}}$, $t_0 = \left(\frac{a^2 h}{\gamma_{01}^2 \gamma_{02}}\right)^{\frac{1}{3}} / 4.3$ 。式中, Q 为源强(以 0.5 h 的恶臭物质释放质量计), 分别是横向、铅直扩散参数回归系数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 此处分别取 $0.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[40]。当某点 $(x, y, 0)$ 计算所得的恶臭单元小于 1 时, 就得到了与主发酵产物使用量相对应的最小防护距离。为简化计算, y 轴坐标取 0, 该点处的 x 坐标值即为最小防护距离。

如图 5 所示, 居民区与施用场地的最小防护距离随着主发酵产物施用面积的增加而增加。甲硫醇作为主要恶臭贡献物质, 是最小防护距离的主要影响因素。尤其是甲硫醇在第 1 d 大量释放, 使得计入全过程恶臭物质排放的最小防护距离是不计入第 1 d 恶臭物质排放的最小防护距离的 3.5 倍。考虑到实际场景中的气象条件均比本文设想的更有利于恶臭扩散, 同时若在施用前对主发酵产物通过吸附、过滤等方法进行处理, 仅从恶臭影响这一点考虑, 在考虑到周边住宅区与场地距离的前提下适量的主发酵产物能够在自然场地中直接利用。

本研究仍有许多需进一步完善的方面。甲醇/甲醛、异戊醛/异丙醇这两种物质的计算方法其实对恶臭水平的评估有影响, 对比恶臭单元值与完全

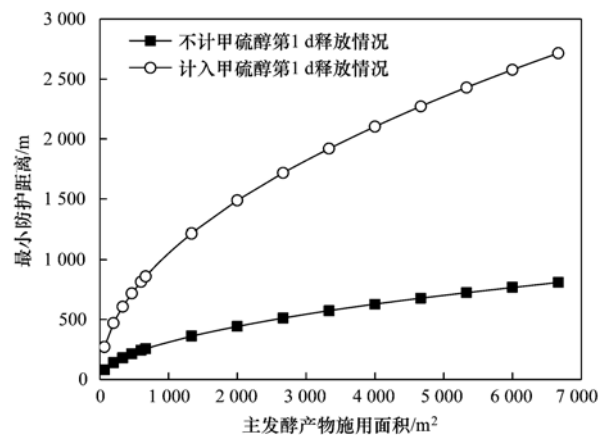


图 5 不同主发酵产物施用面积的最小防护距离

Fig. 5 Relationship between the minimum protection distance and application surface of fresh compost

为甲醇和异丙醇(均为高嗅阈值物质)、完全为甲醛和异戊醛(均为低嗅阈值物质)的两种情况发现, 计算方法对 1~6 d 和第 12 d 结果的影响在 $\pm 10\%$ 以内, 第 10、12、19 d 时均分计算所得恶臭单元值最小, 但计算方法的选择对第 8、17 和 21 d 的结果影响较大 ($\pm 30\%$)。因此, 数据处理方法也需要进一步考察, 或考虑采用其他手段对这些物质进行分析测试, 但对于本文考虑全过程影响的模拟场景而言, 数据处理方法的选择影响不大。此外, 过程为完全好氧条件, 未考虑在主发酵产物以堆放形式利用时, 可能存在的局部缺氧/厌氧区域的恶臭释放特征。模拟利用场景时, 并未考虑环境生物承载量、盐度等限制主发酵产物利用的因素。

4 结论

(1) 在恶臭潜力释放实验(21 d)中, 果蔬类垃圾主发酵产物主要在第 1 d 和第 12~21 d 释放恶臭物质, 氨气作为主要特征恶臭物质持续大量释放。硫化物、苯系物呈现全过程释放的特征, 醇类和醛类物质在第 1 d 大量释放, 之后释放量显著减少, 酮类物质在全过程中释放量少。萜类物质释放量在整个实验中都维持在较低水平。

(2) 通过模拟主发酵产物在封闭环境中少量储放和作为室内绿植营养补给的场景, 发现硫化物、氨气和萜类物质是恶臭特征物质。若在全过程中均不产生臭味影响, 每立方米空间内最多能放置 1 g 主发酵产物。这说明主发酵产物在少量储放的情况下会产生可察觉的臭味, 需通过密封或覆盖等手段防止恶臭散发。而如果作为室内绿植营养补给, 则需要注意使用量的控制, 也可通过土壤覆盖、增强

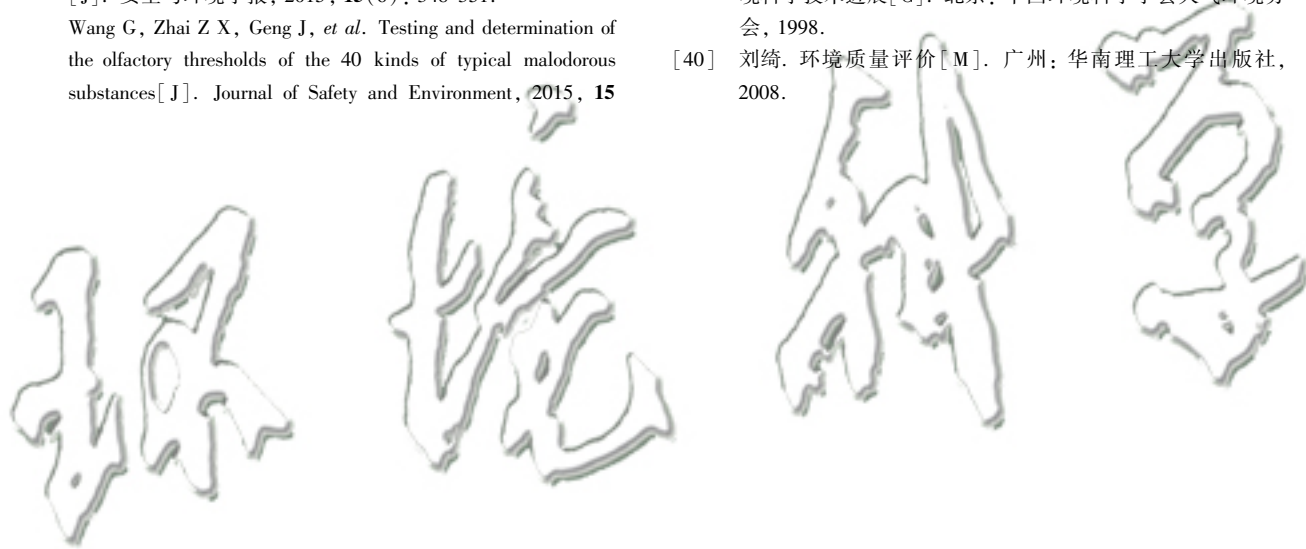
通风等措施以减少恶臭物质的环境浓度。

(3) 在模拟主发酵产物在自然场地中施用的场景中,最小防护距离随着主发酵产物施用面积的增加而增加。甲硫醇作为主要的恶臭贡献物质,是最小防护距离的主要影响因素。仅从恶臭影响这一点考虑,在考虑最小防护距离的前提下适量主发酵产物(施用厚度 < 0.05 m)能够在自然场地中直接利用。

参考文献:

- [1] 杨娜. 基于全生命周期分析的中国城市生活垃圾填埋过程环境影响[D]. 上海: 同济大学, 2014.
Yang N. Environmental impact analysis of municipal solid waste landfilling in China based on life cycle perspective [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [2] 国家发展改革委, 住房城乡建设部. 生活垃圾分类制度实施方案[R]. 北京: 国务院办公厅, 2017.
- [3] Zhang D Q, He P J, Jin T F, *et al.* Bio-drying of municipal solid waste with high water content by aeration procedures regulation and inoculation[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99** (18): 8796-8802.
- [4] Delgado-Rodríguez M, Ruiz-Montoya M, Giraldez I, *et al.* Influence of control parameters in VOCs evolution during MSW trimming residues composting[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2011, **59**(24): 13035-13042.
- [5] Shen Y J, Chen T B, Gao D, *et al.* Online monitoring of volatile organic compound production and emission during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 463-470.
- [6] D'Imporzano G, Crivelli F, Adani F. Biological compost stability influences odor molecules production measured by electronic nose during food-waste high-rate composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **402**(2-3): 278-284.
- [7] Scaglia B, Orzi V, Artola A, *et al.* Odours and volatile organic compounds emitted from municipal solid waste at different stage of decomposition and relationship with biological stability [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(7): 4638-4645.
- [8] Tsai C J, Chen M L, Ye A D, *et al.* The relationship of odor concentration and the critical components emitted from food waste composting plants [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (35): 8246-8251.
- [9] He P J, Tang J F, Yang N, *et al.* The emission patterns of volatile organic compounds during aerobic biotreatment of municipal solid waste using continuous and intermittent aeration [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, **62**(4): 461-470.
- [10] Zhang H Y, Schuchardt F, Li G X, *et al.* Emission of volatile sulfur compounds during composting of municipal solid waste (MSW) [J]. *Waste Management*, 2013, **33**(4): 957-963.
- [11] 方晶晶, 章骅, 吕凡, 等. 生活垃圾收运过程中恶臭暴露的健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(3): 906-916.
Fang J J, Zhang H, Lü F, *et al.* Health risk assessment of exposure to odorous pollutants emitted from the transportation process of MSW [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35** (3): 906-916.
- [12] Gallego E, Roca F J, Perales J F, *et al.* Characterization and determination of the odorous charge in the indoor air of a waste treatment facility through the evaluation of volatile organic compounds (VOCs) using TD-GC/MS [J]. *Waste Management*, 2012, **32**(12): 2469-2481.
- [13] Mustafa M F, Liu Y J, Duan Z H, *et al.* Volatile compounds emission and health risk assessment during composting of organic fraction of municipal solid waste [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **327**: 35-43.
- [14] Komilis D P, Ham R K, Park J K. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid wastes [J]. *Water Research*, 2004, **38**(7): 1707-1714.
- [15] Wu T, Wang X M, Li D J, *et al.* Emission of volatile organic sulfur compounds (VOSCs) during aerobic decomposition of food wastes [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44** (39): 5065-5071.
- [16] Maulini-Duran C, Puyuelo B, Artola A, *et al.* VOC emissions from the composting of the organic fraction of municipal solid waste using standard and advanced aeration strategies [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2014, **89** (4): 579-586.
- [17] Wu T, Wang X M. Emission of oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) during the aerobic decomposition of orange wastes [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **33**: 69-77.
- [18] Eitzer B D. Emissions of volatile organic chemicals from municipal solid waste composting facilities [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(4): 896-902.
- [19] Sundberg C, Yu D, Franke-Whittle I, *et al.* Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting [J]. *Waste Management*, 2013, **33**(1): 204-211.
- [20] Tolvanen O, Nykänen J, Nivukoski U, *et al.* Occupational hygiene in a Finnish drum composting plant [J]. *Waste Management*, 2005, **25**(4): 427-433.
- [21] Moreno A I, Arnáiz N, Font R, *et al.* Chemical characterization of emissions from a municipal solid waste treatment plant [J]. *Waste Management*, 2014, **34**(11): 2393-2399.
- [22] 邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 等. 生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1783-1791.
Shao Z Z, Zheng G D, Wang Y G, *et al.* Emission characteristics and ozone formation potential of VOCs from a municipal solid waste composting plant [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1783-1791.
- [23] Lü F, Shao L M, Zhang H, *et al.* Application of advanced techniques for the assessment of bio-stability of biowaste-derived residues: A minireview [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **248**: 122-133.
- [24] He P J, Wei S Y, Shao L M, *et al.* Emission potential of volatile sulfur compounds (VSCs) and ammonia from sludge compost with different bio-stability under various oxygen levels [J]. *Waste Management*, 2018, **73**: 113-122.
- [25] 何晶晶. 固体废物处理与资源化技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [26] DB31ZB5-15043, 湿垃圾处理残余物的生物稳定性评价方法[S].
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Gallego E, Roca F J, Perales J F, *et al.* Simultaneous evaluation of odor episodes and air quality. Methodology to identify air pollutants and their origin combining chemical analysis (TD-GC/MS), social participation and mathematical simulations techniques[A]. In: Romano G C, Conti A G. *Air Quality in the 21st Century*[M]. New York: Nova Science Publishers, 2009: 139-209.
- [30] Devos M, Patte F, Rouault J, *et al.* Standardized human olfactory thresholds[M]. Oxford: IRL Press at Oxford University Press, 1990.
- [31] Nagata Y, Takeuchi N. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method[J]. *Odor Measurement Review*, 2003, **118**: 118-127.
- [32] 王亘, 翟增秀, 耿静, 等. 40 种典型恶臭物质嗅阈值测定[J]. *安全与环境学报*, 2015, **15**(6): 348-351.
Wang G, Zhai Z X, Geng J, *et al.* Testing and determination of the olfactory thresholds of the 40 kinds of typical malodorous substances[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(6): 348-351.
- [33] Müller T, Thißen R, Braun S, *et al.* (M) VOC and composting facilities part 2: (M) VOC dispersal in the environment[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2004, **11**(3): 152-157.
- [34] 沈培明, 陈正夫, 张东平. 恶臭的评价与分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [35] 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.
- [36] Falk A, Gullstrand E, Löf A, *et al.* Liquid/air partition coefficients of four terpenes[J]. *British Journal of Industrial Medicine*, 1990, **47**(1): 62-64.
- [37] 王兴荣, 蒋年冲, 吴可军, 等. 大气污染研究中静风处理方法之探讨[J]. *环境科学*, 1987, **8**(1): 60-64.
- [38] 孙玫玲, 韩素芹, 姚青, 等. 天津市城区静风与污染物浓度变化规律的分析[J]. *气象与环境学报*, 2007, **23**(2): 21-24.
- [39] 张仁泉. 小风和静风状态下连续体源大气扩散模式的理论推导[A]. 见: 第七届全国大气环境学术会议论文集/大气环境科学技术进展[C]. 北京: 中国环境科学学会大气环境分会, 1998.
- [40] 刘绮. 环境质量评价[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2008.



CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	.....	.....
.....	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	.....	.....
.....	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	.....	.....
.....	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	.....	.....
.....	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	.....	.....
.....	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	.....	.....
.....	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	.....	.....
.....	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	.....	.....
.....	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	.....	.....
.....	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	.....	.....
.....	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)