

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邹晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛,李如梅,彭林,端允,王海京,李颖慧,白慧玲,牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳,邓黄月,张杰,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓,程思超,方舟,李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙,付晶森,郭雪峰,柴建恬,张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅,张崇森,王晓昌,吉铮,周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星,林建伟,詹艳慧,张志斌,邢云青,姜博汇,储鸣 (1936)

树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖,李大鹏,于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军,古文,刘济宁,石利利,徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波,徐辉,冯修平,李方,田晴,马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同,于德爽,李津,吴国栋,王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言,赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟,毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐,坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析

邵珠泽^{1,2}, 郑国砥^{1,2*}, 王元刚³, 高定¹, 朱彦莉^{1,2}, 陈同斌^{1,2}, 聂二旗^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 国家环境保护恶臭污染控制重点实验室, 天津 300191)

摘要: 针对生活垃圾堆肥处理设施生产工艺流程, 采用便携式气质联用仪分析了生活垃圾堆肥设施各工段 VOCs 的组分及含量, 并用等效丙烯浓度法与最大增量反应活性法计算了其臭氧生成潜势. 结果表明, 在垃圾卸料分选车间、一次发酵车间、二次发酵车间、堆肥产品存放车间以及厂界中 VOCs 的总浓度分别为 10 302.1、15 484.1、929.9、4 693.6 与 370.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 乙醇、柠檬烯和丙酮是生活垃圾堆肥设施释放 VOCs 的主要组成物质. 采用等效丙烯浓度法计算出的垃圾卸料分选车间、一次发酵车间、二次发酵车间、堆肥产品存放车间以及厂界中的臭氧生成潜势分别为 25 875.7、4 087.9、378.0、747.7 与 296.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 采用最大增量反应活性法时的臭氧生成潜势分别为 26 979.3、21 168.3、14 69.3、6 439.6 与 455.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 控制垃圾卸料分选车间和一次发酵车间的 VOCs 排放对减少空气污染, 降低生活垃圾堆肥处理设施臭氧生成潜势具有重要意义. 通过比较, 最大增量反应活性法更适合于计算生活垃圾堆肥设施中 VOCs 的臭氧生成潜势.

关键词: 生活垃圾; 堆肥; 挥发性有机物; 臭氧生成潜势; 等效丙烯浓度; 最大增量反应活性

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1783-09 DOI: 10.13227/j.hjxk.201609210

Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant

SHAO Zhu-ze^{1,2}, ZHENG Guo-di^{1,2*}, WANG Yuan-gang³, GAO Ding¹, ZHU Yan-li^{1,2}, CHEN Tong-bin^{1,2}, NIE Er-qi^{1,2}

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Odor Control, Tianjin 300191, China)

Abstract: In Beijing, the chemical composition and component concentrations of volatile organic compounds (VOCs) were investigated during the municipal solid waste composting process using a portable gas chromatograph coupled with a mass spectrometer. The contributions of VOCs to the ozone formation potential were computed using the maximum incremental reactivity (MIR) scale and the propylene-equivalent concentration scale. The results showed that the concentrations of waste discharge in the sorting room, the first fermentation workshop, the second fermentation workshop, the compost product workshop, and the plant boundary were 10 302.1, 15 484.1, 929.9, 4 693.6 and 370.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The main VOCs of the municipal solid waste composting plant were ethanol, limonene, and acetone. The propylene-equivalent concentrations of waste discharge in the sorting room, the first fermentation workshop, the second fermentation workshop, the compost product workshop, and the plant boundary were 25 875.7, 4 087.9, 378.0, 747.7 and 296.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, whereas the O_3 formation potentials computed using the MIR scale were 26 979.3, 21 168.3, 1 469.3, 6 439.6 and 455.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Reducing pollution by controlling the VOCs emission of waste discharge in the sorting room and the first fermentation workshop is important and can decrease the ozone formation potential. Given the accuracy and accessibility of the method, the MIR scale is more suitable for calculating the ozone formation potential of VOCs emitted from the municipal solid waste composting plant.

Key words: municipal solid waste; compost; volatile organic compounds; ozone formation potential; propylene-equivalent concentration; maximum incremental reactivity

中国大、中城市生活垃圾产生量已由 2009 年的 1.57×10^8 t 上升至 2014 年的 1.79×10^8 t^[1]. 随着垃圾产生量的不断增加, 垃圾处理设施面临着巨大的压力. 生活垃圾堆肥处理是在微生物作用下通过高温发酵使垃圾中的有机物矿质化、腐殖化. 堆肥处理可将生活垃圾变为富含氮磷钾与腐殖质的肥料, 是生活垃圾处理的一种手段. 20 世纪 90 年代, 中国建设了一大批生活垃圾堆肥处理设施. 但因为产品出路以

及堆肥处理设施臭气扰民等问题多数已经关停. 随着垃圾分类工作的开展, 以厨余为主的垃圾采用堆肥等生物处理的方式将会有新的增长. 截止 2014 年, 中国已建成并正常运行的生活垃圾堆肥处理设施

收稿日期: 2016-09-26; 修订日期: 2016-12-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC02B01)

作者简介: 邵珠泽(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固废处理设施恶臭污染治理, E-mail: zhuzeshao@vip.qq.com

* 通信作者, E-mail: zhenggd@igsnr.ac.cn

11 座,处理能力可达 $1.2 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ [2]。堆肥处理设施在运行过程中会产生新的污染物质,特别是会产生大量的挥发性有机物(VOCs),并且 VOCs 的种类十分多样。Maulini-Duran 等 [3] 发现,在生活垃圾堆肥过程中每千克干物质 VOCs 产生量可达 $(1.05 \pm 0.18) \text{ mg}$ 。Saldarriaga 等 [4] 研究表明,在生活垃圾堆肥的中期检测出多达 158 种的 VOCs,堆肥的前期 VOCs 主要以脂肪烃和萜烯为主,而中期以芳香烃为主。此外,垃圾堆肥参数的不同会对 VOCs 种类与浓度产生很大影响。在生活垃圾堆肥过程中,高通风量会促进 VOCs 的释放,低通风量下含硫有机物的释放量则会增加 [5]。吴婷等 [6] 进行的模拟试验表明,垃圾好氧发酵过程中垃圾组分不同,产生的 VOCs 成分与总量有很大不同。另外,不单是在垃圾处理过程中会产生 VOCs,处理完成后的垃圾仍会持续释放 VOCs。Moreno 等 [7] 的研究表明,垃圾堆肥厂处理后的堆肥产品也会释放大量 VOCs,腐熟堆肥释放的 TVOCs 仍可达到 $7306 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其主要物质为烯烃、含氧烃与芳香烃。

VOCs 在平流层中会加速臭氧的损耗,在对流层中则会促进臭氧的形成而造成光化学烟雾,更会直接对人类的健康造成影响 [8,9]。国家环境保护部发布 2016 年 4 月重点区域和 74 个城市空气质量状况报告表明,长三角、珠三角区域中,臭氧污染相比 2015 年同期继续恶化,并再次取代 $\text{PM}_{2.5}$,成为区域首要空气污染物。臭氧污染持续加重会成为未来一个长期趋势。

目前国内对于臭氧生成潜力的研究对象主要为城区空气、工业废气与机动车尾气等,许多学者对其进行了大量研究 [10-14]。由于生活垃圾处理设施的 VOCs 排放目前不是我国 VOCs 的主要排放源 [15],对其 VOCs 排放的研究主要集中于致臭物质上 [16],而对其造成的臭氧生成潜力则研究较少。本文以北京南宫生活垃圾堆肥厂为例,采集生活垃圾堆肥过程中各环节 VOCs 的种类与含量,计算各部位 VOCs 的臭氧生成潜力,从反应活性的角度筛选出主要污染物,以期为进一步准确评价与控制生活垃圾堆肥设施 VOCs 污染提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

选用采样袋外负压法采集气体样品。采样装置由采样器与采样袋两部分构成。采样器由肺式采样桶、采样枪、真空泵组成。采样时将采样袋放置于

采样桶内并将接口连接紧密,密闭采样桶后开启采样泵。采样泵将采样桶内气体抽取使采样桶内形成负压,待测气体可通过气体导管进入采样袋。采样袋为 8L 聚酯袋,具有较好的耐久性与化学稳定性。气体导管为聚四氟乙烯管,可减小气体样品的吸附。采样器与采样袋均为天津迪兰奥特环保科技开发公司生产。采样在北京南宫生活垃圾堆肥厂进行。该厂采用隧道式高温好氧堆肥发酵技术,每个隧道均有独立变频控制风机,并装有温度探头和氧气检测探头,能实时对隧道中垃圾的温度、湿度、氧气浓度等技术参数进行有效控制。垃圾在隧道中经过高温灭活,实现了无害化处理。由转运站运来的粒径 $15 \sim 80 \text{ mm}$,有机物含量在 50% 以上的垃圾经过卸料暂存、一次发酵(14 d)、二次发酵(21 d),得到堆肥产品。根据其工艺流程,分别在垃圾卸料分选车间、一次发酵车间、二次发酵车间、堆肥产品存放车间以及厂界设置采样点。具体布置参考相应国家标准 [17,18],卸料分选车间中在卸料坑上方进行采样,一次发酵车间与二次发酵车间选取在车间中心位置进行采样,堆肥产品存放车间中在堆肥产品上方进行采样,厂界采样点设置在堆肥厂办公楼前。采样时将采样枪口保持在距地面 1.5 m 左右处进行采样,每次采样前开启采样设备的清洗功能,用待测气体清洗采样袋 3 次以上,以减小采样袋本底值对采样结果产生的影响。

1.2 样品分析

由于 VOCs 具有较高活性,为了减小采样与分析间隔时间过长所带来的误差,采用 HAPSITE ER 型便携气相色谱质谱联用仪(美国 INFICON 公司)对采集的气体样品现场进行分析。该型号便携式 GC-MS 尺寸为 $46 \text{ cm} \times 43 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$,重量约 19 kg,内置电池在正常工作条件下可使用 2~3 h,使用专用小瓶氮气(纯度 $\geq 99.9995\%$)与小瓶内标气(内含 1,3,5-三氟甲基苯与溴五氟苯两种内标气)。日常维护较为简单,仅需保持每周开机运行一次即可。便携气相色谱质谱联用仪精密性与准确度略低于大型台式仪器,但仍能满足分析要求 [19],目前已被国内外许多环境监测部门、科研院所、军队用于日常检测和应急检测 [20,21]。

仪器使用前使用 TO15 混合标气(64 种物质)、PAMs 混合标气(57 种物质)、硫化物混合标气(5 种物质)、萜烯混合标气(3 种物质)进行了校准。利用 ER IQ 软件的校准功能对标气谱图进行分析,从中选取将标准曲线与回归方程整合到分析方法文

件中,通过无线传输导入到仪器内置存储中。

样品分析时将采样袋与便携式 GC-MS 采样手柄接口相连,运行相应分析方法后自动进行管路清洗。待测气体样品经过 TRI-BED 浓缩管(活性炭、硅胶、Tanex 三合一)浓缩后开始进行分析,进样体积设置为 100 mL。色谱采用 Rtx-1MS 色谱柱(15 m × 0.25 mm × 1.0 μm),载气为高纯氮气。升温程序设置如下:50℃ 保持 7 min,5℃·min⁻¹ 升温至 110℃,20℃·min⁻¹ 升温至 180℃,保持 1.5 min。质谱扫描范围为 40~300 u,离子能量为 70 eV。得到谱图后利用 NIST 库进行检索,对样品各组分进行定性分析。利用 ER IQ 软件通过含有标准曲线的方法文件对样品各组分进行定量分析。

1.3 臭氧生成潜势分析方法

VOCs 臭氧生成潜势的研究方法主要有 OH 自由基反应速率法、等效丙烯浓度法和最大增量反应活性法(MIR)等^[22,23]。自由基反应速率法是用 VOCs 与 OH 自由基的反应速率来表示 VOCs 的反应活性,可用如下公式表示:

$$L^{\text{OH}} = K^{\text{OH}} \cdot c_{\text{VOC}} \quad (1)$$

式中, L^{OH} 为某种 VOC 与 OH 自由基的反应速率, K^{OH} 为该种 VOC 与 OH 自由基的反应速率常数, c_{VOC} 为 VOC 的浓度。

等效丙烯浓度法是在自由基反应速率法的基础上,将各种 VOC 的自由基反应速率以丙烯的自由基反应速率为基础进行归一化处理,其计算公式如下:

$$c_{\text{PEC}} = \frac{K^{\text{OH}} \cdot c_{\text{VOC}}}{K_{\text{p}}^{\text{OH}}} \quad (2)$$

式中, c_{PEC} 为某 VOC 的等效丙烯浓度, K^{OH} 为该种 VOC 与 OH 自由基的反应速率常数, c_{VOC} 为 VOC 的浓度, K_{p}^{OH} 为丙烯与 OH 自由基的反应速率常数,试验中反应速率常数采用文献[24]的研究结果。

最大增量反应活性法(MIR)是根据 VOCs 的最大增量反应活性来表示其反应活性与臭氧生成潜势,可用如下公式表示:

$$c_{\text{OFP}} = c_{\text{VOC}} \cdot K_{\text{MIR}} \quad (3)$$

式中, c_{OFP} 为某种 VOC 的臭氧生成潜势, c_{VOC} 为该 VOC 的浓度, K_{MIR} 为 VOC 相应的臭氧生成潜势系数,在本研究中采用 Carter 的研究结果^[25]。

过氧自由基(RO_2)是形成臭氧和二次气溶胶等大气污染物的重要物质,OH 自由基反应速率法与等效丙烯浓度法就是通过计算 VOCs 与 OH 自由基产生过氧自由基的能力来表达臭氧生成潜势。两种方法所需的常数简单易查,但忽略了 VOCs 在大气

中的二次反应。而最大增量反应活性法则考虑 VOCs 在大气中的一系列反应,从而计算出臭氧生成潜势,其缺点在于目前还没有某些 VOCs 的系数,在计算过程中不得不忽略这些物质,由此对最终结果产生较大影响。

由 OH 自由基反应速率法与等效丙烯浓度法原理与计算公式可以看出两种方法原理相同,等效丙烯浓度法只是在 OH 自由基反应速率法的基础上进行了归一化。两种方法相同情况下对某种 VOCs 臭氧生成潜势的评价相同,只是在数值上有所不同,因此结果分析中计算臭氧生成潜势只采用等效丙烯浓度法与最大增量反应活性法两种方法。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 成分与浓度

生活垃圾堆肥设施各样点样品 VOCs 浓度如表 1 所示。在垃圾堆肥设施中共检测出 47 种 VOCs,其中烷烃 8 种、烯烃 4 种、芳香烃 11 种、卤代烃 16 种、含氧烃 4 种、含硫有机物 4 种。其中,卸料分选车间中共检出烷烃 4 种、烯烃 3 种、芳香烃 8 种、卤代烃 6 种、含氧烃 2 种、含硫有机物 2 种共计 25 种 VOCs,其中浓度由高到低为含氧烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、烷烃、硫化物,浓度分别为 5 373.7、4 051.4、374.6、364.5、86.7、51.2 μg·m⁻³。浓度较高的物质为柠檬烯、乙醇、丙酮,其浓度分别达到了 4 005.4、4 863.2、510.5 μg·m⁻³,分别占总量的 38.9%、47.2%、5.0%。由于卸料分选车间中主要为当天的新鲜垃圾,其在卸料分选车间中停留时间较短,发生分解的主要是生活垃圾中的易腐部分,特别是其中的厨余垃圾。而厨余垃圾的分解会产生大量的乙醇、萜烯、酮类物质^[26,27],因此在垃圾卸料分选车间乙醇、柠檬烯、丙酮的浓度较高。

在一次发酵过程中,由于温度变化剧烈,经过 7 d 的发酵后检测到的 VOCs 45 种,其中烷烃 8 种,烯烃 4 种,芳香烃 10 种,卤代烃 15 种,含氧烃 4 种,含硫化合物 4 种。按含量计算,车间中的主要 VOCs 为含氧烃,其次为卤代烃、烯烃、芳香烃、烷烃与硫化物,其含量分别为 13 550.4、726.7、419.1、309.6、245.7、232.6 μg·m⁻³。其中,浓度较高的物质为乙醇、丙酮、柠檬烯,其含量分别为 12 623.8、699.1、356.5 μg·m⁻³,分别占总量的 81.5%、4.5%、2.3%。由于生活垃圾中含有一定量餐厨垃圾,因此生活垃圾好氧发酵过程会释放大量乙醇,张红玉等^[28]的研究结果同样证实了这一点。

表 1 生活垃圾堆肥厂 VOCs 浓度¹⁾/μg·m⁻³Table 1 Concentration of VOCs components from MSW compost plant/μg·m⁻³

物质名称	卸料分选车间	一次发酵车间	二次发酵车间	堆肥产品车间	厂界
丁烷	—	102.1	14.5	—	—
戊烷	—	82.8	40.9	—	—
环戊烷	—	5.6	0.7	—	—
正庚烷	17.1	12.6	2.5	110.5	—
辛烷	—	3.9	—	19.0	—
癸烷	32.9	14.5	—	42.9	—
十一烷	15.9	12.5	0.6	20.1	—
十二烷	20.8	11.7	2.6	58.0	—
丙烯	—	22.1	12.8	—	—
苯乙烯	13.2	7.6	—	9.5	0.4
α-蒎烯	32.8	32.9	16.7	—	—
柠檬烯	4 005.4	356.5	35.8	—	45.2
苯	7.9	30.1	11.6	10.7	6.9
甲苯	131.5	81.6	19.9	79.8	15.9
乙苯	70.7	62.2	7.0	14.5	3.2
间/对-二甲苯	73.8	59.0	7.0	6.0	4.8
邻二甲苯	66.4	39.8	2.5	41.1	2.1
1,3,5-三甲苯	7.3	5.4	1.3	12.8	0.9
1,2,4-三甲苯	7.6	20.3	3.5	11.6	0.6
1,2,3-三甲苯	9.4	—	—	16.5	—
间-二乙苯	—	4.0	—	—	—
对-二乙苯	—	7.3	2.0	—	—
F12(氯氟甲烷)	—	5.3	10.6	—	—
氯甲烷	—	1.1	4.1	—	—
F11(三氯氟甲烷)	138.7	2.0	1.7	269.5	7.0
二氯甲烷	142.7	29.4	11.4	3.6	18.4
氯仿	—	168.3	25.2	—	—
四氯化碳	—	47.2	8.6	—	—
氯乙烷	—	23.3	1.6	—	52.7
1,1-二氯乙烷	2.8	110.3	16.1	32.6	—
1,2-二氯乙烷	38.7	190.5	27.0	15.4	7.1
1,1,2-三氯乙烷	—	1.1	0.2	—	—
1,1-二氯乙烯	—	3.7	—	—	—
反-1,2-二氯乙烯	—	72.6	11.2	—	—
顺-1,2-二氯乙烯	—	12.5	1.5	—	—
1,3-二氯苯	23.3	—	—	56.7	1.4
氯苯	—	4.3	0.5	—	—
1,4-二氯苯	18.3	37.1	4.4	14.8	1.1
乙醇	4 863.2	12 623.8	616.4	3 570.5	—
丙酮	510.5	699.1	—	42.4	202.7
乙酸乙酯	—	204.7	—	—	—
2-己酮	—	22.8	4.4	—	—
甲硫醇	—	15.9	—	—	—
甲硫醚	—	32.1	—	—	—
二硫化碳	10.4	15.3	—	—	—
二甲二硫	40.8	169.3	3.1	10.2	—
总量	10 302.1	15 484.1	929.9	4 693.6	370.4

1) “—”代表未检出;间、对二甲苯出峰时间相同,在后续计算中取平均值作为其各自浓度

二次发酵车间中检测到 35 种 VOCs,其中烷烃 6 种,烯烃 3 种,芳香烃 9 种,卤代烃 14 种,含氧烃 2 种,含硫化合物 1 种。经过一次发酵后,物料中有有机物大部分已被分解,二次发酵过程产生的 VOCs 浓

度大大降低,其浓度由高到低为含氧烃 620.8 μg·m⁻³、卤代烃 124.1 μg·m⁻³、烯烃 65.3 μg·m⁻³、烷烃 61.8 μg·m⁻³、芳香烃 54.7 μg·m⁻³与含硫化合物 3.1 μg·m⁻³。

此外,在堆肥产品存放车间中也检测出 23 种 VOCs,其中烷烃 5 种、烯烃 1 种、芳香烃 8 种、卤代烃 6 种、含氧烃 2 种、含硫化合物 1 种,各种 VOCs 的总浓度为 $4\ 693.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 相比于二次发酵 VOCs 总浓度,堆肥存放车间的 VOCs 总浓度有一定的增加,可能是堆肥产品在车间堆放时其堆体处于厌氧状态,依旧会产生并释放一定的 VOCs.

通过比较堆肥处理过程中各部位的 VOCs 总浓度可以看出,该生活垃圾堆肥设施堆肥各个阶段的总浓度可达 $31\ 780.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中 VOCs 浓度最高的为一次发酵阶段,可达 $15\ 484.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其次为垃圾卸料分选车间,其 VOCs 浓度可达 $10\ 302.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 二次发酵车间中,VOCs 浓度降至 $929.9\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明在二次发酵阶段之前大部分有机物已经得到分解. 堆肥产品车间中 VOCs 的总浓度达到了 $4\ 693.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明堆肥处理结束后,产品依旧会发生缓慢的降解和腐熟,伴随着后熟过程释放的

VOCs 也不容忽视.

2.2 VOCs 臭氧生成潜势分析

由于某些卤代烃、硫化物的含量较低,并且其 OH 自由基反应速率常数以及 MIR 系数难以查到(其余物质的相关参数见表 2),因此在计算臭氧生成潜势时忽略了这些物质. 垃圾堆肥厂样品 VOCs 臭氧生成潜势如表 3、表 4 所示. 采用等效丙烯浓度法,卸料分选车间、一次发酵车间、二次发酵车间、堆肥产品存放车间与厂界的等效丙烯浓度分别是 25 875.7、4 087.9、378.0、747.7、296.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 在卸料分选车间样品中,柠檬烯与乙醇,柠檬烯的贡献率甚至达到了 96% 以上. 在一次发酵车间中,柠檬烯与乙醇是对臭氧生成潜势贡献较大的物质,这两种物质的臭氧生成潜势分别为 2 223.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、1 536.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其贡献率分别为 54.4% 与 37.6%. 而在堆肥产品车间中,乙醇与芳香烃为等效丙烯浓度较高的物质,其贡献率分别达到了 58.1% 与 19.8%.

表 2 OH 自由基反应速率常数与 MIR 系数¹⁾

Table 2 Coefficients of MIR scale and propylene-equivalent concentration scale

物质名称	K^{OH}	MIR 系数	物质名称	K^{OH}	MIR 系数
丁烷	2.38	1.15	氯甲烷	0.044 8	0.038
戊烷	3.84	1.31	F11(三氯氟甲烷)	—	—
环戊烷	5.02	2.39	二氯甲烷	0.145	0.041
正庚烷	6.81	1.07	氯仿	0.106	0.022
辛烷	8.16	0.9	四氯化碳	—	—
癸烷	11	0.68	氯乙烷	0.418	0.29
十一烷	12.3	0.61	1,1-二氯乙烷	0.26	0.069
十二烷	13.2	0.55	1,2-二氯乙烷	0.253	0.21
丙烯	26	11.66	1,1,2-三氯乙烷	0.2	0.086
苯乙烯	58	2.2	1,1-二氯乙烯	10.9	1.76
α -蒎烯	51.8	4.51	反-1,2-二氯乙烯	2.32	1.7
柠檬烯	163	4.55	顺-1,2-二氯乙烯	—	—
苯	1.22	0.72	1,3-二氯苯	—	—
甲苯	5.58	4	氯苯	0.77	0.32
乙苯	7	2.7	1,4-二氯苯	0.555	0.178
间-二甲苯	23.1	9.75	乙醇	3.2	1.34
对-二甲苯	14.3	5.84	丙酮	0.17	0.56
邻-二甲苯	13.6	7.64	乙酸乙酯	1.6	0.007 2
1,3,5-三甲苯	56.7	11.76	2-己酮	9.1	3.14
1,2,4-三甲苯	32.5	8.87	甲硫醇	—	—
1,2,3-三甲苯	32.7	11.97	甲硫醚	—	—
间-二乙苯	18.6	7.39	二硫化碳	2.76	0.25
对-二乙苯	11.8	5.59	二甲二硫	—	—
F12(二氯二氟甲烷)	—	—			

1) “—”代表未查到相应常数

采用 MIR 法时,臭氧生成潜势由高到低分别为垃圾卸料与分选车间、一次发酵车间、堆肥产品存放车间、二次发酵车间与厂界,其浓度分别为

26 979.3、21 168.3、6 439.6、1 469.3 与 455.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其中,柠檬烯与乙醇是卸料车间中对臭氧生成潜势贡献较大的物质,柠檬烯的贡献率达到了

67.6%,乙醇的贡献率达到了24.2%。一次发酵车间中,乙醇贡献率达到了79.9%。在堆肥产品存放车间乙醇与芳香烃的贡献率分别为74.3%和20.9%,总贡献率超过了95%。

可以看出,两种方法中各设施臭氧生成潜势由高到低顺序一致,乙醇与柠檬烯均有较高贡献率。并且,等效丙烯浓度法中柠檬烯的贡献更为显著,而MIR法中乙醇的贡献则明显上升。以卸料分选车间为例,柠檬烯臭氧生成潜势所占总量的比例由MIR法中的67.6%上升至等效丙烯浓度法中的96.3%,而乙醇则由MIR法中的24.2%下降至等效丙烯浓

度法中的2.3%。此外,柠檬烯与乙醇作为贡献臭氧生成潜势的重要物质,其OH自由基反应速率常数要远高于MIR系数,说明这两种物质在大气中虽然有很强的生成臭氧中间产物的能力,但之后的一系列反应会降低其最终产生的臭氧量。作为生活垃圾堆肥设施产生的主要物质之一,如不综合考虑其在大气中发生的后续化学反应,仅以中间产物作为衡量臭氧生成潜势的标准,势必会使结果产生较大误差。因此,对于像生活垃圾堆肥厂,这类具有各类VOC差距较大、主要排放的VOCs种类较少、MIR系数易查等特点的设施,MIR法更适合用于计算其

表3 垃圾堆肥厂VOCs臭氧生成潜势¹⁾(等效丙烯浓度法)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Ozone formation potential of VOCs from MSW compost plant(propylene-equivalent concentration scale)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

物质名称	卸料分选车间	一次发酵车间	二次发酵车间	堆肥产品车间	厂界
丁烷	—	9.2	1.3	—	—
戊烷	—	12.0	5.9	—	—
环戊烷	—	1.1	0.1	—	—
正庚烷	4.4	3.2	0.6	28.4	—
辛烷	—	1.2	—	58.6	—
癸烷	13.8	6.1	—	17.9	—
十一烷	7.4	5.8	0.3	9.4	—
十二烷	10.4	5.9	1.3	29.1	—
丙烯	—	22.1	12.8	—	—
苯乙烯	29.1	16.8	—	21.0	0.9
α -蒎烯	65.2	65.4	33.2	—	—
柠檬烯	24 976.6	2 223.0	223.2	—	281.9
苯	0.4	1.4	0.5	0.5	0.3
甲苯	28.2	17.5	4.3	17.1	3.4
乙苯	18.8	16.6	1.9	3.9	0.9
间-二甲苯	32.4	25.9	3.1	26.3	2.1
对-二甲苯	20.1	16.0	1.9	16.3	1.3
邻-二甲苯	34.3	20.6	1.3	21.3	1.1
1,3,5-三甲苯	15.7	11.6	2.8	27.6	1.9
1,2,4-三甲苯	9.4	25.1	4.3	14.3	0.7
1,2,3-三甲苯	11.7	—	—	20.5	—
间-二乙苯	—	2.8	—	—	—
对-二乙苯	—	3.3	0.9	—	—
二氯甲烷	0.8	0.2	0.1	—	0.1
氯仿	—	0.7	0.1	—	—
氯乙烷	—	0.4	—	—	0.8
1,1-二氯乙烷	—	1.1	0.2	0.3	—
1,2-二氯乙烷	0.4	1.8	0.3	0.1	0.1
1,1,2-三氯乙烷	—	—	—	—	—
1,1-二氯乙烯	—	1.5	—	—	—
反-1,2-二氯乙烯	—	6.4	1.0	—	—
氯苯	—	0.1	—	—	—
1,4-二氯苯	0.4	0.8	0.1	0.3	—
乙醇	591.7	1 536.0	75.0	434.4	—
丙酮	3.3	4.5	—	0.3	1.3
乙酸乙酯	—	12.5	—	—	—
2-己酮	—	7.9	1.5	—	—
二硫化碳	1.1	1.6	—	—	—
总量	25 875.7	4 087.9	378.0	747.7	296.8

1)“—”代表数值小于0.05

表 4 垃圾堆肥厂 VOCs 臭氧生成潜势¹⁾ (MIR 法)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Table 4 Ozone formation potential of VOCs from MSW compost plant(MIR scale)/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

物质名称	卸料分选车间	一次发酵车间	二次发酵车间	堆肥产品车间	厂界
丁烷	—	104.1	14.8	—	—
戊烷	—	86.1	42.5	—	—
环戊烷	—	13.4	1.7	—	—
正庚烷	13.9	10.2	2.0	89.5	—
辛烷	—	2.3	—	114.0	—
癸烷	15.1	6.7	—	19.7	—
十一烷	6.7	5.3	0.3	8.4	—
十二烷	7.9	4.4	1.0	22.0	—
丙烯	—	207.7	120.3	—	—
苯乙烯	29.0	16.7	—	20.9	0.9
α -蒎烯	108.2	108.6	55.1	—	—
柠檬烯	18 224.6	1 622.1	162.9	—	205.7
苯	3.3	12.6	4.9	4.5	2.9
甲苯	355.1	220.3	53.7	215.5	42.9
乙苯	190.9	167.9	18.9	39.2	8.6
间二甲苯	302.6	241.5	28.7	246.0	19.7
对二甲苯	243.5	194.4	23.1	198.0	15.8
邻二甲苯	431.6	258.7	16.3	267.2	13.7
1,3,5-三甲苯	73.7	54.5	13.1	129.3	9.1
1,2,4-三甲苯	66.9	178.6	30.8	102.1	5.3
1,2,3-三甲苯	83.7	—	—	146.9	—
间-二乙苯	—	29.6	—	—	—
对-二乙苯	—	40.8	11.2	—	—
二氯甲烷	5.9	1.2	0.5	0.1	0.8
氯仿	—	3.7	0.6	—	—
氯乙烷	—	6.8	0.5	—	15.3
1,1-二氯乙烷	0.2	7.6	1.1	2.2	—
1,2-二氯乙烷	8.1	4	5.7	3.2	1.5
1,1,2-三氯乙烷	—	0.1	—	—	—
1,1-二氯乙烯	—	6.5	—	—	—
反-1,2-二氯乙烯	—	123.4	19.0	—	—
氯苯	—	1.4	0.2	—	—
1,4-二氯苯	3.3	6.6	0.8	2.6	0.2
乙醇	6 516.7	16 915.9	826.0	4 784.5	—
丙酮	285.9	391.5	—	23.7	113.5
乙酸乙酯	—	1.5	—	—	—
2-己酮	—	71.6	13.8	—	—
二硫化碳	2.6	3.8	—	—	—
总量	26 979.3	21 168.3	1 469.3	6 439.6	455.8

1) “—”代表数值小于 0.05

臭氧生成潜势.

从反应活性的角度,柠檬烯与乙醇是生活垃圾堆肥设施光化学污染的主要物质,与城区大气或其它工业设施明显不同.在城区大气中,烯烃与芳香烃对臭氧生成潜势的贡献最大^[29,30],而在石化企业、制药厂、酒厂等工业源污染的大气中,苯、甲苯等物质是臭氧生成潜势的主要来源^[31-34].因此,在受多种污染源影响下的大气中,可通过计算柠檬烯、乙醇、苯系物、烯烃等的比例来确定各污染源对大气整体臭氧生成潜势的贡献率.

3 结论

一次发酵车间与垃圾卸料分选车间是生活垃圾堆肥设施 VOCs 的主要排放源,其浓度分别为 $15\,484.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 与 $10\,302.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,生活垃圾堆肥产品车间 VOCs 的排放也不能忽视.乙醇、柠檬烯是生活垃圾堆肥设施释放 VOCs 的主要物质.采用 MIR 法时垃圾卸料分选车间、一次发酵车间、二次发酵车间、堆肥产品存放车间以及厂界中的臭氧生成潜势分别为 26 979.3、21 168.3、1 469.3、

6 439.6、455.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。虽然一次发酵车间的 VOCs 浓度最高,但是臭氧生成潜势的计算结果表明,VOCs 浓度相对偏低的垃圾卸料分选车间臭氧生成潜势反而更高。控制垃圾卸料分选车间和一次发酵车间的 VOCs 排放对减少空气污染,降低生活垃圾堆肥处理设施臭氧生成潜势十分关键。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [2] 中国城市环境卫生协会. 中国城市环境卫生行业发展报告[R]. 北京: 中国城市环境卫生协会, 2014.
- [3] Maulini-Duran C, Artola A, Font X, *et al.* Gaseous emissions in municipal wastes composting: effect of the bulking agent[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **172**: 260-268.
- [4] Saldarriaga J F, Aguado R, Morales G E. Assessment of VOC emissions from municipal solid waste composting [J]. *Environmental Engineering Science*, 2014, **31**(6): 300-307.
- [5] Delgado-Rodríguez M, Ruiz-Montoya M, Giraldez I, *et al.* Effect of aeration rate and moisture content on the emissions of selected VOCs during municipal solid waste composting[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2012, **14**(4): 371-378.
- [6] 吴婷, 王新明. 食品垃圾好氧降解过程中挥发性有机物(VOCs)排放特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(10): 2575-2583.
- Wu T, Wang X M. Release of volatile organic compounds from food wastes during the aerobic decomposition[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(10): 2575-2583.
- [7] 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.
- [8] Araki A, Kawai T, Eitaki Y, *et al.* Relationship between selected indoor volatile organic compounds, so-called microbial VOC, and the prevalence of mucous membrane symptoms in single family homes [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(10): 2208-2215.
- [9] Jobson B T, Berkowitz C M, Kuster W C, *et al.* Hydrocarbon source signatures in Houston, Texas; influence of the petrochemical industry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(D24): D24305.
- [10] Li L Y, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and their role in ground-level ozone formation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **113**: 247-254.
- [11] Ayoko G A, Singh A, Lim M C H, *et al.* Characterization of VOCs from LPG and unleaded petroleum fuelled passenger cars [J]. *Fuel*, 2014, **115**: 636-643.
- [12] Tsai J H, Huang P H, Chiang H L, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds from motorcycle exhaust emission during real-world driving[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 215-226.
- [13] 莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 等. 长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- Mo Z W, Niu H, Lu S H, *et al.* Process-based emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from paint industry in the Yangtze River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- [14] Dong D, Shao M, Li Y, *et al.* Carbonyl emissions from heavy-duty diesel vehicle exhaust in China and the contribution to ozone formation potential [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 122-128.
- [15] 刘金凤, 赵静, 李焱焱, 等. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(6): 496-500.
- Liu J F, Zhao J, Li T T, *et al.* Establishment of Chinese anthropogenic source volatile organic compounds emission inventory [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(6): 496-500.
- [16] 刘强, 陈荣, 张晓岚, 等. 生物滤池净化城市生活垃圾 BMT 发酵恶臭气体的研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1441-1445.
- Liu Q, Chen R, Zhang X L, *et al.* Removal of odors from fermentation process of MSW biological mechanical treatment using compost biofilter [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(5): 1441-1445.
- [17] GB 14554-1993, 恶臭污染物排放标准[S].
- [18] GB 16297-1996, 大气污染物综合排放标准[S].
- [19] 吕怡兵, 孙晓慧, 付强. 便携式气相色谱-质谱仪测定空气中挥发性有机污染物的准确性[J]. *色谱*, 2010, **28**(5): 470-475.
- Lü Y B, Sun X H, Fu Q. Veracity on determination of volatile organic compounds in the air by portable gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2010, **28**(5): 470-475.
- [20] 许秀艳, 朱擎, 谭丽, 等. 水中挥发性有机物的分析方法综述[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3606-3612.
- Xu X Y, Zhu Q, Tan L, *et al.* An overview on analytical method of volatile organic compounds in water [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3606-3612.
- [21] Harshman S W, Dershem V L, Fan M N, *et al.* The stability of Tenax TA thermal desorption tubes in simulated field conditions on the HAPSITE[®] ER [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2015, **95**(11): 1014-1029.
- [22] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 358-366.
- [23] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 10-16.
- Wu F K, Wang Y S, An J L, *et al.* Study on concentration, ozone production potential and sources of VOCs in the atmosphere of Beijing during Olympics period [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 10-16.
- [24] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(10): 5324-5335.
- [25] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications[EB/OL]. <http://www.cert.ucr.edu/~carter/SAPRC/MIR10.pdf>, 2010-01-28.

- [26] Kong X, Liu J G, Song M Y, *et al.* Spatial and temporal variability of odorous VOC in a food waste treatment plant using hydrothermal hydrolysis and aerobic fermentation technology[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2015, **17**(4): 626-636.
- [27] 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.
- [28] 张红玉, 邹克华, 杨金兵, 等. 厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2563-2568.
Zhang H Y, Zou K H, Yang J B, *et al.* Analysis of odor pollutants in kitchen waste composting [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(8): 2563-2568.
- [29] 王红丽. 上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
Wang H L. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the formation of ozone in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- [30] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing Urban District[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 443-451.
- [31] 王刚, 魏巍, 米同清, 等. 典型工业无组织源 VOCs 排放特征[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 1957-1964.
Wang G, Wei W, Mi T Q, *et al.* Characteristics of VOCs emitted from typical industrial fugitive[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 1957-1964.
- [32] Jia C H, Mao X X, Huang T, *et al.* Non-methane hydrocarbons (NMHCs) and their contribution to ozone formation potential in a petrochemical industrialized city, Northwest China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **169**: 225-236.
- [33] 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 等. 浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1864-1870.
Xu Z R, Wang Z M, Xu M Z, *et al.* Health risk assessment and ozone formation potentials of volatile organic compounds from pharmaceutical industry in Zhejiang Province[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 1864-1870.
- [34] Wei W, Lv Z F, Cheng S Y, *et al.* Characterizing ozone pollution in a petrochemical industrial area in Beijing, China: a case study using a chemical reaction model[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(6): 377.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhe, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper (II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)