

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM_{2.5}的源贡献分析..... 李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)

华北地区乡村站点(曲周)夏季PM_{2.5}中二次无机组分的生成机制与来源解析 陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)

成都市大气PM_{2.5}中有机磷阻燃剂的污染水平及来源 印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)

不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究 黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)

北京地区大气消光特征及参数化研究 陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)

光助芬顿反应催化降解气体中甲苯 郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)

遗体火化二噁英类排放水平及影响因素 尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)

我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析 张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商细彬, 曹阳, 张君 (3603)

太湖湖表反照率时空特征及影响因子 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)

基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演 王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)

河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤孔隙水溶解性甲烷时空特征 杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)

石家庄市区土壤水分运移的稳定同位素特征分析 陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)

长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素 白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)

三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态 王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)

湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系 王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)

水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移 李邵龙, 陈道毅 (3683)

城市道路径流的排污特征 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)

杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)

海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律 杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)

天然有机物和电解质对水中C₆₀凝聚行为的影响 方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)

钆改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果 王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)

污水管网中无机氮类营养盐迁变规律 金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)

微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究 朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)

倒置A²/O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性 王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)

高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响 李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)

苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性 李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)

驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径 宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)

苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)

连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化 鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)

FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化 马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)

污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究 刘吉宝, 李亚明, 吕镗, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)

残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响 贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)

大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)

缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)

三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制 吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)

坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响 冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)

不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响 沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)

有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险 纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)

改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响 陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)

菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定 孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)

血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险 李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)

生物传感细胞ADP1_pWHlux在水环境急性毒性检测中的应用 唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)

虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况 高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)

纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应 刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)

黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用 陈亚楠, 袁玲 (3892)

发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性 谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)

搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯 高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)

COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析 李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)

养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)

土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展 邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)

《环境科学》征订启事 (3553) 《环境科学》征稿简则 (3589) 信息 (3705, 3755, 3763, 3800)

我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析

张妍^{1,2}, 王元刚¹, 卢志强¹, 韩萌¹, 商细彬^{1,2}, 曹阳^{1,2}, 张君^{1,2}

(1. 天津市环境保护科学研究院, 国家环境保护恶臭污染控制重点实验室, 天津 300191; 2. 天津迪兰奥特环保科技有限公司, 天津 300191)

摘要: 选择目前国内餐厨废物成功进行资源化处理的代表性城市西宁、北京和宁波, 分别对其处理处置情况进行调研并设置采样点, 采用气相色谱-质谱联用(GC/MS)对各企业主要恶臭排放工段的恶臭物质进行定性定量分析, 采用三点比较式臭袋法对各企业主要恶臭排放工段的臭气浓度进行测试分析. 结果表明, 餐厨垃圾生化处理企业的排放物质种类主要为醇、醛、酮、酯的含氧烃类, 但对恶臭贡献最大的是含硫化合物, 其次是萜烯类物质; 综合西宁、宁波和北京的调研及分析结果, 可初步考虑餐厨垃圾生化处理设施典型恶臭物质为乙醇、柠檬烯、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、乙醛、乙酸乙酯.

关键词: 餐厨垃圾; 臭气浓度; 阈稀释倍数; 典型恶臭物质

中图分类号: X512 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3603-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.008

Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kichen Waste in China

ZHANG Yan^{1,2}, WANG Yuan-gang¹, LU Zhi-qiang¹, HAN Meng¹, SHANG Xi-bin^{1,2}, CAO Yan^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory on Odor Pollution Control, Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China; 2. Environmental Science and Technology Development Co., Ltd., in Tianjin, Tianjin 300191, China)

Abstract: Xining, Ningbo and Beijing were chosen as the representative cities about biochemical treatment of kitchen waste. The treatment facilities of these cities were investigated and set as the sampling points. The main compositions and the material contents were analyzed by GC/MS, the odor concentration was obtained by the Triangle odor bag method. The results showed that oxygenated hydrocarbons including alcohol, aldehyde, ketone, ester were higher than others in the odor gases, however, the largest contribution to odor pollution were sulfocompounds and the 2nd materials were terpenes; According to the research of the three enterprises, ethyl alcohol, limonene, sulfuretted hydrogen, methyl mercaptan, dimethyl sulfide, dimethyl disulfide, acetaldehyde and ethyl acetate were likely to be considered as the typical odorants from the biochemical treatment facilities of kitchen waste.

Key words: kitchen waste; odor concentration; threshold of diluted multiples; typical odorants

餐厨垃圾是餐饮垃圾和厨余垃圾的总称^[1], 清华大学固废污染控制及资源化研究所的统计数据表明, 中国城市每年产生的餐厨垃圾总量不低于6 000万 t^[2]. 餐厨垃圾具有含水率高、含盐分高、有机成分多、容易腐败、有害成分少等特点^[3~5]. 在收集运输和处理过程中能够迅速被微生物降解, 造成恶臭污染^[6]. 很多恶臭物质是形成二次气溶胶粒子的重要前体物, 可诱发灰霾污染, 严重危害着人体健康和生态环境^[7].

近年来, 国内外多是对固体废物资源化处理恶臭排放特征进行研究^[8~14], 针对餐厨垃圾的还比较少. Phan等^[15]研究了泡菜、鱼、咸鱼这3种食物腐败过程的挥发性有机物(VOCs)质量浓度排放, 结果表明, 鱼和咸鱼的VOCs排放水平类似, 分别为 $(1\ 120 \pm 2\ 304)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(2\ 016 \pm 4\ 356)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 而泡菜的VOCs明显低于鱼和咸鱼, 只有 $(65.5 \pm$

$30.4)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 这说明不同种类的食物在腐败过程中VOCs质量浓度的变化相差很大. Liu等^[16]对我国2个典型的餐厨垃圾处理厂进行调研采样, 其中A企业是湿热水解+好氧发酵工艺, B企业是厌氧消化工艺. 分别对其NH₃、VOCs排放进行连续5d的监测. 结果表明, 这两家企业的恶臭排放特征有明显的差别, A企业中恶臭主要贡献是其密闭的湿热水解工艺, B企业的恶臭主要贡献是其开放式的预处理阶段. 总体来说, 在恶臭控制方面, 湿热水解+好氧发酵工艺是明显优于厌氧发酵工艺.

本研究选取3个国内餐厨废物成功进行资源化处理的代表性城市——西宁、北京和宁波^[17~19], 其

收稿日期: 2015-02-28; 修订日期: 2015-05-20

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201209022); 天津市科技计划项目(13TXGCCX06200); 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ060165)

作者简介: 张妍(1987~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境恶臭管理与污染控制, E-mail: zhangyan_510@126.com

中西宁位于西部地区,是以牛羊肉为主的清真菜系的代表;北京位于北部地区,是沿海城市以及北方东部城市的代表;宁波处于南部地区,是江浙菜系的代表. 全面探索国内餐厨垃圾生化处理设施的恶臭排放特征,对于今后此类设施的恶臭监测、恶臭防护距离核算及排放口的恶臭控制具有重大意义.

1 工艺比较

西宁餐厨垃圾厂建于2008年,占地面积6 600 m²,日处理量约为200 t,处理垃圾类型为餐厨垃圾,处理周期为1 d. 采用物理生物处理技术,由收运系统、蛋白饲料生产系统、生物柴油生产系统、污水处

理系统、废气处理系统以及计算机自动控制系统组成,可以将餐厨废弃物进行自动分类分离,并经无害化处理,固体部分可以生产出高蛋白饲料母料,液体部分经厌氧反应产生沼气加以利用,餐厨废弃油脂可以生产出高洁净生物柴油. 工艺流程如图1所示.

宁波餐厨垃圾厂建于2005年,占地面积7 500 m²,日处理量约为200 t(约为设计规模的2/3),处理垃圾类型为餐厨垃圾,处理周期为1 d. 拥有自主研发的自动分拣技术和三相分离技术. 其中,液态部分可分离为废油和废水,废油可制成工业油脂,废水可通过厌氧发酵制沼气,固相部分可最终制成蛋白饲料. 工艺流程如图2所示.

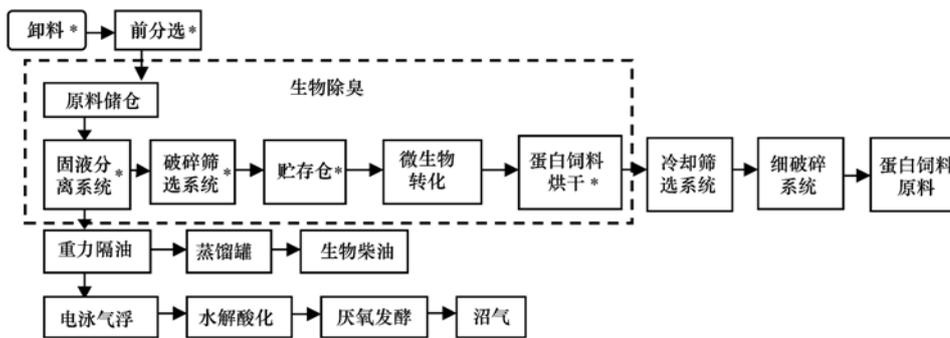


图1 西宁餐厨垃圾厂工艺流程示意

Fig. 1 Process flow diagram of Xining kitchen garbage enterprise

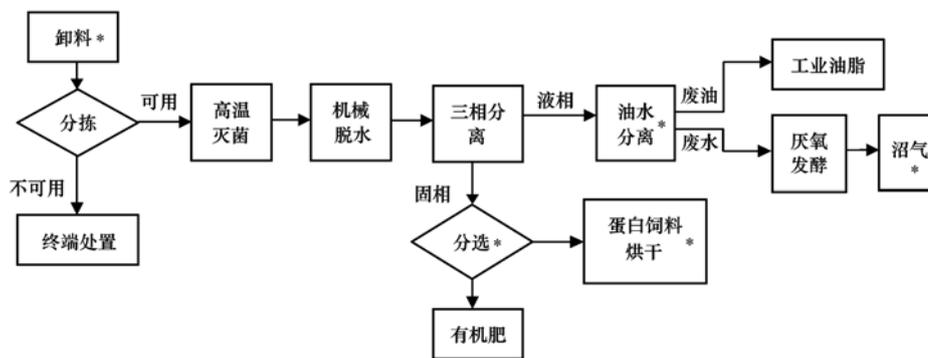


图2 宁波餐厨垃圾厂工艺流程示意

Fig. 2 Process flow diagram of Ningbo kitchen garbage enterprise

北京餐厨垃圾厂建于2007年,占地面积66 000 m²,日处理量约为1 000 t,处理垃圾类型为餐厨垃圾与生活垃圾的混合垃圾(有机物含量在50%以上),处理周期为1个月左右. 垃圾首先进行一次好氧发酵再进行为期7 d的隧道发酵,之后进入为期10 d后熟化阶段,最终进入滚筒筛,筛分成大于25 mm的筛上物进入填埋场,小于25 mm的筛下物被输送到最终熟化区. 在最终熟化区,垃圾经过10 d的强制通风发酵(3次好氧发酵)制成肥料,工艺

流程如图3所示.

总之,在处理规模、处理垃圾种类及处理工艺上,西宁和宁波餐厨垃圾生化处置企业较为类似,但是目前西宁餐厨垃圾处理的工艺技术和设备比较成熟,自动化程度高,废气达标排放,环保实施效果好;宁波餐厨垃圾处理工艺比较简单,自动化程度较高,环境保护实施效果一般(废气未达标排放);而北京处置的垃圾类型是餐厨垃圾与生活垃圾的混合垃圾,占地面积大,工艺类型为好氧发酵,环境保护实

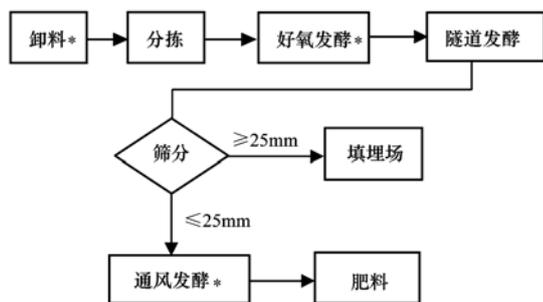


图3 北京餐厨垃圾厂工艺流程示意

Fig. 3 Process flow diagram of Beijing kitchen garbage enterprise

施效果较好。

2 材料与方法

2.1 采样点位及采样时间

于2012年秋季进行采样,仅在恶臭污染较为严重的排放口或作业面上进行采样,若有恶臭防护设施,则在恶臭处理前端进行采样。采样点设置在各点位采样口处或作业面中间,由于餐厨垃圾生化处理过程都在车间内进行,认为采样时的风速、风向等气象条件对结果无明显影响。采样时即为设备正常运行时,采样时的温度为西宁16~20℃,宁波25~31℃,北京19~25℃,其中,每个点位在不同时段采样2次,且每次采一个平行样品。

由于各企业工艺流程不同,恶臭排放来源不同,所以其采样点位不同。西宁某企业采样口为卸料口、分选口、破碎口、固液分离口、烘干口、贮存仓,具体见图1工艺流程中的*号方框,该企业所有设备都在2000 m²的车间内运行;宁波某企业采样口为卸料口、分选口、油水分离口、烘干口、沼气口,具体见图2工艺流程中的*号方框,该企业所有设备都在4000 m²的车间运行;北京某企业采样口为卸料口、一次好氧发酵、三次好氧发酵,具体见图3工艺流程中的*号方框,该企业的运行车间为20000 m²,其中一次好氧发酵车间为2000 m²,三次好氧发酵车间为3000 m²,封闭式填埋场的填埋面积约为4000 m²。

2.2 采样方法

采用SOC-01型采样装置在采样点进行“肺法”取样(天津迪兰奥特环保科技开发有限公司),该采样装置由采样桶、采样袋、采样枪、真空泵及连接管组成。采样时桶内的气体被抽出从而形成负压,气体样品通过采样枪及导管进入采样袋,采样气体没有经过采样泵及采样桶,避免了二次污染。为避免采样袋本底干扰,采样前用样品气体将采样袋清

洗两次。采样完成后在24 h内将所有样品送往实验室进行分析。

2.3 分析测试方法

臭气浓度分析方法参照文献[20],使用的嗅觉实验袋、无臭空气过滤分配器和无油空气压缩机等均为天津迪兰奥特环保科技开发有限公司生产。

恶臭物质浓度采用GC-MS(Agilent 7890A/5975C, USA)法测定:采样袋采集的样品在预浓缩系统(Entech 7100, USA)一级冷阱中经液氮低温冷冻浓缩除去空气中的氧气和氮气后,经二级冷阱去除样品中的水蒸气和大部分二氧化碳,最后经第三级冷阱冷聚焦后瞬间升温将待测组分导入气相色谱,经色谱柱分离后,由质谱对恶臭物质进行定性定量分析。使用的分析标准物质包括:内含65种挥发性有机物的美国EPA VOCs标准气体,主要为卤代烃、芳香烃和含氧有机物;内含57种挥发性有机物的美国EPA PAMs标准气体,主要为烷烃、烯烃和芳香烃;内含硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、乙硫醇、乙硫醚和二甲基二硫醚的硫化物标准气体;三甲胺标准气体;内含柠檬烯、 α -蒎烯和 β -蒎烯的萜烯类标准气体^[21]。醛酮类挥发性有机物分析方法参照文献[22]。

预浓缩进样系统条件:第一级冷阱捕集温度为-150℃,预热温度10℃,解析温度10℃,烘烤温度130℃,烘烤时间5 min;二级冷阱捕集温度为-50℃,解析温度180℃,解析时间3.5 min,烘烤温度190℃;三级冷阱捕集温度为-150℃,进样时间2 min,烘烤时间2 min,结束时间3 min,等待时间31 min。色谱条件:DB-5(60 m×0.32 mm×1.0 μ m);载气为高纯氦气,流速为1.5 mL·min⁻¹;初始柱温35℃,保持10 min,以4℃·min⁻¹升温至140℃,而后以15℃·min⁻¹升温到250℃,保持5 min。质谱条件:电子轰击源,电压70 eV,全扫描(Scan)和选择离子扫描(SIM)同步,质量范围:15~300 u,扫描时间<1 s,四级杆温度150℃;EI源温度230℃;接口温度280℃。

3 结果与分析

3.1 VOCs与臭气浓度

通过对北京、西宁、宁波的各排放口样品进行感官分析及定性定量分析,剔除异常样品数据,对每个工艺点位的样品数据取平均值,得到各排放口的VOCs质量浓度及臭气浓度如图4所示。

针对各餐厨垃圾厂各排放单元的VOCs排放水

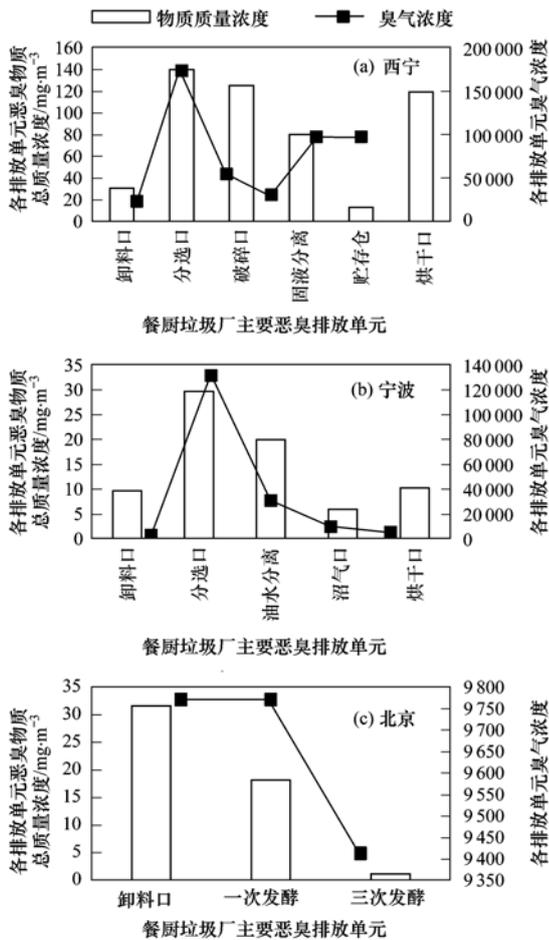


图4 西宁、宁波和北京餐厨垃圾厂不同排放口中恶臭物质质量浓度及臭气浓度

Fig. 4 Odorants concentration and odor concentration in different treatment facilities of Xining, Ningbo and Beijing kitchen garbage enterprises

平,由图4可以看出,西宁餐厨垃圾厂各个工艺单元污染物排放质量浓度在 $13.21 \sim 140.16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,从排放强度来看,从大到小分别为分拣口>固液分离>破碎口>烘干口>卸料口>贮存仓;宁波餐厨垃圾厂各个工艺单元污染物排放质量浓度在 $6.02 \sim 29.70 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,从排放强度来看,从大到小分别为分选口>油水分离>烘干口>卸料口>沼气口;北京餐厨垃圾厂卸料口和一次好氧发酵处物质检出总质量浓度相对较高,分别为 $22.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $17.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,而3次发酵处物质检出质量浓度较低为 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,这是由于3次好氧发酵垃圾已经降解得比较完全,垃圾组成稳定。

总体来说,西宁餐厨垃圾厂的恶臭排放强度及总体质量VOCs浓度都高于宁波和北京,一是由于西部地区餐饮的地域特色导致其垃圾本身的物质组

成中蛋白质含量高,垃圾中的有机物含量高,二是由于西宁餐厨垃圾厂的处理工艺类型所致,且其处理设施较为密闭,采样时在其排放口采样导致其恶臭排放强度较高。对比3个企业的臭气浓度水平,北京餐厨垃圾厂明显低于西宁和宁波,这是由于北京餐厨垃圾厂的工艺类型为好氧发酵,垃圾都暴露在车间内且无臭气收集系统,所以采样时只能在垃圾堆体上采样,并且北京餐厨垃圾发酵周期长,在3次发酵时有机物已降解得比较完全,排放的臭气浓度小。

各餐厨垃圾厂各个排放单元的臭气浓度水平与VOCs质量浓度水平基本保持一致,但是在个别排放口,却不完全一致,如北京餐厨垃圾厂的卸料口与一次发酵口,臭气浓度基本持平,但是一次发酵口的VOCs质量浓度要比卸料口的小50%左右,这是由于恶臭混合气体中,臭气浓度大小不仅与物质质量浓度相关,还与阈稀释倍数有一定的关系^[23],所谓阈稀释倍数是恶臭物质的物质浓度除以该成分的嗅阈值浓度^[24],卸料口与一次发酵口的典型恶臭物质的总阈稀释倍数分别为10999和9485,与其臭气浓度水平基本一致。又如西宁和宁波餐厨垃圾厂的分拣口,西宁的VOCs质量浓度是宁波的4倍,而其臭气浓度值却很接近,这也是由于宁波餐厨垃圾厂中低嗅阈值的物质质量浓度较高所致。

3.2 VOCs 组成分析

通过对北京、西宁、宁波的各排放口样品进行定性定量分析,将检测出化合物分为6大类:含硫化合物、含氧化合物、烷烃、烯烃、芳香族化合物以及卤代物,各类物质在不同排放口的质量分数如图5所示。

从图5可以看出,西宁、宁波、北京餐厨垃圾厂排放物质种类主要为醇、醛、酮、酯的含氧烃类,其中西宁餐厨垃圾厌氧处置排放单元含氧烃的质量分数高达95%左右。除了由于含氧烃是餐厨垃圾资源化处理的主要产物外,其质量分数高的原因还包括:收集的垃圾绝大部分来源于酒店,餐厨垃圾本身含有一定的醇类;垃圾在运输的过程中由于表层以下的垃圾处于缺氧状态,在微生物的作用下发生厌氧发酵反应会产生乙醇。

除了含氧烃外,西宁、宁波和北京餐厨垃圾厂都含有部分的含硫化合物和萜烯类物质,其中,含硫化合物是垃圾中蛋白质分解的主要产物,萜烯类物质是源自餐厨垃圾中大量芳香类水果果皮,在生化处置工艺下释放出来,最终由废气排放口排出。而

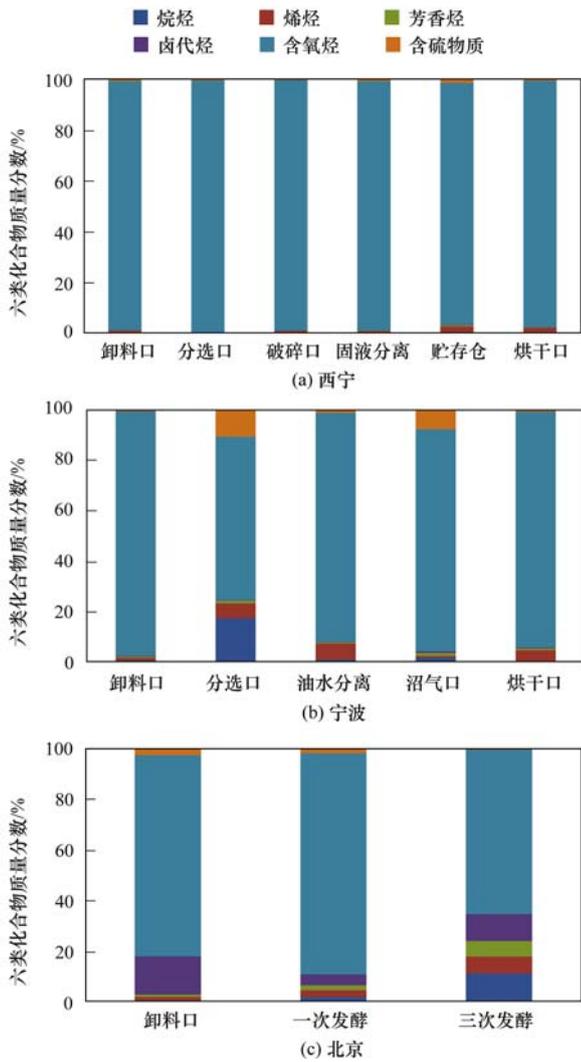


图5 西宁、宁波和北京餐厨垃圾厂不同排放口中恶臭物质质量分数

Fig. 5 Mass fraction of odorants in different treatment facilities of Xining, Ningbo and Beijing kitchen garbage enterprises

相比于西宁和宁波,北京餐厨垃圾厂的卤代烃质量分数较高,这是由于北京企业收集的垃圾是餐厨垃圾与生活垃圾的混合垃圾,塑料类杂质含量较多,释放大量卤代烃。

3.3 典型恶臭物质筛选

恶臭混合气体中,恶臭物质的阈稀释倍数越高,该物质在臭气中的贡献值越大,但是也不能完全断定阈稀释倍数最高的恶臭物质对臭气的性质影响最大^[25]。还需考虑物质质量浓度相对较高,且化学结构具有一定的稳定性的物质;除此之外,典型恶臭物质需在总体气体样品中出现的频率较高^[26];最后,典型恶臭物质的筛选应优先选择被列入《国家污染物环境健康风险名录》^[27]中毒性较大的物质及我国现行的《恶臭污染物排放标准(GB 14554-1993)》^[28]控制的8种恶臭物质。所以,为了找出宁波、西宁、北京餐厨垃圾生化处理设施的主要致臭物质,首先要分析计算各企业恶臭物质的质量浓度和阈稀释倍数。选取各企业不同排放口物质浓度排名前十及阈稀释倍数 > 1 的物质进行分析对比,结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,各个排放单元中物质质量浓度最高的均为乙醇,其次是乙醛。并且相对于其他恶臭物质,乙醇的质量浓度至少高出一个数量级,虽然乙醇的嗅阈值高且气味儿性质为酒精味,但其如此高的质量浓度,可将其看成西宁餐厨垃圾厂的典型恶臭物质。除此之外,乙酸乙酯、二甲二硫醚、柠檬烯、氨、丙酮等物质的质量浓度排名都很靠前。从表 2 阈稀释倍数排名结果可知,各个工艺阈稀释倍数最高的都为二甲二硫醚,乙醛和乙酸乙酯的阈稀释倍数也很高,其余物质多为硫化物、含氧烃类

表 1 西宁餐厨垃圾不同排放口前 10 名恶臭物质质量浓度/mg·m⁻³

Table 1 Top ten mass concentration of odorants in different treatment facilities of Xining kitchen garbage enterprise/mg·m⁻³

排名	卸料口		一次分拣		破碎机		固液分离		烘干		贮存仓	
	项目	物质浓度	项目	物质浓度	项目	物质浓度	项目	物质浓度	项目	物质浓度	项目	物质浓度
1	乙醇	28.315	乙醇	133.522	乙醇	114.359	乙醇	71.064	乙醇	101.175	乙醇	11.929
2	乙醛	1.028	乙醛	2.243	乙醛	7.696	乙醛	6.118	乙醛	10.008	乙醛	0.305
3	氨	0.175	2,5-二甲基苯甲醛	0.727	氨	1.550	乙酸乙酯	0.485	柠檬烯	1.700	丙酮	0.186
4	二甲二硫醚	0.145	乙酸乙酯	0.651	柠檬烯	0.713	丙酮	0.439	丁醛	1.128	柠檬烯	0.174
5	乙酸乙酯	0.135	丁醛	0.552	丙酮	0.394	柠檬烯	0.429	氨	1.100	二甲二硫醚	0.110
6	甲醛	0.133	丙酮	0.459	丁醛	0.373	二甲二硫醚	0.368	戊醛	0.988	甲醛	0.090
7	丙酮	0.115	二甲二硫醚	0.289	乙酸乙酯	0.309	氨	0.280	异戊醛	0.930	α-蒎烯	0.067
8	柠檬烯	0.082	氨	0.255	α-蒎烯	0.233	丁醛	0.223	对、间-苯甲醛	0.683	β-蒎烯	0.062
9	丙醛	0.080	戊烷	0.203	甲醛	0.178	α-蒎烯	0.183	二甲二硫醚	0.387	乙硫醚	0.048
10	戊烷	0.057	柠檬烯	0.178	二甲二硫醚	0.168	β-蒎烯	0.139	丙醛	0.348	乙酸乙酯	0.037

表 2 西宁餐厨垃圾不同排放口阈稀释倍数 >1 的恶臭物质

Table 2 Dilution multiples of the odorants in different treatment facilities of Xining kitchen garbage enterprise

排名	卸料口		一次分拣		破碎机		固液分离		烘干		贮存仓	
	项目	阈稀释倍数	项目	阈稀释倍数	项目	阈稀释倍数	项目	阈稀释倍数	项目	阈稀释倍数	项目	阈稀释倍数
1	二甲二硫醚	10 681	二甲二硫醚	20 914	二甲二硫醚	9 583	二甲二硫醚	23 395	二甲二硫醚	31 175	二甲二硫醚	5 135
2	乙酸乙酯	1 468	乙酸乙酯	7 478	乙醛	5 224	乙酸乙酯	4 309	异戊醛	4 846	乙硫醚	363
3	乙醛	698	乙醛	1 522	乙酸乙酯	2 012	乙醛	4 153	乙酸乙酯	2 243	乙酸乙酯	232
4	乙硫醚	382	乙硫醚	1 475	乙硫醚	390	乙硫醚	417	乙硫醚	1 493	乙醛	103
5	乙醇	41	甲硫醇	584	丁醛	347	甲硫醇	308	丙醛	268	甲硫醚	26
6	甲硫醚	48	丁醛	512	甲硫醇	272	丁醛	207	乙醇	171	乙醇	11
7	丁醛	40	乙醇	193	乙醇	115	甲硫醚	74	甲硫醚	145		
8	丙醛	61	甲硫醚	126	甲硫醚	39	乙醇	69	硫化氢	119		
9	甲硫醇	43	丙醛	111	硫化氢	33	硫化氢	35	柠檬烯	14		
10	硫化氢	14	硫化氢	108	柠檬烯	3	柠檬烯	1				
11	乙醇	12										

以及少量萜烯. 阈稀释倍数 >1 的物质质量浓度占总检出物质的 90% 以上, 基本能代表各个污染点位的污染物存在情况. 所以, 以阈稀释倍数为核心指标, 综合物质质量浓度、物质性质、出现频次及毒理学性质, 可考虑乙醇、二甲二硫醚、乙硫醚、硫化氢、甲硫醚、甲硫醇、乙酸乙酯、乙醇、乙醛、丁醛及柠檬烯为西宁餐厨垃圾厂的典型恶臭物质.

由表 3 可以看出, 各个排放口都含有大量的乙醇、乙醛, 并且其排名前几的物质质量浓度与西宁较为一致. 乙醇的质量浓度至少高出其他物质一个

数量级, 可作为宁波餐厨垃圾厂的典型恶臭物质. 由表 4 阈稀释倍数排名结果可知, 除沼气口外, 各个工艺阈稀释倍数最高的都为甲硫醇, 其余物质也多为硫化物、含氧烃类以及少量萜烯. 阈稀释倍数 >1 的物质质量浓度占总检出物质的 90% 以上, 基本能代表各个污染点位的污染物存在情况. 所以, 以阈稀释倍数为核心指标, 综合物质质量浓度、物质性质、出现频次及毒理学性质, 可考虑硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、乙醇、乙醛、柠檬烯以及 α -萜烯为宁波餐厨垃圾厂的典型恶臭物质.

表 3 宁波餐厨垃圾不同排放口前 10 名恶臭物质质量浓度/mg·m⁻³

Table 3 Top ten mass concentration of odorants in different treatment facilities of Ningbo kitchen garbage enterprise/mg·m⁻³

排名	卸料口		分选口		油水分离口		烘干口		沼气口	
	项目	物质浓度	项目	物质浓度	项目	物质浓度	项目	物质浓度	项目	物质浓度
1	乙醇	7. 636	乙醇	14. 594	乙醇	15. 253	乙醇	8. 823	乙醇	4. 170
2	丁醛	0. 925	乙醛	2. 298	乙醛	1. 682	乙醛	0. 702	硫化氢	0. 377
3	甲醛	0. 283	丁烷	1. 845	柠檬烯	1. 067	柠檬烯	0. 392	甲醛	0. 356
4	乙醛	0. 263	乙酸乙酯	1. 742	乙酸乙酯	0. 730	二甲二硫醚	0. 037	丁烯醛	0. 301
5	丙酮	0. 148	硫化氢	1. 385	甲醛	0. 281	乙酸乙酯	0. 032	丙酮	0. 281
6	乙酸乙酯	0. 083	异丁烷	1. 219	戊烷	0. 124	甲苯	0. 024	乙醛	0. 096
7	柠檬烯	0. 070	柠檬烯	1. 090	丙醛	0. 095	α -萜烯	0. 019	柠檬烯	0. 073
8	二甲二硫醚	0. 029	戊烷	1. 025	β -萜烯	0. 085	丁烷	0. 018	二甲二硫醚	0. 049
9	丁烷	0. 026	二甲二硫醚	0. 825	硫化氢	0. 081	硫化氢	0. 016	甲苯	0. 044
10	异丁烷	0. 017	丙烷	0. 823	丙酮	0. 069	二氯甲烷	0. 014	丁烷	0. 040

表 4 宁波餐厨垃圾不同排放口阈稀释倍数 >1 的恶臭物质

Table 4 Dilution multiples of the odorants in different treatment facilities of Ningbo kitchen garbage enterprise

排名	卸料口		分选口		油水分离口		烘干口		沼气口	
	项目	阈稀释倍数								
1	甲硫醇	122	甲硫醇	6 142	甲硫醇	870	甲硫醇	98	硫化氢	1 065
2	乙醇	35	硫化氢	2 251	乙醛	174	乙醛	39	甲硫醇	336
3	硫化氢	16	乙醛	89	乙醇	73	乙醇	32	乙醇	25
4	乙醛	14	乙醇	82	硫化氢	71	硫化氢	9	二甲二硫醚	6
5	α -萜烯	2	甲硫醚	51	α -萜烯	19	柠檬烯	6	甲苯	6
6	柠檬烯	1	二甲二硫醚	52	柠檬烯	13	α -萜烯	5	α -萜烯	6
7			柠檬烯	14	丙醛	8	甲硫醚	3	柠檬烯	2
8			α -萜烯	11	甲硫醚	7				
9			甲苯	2	二甲二硫醚	2				

由表 5 可以看出,各个排放口乙醇的质量浓度最高,其次是醛类、酮类。由于其垃圾类型、垃圾处理时间及处理方式与西宁和宁波的差距较大,所以其质量浓度排名前 10 的物质与宁波西宁差距较大。除此之外,根据文献[27],1,2-二氯乙烷的毒性较高且为优先控制的污染物,而北京餐厨垃圾厂 1,2-二氯乙烷的质量浓度较高且出现的频次大,可作为其典型恶臭物质。由表 6 阈稀释倍数排名结果可以看出,以甲硫醇及硫化氢为代表的硫化物是造成厂区恶臭的主要物质。其余物质也多为硫化物、含氧烃类以及少量萜烯。阈稀释倍数 >1 的物质质量浓度占总检出物质的 90% 以上,基本能代表各个污染点位的污染物存在情况。所以,以阈稀释倍数为核心

指标,综合物质质量浓度、物质性质、出现频次及毒理学性质,可考虑乙醇、1,2-二氯乙烷、甲硫醇、硫化氢、甲硫醚、二甲二硫醚、 α -萜烯和柠檬烯为北京餐厨垃圾厂典型恶臭物质。

综上所述,3 个餐厨垃圾处理企业筛选的典型恶臭物质一致性较高,都是以硫化物为主,并伴有少量的醇类、醛类及萜烯类。由于这 3 个企业在餐厨垃圾处理处置行业中具有代表性,所以,综合这 3 个企业的恶臭物质数据,以阈稀释倍数为核心指标,以物质质量浓度、物质性质、出现频次及毒理学性质为辅助指标,可以初步考虑将乙醇、柠檬烯、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、乙醛、乙酸乙酯定为国内餐厨垃圾生化处理设施的典型恶臭物质。

表 5 北京餐厨垃圾不同排放口前 10 名恶臭物质质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 5 Top ten mass concentration of odorants in different treatment facilities of Beijing kitchen garbage enterprise/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

排名	卸料口		一次好氧发酵		三次好氧发酵	
	项目	物质浓度	项目	物质浓度	项目	物质浓度
1	乙醇	12.403	乙醇	12.624	乙醇	0.616
2	丁烯醛	8.715	乙醛	1.256	丙醛	0.065
3	乙醛	1.840	丙酮	0.699	氨	0.061
4	丙酮	1.242	异戊醛	0.432	戊烷	0.041
5	1,2-二氯乙烷	1.176	丁烯醛	0.422	丁烯醛	0.040
6	氯仿	1.163	柠檬烯	0.357	柠檬烯	0.036
7	1,1-二氯乙烷	0.955	乙酸乙酯	0.205	1,2-二氯乙烷	0.027
8	反-1,2-二氯乙烷	0.624	1,2-二氯乙烷	0.191	氯仿	0.025
9	异戊醛	0.542	二甲二硫醚	0.169	甲苯	0.020
10	硫化氢	0.522	氯仿	0.168	2,2-二甲基丁烷	0.019

表 6 北京餐厨垃圾不同排放口阈稀释倍数 >1 的恶臭物质

Table 6 Dilution multiples of the odorants in different treatment facilities of Beijing kitchen garbage enterprise

排名	卸料口		一次好氧发酵		三次好氧发酵	
	项目	阈稀释倍数	项目	阈稀释倍数	项目	阈稀释倍数
1	甲硫醇	390	甲硫醇	156	二甲二硫醚	8
2	硫化氢	317	硫化氢	95	乙醇	4
3	乙醇	50	乙醇	56	α -萜烯	3
4	二甲二硫醚	21	二甲二硫醚	20	对-二乙苯	2
5	甲硫醚	7	α -萜烯	6		
6	α -萜烯	5	甲硫醚	6		
7	柠檬烯	3	柠檬烯	5		
8	对-二乙苯	2	对-二乙苯	3		

4 结论

(1)餐厨垃圾生化处理企业的排放物质种类主要为醇、醛、酮、酯的含氧烃类,但对恶臭贡献最大的是含硫化合物,其次是萜烯类物质,对于餐厨垃圾与生活垃圾的混合垃圾来说,还含有较高质量浓度的卤代烃。

(2)相比于北京餐厨垃圾企业,西宁和宁波的垃圾类型及工艺类型较为类似,其物质排放种类及

筛选的典型恶臭物质一致性较高。

(3)综合西宁、宁波和北京的调研数据及分析结果,乙醇、柠檬烯、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、乙醛、乙酸乙酯为这 3 个企业的典型恶臭物质,可将其作为餐厨废物生化处理设施的恶臭监测的主要指标,可初步考虑将其作为国内餐厨垃圾生化处理设施典型恶臭物质。

参考文献:

[1] CJJ 184-2012, 餐厨垃圾处理技术规范[S].

- [2] Zhu H G, Stadnyk A, Béland, *et al.* Co-production of hydrogen and methane from potato waste using a two-stage anaerobic digestion process[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(11): 5078-5084.
- [3] 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.
- [4] 王攀, 黄燕冰, 袁传胜, 等. 国内成功运营的餐厨垃圾处理厂臭气排放特征研究[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(2): 624-630.
- [5] 胡新军, 张敏, 余俊峰, 等. 中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策[J]. *生态学报*, 2012, **32**(14): 4575-4584.
- [6] 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.
- [7] 孙杰, 王跃思, 吴方堃, 等. 唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1438-1443.
- [8] 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.
- [9] Gutiérrez M C, Chica A F, Martín M A, *et al.* Compost pile monitoring using different approaches: GC-MS, E-nose and dynamic olfactometry [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2014, **5**(3): 469-479.
- [10] Duan Z H, Lu W J, Li D, *et al.* Temporal variation of trace compound emission on the working surface of a landfill in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **88**: 230-238.
- [11] 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.
- [12] Orzi V, Cadena E, D'Imporzano G, *et al.* Potential odour emission measurement in organic fraction of municipal solid waste during anaerobic digestion: Relationship with process and biological stability parameters [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(19): 7330-7337.
- [13] 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.
- [14] Kaepler K, Mueller F. Odor classification: a review of factors influencing perception-based odor arrangements [J]. *Chemical Senses*, 2013, **38**(3): 189-209.
- [15] Phan N T, Kim K H, Jeon E C, *et al.* Analysis of volatile organic compounds released during food decaying processes[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(3): 1683-1692.
- [16] Liu J G, Wang X W, Nie X Q, *et al.* In-situ emission characteristics of odorous gases from two food waste processing plants[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2013, **15**(4): 510-515.
- [17] 宋剑飞, 李灵周, 朱洁. 西宁、宁波、苏州餐厨垃圾管理及处置模式对比分析与经验借鉴[J]. *北方环境*, 2012, **27**(5): 93-97.
- [18] 王磊, 李振山, 焦安英, 等. 北京市生活垃圾堆肥设施耗能、排污及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(11): 1212-1218.
- [19] 张锐. 餐厨垃圾转化为生物质能的“宁波模式”与效益评价[D]. 宁波: 宁波大学, 2014. 17-22.
- [20] GB/T 14675-93, 空气质量 恶臭的测定 三点比较式臭袋法[S].
- [21] U. S. EPA. EPA/625/R- 96/010b. Method TO- 15, Determination of volatile organic compounds (VOCs) in air collected in specially-prepared canisters and analyzed by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS)[S].
- [22] 赵淑莉, 谭培功. 空气和废气监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2003. 679-682, 730-734.
- [23] 黄丽丽, 张妍, 商细彬, 等. 餐厨垃圾两相厌氧发酵产甲烷相恶臭排放规律[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(10): 4386-4392.
- [24] Nagata Y. Measurement of odor threshold by triangular odor bag method[R]. Tokyo: Japan Ministry of the Environment, 2003.
- [25] 包景岭, 邹克华, 王连生. 恶臭环境管理与污染控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009. 244-246.
- [26] 赵岩, 陆文静, 王洪涛, 等. 城市固体废物处理处置设施恶臭污染评估指标体系研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1804-1810.
- [27] 环境保护部. 国家污染物环境健康风险名录[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [28] GB 14554-1993, 恶臭污染物排放标准[S].

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O- <i>MBR</i> Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	Ji Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADP1_pWHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人