

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征	陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)
面向二/三维城市形态指标的PM _{2.5} 浓度调控模拟	李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)
减排背景下成都大气PM _{2.5} 碳质组分特征	陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)
青岛秋冬季PM ₁ 中金属元素污染特征及健康风险评估	刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)
港口地区大气PM _{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析	王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析	张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)
北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素	梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)
北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析	孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源	周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠筠, 张智胜, 陶俊(4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果	何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比	武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析	宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险	许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子	剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性	陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源	陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)
紫外光化过硫酸盐降解磷酸氯喹	李阳, 许玻琨, 邓琳, 罗伟(4597)
微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机物性能	刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响	陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响	郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响	夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响	宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响	袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化	孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响	翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性	赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制	龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响	刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响	王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析	李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基(4727)
IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析	赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响	郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价	王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)
兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析	张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)
典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价	沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析	汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应	唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)
稻田干湿过程甲基化效率变化与关键影响因素分析	张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应	李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响	宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响	张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测	李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)
小型养殖塘水体中CH ₄ 、CO ₂ 和N ₂ O浓度的时空变化特征及影响因素	石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响	胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征	商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析	张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用	马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)
《环境科学》征订启事(4512)	《环境科学》征稿简则(4735)
信息	(4696, 4790, 4887)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果

何品晶^{1,2}, 李健晨^{1,2}, 吕凡^{1,2}, 章骅^{1,2}, 邵立明^{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)

摘要: 为探究生活垃圾填埋场恶臭污染的源特征和时空变化规律, 采样分析了东部沿海某填埋场不同暴露状态填埋区域冬夏两季的昼夜间气体样品。定量检测到的各种恶臭物质合计浓度最高可达 $60\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季检出的恶臭物质种类多于冬季, 且各采样点平均浓度高于冬季 30~300 倍, 其中, 硫系物高于冬季 4.7~136.7 倍。含氧化合物是物质浓度最高的恶臭组分, 各采样点硫系物合计浓度不足恶臭物质合计浓度的 10%, 但换算的理论恶臭浓度贡献率超过理论恶臭合计浓度的 90%, 甲硫醇和丙硫醇等硫系物是填埋场恶臭污染的关键物质。填埋单元覆膜后堆体表层恶臭物质浓度和理论恶臭浓度随时间呈现出一定的上升趋势, 说明覆膜具有一定的恶臭阻隔效果, 但填埋单元仍有较大的恶臭释放潜力。相似度分析显示, 作业后临时覆盖和未抽气区盖膜单元内累积的恶臭气体可以通过膜搭接缝隙和膜破裂位置等处释放至环境, 导致填埋场周边夜间恶臭污染高于白天。

关键词: 恶臭污染; 填埋场; 硫系物; 垃圾; 异味

中图分类号: X512 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4506-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107035

Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill

HE Pin-jing^{1,2}, LI Jian-chen^{1,2}, LÜ Fan^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}, SHAO Li-ming^{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)

Abstract: In order to explore the source characteristics as well as the temporal and spatial variations in odor pollution in municipal waste landfills, gas samples were collected from a landfill in an eastern coastal area of China throughout winter and summer. The total concentration of malodorous substances reached $60\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. There were more types of odor pollutants detected in summer than in winter, the average concentration was 30-300 times higher than that in winter, and the concentration of sulfur compounds increased by 4.7-136.7 times in summer. Oxygenated compounds had the highest concentration, and the total concentration of sulfur compounds accounted for less than 10% of malodorous substances. However, sulfur compounds contributed more than 90% to the theoretical odor concentration. Sulfur compounds such as methyl mercaptan and propane mercaptan were the key odorants in the landfill. After the landfill unit was covered, the concentration of odorous substances and the theoretical odor concentration on the surface of the landfill showed an increasing trend with time, indicating that the covering had a certain odor barrier effect; however, the landfill unit still had a large odor release potential. The similarity analysis showed that the odorous gas accumulated in the unit with temporary cover and without an exhaust system could be released to the environment through the overlapping gap of the membrane and the location of membrane rupture, resulting in more serious odor pollution around the landfill at night than that during the day.

Key words: odor pollution; landfill; sulfur compounds; municipal solid waste; odors

2018 年全国城市生活垃圾无害化处理量为 22 565.4 万 t^[1], 其中, 卫生填埋占 51.9%, 仍是我国目前生活垃圾主要的无害化处理处置方式。填埋处置过程会产生占填埋气体积比 <1% 的微量气体, 包括氨气和硫化氢等无机化合物及成分复杂的各类挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs)^[2]。这些组分会形成恶臭污染^[3], 导致邻避效应^[4], 加剧了周边居民与填埋场的矛盾。2019 年, 恶臭污染占生态环境部“12369”环境污染举报总数的 20.83%, 超过了各类水污染和固体废物污染举报的总和^[5]; 且众多案例显示, 填埋场周边居民恶臭投诉主要集中在夜间至凌晨的非填埋作业时段。因此, 生活垃圾填埋场恶臭时空变化规律是其污染控制亟待解决的问题。

填埋场恶臭污染研究主要针对污染物质和环境

影响这 2 个方面。恶臭污染物质方面, Allen 等^[6]的研究检测了英国 7 处填埋场的 VOCs, 共检测出 140 种化合物。Chiriac 等^[7]的研究表明接近敞开作业面的区域排放源强最大, 按物质浓度计算得有机氯化物和芳香烃是主导污染物。Nicolas 等^[8]的研究采用嗅探法计算填埋场恶臭释放速率, 认为恶臭物质主要来源于新鲜填埋的生活垃圾, 部分来源于不完全密闭的抽气井。恶臭污染的环境影响方面, Parker 等^[9]研究了英国 97 座填埋场数据, 认为含硫化化合物是主要的恶臭污染物。有研究则认为 H₂S 是硫系物及挥发性恶臭污染物中的主要贡献者^[10~12]。何品晶

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2022-01-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD1100600)

作者简介: 何品晶 (1962~), 男, 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: slm0039@163.com

等^[13]的研究发现生活垃圾初期降解阶段的恶臭物质合计浓度中酮类占 70%~80%,但硫醚类物质是主要的恶臭组分。Ding 等^[14]的研究显示杭州市填埋场的 H₂S 浓度占各类恶臭物质合计浓度 83% 以上。Han 等^[15]的研究表明硫化氢、氨和二甲基硫醚是填埋覆膜区域的主要臭气成分。Fang 等^[16]的研究用嗅阈值换算了填埋场 5 类化合物的理论恶臭浓度,分析发现物质浓度值最高的氨和芳香族化合物不是主导者,而浓度较低,但嗅阈值极低的甲硫醇和二甲基硫等硫系物是主要恶臭物质。Cheng 等^[17]的研究发现硫化氢、苯和氨是填埋场的主要恶臭物质。目前填埋场普遍采用土工膜覆盖以减少雨水渗入和恶臭气体释放,但 Yao 等^[18]的研究发现填埋覆盖膜破裂处挥发性化合物排放量最高,硫系物占主导地位。

以上研究揭示了填埋场恶臭污染释放因填埋时间、昼夜循环和覆盖条件等因素,呈现明显的时空变化;但是,其结果仍难以系统归纳填埋场恶臭污染的时空变化规律,也不能说明非填埋作业时段恶臭影响更甚的原由。

为此,本文以东部沿海某填埋场作为研究对象,在冬夏两季代表性气候下,昼夜间采集不同填埋时段、覆盖状态的气体样品,检测恶臭物质组成,分析比较不同季节和昼夜间的恶臭污染状况,通过揭示生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化特征,以期为污染控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 填埋场基本情况

本研究选取的东部沿海某生活垃圾卫生填埋场总面积约 15.3 km²。采样时,该场正在运营中的有

I 号和 II 号两个填埋场区,其中, I 号场区日处理量 4 000 t·d⁻¹; II 号场区日处理量 7 000 t·d⁻¹。该场处置未分类原生生活垃圾,入场垃圾组成可参见贾悦等^[19]的研究。

1.2 采样方法与方案设计

本研究采用低吸附和高惰性^[20]的特氟龙(Teflon)涂层的氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)采样袋(FEV31-10 型, 10 L,大连海德科技有限公司),联合真空箱式采样器采集气体样品,减少气体样品的接触污染^[21]。

该填埋场分单元作业,每日作业后用 1.5 mm 的高密度聚乙烯(HDPE)膜进行覆盖,根据单元填埋后时间的长短可分为填埋作业单元、临时覆盖单元和中间覆盖单元。填埋作业单元填入时卷膜敞开,而夜间采用搭接方式盖膜为临时覆盖单元;中间覆盖单元的覆膜搭接处焊接密闭,并配置填埋气收集系统,根据其是否运行又可分为未抽气区和抽气区。

本研究对该填埋场 I 号和 II 号两个场区的填埋作业单元、临时覆盖单元、中间覆盖未抽气区和中间覆盖抽气区 4 类区域分别布设 13 个采样点,各样品点位分别采集膜上空气、膜搭接处气体和膜下气体,采样方法见表 1。采样时期为冬(12 月至次年 1 月)和夏(6~7 月)2 季,采样时间昼间为 09:00~15:00,夜间为 20:00~22:00,共采集样品 48 个(具体见表 2)。

表 1 不同采样位置的采样方法	
Table 1 Sampling methods of different positions	
采样位置	采样方式
膜上空气	无组织源气体采样标准 ^[22]
膜搭接处气体	采样管深入搭接缝隙处 0.5 m 采集气体样品
膜下气体	采样管穿透覆盖膜,深入 1 m 采集气体样品

表 2 采集样品的特征和数量					
Table 2 Amount and characteristics of samples					
采样位置	位置特征				
	作业单元	当日临时覆盖单元	一周临时覆盖单元	未抽气中间覆盖单元	抽气中间覆盖单元
膜上空气	8	4	4	4	4
膜搭接处气体	0	4	4	2	2
膜下气体	0	4	4	2	2

1.3 检测方法

针对恶臭物质低嗅阈值、低浓度、多组分混合的特点,本研究采用三级冷阱预浓缩处理联合气相色谱法检测气体样品中的恶臭污染物,该方法可检出的恶臭物质及检出限参见文献^[23]。样品采用三级冷阱浓缩仪(Model 7100A, Entech, USA)进行预处理,参数参照美国国家环境保护署 TO-15 方法^[24]。

预浓缩后进入气相色谱仪(GC450, Varian, USA)进行分析,含硫化合物使用脉冲火焰光度检测器(PFPD, Varian, USA),色谱柱为毛细柱(CP-Sil 5 CB, Varian, USA),尺寸:30 m×0.32 mm ID×4 μm;含氧化合物与芳香烃类化合物使用氢火焰离子化检测器(FID, Varian, USA),色谱柱为毛细柱(CP-Wax 52CB, Varian, USA),尺寸:60 m×0.32 mm ID×1.2 μm。

2 结果与讨论

2.1 填埋场恶臭污染的季节变化

表3列出了本研究各气体样品恶臭物质检出情况,共检出27种恶臭物质,按类别划分,有硫系物13种,含氧化合物7种,芳香族化合物7种。可以看出,除了对二甲苯等芳香族化合物,其余物质的夏季检出率均高于冬季,尤其是含硫化合物,硫化氢和甲硫醚等强致臭(低嗅阈值)物质的检出率显著提高,最高达到100%。说明填埋堆体内的微生物活动在夏季更强,促进了生活垃圾的降解,从而产生了更多的恶臭污染物。

表4列出了冬夏两季填埋场各取样点位气体样品检出的各类恶臭物质的平均浓度,同一点位3类恶臭污染物浓度和总浓度的夏冬季之比见表5。可见,夏季恶臭污染物的总浓度也显著增加。相比于冬季,夏季填埋场气体样品中恶臭物质总浓度提高了30~300倍,硫系物、含氧化合物和芳香族化合物均有1~2个数量级的显著提高。其中,低嗅阈值的硫系物平均浓度提高了4.7~136.8倍,表明夏季出现恶臭污染的可能性急剧上升。这体现了夏季高温加速垃圾降解和恶臭物质的产生^[25~27],同时促进恶臭物质挥发释放^[28]。

表3 检出的恶臭物质及其对应嗅阈值和检出率

Table 3 Types of malodorous substances and their corresponding olfactory thresholds and detection rates				
恶臭物质	嗅阈值 /mg·m ⁻³	检出率/%		
		冬季	夏季	
硫系物	H ₂ S	0.001 8	58.8	97.1
	COS	1.2	94.1	61.8
	甲硫醇	0.000 143	41.2	97.1
	乙硫醇	0.000 022 1	11.8	58.8
	甲硫醚	0.005 54	17.6	100.0
	CS ₂	0.577	70.6	100.0
	丙硫醇	0.000 033 9	5.9	58.8
	噻吩	0.001 88	35.3	58.8
	二乙基硫醚	0.000 133	NA	32.4
	二甲基二硫醚	0.046	41.2	100.0
	烯丙基二甲基硫醚	0.000 52	NA	32.4
	二烯丙基硫醚	0.000 81	NA	32.4
	二乙基二硫醚	0.010 21	5.9	5.9
含氧化合物	乙醛	0.035	100.0	100.0
	异丁醛	0.041	100.0	100.0
	乙酸乙酯	3.3	88.2	97.1
	甲醛	0.67	94.1	88.2
	丁酮	0.17	100.0	100.0
	乙醇	0.979 9	41.2	85.3
	异戊醛	0.001 57	11.8	94.1
芳香族化合物	苯	—	100.0	100.0
	甲苯	0.4	100.0	100.0
	乙苯	0.085	100.0	100.0
	对二甲苯	1.3	100.0	67.6
	间二甲苯	0.43	100.0	82.4
	邻二甲苯	0.577	100.0	100.0
	苯乙烯	0.16	47.1	94.1

表4 夏冬两季填埋场检出的各类恶臭物质浓度/μg·m⁻³

Table 4 Concentrations of various substances detected in landfills in winter and summer/μg·m ⁻³						
季节	填埋区	时间	硫系物	含氧化合物	芳香族化合物	总浓度
冬季	I号	昼	14.9±0.3	23.7±2.9	11.7±2.5	50.3±5.1
		夜	32.0±24.5	56.3±28.4	42.2±30.3	130.5±83.3
	II号	昼	15.9±12.3	20.9±4.0	17.9±10.0	54.8±29.9
		夜	610.0±234.1	319.6±68.4	401.4±60.7	1331.0±241.7
夏季	I号	昼	432.0±141.8	14 060.8±15 876.8	586.1±4 997	15 078.8±16 377.0
		夜	629.7±692.3	6 680.0±9 560.7	957.8±733.0	8 267.4±10 691.5
	II号	昼	2 174.9±1 803.0	11 698.0±18 515.7	9 130.7±14 182.5	23 003.6±22 285.2
		夜	2 851.2±1 897.0	10 323.7±12 186.8	27 607.6±20 099.0	40 782.5±19 944.2

表5 填埋场各类恶臭物质夏冬两季浓度变化倍率

Table 5 Concentration change rate of various substances detected in landfills in summer and winter					
填埋区	时间	硫系物	含氧化合物	芳香族化合物	总浓度
I号	昼	29.0	593.3	50.1	299.8
	夜	19.7	118.7	22.7	63.4
II号	昼	136.8	559.7	510.1	419.8
	夜	4.7	32.3	68.8	30.6

2.2 填埋场恶臭污染的昼夜变化

比较表4中同一填埋区域昼夜的恶臭物质浓度,夜间浓度普遍高于白天。除了夏季I号填埋区因含氧化合物白天浓度占比较高而夜间显著大幅下降,导致白天总浓度高于夜间外,其它各类恶臭物质夜间浓度

均高于白天,II号填埋区冬季夜间和白天的比值最高可达24.3倍。同时,比较3类恶臭污染物中,硫系物和芳香族化合物的夜间提升倍率高于含氧化合物。其中,夜间低嗅阈值的硫系物占比上升和浓度增加,应是填埋场夜间恶臭影响更甚的重要原因。

2.3 关键恶臭物质的识别

恶臭污染物浓度并不直接决定臭气影响强度，以恶臭组分物质浓度与其嗅阈值(表3)之比定义的无量纲理论恶臭浓度是评估臭气影响的指示性量化方法。

以恶臭物质总浓度最高的夏天夜间填埋场为例，I 号和 II 号填埋区该时段各采样点检测所

得的各类恶臭物质和理论恶臭物质的质量分数如图1。从中可知，从物质浓度看，硫系物平均的物质质量分数 < 10%，并不占主导地位；含氧化合物与芳香烃类的质量分数更高。而量化后的理论恶臭浓度显示，因为硫系物极低的嗅阈值，硫系物质的浓度贡献率超过了 90%，是关键的恶臭污染物质。

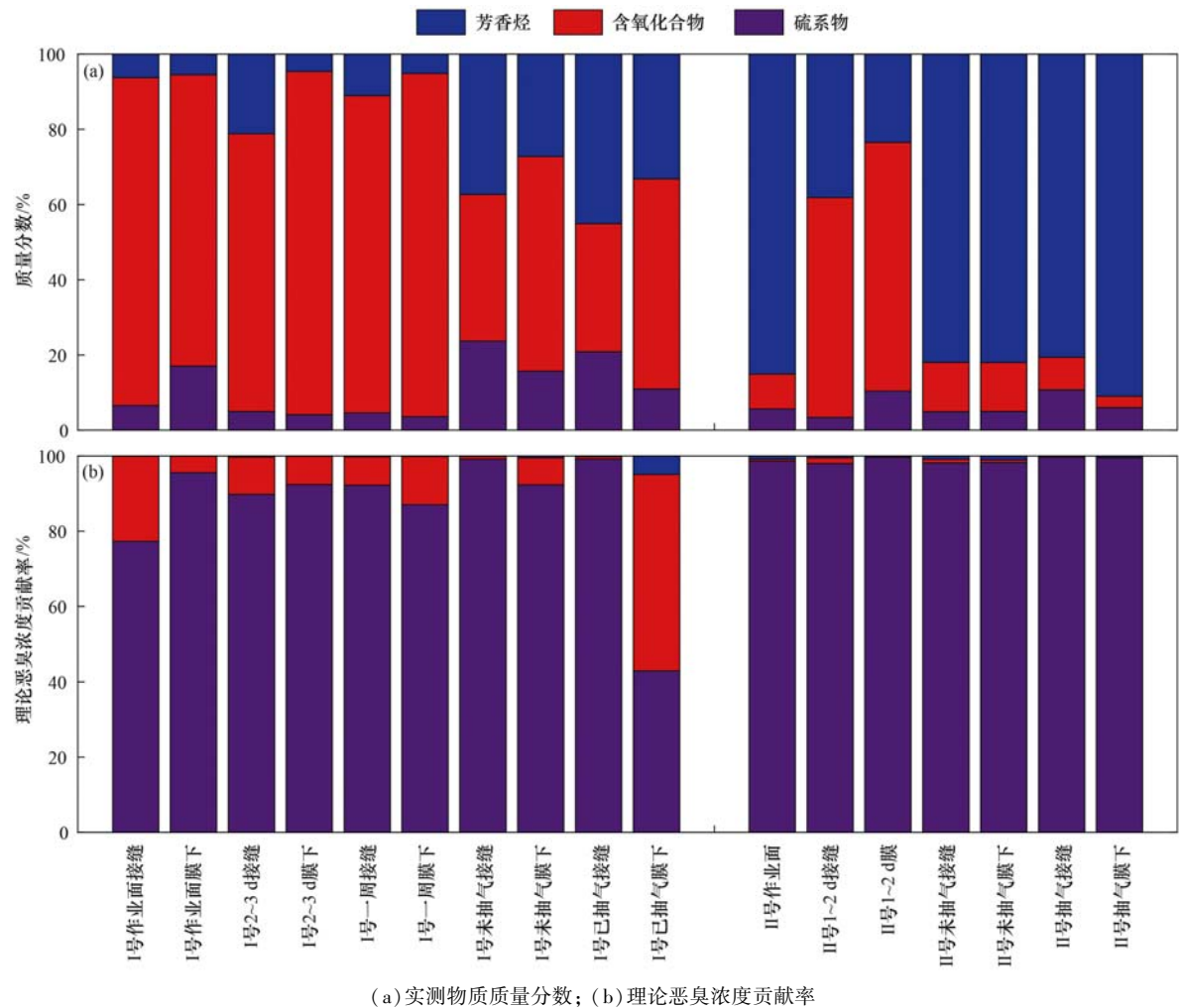


图1 夏季夜间各检测点位恶臭物质浓度和理论臭气浓度的分布

Fig. 1 Distribution of chemical concentrations and theoretical odor concentrations at different sampling points at night in summer

夏天夜间填埋场采集的各个样品(共17个)中,在单一样品中理论恶臭贡献率 > 30% 的物质见表6。从中可知,甲硫醇、乙硫醇和丙硫醇等硫醇类物质成为高贡献率恶臭物质的频率较高,其中,丙硫醇贡献率超过30%的频率最高(0.76),而单一样品中贡献率最高的为甲硫醇(87.1%)和丙硫醇(79.0%)。可知,硫醇类为硫系物中最关键的恶臭污染物。

2.4 填埋恶臭的重点释放位置

夏季填埋区各点位昼夜的理论恶臭浓度如图2,排列顺序对应填埋龄为:作业面、临时覆盖区、中间覆盖未抽气区和中间覆盖抽气区。

表6 填埋场夏间夜间理论恶臭高贡献率的物质

物质	concentration at night in summer		
	贡献率过30% 次数	贡献率过30% 频率	最大贡献率/%
甲硫醇	5	0.29	87.1
乙硫醇	5	0.29	53.1
丙硫醇	13	0.76	79.0
异戊醛	1	0.06	38.4

由图2可见,日处理量更大的II号填埋区各位置的理论恶臭浓度基本均高于I号填埋区。为此,重点讨论II号填埋区的恶臭重点释放位置。在白天,II号填埋区理论恶臭浓度最大值出现在已启

动抽气的膜接缝处和膜下,理论恶臭浓度(无量纲)分别为69 424和48 809,其次为临时覆盖区膜下、未抽气区膜下及接缝和作业面及临时覆盖接缝;夜间同样以已抽气单元为最高,理论恶臭浓度尚高于白天,其它各点则与白天明显不同,临时覆盖区膜下浓度高于白天约8 倍,该接缝处次之,未抽气膜下和接缝则与白天接近,膜上(作业面)恶

臭浓度是白天的5 倍以上.中间覆盖抽气区膜下恶臭浓度高,应是集气井影响范围呈球形^[29]存在死角,导致堆体表层抽气效果不佳之故;中间覆盖未抽气区膜下恶臭浓度较低是因为该区覆盖时间短,恶臭物质积累量较低.临时覆盖区膜下浓度夜间急剧升高则是相邻作业面覆盖后,膜下厌氧程度加深所致.

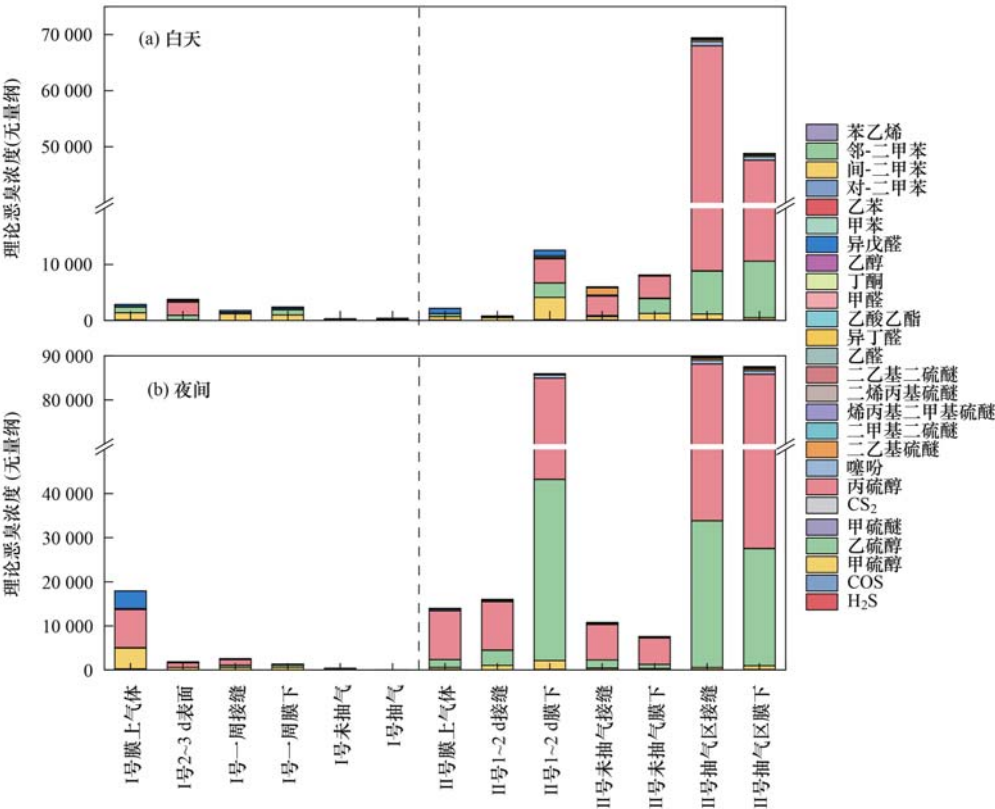


图2 夏季填埋区各点位昼夜的理论恶臭浓度

Fig. 2 Theoretical odor concentrations of landfill sites in daytime and at night in summer

为分析上述各潜在释放点对夜间填埋场恶臭释放的贡献,采用夹角余弦法^[30]对Ⅱ号填埋区夏天夜间各可能释放点的理论恶臭浓度进行相似性分析,结果如表7所示.从中可知,与膜上气体(代表填埋场可自由释放的臭气浓度水平)相似度最高的为中间覆盖未抽气区膜下(1.000)、接缝(0.998)和临时覆盖区接缝(0.988);这些位置应是填埋场夜间恶臭的主要释放点.其中,未抽气区内部气压较高,

恶臭物质易从覆膜的缺陷(虚焊和破损等)处逸出;临时覆盖接缝非气密,气体易于释放,该区膜下与接缝恶臭差异稍大(0.890),则与接缝处积液有滤除效应有关.比较而言,临时覆膜区恶臭浓度高,中间覆盖未抽气区则面积更广,二者均应是填埋场夜间的主要恶臭释放位置.而中间覆盖已抽气区,尽管膜下恶臭浓度高,但是堆体气压较低,释放的贡献较小.

表7 夏天夜间Ⅱ号填埋区各点位理论恶臭浓度相似性分析

Table 7 Similarity analysis of theoretical odor concentration at different sites of landfill Ⅱ in summer night

	膜上气体	1~2 d 接缝	1~2 d 膜下	未抽气接缝	未抽气膜下	抽气区接缝	抽气区膜下
膜上气体	1						
1~2 d 接缝	0.988	1					
1~2 d 膜下	0.815	0.890	1				
未抽气接缝	0.998	0.995	0.847	1			
未抽气膜下	1.000	0.988	0.812	0.998	1		
抽气区接缝	0.924	0.967	0.974	0.944	0.922	1	
抽气区膜下	0.964	0.990	0.939	0.977	0.962	0.993	1

3 结论

(1) 填埋场夏季检出的恶臭物质数量和浓度均高于冬季,尤其是硫系物的检出率显著提高;同时,夏季各恶臭物质合计浓度高于冬季 30~300 倍,表明夏季填埋场发生恶臭污染的可能性急剧上升. 填埋场各夜间气体样品的恶臭物质浓度显著高于白天,总浓度最高提升 24.3 倍.

(2) 硫系物在所有恶臭物质中的平均物质分数 <10%, 低于含氧化合物,但因为硫系物极低的嗅阈值,在绝大部分样品中的理论恶臭贡献率超过了 90%; 其中,甲硫醇、丙硫醇等硫醇类物质是填埋场恶臭的关键污染物.

(3) 填埋单元覆膜后,因厌氧代谢,膜下气体恶臭物质和理论恶臭浓度呈现随填埋龄上升的趋势,表明填埋单元覆膜后在一段时间内仍有较大的恶臭释放潜力. 其中,填埋后 1~2 d 和未抽气区的覆膜单元,因填埋堆体代谢产气的推动,膜下累积的恶臭污染物易通过膜搭接缝隙、膜破裂处等散发至环境,这是夜间填埋场恶臭物质和理论恶臭总浓度高于白天作业时段的主要原因.

(4) 垂直抽气井抽气,作用半径不易达到填埋单元表层,宜补充膜下负压抽气方式,控制膜下气体释放造成填埋场恶臭环境影响.

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, 2019.
- [2] Young P J, Parker A. The identification and possible environmental impact of trace gases and vapours in landfill gas[J]. *Waste Management & Research*, 1983, **1**(3): 213-226.
- [3] 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.
- [4] O'Hare M. Not on my block you don't: facility siting and the strategic importance of compensation[J]. *Public Policy*, 1977, **25**(4): 407-458.
- [5] 生态环境部. 生态环境部公布 2019 年度全国“12369”环保举报情况[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-05/14/content_5511404.htm, 2022-01-24.
- [6] Allen M R, Braithwaite A, Hills C C. Trace organic compounds in landfill gas at seven U. K. waste disposal sites[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(4): 1054-1061.
- [7] 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.
- [8] Nicolas J, Craffe F, Romain A C. Estimation of odor emission rate from landfill areas using the sniffing team method[J]. *Waste Management*, 2006, **26**(11): 1259-1269.
- [9] Parker T, Dottridge J, Kelly S. Investigation of the composition and emissions of trace components in landfill gas[R]. Bristol: Environment Agency, 2002.
- [10] Ko J H, Xu Q Y, Jang Y C. Emissions and control of hydrogen sulfide at landfills: a review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, **45**(19): 2043-2083.
- [11] Kim K H, Choi Y J, Jeon E C, *et al.* Characterization of malodorous sulfur compounds in landfill gas[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(6): 1103-1112.
- [12] Kim K H, Choi Y J, Oh S I, *et al.* Short-term distributions of reduced sulfur compounds in the ambient air surrounding a large landfill facility[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **121**(1-3): 343-354.
- [13] 何晶晶, 曾阳, 唐家富, 等. 城市生活垃圾初期降解挥发性有机物释放特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, **38**(6): 854-858, 869.
- [14] He P J, Zeng Y, Tang J F, *et al.* Emission of volatile organic compounds during initial decomposition phase of municipal solid waste[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, **38**(6): 854-858, 869.
- [15] Ding Y, Cai C Y, Hu B, *et al.* Characterization and control of odorous gases at a landfill site: a case study in Hangzhou, China[J]. *Waste Management*, 2012, **32**(2): 317-326.
- [16] Han Y P, Wang Y, Chai F G, *et al.* Biofilters for the co-treatment of volatile organic compounds and odors in a domestic waste landfill site[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **277**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124012.
- [17] 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.
- [18] Cheng Z W, Sun Z T, Zhu S J, *et al.* The identification and health risk assessment of odor emissions from waste landfilling and composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1038-1044.
- [19] Yao X Z, Ma R C, Li H J, *et al.* Assessment of the major odor contributors and health risks of volatile compounds in three disposal technologies for municipal solid waste[J]. *Waste Management*, 2019, **91**: 128-138.
- [20] 贾悦, 李晓勇, 杨小云. 上海市 1986-2019 年生活垃圾理化特性变化规律研究[J]. 环境卫生工程, 2021, **29**(3): 20-25.
- [21] Jia Y, Li X Y, Yang X Y. Study on the change law of physico-chemical characteristics of MSW in Shanghai from 1986 to 2019[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, **29**(3): 20-25.
- [22] Zarra T, Reiser M, Naddeo V, *et al.* A comparative and critical evaluation of different sampling materials in the measurement of odour concentration by dynamic olfactometry[J]. *Chemical Engineering Transaction*, 2012, **30**: 307-312.
- [23] Capelli L, Sironi S, Del Rosso R. Odor sampling: techniques and strategies for the estimation of odor emission rates from different source types[J]. *Sensors*, 2013, **13**(1): 938-955.
- [24] HJ/T 55-2000, 大气污染物无组织排放监测技术导则[S].
- [25] 方晶晶. 生活垃圾处理设施恶臭污染物的排放特征及源解析方法[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- [26] US-EPA, Compendium 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].
- [27] Zou S C, Lee S C, Chan C Y, *et al.* Characterization of ambient volatile organic compounds at a landfill site in Guangzhou, South China[J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(9): 1015-1022.
- [28] Wu C D, Liu J M, Liu S H, *et al.* Assessment of the health risks

- and odor concentration of volatile compounds from a municipal solid waste landfill in China[J]. *Chemosphere*, 2018, **202**: 1-8.
- [27] 李昊, 刘彦君, 陈坦, 等. 填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4070-4077.
- Li H, Liu Y J, Chen T, *et al.* Ozone generation potential and highly contributing substances of NMOCs from landfill working face[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4070-4077.
- [28] Capelli L, Sironi S, Del Rosso R, *et al.* A comparative and critical evaluation of odour assessment methods on a landfill site [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(30): 7050-7058.
- [29] Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues [M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [30] Kuto V, Deshpande B. Data Science—Concepts and Practice [M]. 2nd edition. USA Cambridge: Morgan Kaufmann publications, 2019.

欢迎订阅 2022 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE;Scopus;化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA);Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA);Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS);Life Sciences Abstracts等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risk in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)