

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

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

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐珺, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响

余亚伟¹, 杨雨涵¹, 张成^{1,2*}, 易建婷¹, 安思危¹, 王定勇^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 采用田间试验, 分别施加两种不同的污泥堆肥品(含生物质炭和不含生物质炭), 研究污泥堆肥土地利用过程土壤及植物总汞和甲基汞变化情况、迁移转化特征和植物富集能力。结果表明, 施加污泥堆肥品会引起土壤总汞和甲基汞含量升高, 但总汞含量低于国家土壤环境质量二级标准。生物质炭堆肥品可能促进土壤汞的甲基化, 但不同处理土壤甲基汞/总汞(MeHg/THg)比值较低。植物成熟后不同处理植物总汞含量明显低于幼苗期, 而甲基汞含量均高于幼苗期。施加两种堆肥品对植物富集总汞没有明显差异, 但对甲基汞富集影响显著。施加生物质炭堆肥品的土壤甲基汞含量明显高于施加无生物质炭堆肥品的土壤, 而植物甲基汞含量则相反。生物质炭的加入可能有利于土壤甲基汞形成, 但不利于甲基汞的迁移, 抑制植物对土壤甲基汞的富集。植物对甲基汞的富集能力较强(富集系数为 1.24 ~ 14.63), 需关注长期施肥带来的土壤环境汞生态风险。

关键词: 污泥堆肥品; 土地利用; 植物; 总汞; 甲基汞; 富集; 生物质炭

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0405-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201606045

Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants

YU Ya-wei¹, YANG Yu-han¹, ZHANG Cheng^{1,2*}, YI Jian-ting¹, AN Si-wei¹, WANG Ding-yong^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China)

Abstract: Two different sludge composting products (with and without biochar) were applied in field to study the variations of total mercury (THg) and methylmercury (MeHg) in soil and plants, as well as their migration in the soil-plant system and accumulation ability in plants during the sludge compost land use process. The results indicated that the concentrations THg and MeHg in soil increased after applying sewage sludge compost products, while the THg level was still lower than the secondary standard of national soil environmental quality. Biochar was speculated to probably promote the soil mercury methylation with lower MeHg/THg ratios in different soil treatments. THg concentrations in mature plants were significantly lower than those in seedling stage, but MeHg levels were higher than those in seedling stage. An obvious influence of composting on MeHg enrichment in plants was observed, and this similar effect was not found for THg enrichment. MeHg concentration in the soils applied with biochar compost was significantly higher than that without applying biochar compost soil, while MeHg in plant presented a contrary trend with higher level observed in no-biochar compost soil, suggesting that the addition of biochar could be in favour of soil MeHg formation and inhibit the MeHg accumulation in plants by influencing its migration. Since a strong MeHg accumulation ability with BCF of 1.24-14.63 was present in plant, the mercury ecological risk in soil environment caused by long-term fertilizing should be noticed.

Key words: sludge compost product; land use; plant; total mercury; methylmercury; accumulation; biochar

据统计, 2015 年我国累计处理城镇生活污水 410.3 亿 m³, 而相应的污泥产量突破 3 000 万 t, 如此巨大的污泥量已成为亟待解决、无法回避的重大城市环境问题, 若处置不当则会对环境和人体健康造成严重危害。随着我国新环保法的颁布和“水十条”的实施, 污泥堆肥后进行土地利用将是我国污泥处理处置与资源化的主要方式之一^[1], 其富含氮、磷、钾等植物营养元素和大量的有机质等使其具有较高的利用价值。但污泥堆肥施入土壤后也可能产生二次污染, 特别是增加土壤重金属含量^[2,3]。目前关于污泥土地利用重金属污染问题进行了较多的研究, 郭广慧等^[4]对国内外文献(2006 ~ 2013 年)报道的污泥重金属含量进行了分析, 2013 年我国城市污泥

Hg 的超标率大于 2006 年。铁梅等^[5]通过将污泥与土壤按照一定质量比配成混合土壤进行盆栽试验, 发现污泥的添加促进了黑麦草对 Cu、Cd、Zn 的吸收。李淑芹等^[6]研究污泥堆肥对土壤和大豆不同器官的重金属积累的影响, 发现随着污泥堆肥使用量的增加, 土壤和大豆不同器官中 Cu、Zn、Cd 含量逐渐增加, 但均未超过国家相关标准。Carbonell 等^[7]通过室内堆肥和土地利用试验发现, 施加堆肥品的

收稿日期: 2016-06-08; 修订日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208426); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015B036)

作者简介: 余亚伟(1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 13677633952@163.com

* 通信作者, E-mail: zhcheng@126.com

土壤 Cu、Pb、Zn 含量轻微增加,而施加化肥一方面增加了土壤 Cd 和 Ni 含量,同时发现玉米果实和植物根系分别是重金属含量最低和最高的部分. 虽然关于污泥堆肥土地利用的土壤-植物体系重金属方面做了较多研究,但针对污泥堆肥土地利用过程汞及甲基汞方面的研究还很缺乏. 甲基汞作为亲脂性的有机汞,具有极高的毒性和生物可利用性,通过作物富集后进入人体会引起较大危害. 因此,本研究采用两种污泥堆肥品,分别施用到土壤中并种植作物,分析污泥堆肥土地利用过程总汞及甲基汞的迁移转化和富集特征,以期为深入开展城市污泥土地利用的重金属(特别是汞)环境风险提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

试验于 2015 年 7~8 月在重庆西南大学试验大棚内进行,供试植物为耐热且早熟的不结球白菜 (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* Makino), 试验周期 35 d 左右,按照传统管理模式:施肥、间苗、翻耕、灌溉等管理菜地. 播种前将磨细的堆肥产品均

匀撒在各土壤样方表面后混合均匀,并浇水,后期不追肥. 种植密度为 40 穴·m⁻²,每穴 3 株,分别于发芽期第 1 d 和第 3 d 间苗,每天上午 08:00 前浇水灌溉,作物成熟后收割. 室内配备辅助照明系统,通风换气系统,透光率为 75%~85% 以满足植物光合作用.

所用堆肥品为自制污泥堆肥产品,按照质量比分别将污泥:秸秆:生物质炭=20:5:1(A 类堆肥品)、污泥:秸秆=4:1(B 类堆肥品)混合后放入自制堆肥箱(有效尺寸为 0.90 m×0.45 m×0.71 m),采用强制通风+人工翻堆的方式进行好氧堆肥,堆肥产品仅限于本试验使用. 根据相关资料^[8,9],结合本次试验土壤肥力,确定土地利用试验共设 7 个处理(以施氮量计):即 CK(不施肥)、A₁、A₂、A₃(施氮量分别为 100、200、300 kg·hm⁻²)、B₁、B₂、B₃(施氮量分别为 100、200、300 kg·hm⁻²). 每块试验田为 1 m²,试验田之间用 PVC 板隔开深入土壤表层 30 cm,隔绝地表径流,A、B 处理组间隔约 1 m,避免不同处理组之间相互干扰. 供试土壤和堆肥基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤和堆肥基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil and sludge compost

项目	THg/mg·kg ⁻¹	MeHg/μg·kg ⁻¹	pH	有机质/g·kg ⁻¹	电导率/S·m ⁻¹	TC/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹
供试土壤	0.051	0.16	7.93	18.10	1.11	64.40	1.39
A 组堆肥	2.203	2.31	7.58	550.70	1.83	414.98	24.34
B 组堆肥	2.310	1.83	7.33	431.03	2.15	338.73	24.92

1.2 样品采集与保存

土壤样品于试验前(基本性质见表 1)、幼苗初期(2015 年 7 月 15 日)和植物收获时(2015 年 8 月 13 日)各采集一次,施肥前采集方式采用对角线采样法,幼苗期和收获期土壤样品的采集选取作物种植附近的表层土壤(0~10 cm). 土壤每次采集样品约 300 g 左右,各处理组每次采集 3 个样品;采集的样品放入聚氯乙烯样品袋中,放入冻干机中冻干,研磨并过 100 目尼龙筛后测定. 植物样的采集分别在植株幼苗期和成熟期采集各处理组所有植物样品的地上可食用部分,用去离子水冲洗干净,放入 100℃烘箱烘干至恒重,称量干重,研磨并过 100 目尼龙筛后装袋,于 4℃条件下冷冻保存.

1.3 样品分析方法与质量控制

土壤、植物样品总汞通过 DMA-80 测汞仪进行测定,土壤和植物甲基汞采用溶剂萃取-乙基化衍生-气相色谱与冷原子荧光检测器联用方法(GC-CVAFS)测定^[10,11]. pH 和电导率通过 pH 仪和电导

率仪进行测定,温度在每次采样的时候通过温度计实时测定,有机质通过重铬酸钾容量法-加热法测定;其他物理化学指标参照文献[12]进行测定.

试验所使用的玻璃器皿在使用前均用硝酸(25%,体积比)浸泡 24 h 以上,超纯水清洗后经马弗炉 500℃灼烧 30 min,在洁净无汞的环境下冷却后使用,分析过程中采用空白试验、标准物质测定、平行样控制及加标回收率进行质量控制. 总汞测定加标回收率为 93%~105%,甲基汞测定加标回收率为 89%~103%. 数据处理与图形制作分别使用 Excel 2010、Spss 18.0 和 Origin 8.0.

2 结果与讨论

2.1 土壤总汞与甲基汞含量变化

2.1.1 土壤总汞

幼苗期土壤总汞含量变化情况见表 2. A₁、A₂、A₃ 处理土壤总汞含量分别为(114.29±6.61)、(135.43±10.44)、(125.87±1.49) μg·kg⁻¹; B₁、

B₂、B₃ 处理土壤总汞含量分别为 (167.86 ± 19.27)、(174.43 ± 15.34)、(185.83 ± 12.73) μg·kg⁻¹. 对比 CK, 添加堆肥产品使土壤总汞含量显著升高 ($P < 0.05, n = 12$), A₁、A₂、A₃ 处理分别增加了 124.32%、165.81%、147.05%, B₁、B₂、B₃ 处理分别增加了 229.46%、242.36%、264.73%. 随着施肥量的增加, B 处理组土壤总汞含量逐渐升高, 而 A 处理组土壤总汞含量表现为 A₂ > A₃ > A₁. 这可能是由于 A 处理组堆肥品富含生物质炭, 对施肥后汞元素在土壤中的迁移和分布产生一定影响. 同时, 幼苗期和收获期的土样为作物种植旁边采集, 因而土壤总汞可能由于种植环境及迁移转化等条件影响产生一定差异.

到 8 月植物收获期, 不同处理土壤总汞含量呈降低趋势. 其中, A₁、A₂、A₃ 处理土壤总汞比 7 月刚试验时分别减少了 6.87%、5.50%、11.97%, B₁、B₂、B₃ 处理分别降低了 20.19%、8.73%、11.63%, 这可能是由于土壤中汞的转化、释放和植物对土壤汞元素的吸收所致. 分析发现, 施加污泥堆肥产品虽然能增加土壤总汞含量, 但都低于国家土壤环境质量二级标准限值 (GB 15618-1995), 没有引起土壤汞污染, 但若长期施用可能会造成土壤汞累积, 存在潜在的汞生态风险.

2.1.2 土壤甲基汞变化特征

土壤甲基汞含量变化情况如图 1. 结果显示, 幼苗期 (7 月 15 日) A₁、A₂、A₃ 处理土壤甲基汞含量分别为 0.28、0.40、0.38 ng·g⁻¹, B₁、B₂、B₃ 处理则分别为 0.23、0.22、0.38 ng·g⁻¹, 其含量与一般旱地土壤甲基汞含量相近, 甚至低于稻田土壤^[13,14], A 组土壤甲基汞含量总体上略高于 B 组. 对比 CK, 施加污泥堆肥品使土壤甲基汞含量明显升高, A₁、A₂、A₃ 和 B₁、B₂、B₃ 土壤甲基汞升高量分

别为 75.45%、151.33%、135.29% 和 45.47%、38.66%、139.14%, A 处理组土壤甲基汞增加量总体高于 B 处理组. 随着施肥量的增加, 两组处理土壤甲基汞含量没有明显变化趋势. 试验结束时 (8 月 13 日), A₁、A₂、A₃ 和 B₁、B₂、B₃ 土壤甲基汞含量分别为 0.34、0.49、0.39 ng·g⁻¹ 和 0.21、0.10、0.19 ng·g⁻¹. 图 1(b) 可以看出, A 处理组土壤甲基汞含量明显高于 B 处理组 ($P < 0.05, n = 12$).

表 2 不同处理土地利用土壤总汞含量变化¹⁾/μg·kg⁻¹

处理组	land use processing/μg·kg ⁻¹	
	2015-07-15	2015-08-13
CK	50.95 ± 1.42a	56.72 ± 0.57a
A ₁	114.29 ± 6.61b	106.44 ± 8.97b
A ₂	135.43 ± 10.44d	127.98 ± 7.77d
A ₃	125.87 ± 1.49c	110.80 ± 8.00c
B ₁	167.86 ± 19.27e	133.97 ± 0.85e
B ₂	174.43 ± 15.34f	159.21 ± 5.41f
B ₃	185.83 ± 12.73g	164.22 ± 6.32g

1) 同列数值的不用字母表示 Duncan's 多重比较差异显著 ($P < 0.05, n = 12$)

与幼苗期相比, 试验结束时 A 组 3 种处理的甲基汞含量均有不同程度增加, 而 B 组 3 种处理土壤甲基汞含量则有所降低. 分析原因, 可能是由于 A 组处理加入了含生物质炭的堆肥品, 提高了土壤有机质含量. Porvari 等^[15]发现有机质作为甲基化微生物的营养物质, 能够为其提供充足碳源, 提高微生物活性, 促进汞甲基化. Graber 等^[16]也认为施加生物质炭能够增加微生物群落, 促进土壤团聚体的形成, 改善土壤物理性质, 保持水气协调, 为微生物的活动创造了良好的条件. 因此施加生物质炭堆肥品的 A 处理组土壤甲基汞含量高于 B 处理组. Weber^[17]研究发现 DOM 能促进汞的甲基化, 而

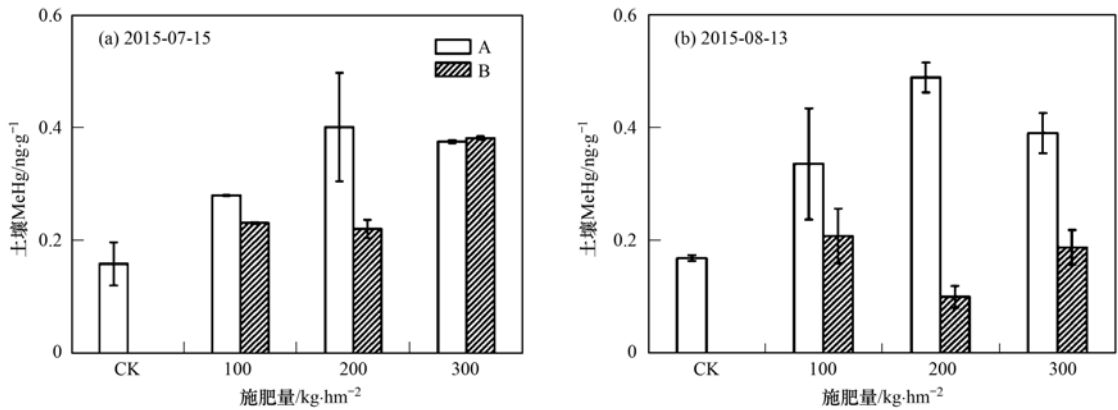


图 1 土壤甲基汞含量变化情况
Fig. 1 Content changes of soil methylmercury

Barkay 等^[18] 却认为 DOM 的络合作用能够提高汞溶解和抑制汞形成硫化物沉淀,限制甲基化细菌对 Hg^{2+} 的可利用程度和甲基汞的生物累积效率. 本试验也发现,生物质炭堆肥品加入后,增加了土壤有机质含量,土壤甲基汞含量增加,但施肥量超过一定范围后,土壤甲基汞含量出现降低,表明有机质对土壤汞的甲基化可能具有双重作用,但其影响机制需要进一步研究分析.

2.1.3 土壤 MeHg/THg 比值

分析发现,不同处理土壤 MeHg/THg 比值较低. 刚施入污泥堆肥品时, A_1 、 A_2 、 A_3 处理和 B_1 、 B_2 、 B_3 处理土壤 MeHg/THg 比值分别为 0.25%、0.30%、0.30% 和 0.14%、0.13%、0.21%, CK 处理 MeHg/THg 比值为 0.31%, 和湖泊和湿地沉积物 MeHg/THg 比值相近^[19]. 本试验结束时,土壤 MeHg/THg 比值分别为 0.32%、0.38%、0.35% 和 0.16%、0.06%、0.11%, CK 处理 MeHg/THg 比值为 0.30%. 总体来说, A 处理组 MeHg/THg 比值高于 B 处理组,这可能与土壤中甲基汞含量较高以及 A 组处理含有生物质炭有关. 有研究表明土壤汞主要以性质稳定的残渣态形式存在^[20~22],活性汞含量极少. 彭倩等^[23] 发现腐殖酸的加入导致土壤中有机关态汞含量显著上升,说明无机汞与腐殖酸存在络合作用. Cunha-Santino 等^[24] 也发现有机质对土壤重金属的矿化作用,从而降低对土壤微生物的生物有效性,因此本试验中土壤汞甲基化率均处于较低水平.

2.2 植物总汞和甲基汞含量变化

2.2.1 植物总汞

表 3 结果显示,植物幼苗期 A_1 、 A_2 、 A_3 处理植物总汞含量分别为 (314.99 ± 63.26) 、 (377.77 ± 111.13) 、 $(321.45 \pm 19.03) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_1 、 B_2 、 B_3 处理植物总汞含量分别为 (397.87 ± 46.85) 、 (429.22 ± 80.30) 、 $(377.15 \pm 173.21) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, A、B 各处理组内植物总汞含量无显著差异. 而到 8 月收获期,植物总汞含量均出现不同程度降低,其中 A_1 、 A_2 、 A_3 处理分别下降了 60.14%、44.93%、38.76%; B_1 、 B_2 、 B_3 处理分别下降了 52.91%、58.10%、55.25%. 这主要是由于污泥堆肥品富含有机质和植物所需多种微量元素,在幼苗期植物生长需要大量养分,根系吸收能力较强,从施污土壤中吸收养分的同时,富集了大量的汞. 同时,植物中的汞也可以通过气孔吸收 Hg^0 、叶片吸附大气 Hg^0 、 Hg^{2+} 以及通过蒸腾作用吸收土壤可溶性汞^[25,26].

而收获期 90% 以上的植物已成熟,需要的养分较少,植物体内生长代谢、化学转化等过程逐渐减少,基本不再从土壤中吸收营养,植物体内吸收的生物可利用汞含量也基本稳定,因而收获期植物汞含量低于幼苗期. A_1 、 A_2 、 A_3 处理和 B_1 、 B_2 、 B_3 处理的植物总汞含量无明显差异 ($P > 0.05$, $n = 12$),说明生物质炭的添加对植物总汞的吸收未产生显著影响.

表 3 不同处理植物总汞含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Total mercury in the plants of different land use processing/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理组	2015-07-15	2015-08-13
CK	167.42 ± 72.44b	121.32 ± 27.15d
A_1	314.99 ± 63.26a	125.55 ± 11.81bc
A_2	377.77 ± 111.13a	208.03 ± 10.70a
A_3	321.45 ± 19.03a	196.84 ± 34.91a
B_1	397.87 ± 46.85a	187.35 ± 44.66a
B_2	429.22 ± 80.30a	179.84 ± 37.12ab
B_3	377.15 ± 173.21a	168.78 ± 25.37abc

2.2.2 植物甲基汞

植物甲基汞含量变化见图 2. 幼苗期 A 处理组植物甲基汞含量范围为 $0.21 \sim 0.54 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, B 处理组植物甲基汞含量范围为 $0.28 \sim 1.13 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 除 B_3 处理外,其余处理均高于 A 处理组. 收获期不同处理植物体内甲基汞含量比幼苗期均有不同程度增加, A 组增加幅度较小,而 B 组 B_2 、 B_3 处理分别增加了 1.4 和 3.7 倍. A 处理组植物甲基汞含量显著低于 B 处理 ($P < 0.05$, $n = 12$),与土壤甲基汞含量正好相反 (A 处理组土壤甲基汞含量明显高于 B 处理组),说明生物质炭对植物甲基汞的吸收或者土壤甲基汞自身迁移能力造成一定抑制. 虽然试验中生物质炭的加入增加了土壤有机质含量 (土壤有机质均值从 1.81% 增加到 6.11%), 但有机质的增加特别是腐殖酸与汞具有矿物质结合、络合反应等吸附作用,从而使其在土壤中被固定下来,导致其甲基化后难以从土壤迁移到植物体内.

2.3 植物汞富集水平

植物中重金属的富集系数 (bioconcentration factors, BCFs) 可以用植物中的重金属含量与土壤重金属含量的比值来表示^[27]. 不同处理植物汞的富集系数见图 3. 从中可知,植物对甲基汞的富集系数为 $1.24 \sim 14.63$,显著高于 ($P < 0.05$, $n = 12$) 总汞的富集系数 ($1.03 \sim 1.78$),其结果与梁丽等^[28] 的研究结果相近. 本试验在大棚里面进行,受大气干湿沉降的影响很小,植物富集的汞一方面来源于土壤,另

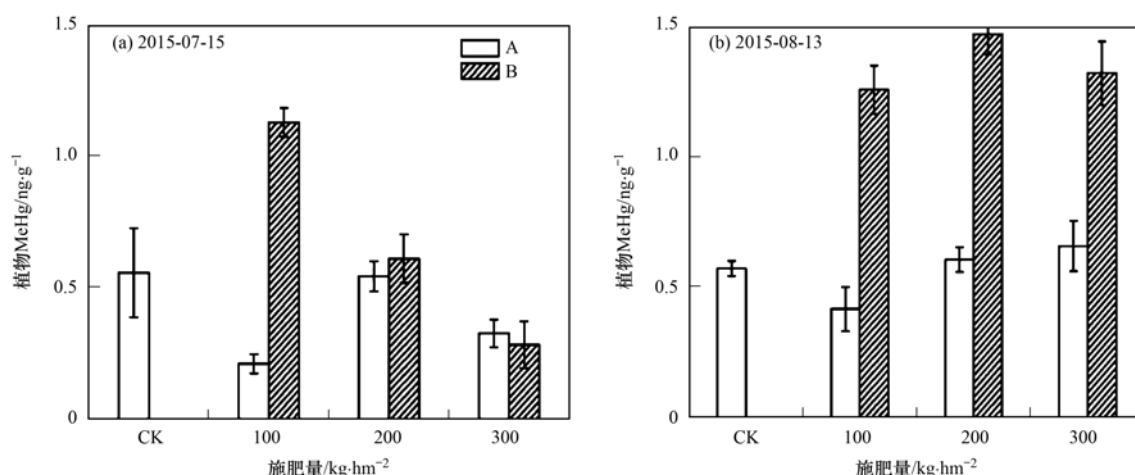


图2 植物甲基汞含量变化

Fig. 2 Content changes of plant methylmercury

外也可能通过植物叶片吸收大气中的汞以及通过蒸腾作用吸收土壤释放的汞^[29,30]。有研究发现,水稻地上组织中的汞主要来自对大气汞的吸收,茎部和叶部少部分汞来自根系对土壤汞的吸收^[26],表明大气汞对植物汞含量也有一定影响。但由于仪器设备的限制,本次试验未对大气汞浓度进行监测。研究还发现,A、B两处理组植物对总汞的吸收没有明显差异($P > 0.05$, $n = 12$),但A组甲基汞富集系数显著低于B组($P < 0.05$, $n = 12$),表明生物质炭的加入可能降低植物对土壤甲基汞的富集,这与前面对植物体内甲基汞含量分析结果一致,但其影响机制还需进一步研究。

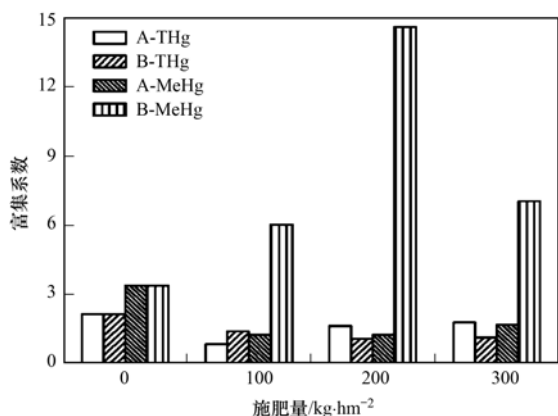


图3 植物总汞和甲基汞富集系数

Fig. 3 BCFs of THg and MeHg in the plants

2.4 土壤-植物系统汞迁移转化影响因素

汞在土壤中的积累、迁移和转化受土壤体系中的生物、物理过程和氧化还原、沉淀溶解、吸附解吸、络合螯合和酸碱反应等复杂化学过程的影响^[31],因此对土壤理化性质和土壤、植物总汞及甲

基汞进行相关性分析。结果显示,A处理组土壤甲基汞与有机质呈显著正相关关系($R = 0.955^*$, $P = 0.045$, $n = 12$)。本试验中A处理组污泥堆肥品富含生物质炭导致土壤有机质含量升高,有研究称有机质可以促进土壤汞甲基化^[32],因此在刚施入污泥堆肥品和试验结束时,A处理土壤甲基汞含量明显高于B处理,说明生物质炭的添加可能有利于土壤汞甲基化。此外,生物质炭的加入可能改变了土壤内部环境,其多孔性和表面特性可以为土壤微生物提供附着位点和较大的空间,并且其保水保肥的能力对微生物的数量和活性起促进作用^[33,34],从而有利于甲基化微生物活动,进而影响到土壤甲基汞的含量。此外,B处理组植物甲基汞与TC呈显著正相关关系($R = 0.961^*$, $P = 0.039$, $n = 12$),TN、pH等其他因素与土壤、植物总汞及甲基汞之间相关性均不明显。

3 结论

(1)施加污泥堆肥产品能增加土壤总汞和甲基汞含量,但总汞低于国家土壤环境质量二级标准。生物质炭堆肥品的加入可能促进土壤中汞的甲基化,增加土壤甲基汞含量,不同处理土壤MeHg/THg比值均处于较低水平。

(2)植物幼苗期富集了大量的汞,收获期植物总汞含量低于幼苗期,而甲基汞含量均高于幼苗期,且施加生物质炭堆肥品对土壤甲基汞的迁移和植物对甲基汞的吸收具有一定抑制作用。

(3)植物对甲基汞富集能力显著高于总汞,污泥堆肥品的长期施用可能会造成潜在的汞生态风

险. 生物质炭对植物总汞的富集未产生显著影响, 但降低了植物对土壤甲基汞的富集.

参考文献:

- [1] 陈同斌, 郑国砥, 高定, 等. 城市污泥堆肥处理及其产业化发展中的几个关键问题[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(9): 104-108.
Chen T B, Zheng G D, Gao D, *et al.* Key problems in municipal sludge composting and its industrialization process [J]. China Water & Wastewater, 2009, **25**(9): 104-108.
- [2] 周东兴, 魏丹, Касатиков В А, 等. 城市污泥及其堆肥对土壤重金属积累的影响[J]. 土壤通报, 2010, **41**(4): 976-980.
Zhou D X, Wei D, Касатиков В А, *et al.* The effect of sewage sludge and its compost on the accumulation of heavy metals in soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, **41**(4): 976-980.
- [3] 王社平, 程晓波, 姚岚, 等. 施用城市污泥堆肥对土壤和青椒重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(9): 1829-1836.
Wang S P, Cheng X B, Yao L, *et al.* Effects of sewage sludge compost application on heavy metal accumulation in soil and green pepper [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(9): 1829-1836.
- [4] 郭广慧, 陈同斌, 杨军, 等. 中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(10): 2455-2461.
Guo G H, Chen T B, Yang J, *et al.* Regional distribution characteristics and variation of heavy metals in sewage sludge of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(10): 2455-2461.
- [5] 铁梅, 宋琳琳, 惠秀娟, 等. 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性[J]. 生态学报, 2013, **33**(7): 2173-2181.
Tie M, Song L L, Hui X J, *et al.* The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(7): 2173-2181.
- [6] 李淑芹, 田仲鹤, 金宏鑫, 等. 施用城市污泥堆肥对土壤和大豆器官重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(2): 352-357.
Li S Q, Tian Z H, Jin H X, *et al.* Effects of municipal sludge composts on heavy metal accumulation in soil and soybean [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(2): 352-357.
- [7] Carbonell G, De Imperial R M, Torrijos M, *et al.* Effects of municipal solid waste compost and mineral fertilizer amendments on soil properties and heavy metals distribution in maize plants (*Zea mays* L.) [J]. Chemosphere, 2011, **85**(10): 1614-1623.
- [8] 王正银, 李会合, 李宝珍, 等. 氮肥、土壤肥力和采收期对小白菜体内硝酸盐含量的影响[J]. 中国农业科学, 2003, **36**(9): 1057-1064.
Wang Z Y, Li H H, Li B Z, *et al.* Influence of nitrogen rates, soil fertility and harvest time on nitrate in Chinese cabbage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, **36**(9): 1057-1064.
- [9] 王荣萍, 蓝佩玲, 李淑仪, 等. 氮肥品种及施肥方式对小白菜产量与品质的影响[J]. 生态环境, 2007, **16**(3): 1040-1043.
Wang R P, Lan P L, Li S Y, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizers and fertilization patterns on yield and quality of *Brassica chinensis* [J]. Ecology and Environment, 2007, **16**(3): 1040-1043.
- [10] 何天容, 冯新斌, 戴前进, 等. 萃取-乙基化结合 GC-CVAFS 法测定沉积物及土壤中的甲基汞[J]. 地球与环境, 2004, **32**(2): 83-86.
He T R, Feng X B, Dai Q J, *et al.* Determination of methyl mercury in sediments and soils by GC-CVAFS after aqueous phase ethylation [J]. Earth and Environment, 2004, **32**(2): 83-86.
- [11] 仇广乐, 冯新斌, 梁琰, 等. 溶剂萃取-水相乙基化衍生 GC-CVAFS 联用测定苔藓样品中的甲基汞[J]. 分析测试学报, 2005, **24**(1): 29-32.
Qiu G L, Feng X B, Liang L, *et al.* Determination of methylmercury in moss by ethylation-gas chromatography-cold vapor atomic fluorescence spectrometry with solvent extraction [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2005, **24**(1): 29-32.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] 尹德良, 何天容, 安艳玲, 等. 万山汞矿区稻田土壤甲基汞的分布特征及其影响因素分析[J]. 地球与环境, 2014, **42**(6): 703-709.
Yin D L, He T R, An Y L, *et al.* Distribution and influencing factors of methylmercury in paddy soil of Wanshan mercury mining areas [J]. Earth and Environment, 2014, **42**(6): 703-709.
- [14] 郑顺安, 唐杰伟, 郑宏艳, 等. 污灌区稻田汞污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(9): 2729-2736.
Zheng S A, Tang J W, Zheng H Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessments of mercury in wastewater-irrigated paddy fields [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(9): 2729-2736.
- [15] Porvari P, Verta M. Methylmercury production in flooded soils: a laboratory study [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, **80**(1-4): 765-773.
- [16] Graber E R, Harel Y M, Kohon M, *et al.* Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media [J]. Plant and Soil, 2010, **337**(1-2): 481-496.
- [17] Weber J H. Review of possible paths for abiotic methylation of mercury (II) in the aquatic environment [J]. Chemosphere, 1993, **26**(11): 2063-2077.
- [18] Barkay T, Gillman M, Turner R R. Effects of dissolved organic carbon and salinity on bioavailability of mercury [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(11): 4267-4271.
- [19] DeLaune R D, Jugsujinda A, Devai I, *et al.* Relationship of sediment redox conditions to methyl mercury in surface sediment of Louisiana lakes [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2004, **39**(8): 1925-1933.
- [20] 冯玲, 李波, 修光利, 等. 西宁市夏季周边表层土壤中汞形态的空间分布特征[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(4): 118-123.
Feng L, Li B, Xiu G L, *et al.* Spatial distribution of mercury species in the topsoils of ambient areas surrounding Xining urban in summer [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(4): 118-123.
- [21] 曾昭婵, 黄艺, 吴攀, 等. 贵州省万山汞矿区周围土壤中不

- 同形态汞的空间分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(5): 949-956.
- Zeng Z C, Huang Y, Wu P, *et al.* The spatial distribution characteristics of mercury specification in soil of Wanshan mercury mining area Guizhou province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(5): 949-956.
- [22] Millán R, Lominchar M A, López-Tejedor I, *et al.* Behavior of mercury in the Valdeazogues riverbank soil and transfer to *Nerium oleander* L. [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, **123**: 136-142.
- [23] 彭倩, 朱慧可, 钟寰, 等. 腐殖酸对汞污染稻田中甲基汞行为的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(5): 748-752.
- Peng Q, Zhu H K, Zhong H, *et al.* Effects of humic acid on behaviors of methylmercury in Hg-contaminated paddy soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(5): 748-752.
- [24] Cunha-Santino M B D, Júnior I B. Humic substance mineralization in a tropical oxbow lake (São Paulo, Brazil)[J]. Hydrobiologia, 2002, **468**(1-3): 33-43.
- [25] Kuiken T, Zhang H, Gustin M, *et al.* Mercury emission from terrestrial background surfaces in the eastern USA. Part I: air/surface exchange of mercury within a southeastern deciduous forest (Tennessee) over one year[J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(3): 345-355.
- [26] 陈剑, 王章玮, 张晓山, 等. 开顶式气室原位研究水稻汞富集对大气汞浓度升高的响应[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2997-3003.
- Chen J, Wang Z W, Zhang X S, *et al.* Open-top chamber for in situ research on response of mercury enrichment in rice to the rising gaseous elemental mercury in the atmosphere [J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2997-3003.
- [27] Zu Y Q, Yuan L, Schwartz C, *et al.* Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China [J]. Environment International, 2004, **30**(4): 567-576.
- [28] 梁丽, 王永敏, 李先源, 等. 三峡水库消落带植物汞的分布特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4103-4111.
- Liang L, Wang Y M, Li X Y, *et al.* Distribution of mercury in plants at water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4103-4111.
- [29] Laacouri A, Nater E A, Kolka R K. Distribution and uptake dynamics of mercury in leaves of common deciduous tree species in Minnesota, U. S. A [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(18): 10462-10470.
- [30] Stamenkovic J, Gustin M S. Nonstomatal versus stomatal uptake of atmospheric mercury [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(5): 1367-1372.
- [31] 荆延德, 赵石萍, 何振立. 土壤中汞的吸附-解吸行为研究进展[J]. 土壤通报, 2010, **41**(5): 1270-1274.
- Jing Y D, Zhao S P, He Z L. A review on the studies on mercury adsorption-desorption behavior in the soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, **41**(5): 1270-1274.
- [32] 阴永光, 李雁宾, 马旭, 等. 天然有机质介导的汞生物地球化学循环: 结合作用与分子转化[J]. 化学进展, 2013, **25**(12): 2169-2177.
- Yin G Y, Li Y B, Ma X, *et al.* Role of natural organic matter in the biogeochemical cycle of mercury: binding and molecular transformation[J]. Progress in Chemistry, 2013, **25**(12): 2169-2177.
- [33] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(6): 1301-1310.
- [34] Khodadad C L M, Zimmerman A R, Green S J, *et al.* Taxa-specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(2): 385-392.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301

