

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载钼或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗砷内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征

李雨琴¹, 孙涛¹, 邓晗¹, 张成^{1,2,3}, 王永敏^{1,2,3}, 王定勇^{1,2,3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716; 3. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 采用盆栽模拟试验, 对汞(Hg)及甲基汞(MeHg)在酸性紫色水稻土中不同水稻生长期的动态变化进行了研究, 并分析对比了总汞(THg)和MeHg在水稻体中的富集特征。结果表明: 在水稻生长期, 土壤总汞含量变化较小, MeHg含量随时间增加而增加, 土壤MeHg/THg值的变化趋势和土壤中MeHg含量变化一致。完熟期THg在水稻植株中的分布状况为: 根>籽粒>茎>叶>穗壳, MeHg的分布为: 籽粒>根>茎>叶>穗壳。水稻植株中MeHg/THg均值为24.03%, 大于土壤均值3.05%, 说明水稻植株中具有较强的MeHg累积能力。在水稻生长周期内, 水稻体内MeHg富集系数均值为8.16, 远大于THg富集系数的均值2.31, 且籽粒中的MeHg富集系数大于根、茎、叶, 说明水稻对MeHg的富集能力强于THg, 且籽粒更易于富集MeHg。水稻体内的MeHg的转移系数大于THg, 且籽粒中MeHg的转移系数大于1, 进一步说明MeHg比THg更易在水稻体内转移。

关键词: 汞; 甲基化; 甲基汞; 水稻; 酸性紫色水稻土

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2472-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709126

Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area

LI Yu-qin¹, SUN Tao¹, DENG Han¹, ZHANG Cheng^{1,2,3}, WANG Yong-min^{1,2,3}, WANG Ding-yong^{1,2,3*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-Point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to analyze the characteristics of mercury (Hg) accumulation during the rice growth period in acidic purple paddy soil. Results showed that the soil total Hg concentration was stable with time during the rice growth period, while methylmercury (MeHg) increased greatly. Therefore, the ratio of MeHg/THg was mainly affected by MeHg concentration. THg concentration in rice plant parts followed the trend: root > grain > stalk > leaf > husk at the mature grain stage, while MeHg concentration followed grain > root > stalk > leaf > husk. The average of MeHg/THg in rice (24.03%) far exceeded that in soil (3.05%), suggesting that rice plants have a strong affinity for MeHg accumulation. This conclusion was supported also by the great difference in average of bio-concentration factors between MeHg (8.16) and THg (2.31) or the transfer factor in the grain, which was more than 1. Moreover, the bio-concentration factor for grain was higher than that for roots, stalks, and leaves, suggesting MeHg was prone to accumulation in grain compared with other part of rice plants.

Key words: mercury; methylation; methylmercury; rice plants; acidic purple paddy soil

Hg是具有高毒性的微量重金属元素, 它可经过生物及非生物作用转化成毒性更强的有机化合物形态, 即MeHg^[1], 而MeHg具有极高的神经毒性, 可以通过生物富集和食物链放大对人类健康产生更大威胁^[2]。已有研究表明, 沉积物、土壤、沉积物-水界面等厌氧环境是自然界Hg甲基化的主要场所^[3,4]。近年的研究也发现, 稻田作为一种水生生态系统, 淹没的湿地土壤为Hg的甲基化提供了厌氧环境, 增强了Hg甲基化微生物的活性, 促进了MeHg的产生^[5]。因此, 水稻相较于其他旱地作物, 可能更易富集MeHg。

紫色土在我国南方诸省均有分布, 其中以四川

盆地分布面积最广, 同时四川盆地又是我国西南地区主要的耕作区, 也是我国水稻的主产区。然而, 西南地区也是我国的主要的酸沉降区之一, 随着酸沉降的积累以及农田过量且不均衡地施肥导致土壤酸化的情况日趋严峻。土壤的酸化势必会导致土壤理化性质的变化(如土壤pH、阳离子交换量、盐基饱和度降低), 进而导致土壤的贫瘠、有毒重金属的活化等。有研究指出, Hg²⁺在酸性(pH 2~

收稿日期: 2017-09-14; 修订日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671469, 41373113); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430004)

作者简介: 李雨琴(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: laaland@email.swu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

6) 土壤中的化学行为与其它二价重金属不同, 且在 $\text{pH} < 4.5$ 时, 土壤中的腐殖质增加导致土壤对 Hg^{2+} 的吸附量较大^[6]. 因而, 本文选取酸性紫色水稻土, 采用盆栽试验, 研究酸性紫色水稻土中 Hg 的甲基化及水稻 MeHg 的富集特征, 以期为深入研究稻田生态系统中 Hg 的迁移转化规律提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自重庆市江津区四面山镇 ($28^{\circ}38'58.65''\text{N}$, $106^{\circ}24'21.10''\text{E}$), 由白垩纪飞仙关组红紫色砂岩发育的酸性紫色土稻田, 土壤基本理化性质见表 1. 土壤经研磨, 过 2 mm 筛用于盆栽

试验. 盆栽试验在重庆市西南大学国家紫色土肥力监测基地网室中 ($30^{\circ}26'\text{N}$, $106^{\circ}26'\text{E}$) 进行.

1.2 试验设计

试验设两组处理, 分别为加 Hg 组 (AH) 和对照组 (CK). 其中, 加 Hg 组将 HgCl_2 作为外源 Hg 按 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土加入酸性紫色土样中混匀, 平衡 30 d; 同时, 将未添加 Hg 的酸性紫色土作为对照处理. 将土壤分别装入直径 25 cm、高 30 cm 陶瓷盆中, 每组处理装 5 盆, 每盆 5 kg. 在所有盆中施入基肥 (硫酸钾: 1.535 g , 尿素: 1 g , 过磷酸钙: 1.171 g), 添加自来水, 形成约 5 cm 高的水层, 平衡 2 d. 移栽苗龄一致, 长势相近的水稻幼苗, 每盆 3 株. 水稻生长期间按时浇灌, 使盆内保持约 5 cm 高的水层.

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Physicochemical properties of soils in this study

土壤类型	pH	阳离子交换量 / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	机械组成/%			THg / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	MeHg / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
				>0.25 mm	<0.02 mm	<0.002 mm		
酸性紫色土	4.90	18.65	18.34	2.72	28.80	14.01	97.02	0.18

采样根据水稻生长周期进行, 分别在插秧前、返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期、完熟期采集土样, 共计 7 次; 在插秧前 (秧苗)、拔节期、乳熟期、完熟期采集水稻植株, 共计 4 次. 土样采集表层土和底层土, 装于自封袋内. 植物样品采集整株水稻, 用去离子水洗净后, 区分根、茎、叶、穗 4 部分, 分装于自封袋内. 样品采集后立即放置于低温保温箱内, 于 2 h 内送回实验室处理.

1.3 样品分析方法与质量控制

土样经冻干机避光冻干和玛瑙研钵磨细过 100 目筛, 土壤 THg 直接采用意大利 Milestone 公司生产的 DMA-80 (检测限 5 ng) 固体进样自动测 Hg 仪测定. 土壤 MeHg 分析采用萃取-乙基化结合 GC-CVAFS 法测定^[7] (检测限为 $0.6\text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$). 水稻经冻干机避光冻干, 完熟期稻米脱壳得到籽粒, 分别将根、茎、叶、穗、籽粒、穗壳研磨后过 0.1 mm 孔径筛. 植物 THg 用 DMA-80 固体进样自动测 Hg 仪直接测定. 植物 MeHg 采用 $\text{KOH}/\text{CH}_3\text{OH}$ 溶液萃取, 并结合水相乙基化等温气相色谱-冷原子荧光法 (GC-CVAFS) 测定.

试验过程采用空白试验、平行试验和标准物质进行质量控制. 土壤 THg 测样中使用标准物质 GBW07428 (GSS-16) 进行质量控制, 植物 THg 使用 GBW10020 (GSB-11) 进行质量控制, 土壤及植物 MeHg 使用 Brooks Rand LLC 生产的 methylmercury

(II) chloride 标准物质进行质量控制. 所测浓度值与标准值相差均小于 8%, 标准物质的加标回收率为 96% ~ 104%. 所用化学试剂硝酸、盐酸均为优级纯, 水为超纯水. 试验数据采用 OriginLab 2017 等软件进行处理.

2 结果与讨论

2.1 水稻土中 Hg 的变化特征

2.1.1 水稻土中 THg 的变化特征

由图 1(a) 可知, AH 组的土壤 THg 含量随着水稻的生长具有较小的波动, 范围值为 $664.95 \sim 774.19\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (均值为 $709.79\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 土壤在淹水初期, THg 含量有下降的趋势, 这可能是因为淹水后土壤 THg 向水体释放^[8]. CK 组土壤 THg 含量较为稳定, 均值为 $98.98\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (范围为 $89.80 \sim 117.81\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 在水稻生长期, 水稻土中 THg 的含量变化可能和土壤再吸附、植物富集以及大气沉降有关. AH 组的土壤 THg 含量变化较大, 说明土壤初始 Hg 含量对土壤中 Hg 的平衡、吸附、解吸有影响, 土壤系统中的 Hg 处于吸附和解吸的动态平衡中^[9], 也有研究指出, 当重金属离子浓度增大时, 它们与土壤颗粒表面碰撞的几率增多, 因而较易被土壤吸附^[10].

2.1.2 水稻土中 MeHg 变化特征

土壤 MeHg 含量的变化趋势与土壤 THg 含量有

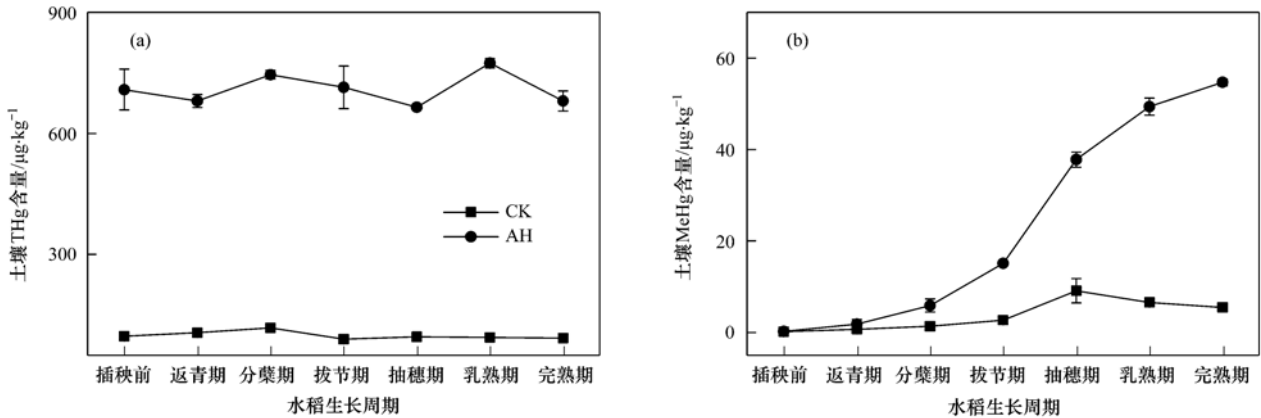


图 1 土壤中 THg 和 MeHg 含量变化

Fig. 1 Variation of THg and MeHg levels in soil

较大差异[图 1(b)]. 在水稻生长期, AH 组土壤 MeHg 含量在淹水后随时间不断增加, 这与贺春风等^[11]的研究结果类似, 可能是因为淹水后逐渐形成的厌氧环境有利于汞甲基化微生物的甲基化行为. 抽穗期, 添加 Hg 的处理组土壤 MeHg 产生速率较快, 此后速率有所减缓. 完熟期土壤中的 MeHg 含量为 $54.70\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是插秧前的 280.54 倍. CK 组土壤 MeHg 含量在拔节期之前较为稳定, 在拔节期后有所增加, 在抽穗期达到最大值 $9.11\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是插秧前的 50.61 倍, 而后产生速率逐渐降低, 趋于稳定.

2.1.3 水稻土 MeHg/THg 比例

MeHg 占 THg 的含量比值可用来评判土壤 Hg 的甲基化能力^[12,13]. 在水稻生长周期内, 土壤 MeHg/THg 含量比值见表 2, 其变化范围为 0.03%~9.48%. CK 组在抽穗期达到最大值 9.48%, AH 组在完熟期达到最大值 8.04%, 可以看出土壤 MeHg/THg 比例的变化趋势和土壤中 MeHg 含量的变化趋势一致, 这是由于土壤 THg 的变化较小, 而

随着时间的增加土壤中的无机汞在微生物的作用下向 MeHg 转化, 导致土壤中 MeHg 含量的升高进而导致 MeHg/THg 比值变大. 对比 AH 组和 CK 组, 除完熟期外, AH 组土壤 MeHg/THg 比值一直低于 CK 组, 这是由于 AH 组土壤添加了较高含量的土壤初始 Hg, 而土壤中 MeHg 的含量是随着土壤微生物的生长时间以及丰度等慢慢积累而逐渐升高, 完熟期时, AH 组土壤已经经过了长时间的 MeHg 累积, 进而导致 MeHg/THg 比值的增大; 相较 AH 组, CK 组的土壤本底 THg 含量较低, 土壤中 MeHg 含量可以在较短时间达到峰值, 然后随着水稻植株对土壤中 MeHg 的吸收有所下降. 黄中伟等^[14]的研究结果显示在旱地土壤中 MeHg/THg 比值为 0.23%, 远小于本试验结果, 表明稻田淹水环境有利于 MeHg 的产生. Hg 在土壤中的甲基化过程取决于多方面因素, 种植水稻后, 根系活动能改变根际环境、植物对 MeHg 的富集、土壤的理化性质以及微生物种类和活性的变化, 都可能对土壤 Hg 的甲基化造成影响^[15].

表 2 土壤 MeHg 含量占 THg 含量比值/%

Table 2 Proportion of MeHg in THg in soil/%

试验处理	插秧前	返青期	分蘖期	拔节期	抽穗期	乳熟期	完熟期
CK	0.18 ± 0.04	0.66 ± 0.09	1.13 ± 0.47	2.99 ± 0.24	9.48 ± 0.83	6.99 ± 0.04	5.91 ± 0.57
AH	0.03 ± 0.01	0.27 ± 0.02	0.79 ± 0.07	2.11 ± 0.21	5.68 ± 0.84	6.38 ± 0.82	8.04 ± 0.08

2.2 水稻中 Hg 的分布特征

2.2.1 水稻中 THg 的分布特征

从图 2 可以看出, 在水稻生长周期内, 不同部位 THg 含量的变化趋势并不一致. AH 组根部 THg 含量先增加后降低, 在乳熟期达到最大值 $5595.73\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是幼苗期的 93.56 倍. 在乳熟期之前, THg 含量具有从植物下部往上部减少的趋势, Xu

等^[16]和 Meng 等^[17]的研究指出水稻植株的根对 Hg 的吸收具有一定的“阻碍”作用, 同时在水稻根部时 Hg 就已经和蛋白质、氨基酸等结合, 然后随着水稻的新陈代谢向植株的上部转移, 进而导致 Hg 在水稻体内的由下向上的一个递减趋势. 乳熟期后, 根中 THg 含量下降, 茎、叶有所增加, 随着籽粒的成熟 THg 具有往上部转移的趋势. 完熟期 THg 含量

在水稻中的分布状况为: 根 > 籽粒 > 茎 > 叶 > 穗壳 [图 2(d)], 水稻根和籽粒中的 THg 含量比茎、叶中均高了一个数量级. 乳熟期时, 穗中 THg 的含量为 $1\,378.45\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是同时期茎和叶的 4.54 倍和 10.69 倍. 在完熟期, 籽粒中 THg 含量为 $1\,734.60\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是穗壳中的 14.19 倍, 说明籽粒成熟后, 穗中的 THg 基本转移到水稻籽粒中.

本试验结果与周俊等^[18]用 pH 值为 7.7 的土壤水稻盆栽试验结果(根 > 叶 > 茎 > 穗 > 籽粒)并不

一致, 这可能与土壤理化性质以及水稻品种有关. 本试验中, 紫色水稻土 pH 值在完熟期时升高到 5.2, 此时弱酸性的土壤促进了碳酸盐的水解, 有利于有效态 Hg 的累积, 便于被根部吸收. 而在黄中伟^[14]的研究中, 水稻中 THg 的分布为叶 > 梗 > 根 > 米 > 杆 > 壳, 这可能是因为水稻生长在大气 Hg 浓度高的环境中, 叶片中的 Hg 不仅有来自根部吸收土壤 Hg 的转移, 还有大量叶片通过气孔富集大气沉降带来的 Hg.

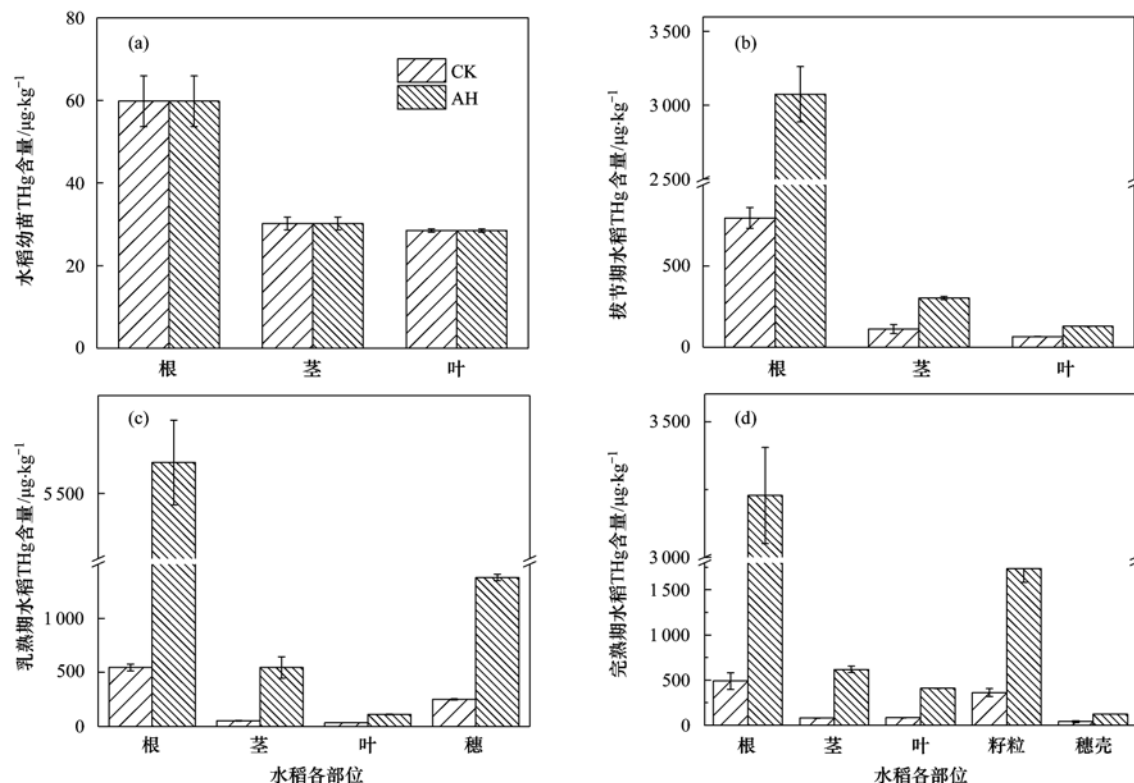


图 2 不同时期水稻中 THg 的累积

Fig. 2 Variation of THg levels in rice plants during different periods

2.2.2 水稻中 MeHg 的分布特征

从图 3 可以看出, 在乳熟期之前, MeHg 含量同样具有从植株下部往上部减少的趋势, 说明土壤 MeHg 可能是水稻植株 MeHg 的主要来源. AH 组, 根、茎中 MeHg 含量变化为先增大后降低, 而叶中 MeHg 含量变化与根、茎有所不同, 这可能是因为叶片中的 Hg 与大气 Hg 交换有关. 乳熟期, 穗中 MeHg 的含量为 $452.98\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 3(c)], 分别是同时期茎、叶的 2.04 和 32.80 倍. 在完熟期, MeHg 含量在水稻体内各部位具有和 THg 含量不一样的分布状况, 籽粒 > 根 > 茎 > 叶 > 穗壳 [图 3(d)]. 到完熟期时, 籽粒中 MeHg 含量为 $560.36\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而穗壳中只有 $76.61\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 说明随着籽粒成熟, 地上组织部分的 MeHg 主要富集在籽粒

中, 这和周俊等^[18]、Meng 等^[19]的研究结果相似.

THg 和 MeHg 在水稻植株内不同的分布趋势, 说明无机汞 (IHg) 和 MeHg 在植物体内具有不同的累积机制. Krupp 等发现^[20], 植物体内的植物络合素可以隔离 Hg^{2+} , 却不能隔离 MeHg; Schwesig 等^[21]的研究也指出, 有机汞比 IHg 更易在植物体内传输.

2.2.3 水稻中 MeHg/THg 比例

水稻植株中 MeHg/THg 的含量比值见表 3, 可比较水稻各部位对 MeHg 的累积能力. 比值变化范围为 6.81% ~ 62.69%, 均值为 24.03%, 大于土壤中 MeHg/THg 的含量比值 (均值为 3.05%), 说明水稻植株中 Hg 的富集能力远高于土壤. 在不同生长期, 水稻各部位累积 MeHg 的能力并不一致:

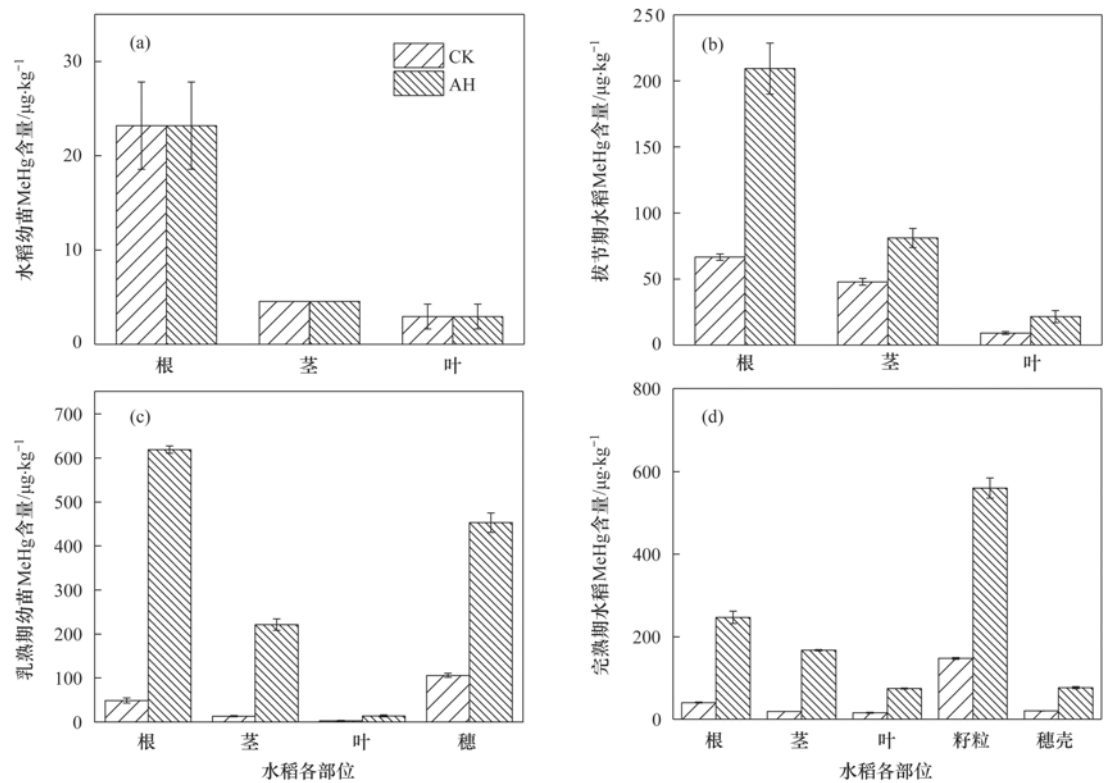


图 3 不同时期水稻中 MeHg 的累积

Fig. 3 Variation of MeHg levels in rice plants during different periods

拔节期，茎具有较强的 MeHg 累积能力；乳熟期，茎、穗的累积能力大于根、叶；完熟期，穗壳和籽粒的 MeHg 累积能力最大，这可能和水稻不同器官的生长代谢有关，器官生长代谢越旺盛越利于 MeHg 的累积^[22]。另外，根部虽然累积的 MeHg 含量较高，但 MeHg/THg 的比值并不高，而穗壳中的 MeHg 含量不高，但 MeHg/THg 的比值却较高，可

能是因为根部的生物量随时间增加而有较大的增加，而穗壳的生物量较小。对比 AH 组和 CK 组的植物 MeHg 累积能力，没有明显的规律，这可能是影响植物对重金属吸收及重金属在植物体内分布的因素，除了与重金属在土壤中的含量有关外还与土壤重金属有效态含量、土壤氧化还原状态、作物种类、阳离子代换量等有关。

表 3 水稻中 MeHg 占 THg 比例/%

Table 3 Proportion of MeHg in THg in rice plants/%

生长周期	试验处理	根	茎	叶	穗	籽粒	穗壳
幼苗		38.78 ± 0.21	15.06 ± 1.52	10.35 ± 1.07			
拔节期	CK	8.36 ± 0.17	42.91 ± 2.05	13.79 ± 0.94			
	AH	6.81 ± 0.56	26.71 ± 1.55	16.68 ± 1.10			
乳熟期	CK	8.95 ± 0.31	24.57 ± 0.94	7.53 ± 0.71	42.20 ± 1.31		
	AH	11.07 ± 1.04	40.57 ± 2.27	12.19 ± 0.62	32.86 ± 1.66		
完熟期	CK	8.23 ± 1.18	24.24 ± 1.05	18.54 ± 0.14		40.85 ± 1.27	49.72 ± 0.95
	AH	7.65 ± 0.36	26.98 ± 0.81	18.28 ± 0.21		32.30 ± 2.05	62.69 ± 3.17

2.3 水稻中 Hg 的富集能力

生物富集系数 (bioconcentration factors, BCF) 可以反映植物对土壤中某种重金属的富集能力。图 4 为水稻植株中 THg 和 MeHg 的富集系数。可以看出，水稻根、籽粒的 THg 的富集系数大于 1，说明 THg 在这些部位具有富集效应，且根中 THg 的富集

系数均大于籽粒。水稻中 MeHg 富集系数具有和 THg 不一样的分布，除乳熟期叶中 MeHg 富集系数小于 1，没有明显的富集效应，其他时期均大于 1。在水稻生长周期内，水稻中 MeHg 富集系数的均值为 8.16，大于 THg 的富集系数均值 2.31，说明水稻对 MeHg 的富集能力强于 THg。籽粒中的 MeHg

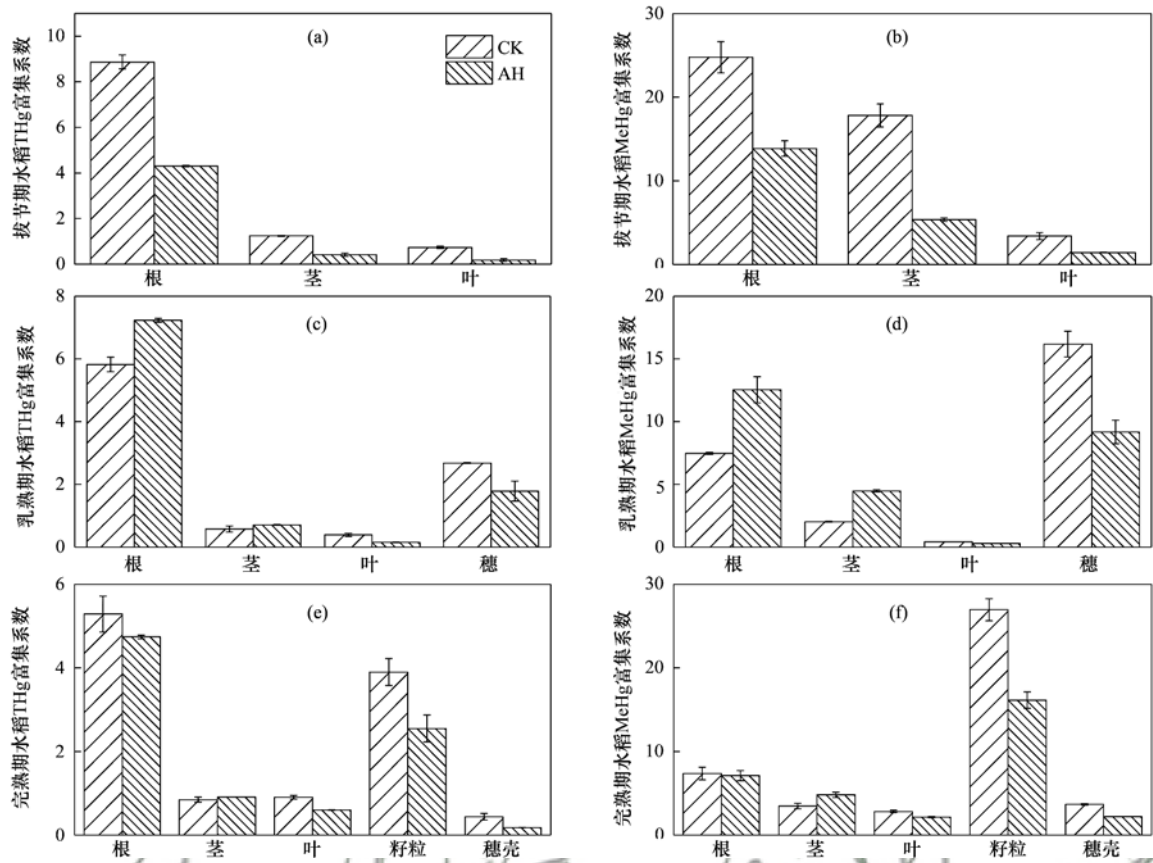


图4 水稻植株中 THg 和 MeHg 的富集系数
Fig. 4 Bioconcentration factors of THg and MeHg in rice plants

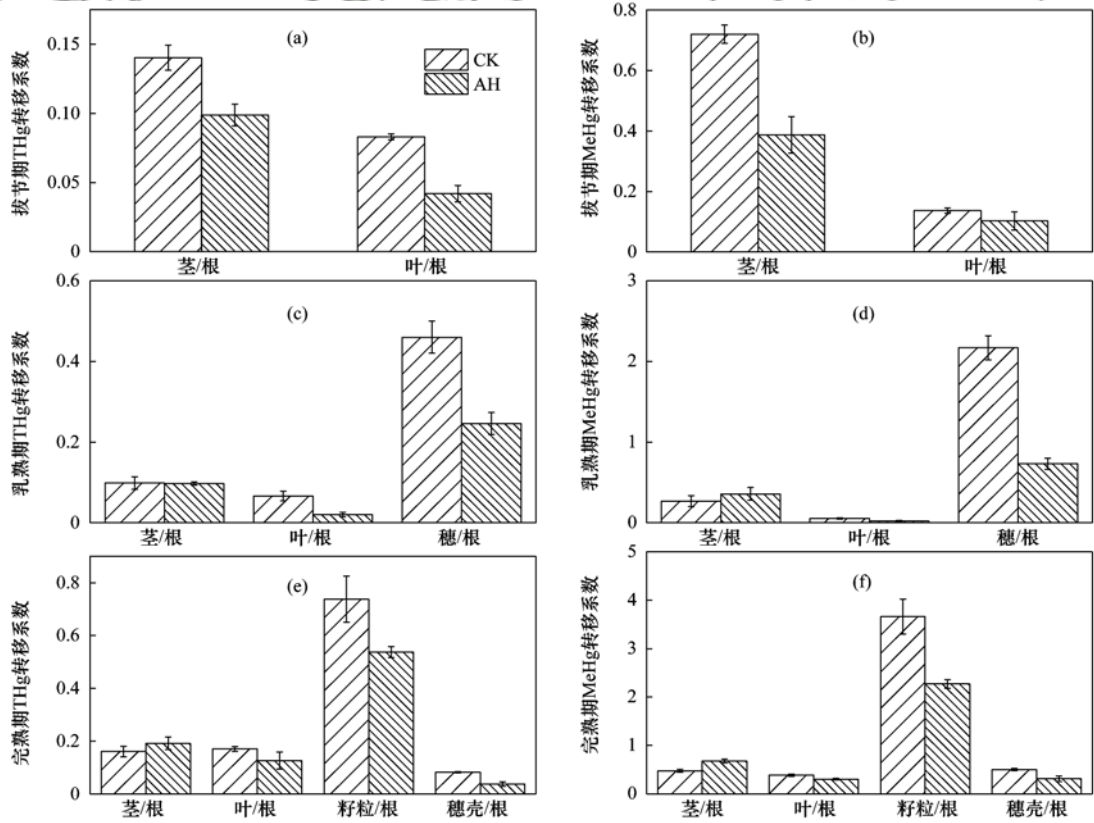


图5 水稻中 THg 和 MeHg 的转移系数
Fig. 5 Translocation factors of THg and MeHg in rice plants

富集系数大于根、茎、叶,进一步说明在酸性紫色水稻土中籽粒更易富集 MeHg. 根据 Perel'Man^[23]对 BCF 的分组,水稻籽粒中 THg 的 BCF 值属于强吸收(0~10),MeHg 的 BCF 值属于强烈吸收(10~100),这也和 Krupp 等^[20]的研究结果一致.

2.4 水稻中 Hg 的转移能力

有研究认为根部吸收的 Hg 难以向其他部位迁移,因为根部与其他器官间存在较强的阻碍 Hg 迁移的机制,但也有人认为这种迁移方式是存在的,通常认为重金属进入水稻根部先与蛋白质、多糖、核酸等结合,再往地上部位迁移^[21, 24, 25]. 转移系数(translocation factors, TF)可以比较植物地下部位到地上部位重金属的转移能力,TF 值越大,植物根向上部器官的运输能力越强. 由图 5 可以看出,在水稻生长期,水稻体内 MeHg 转移系数均大于 THg,且 THg 转移系数均小于 1,而籽粒中 MeHg 的转移系数大于 1,这也进一步证明了 MeHg 比 THg 更易在水稻体内转移,且籽粒中易富集 MeHg,这一点也和 Schwesig 等^[21]的研究结果一致. 有研究认为^[22],作物受重金属胁迫,会产生以下几种对抗机制:回避机制减少对重金属的吸收,抗性机制增加对重金属的耐受,代谢机制减少对重金属的积累和消除毒性. 水稻生长过程中对重金属迁移富集的变化,可能与水稻各器官这些机制的强弱有关,但具体的情况还有待更进一步研究.

3 结论

(1) 在水稻生长期,酸性紫色水稻土 THg 含量的变化较为平稳,而 MeHg 的含量随时间增加而增加;另外,CK 组水稻土中 MeHg/THg 含量比值在抽穗期达到峰值,而 AH 组水稻土中 MeHg/THg 含量比值在试验期内一直处于增加的趋势.

(2) THg 和 MeHg 在水稻体不同部位的分布并不一致,THg 在水稻植株中的分布为:根>籽粒>茎>叶>穗壳,而 MeHg 的分布为:籽粒>根>茎>叶>穗壳,其中 MeHg 在籽粒中较高的含量,表明水稻籽粒对 MeHg 具有较强的累积效应.

(3) 水稻中 MeHg 的富集系数和转移系数均大于 THg,籽粒中的 MeHg 富集系数大于根、茎、叶,且籽粒中的 MeHg 转移系数大于 1,大于 THg 的转移系数,进一步说明 MeHg 更易在水稻体内富集和转移,且籽粒中最易富集 MeHg.

参考文献:

[1] Shao D D, Kang Y, Wu S C, *et al.* Effects of sulfate reducing

bacteria and sulfate concentrations on mercury methylation in freshwater sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **424**: 331-336.

[2] Lindqvist O, Johansson K, Bringmark L, *et al.* Mercury in the Swedish environment-recent research on causes, consequences and corrective methods [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1991, **55**(1-2): xi-261.

[3] Regnell O, Elert M, Höglund L O, *et al.* Linking cellulose fiber sediment methyl mercury levels to organic matter decay and major element composition [J]. *Ambio*, 2014, **43**(7): 878-890.

[4] Guimarães J R D, Meili M, Hylander L D, *et al.* Mercury net methylation in five tropical flood plain regions of Brazil: high in the root zone of floating macrophyte mats but low in surface sediments and flooded soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **261**(1-3): 99-107.

[5] Yu R Q, Flanders J R, Mack E E, *et al.* Contribution of coexisting sulfate and iron reducing bacteria to methylmercury production in freshwater river sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(5): 2684-2691.

[6] Schuster E. The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption processes-a review of the literature [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1991, **56**(1): 667-680.

[7] 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.

[8] 王欣悦, 唐振亚, 张成, 等. 长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 910-916.

Wang X Y, Tang Z Y, Zhang C, *et al.* Effects of long-term different tillage methods on mercury and methylmercury contents in purple paddy soil and overlying water [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 910-916.

[9] 于天仁, 季国亮, 丁昌璞, 等. 可变电荷土壤的电化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1996. 23-25.

[10] 李英华, 孙丽娜. pH 值和外加汞浓度对汞在棕土中的吸附-解吸动力学特征的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(2): 579-582.

Li Y H, Sun L N. Impact of pH and mercury concentration on adsorption-desorption kinetic characteristics of mercury in umber [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(2): 579-582.

[11] 贺春风. 三峡库区消落带土壤淹水过程汞释放与甲基化特征的模拟研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013. 24-26.

He C F. Mesocosm of mercury release and methylation characteristic in the soil during the flooding in water level fluctuating zone of Three Gorges Reservoir Region [D]. Chongqing: Southwest University, 2013. 24-26.

[12] 王娅, 赵铮, 木志坚, 等. 三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4095-4102.

Wang Y, Zhao Z, Mu Z J, *et al.* Spatial and temporal distribution of mercury in water of a small typical agricultural watershed in the Three Gorges Reservoir Region [J].

- Environmental Science, 2014, **35**(11): 4095-4102.
- [13] Moingt M, Lucotte M, Paquet S, *et al.* Deciphering the impact of land-uses on terrestrial organic matter and mercury inputs to large boreal lakes of central Québec using lignin biomarkers[J]. Applied Geochemistry, 2014, **41**: 34-48.
- [14] 黄中伟. 稻田生态系统中总汞和甲基汞的分布研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012. 57-58.
Huang Z W. The distributive of the THg and MeHg in the rice paddy ecosystem[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012. 57-58.
- [15] 张玲. 添加硫素对木橈吸收汞及土壤汞甲基化的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2012. 31-32.
- [16] Xu X H, Zhao J T, Li Y Y, *et al.* Demethylation of methylmercury in growing rice plants: an evidence of self-detoxification[J]. Environmental Pollution, 2016, **210**: 113-120.
- [17] Meng B, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Localization and speciation of mercury in Brown rice with implications for Pan-Asian public health[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(14): 7974-7981.
- [18] 周俊, 刘鸿雁, 吴龙华, 等. 不同 Hg 浓度下水稻中 Hg 的分布累积特征[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(6): 1532-1538.
Zhou J, Liu Y H, Wu L H, *et al.* Distribution and accumulation characteristics of Hg in rice (*Oryza sativa* L.) under different concentrations of soil Hg[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(6): 1532-1538.
- [19] Meng B, Feng X B, Qiu G L, *et al.* The Process of methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(7): 2711-2717.
- [20] Krupp E M, Mestrot A, Wielgus J, *et al.* The molecular form of mercury in biota: identification of novel mercury peptide complexes in plants[J]. Chemical Communications, 2009, (28): 4257-4259.
- [21] Schwesig D, Krebs O. The role of ground vegetation in the uptake of mercury and methylmercury in a forest ecosystem[J]. Plant and Soil, 2003, **253**(2): 445-455.
- [22] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, **21**(2): 110-116.
Mo Z, Wang C X, Chen Q, *et al.* Distribution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in paddy plant[J]. Environmental Chemistry, 2002, **21**(2): 110-116.
- [23] Perel'Man A I. Geochemistry of elements in the supergene zone [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 1977. 46-48.
- [24] Cavallini A, Natali L, Durante M, *et al.* Mercury uptake, distribution and DNA affinity in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) plants[J]. Science of the Total Environment, 1999, **243-244**: 119-127.
- [25] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 等. 土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3996-4003.
Shi Y X, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Simulation of the absorption, migration and accumulation process of heavy metal elements in soil-crop system[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3996-4003.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)