

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

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(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCAAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

水稻对气态单质汞的吸收与挥发

尚帅¹, 田珮¹, 蒋煜¹, 武婧轩¹, 姜珊¹, 邓泓^{1,2*}

(1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; 2. 华东师范大学上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

摘要: 湿地是汞的重要富集场所, 其还原性底质会促进气态单质汞的产生. 湿地植物已进化出一系列适应淹水环境的生态特征, 其中发达的通气组织可以从大气向根部输送氧气满足根系的呼吸作用. 以水稻这一典型的湿地植物为例, 研究其根系及通气组织是否也能成为根际气态汞向大气运输的通道, 并探究其过程和影响因素. 通过设计密闭分室培养装置将水稻根部与地上部分隔开, 对水稻根部进行汞蒸气暴露, 并通过气体吸收剂吸收由叶片挥发出的气态汞. 结果表明, 水稻可以从根系吸收气态单质汞并向地上组织迁移, 其中根系的汞含量与水稻根孔隙度呈显著负相关, 并呈二次拟合 ($R = 0.8309$, $P < 0.01$); 而水稻地上部汞迁移量与水稻根表面积和根体积均呈线性正相关 ($R = 0.896$, $P < 0.01$; $R = 0.871$, $P < 0.01$). 由根系吸收的汞最终可通过水稻叶片挥发进入大气, 叶片汞的挥发量随着叶片面积的增加呈线性增加 ($R = 0.897$, $P < 0.01$), 单位叶面积汞挥发量与水稻蒸腾作用强度呈线性显著正相关 ($R = 0.73$, $P < 0.01$). 证明了水稻根系不仅能吸收气态单质汞, 并且能将汞从根部转运到地上部, 再通过叶片的气孔释放到空气中. 为进一步揭示湿地生态系统中汞的迁移及调控机制提供了科学依据.

关键词: 水稻; 气态单质汞; 叶面积指数; 汞挥发; 通气组织

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5308-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704034

Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice

SHANG Shuai¹, TIAN Pei¹, JIANG Yu¹, WU Jing-xuan¹, JIANG Shan¹, DENG Hong^{1,2*}

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Wetlands are important sinks for mercury, and its reducing substrate favors the production of gaseous elemental mercury. In order to adapt to the anoxic condition, wetland plants usually have developed aerenchyma to transfer oxygen from the shoots to the roots to supply their roots respiration. In this study, a typical wetland plant, rice, is used to investigate whether its aerenchyma can also be a channel for the transportation of rhizosphere gaseous mercury into the atmosphere. In addition, the underlying mechanisms will be evaluated. In this study, the roots of rice were separated from the shoots by an air-tight chamber. Roots were exposed to saturated mercury vapor in the root chamber, and the gaseous mercury volatilized from the leaf chamber was absorbed by an active carbon absorbent. The results showed that gaseous elemental mercury could be transferred to shoots after absorption by the roots. The mercury in the roots decreased polynomially with root porosity ($R = 0.8309$, $P < 0.01$), while the mercury in the above ground tissues showed a positive correlation with root surface area and root volume ($R = 0.896$, $P < 0.01$; $R = 0.871$, $P < 0.01$). It was also indicated that the mercury absorbed by the roots could be volatilized into the atmosphere through the leaves. The volatilization of the mercury from the leaves increased positively with the leaf area ($R = 0.897$, $P < 0.01$). There was also a significant positive correlation between the mercury volatilization per unit leaf area and transpiration intensity ($R = 0.73$, $P < 0.01$). The results proved that rice can absorb gaseous elemental mercury through its roots and transfer it above ground for emission into the atmosphere through the stomata of the leaves. This provides a scientific basis for further investigations to reveal mercury behavior and its mechanisms in wetland ecosystems.

Key words: rice; gaseous elemental mercury; leaf-area index; Hg volatilization; aerenchyma

汞是环境中重要的金属污染物, 可经食物链对人体产生严重的毒害作用. 因在常温下具有较高的蒸气压, 汞主要以气态存在于大气中. 有研究表明大气中的气态单质汞可以随着大气循环进行长距离传输, 再经过干湿沉降至地表, 污染生态环境^[1,2]. 湿地是一种独特的生态系统, 其水体含有较为丰富的可溶性碳及腐殖酸, 它们可以和汞形成稳定的络合物. 所以湿地能够将大气沉降和地表径流等输入的汞固定下来, 成为了汞的活性库^[3,4]. 湿地水体

中 Hg^{2+} 经光照、化学、微生物还原等形成溶解性气态元素汞 (Hg^0)^[5,6] 及沉积物在厌氧条件下经微生物和其他非生物因素作用还原产生的 Hg^0 , 这些可通过扩散进入水层并向大气释放^[7,8].

湿地植物根、茎中通常具有发达的通气组织,

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31400445, 41371451); 上海市科委科研项目 (17295810603)

作者简介: 尚帅 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染生态与修复, E-mail: 249744778@qq.com

* 通信作者, E-mail: hdeng@des.ecnu.edu.cn

以利于缺氧条件下由地上向根部运输氧气满足根细胞的呼吸. 这些通气组织是否也可成为还原性沉积物中产生的气态汞由地下向地上运输的通道? 有研究发现, 湿地植物(香蒲、克拉莎草、芦苇)存在的条件下, 大大提高了湿地生态系统的汞释放通量^[9]. 在佛罗里达的野外实验也表明生长香蒲的湿地, 其汞的释放通量远高于无植物的水面, 且释放量与蒸腾作用相关^[10]. 通过这些为数不多的野外研究, 可以推测根系可能在根际气体的运输中扮演着重要的角色, 但尚未有直接的证据, 其中的过程和机制有待进一步研究.

因此, 本研究以水稻这一典型的湿地植物为例, 通过室内模拟实验, 设计分室密闭装置将水稻根系与水稻地上部分隔开, 对水稻根系进行气态单质汞暴露后, 收集由水稻叶片的汞释放量, 以探究水稻根系是否能吸收气态单质汞, 并将其转移到地上部释放到空气中, 以及其中的影响因素. 本研究结果将进一步丰富植被在汞的生物地球化学循环中的作用.

1 材料与方法

1.1 实验材料

通过预实验, 选定以下 3 种具有良好重金属耐性的水稻品种(表 1): 其中 X1 为籼稻, 长势快, 茎秆粗壮, 抗倒伏. J1 为粳稻, 长势较快, 茎秆较为粗壮. 而 J2 也为粳稻, 但长势一般, 茎秆较细. 预实验表明这 3 种水稻根、叶的生理生态指标具有明显的差异.

表 1 水稻品种信息

Table 1 Information on rice species			
品种名称	代码	来源地	类型
Ⅱ 优 1259	X1	福建省三明农科所	籼
武运粳 21 号	J1	江苏中江种业	粳
屈优 267	J2	辽宁稻作所	粳

1.2 研究方法

1.2.1 水稻幼苗培养方法

将挑选好的水稻种子放在 30% 的 H₂O₂ 溶液中浸泡 40 min, 用蒸馏水冲洗 5 遍, 洗净后置于垫有滤纸的培养皿中, 将培养皿放入 28℃ 恒温培养箱中培养 3 d, 再将幼苗转移到沙土培养基中培养 5 d. 水培: 挑选生长较好、长势一致的幼苗转移到添加 Kimura B 营养液 (pH = 5.5)^[11] 的 5LPVC 盆中培养 20d. 所有水稻在人工气候箱中进行培养, 培养条件: 湿度 60%, 28℃/14 h 光照和 22℃/10 h 黑暗,

光照强度为 260 μmol·(m²·s)⁻¹.

1.2.2 分室密闭实验装置

为了避免气态汞的交叉污染, 本研究需要设计能将地上和地下组织严格区分的密闭实验装置, 各分室严格的气密性是实验成功的关键. 为此, 利用耐高温的硼化硅材料定做了分室密闭反应室(图 1). 该装置分为两个部分, 上部气室(即叶室)高 30 cm, 直径 12.5 cm, 下部气室(即根室)高 10 cm, 直径 12.5 cm. 上下部气室中间开直径 4 cm 的圆孔, 圆孔中放置一个开有直径为 5 mm 孔洞的硅胶塞, 植物根、茎结合处放置于硅胶塞上的孔洞中. 为保证上下两个气室严格密封, 植物与硅胶塞的之间封以黏土和凡士林, 硅胶塞与气室封以凡士林. 叶室上方通过两个串联的气体吸附剂 1 和 2 (Milestone Sorbent Traps), 以吸收由叶片挥发的 Hg⁰; 而为保证叶室的气压稳定, 在叶室下方通过充气泵充入空气(连接 50 mL 200 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 溶液除去空气中的 Hg⁰).

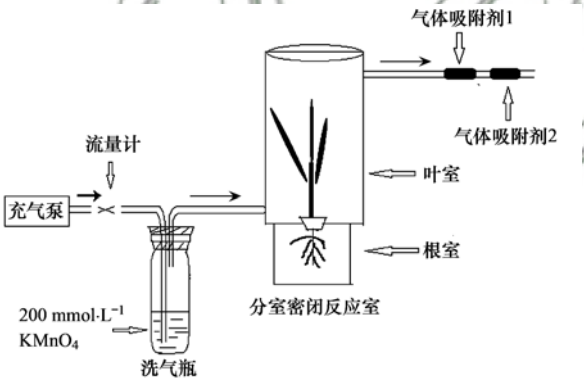


图 1 分室密闭反应室系统

Fig. 1 Chamber closed reaction chamber system

1.3 实验步骤

1.3.1 水稻叶片汞挥发实验

将培养好的水稻用蒸馏水洗净根部, 放入分室密闭反应室中, 将水稻地上部和根分别暴露在上下气室中, 并在下部气室放入 3 g 单质汞(根据 27℃ 下汞的饱和蒸气压计算得出下部气室汞蒸气浓度约为 0.021 5 g·m⁻³), 充气泵通过浮子流量计提供流速为 200 mL·min⁻¹ 的恒定空气气流, 气流通过洗气瓶去除空气中含有的汞, 随后气流进入上部气室将水稻挥发出的气体通过出气口载流到气体吸附剂 1 和 2 中进行吸收, 供气反应时间为 150 min. 进行 3 组重复.

1.3.2 去叶水稻汞挥发实验

为了探究水稻叶片在汞挥发过程中的作用及其

所挥发出来的汞的来源,实验还收集了叶片去除后的水稻挥发出来的汞.选取长势一致的水稻 X1 作为样本,将其叶片沿茎切除,地上部只保留 5 cm 的茎,按 1.3.1 节的方法收集地上部分挥发的汞.

1.3.2 水稻生理指标测定

①用甲基蓝染液将水稻根系染色,用扫描仪(EPSON EU-22)扫描完整根系图片,并用根系分析软件 winrhizo 分析根长、根表面积及根体积.②水稻的根孔隙度利用改进的比重瓶法进行测量^[12].③水稻叶片用扫描仪(EPSON EU-22)扫描获得完整叶片图片,用软件 ImageJ 处理获得水稻叶面积^[13].④利用改进的快速称重法测定水稻蒸腾作用强度^[14,15].

1.3.3 汞含量测定

植物组织(冻干)、吸附剂中的汞均由直接测汞仪(Milestone DMA-80)测定,即样品经过高温分解后被持续的高纯氧气流载入到催化管,后所有的汞被带到金汞齐管,通过瞬间加热,汞蒸气被释放到单波长 253.7 nm 原子吸收分光光度计中进行测量.

1.4 计算方法及统计分析

通过测定,对数据进行以下处理.

汞挥发总量(ng) = 吸附剂 1 汞含量 +

吸附剂 2 汞含量 - 对照组 (1)

地上部汞迁移量(ng) = 汞挥发总量 + 地上部汞含量 (2)

植物汞总吸收量(ng) = 根部汞含量 + 地上部迁移量 (3)

地上部汞迁移率(%) = $\frac{\text{地上部汞迁移量}}{\text{植物汞总吸收量}} \times 100$ (4)

汞挥发率(%) = $\frac{\text{汞挥发总量}}{\text{植物汞总吸收量}} \times 100$ (5)

地上部汞含量: 根部汞含量 = $\frac{\text{地上部汞含量}}{\text{根部汞含量}} \times 100\%$ (6)

利用 SPSS 软件对上述获得数据进行方差分析、显著性检验及相关性分析并作图.

2 结果与分析

2.1 3 种基因型水稻的生理指标

水稻生理相关指标如表 2,水稻 X1 与 J2 和 J1 在叶面积、根表面积、根干重和蒸腾作用强度有显著性差异($P < 0.05$),其中 X1 叶面积和根表面积最高,蒸腾作用强度最低.根孔隙度、根体积这 3 种水稻差异性显著($P < 0.05$),其中 X1 根体积最高,J1 根孔隙度最高.比根面积、根冠比、根长这 3 种水稻无显著性差异($P > 0.05$).

表 2 水稻生理生态指标

Table 2 Physio-ecological indexes for rice

项目	水稻品种		
	X1	J2	J1
叶面积/cm ²	23.61 ± 3.22b	10.00 ± 3.14a	9.64 ± 1.78a
根长/cm	10.54 ± 0.48a	12.82 ± 2.82a	10.38 ± 0.65a
根表面积/cm ²	31.70 ± 0.48b	18.65 ± 3.15a	14.78 ± 0.84a
根体积/cm ³	0.26 ± 0.02a	0.17 ± 0.02b	0.12 ± 0.01c
根孔隙度/%	19 ± 2a	24 ± 2b	37 ± 3c
根干重/g	0.031 ± 0.002a	0.024 ± 0.003b	0.020 ± 0.002b
地上部干重/g	0.124 7 ± 0.016 0a	0.118 3 ± 0.018 3a	0.075 3 ± 0.014 3b
比根面积	1 040 ± 81.80a	838.4 ± 92.00a	852.0 ± 164.0a
根冠比	0.25 ± 0.04a	0.19 ± 0.02a	0.25 ± 0.11a
蒸腾作用强度/g·(m ² ·h) ⁻¹	654.7 ± 73.51a	1 344 ± 306.8b	1 420 ± 263.2b

1) 本表内容为单株植株的指标,数据均为均值 ± 标准差($n = 3$);同一行中相同字母代表没有显著性差异($P < 0.05$),下同

2.2 3 种基因型水稻测汞数据

通过收集测定,水稻叶片汞挥发量及水稻样品中汞含量结果见表 3.研究结果表明,水稻根部暴露在汞蒸气时,根系可以吸收气态汞单质并向地上部少量转运,再通过叶片向空气中释放.其中叶片汞挥发总量水稻 X1 最高,并与 J2 和 J1 有显著性差异($P < 0.05$).地上部汞含量与地上部汞迁移量三者都具显著性差异($P < 0.05$),其中水稻 X1 最

高、J1 最低.而单位叶面积汞挥发量三者无显著性差异($P < 0.05$).水稻 J1 根部汞含量及植物汞总吸收量较低且与 J1 和 X1 相比有显著性差异($P < 0.05$).这些差异产生的原因有可能是和根的生物量有关.

2.3 去除叶片水稻与有叶水稻的比较

将同生长期的水稻 X1 去除叶片进行汞挥发实验,与正常水稻(未去除叶片)进行对比,结果如表

表 3 水稻汞相关数据

项目	水稻品种		
	X1	J2	J1
汞挥发总量/ng	76.58 ± 6.58a	51.49 ± 4.04b	44.77 ± 5.27b
地上部汞总量/ng	225.2 ± 4.09a	114.7 ± 3.14b	57.66 ± 15.80c
地上部汞迁移总量/ng	301.8 ± 8.84a	166.2 ± 6.80b	102.4 ± 20.66c
根部汞总量/ng	12 773 ± 1 784a	11 644 ± 832.3a	3 790 ± 249.8b
植物汞总吸收量/ng	13 075 ± 1 775a	11 810 ± 830.4a	3 892 ± 252.0b
单位叶面积汞挥发量/ng·cm ⁻²	3.26 ± 0.19a	5.44 ± 1.47a	4.68 ± 0.31a

4. 去叶水稻的汞挥发总量是正常有叶水稻汞挥发总量的 3 倍, 差异显著 ($P < 0.05$). 而正常水稻地上部汞总量是去叶水稻的 3 倍, 并呈显著性差异 ($P < 0.05$). 地上部汞迁移总量、根部汞总量、植物汞总吸收量两者相似, 无显著性差异 ($P > 0.05$).

表 4 去除叶片水稻的汞含量数据
Table 4 Data for mercury in leafless rice

项目	水稻 X1	
	去叶	有叶
汞挥发总量/ng	203.0 ± 19.33a	76.58 ± 6.58b
地上部汞总量/ng	86.12 ± 11.95a	225.2 ± 4.09b
地上部汞迁移总量/ng	289.2 ± 14.4a	301.8 ± 8.8a
根部汞总量/ng	12 738 ± 1 404a	12 773 ± 1 784a
植物汞总吸收量/ng	13 290 ± 1 421a	13 075 ± 1 775a

2.4 水稻汞含量相关性分析

水稻根孔隙度与水稻根部汞含量呈显著负相关, 并呈二次拟合 ($R = 0.8309$, $P < 0.01$, 如图 2), 说明随着水稻的孔隙度的增加, 根部的汞含量是先增加后减少的.

水稻的地上部汞迁移总量占植物汞总吸收总量

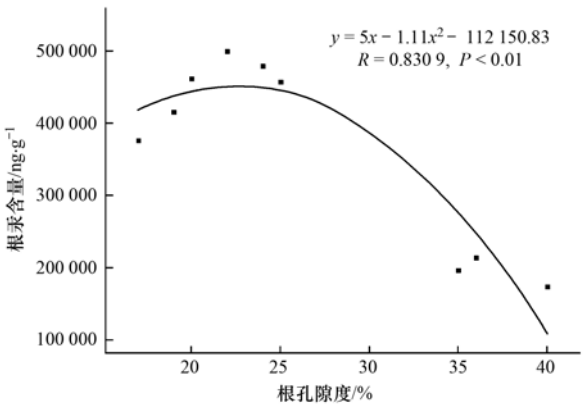


图 2 水稻根汞含量与根孔隙度相关性

Fig. 2 Relationship between root mercury content and root porosity in rice

比例范围在 1.3% ~ 3% 之间 (如表 5), 其中 J1 地上部迁移率最高, J2 水稻地上部迁移率最低, 且 J1 和 J2 具显著性差异 ($P < 0.05$). 水稻的汞挥发量占植物吸收汞总量比例较低, 小于 1.3%, 且挥发率 X1 和 J2 与 J1 呈显著性差异 ($P < 0.01$). 说明水稻根吸收的气态单质汞只有很少的一部分从根部转移到地上部, 并挥发出去.

表 5 水稻汞挥发迁移比例/%

项目	水稻种		
	X1	J2	J1
地上部汞迁移率	2.35 ± 0.41a	1.41 ± 0.13ab	2.64 ± 0.53ac
汞挥发率	0.60 ± 0.14a	0.44 ± 0.06a	1.15 ± 0.12b
地上部汞含量: 根部汞含量	1.79 ± 0.29a	0.99 ± 0.08b	1.53 ± 0.43ab

水稻的地上部汞迁移总量与根表面积呈线性显著正相关 ($R = 0.896$, $P < 0.01$), 且与根体积呈线性显著正相关 ($R = 0.871$, $P < 0.01$, 如图 3、4). 表明水稻根系吸收的汞转移到地上部的量与根系结构具有密切相关性, 根系越发达转移到地上部的汞量越多.

通过实验表明, 水稻叶片可以挥发气态单质汞, 并且汞挥发总量与水稻叶面积呈线性显著正相

关 ($R = 0.89707$, $P < 0.01$, 如图 5), 说明水稻汞的释放可能是通过水稻叶片进行的, 且释放量随着水稻叶面积的增加而增大. 而水稻单位叶面积汞挥发量与水稻蒸腾作用强度呈线性显著正相关 ($R = 0.73$, $P < 0.01$, 如图 6).

3 讨论

通过设计分室密闭装置, 对水稻根系进行气态

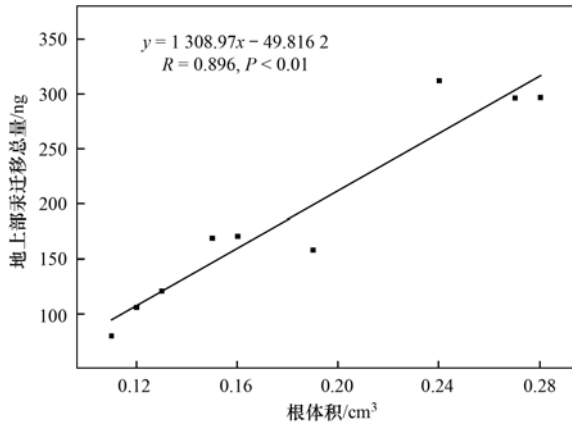


图3 水稻根体积和地上部汞迁移总量相关性

Fig. 3 Relationship between the root volume of rice and total amount of mercury transported above ground

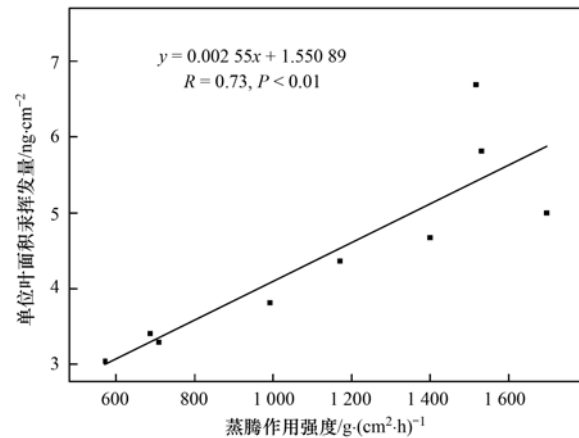


图6 水稻蒸腾作用强度与单位叶面积汞挥发量相关性

Fig. 6 Relationship between rice transpiration intensity and unit leaf area of mercury volatilization

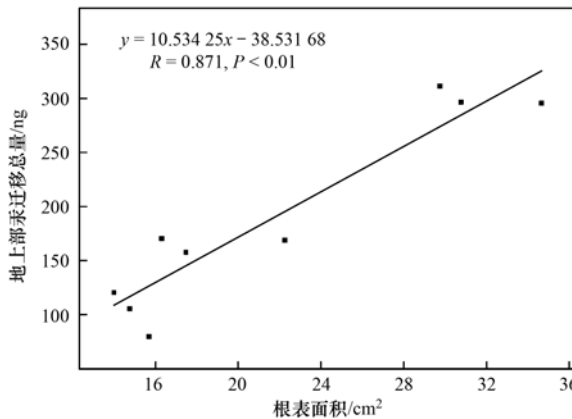


图4 水稻根表面积与地上部汞迁移总量相关性

Fig. 4 Relationship between total root surface area and above ground mercury transport of rice

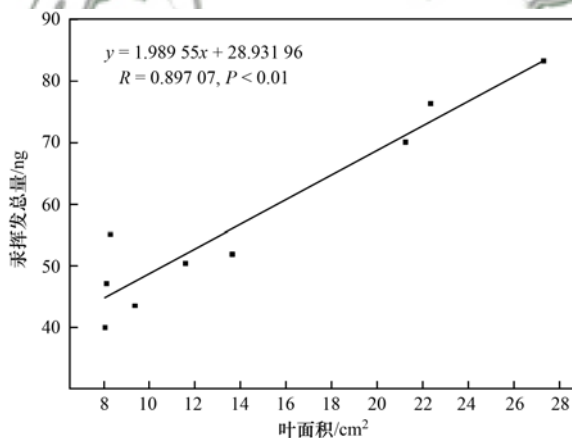


图5 水稻叶面积与汞挥发总量相关性

Fig. 5 Relationship between rice leaf area and total amount of mercury volatilization

单质汞暴露,并收集叶片挥发的的气体。经过测定,发现水稻根系能吸收气态单质汞,并将其转运到地上部,再挥发到空气中。水稻的汞挥发总量籼稻和粳稻具显著性差异($P < 0.05$),且汞挥发总量与

稻的叶面积呈显著正相关($R = 0.897, P < 0.01$)。3种基因型水稻的单位叶面积汞挥发量虽略有差异,但并不显著($P > 0.05$)。

为了探究水稻叶片在汞挥发过程中的作用及其所挥发出来的汞的来源,将水稻叶片沿茎切除,地上部只保留5 cm的茎秆,并对其进行汞挥发实验。通过与有叶的水稻对比,发现水稻去除叶片并不影响根系吸收气态单质汞及根系转移到地上部汞的量,但去除叶片导致水稻汞挥发总量显著增高。水稻根、茎叶中具有丰富的通气组织,它对水稻与大气中气体交换和传输起着非常关键的作用^[16~18]。Butterbach-Bahl等^[19]在之前对水稻吸收排放 CH_4 的研究中发现,水稻向大气中排放 CH_4 主要是通过通气组织进行的,并且从根系转移到地上部分的主要运输阻力是根-茎结合部,不同基因型水稻气体运输的差异是通气组织形态差异的结果,特别是根-茎结合部结构差异。在本实验中,并未破坏水稻的根-茎结合部,所以地上部汞迁移量并未发生显著变化。综上推测水稻根系吸收气态单质汞并通过根-茎结合部转运到茎,当地上部只保留5 cm茎的时候,单质汞就通过茎的空腔直接释放到空气中。而地上部完整的时候,转运到地上部的汞就只能通过水稻叶片的气孔释放到空气中。

水稻孔隙度的大小是表征水稻根系通气组织的重要指标,水稻根系通气组织是植物薄壁组织内的细胞衰老坏死形成的空腔^[20,21],水稻孔隙度越大,其根部活细胞越少。在研究中发现水稻根孔隙度与水稻根部汞含量呈显著负相关,并呈二次拟合($R = 0.8309, P < 0.01$),说明水稻根部吸收气态单质汞可能与水稻根部的活细胞的新陈代谢有关。

在实验中通过计算水稻汞的迁移率,发现水稻根吸收的汞只有很少的一部分被转运到了地上部,迁移率小于3%,挥发的比例更低,小于1.3%。Greger等的研究发现^[22],当对6种陆生植物(甜菜、小麦等)根部暴露 $200\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Hg^{2+} 时,汞从根部转移到地上部的量也较少(0.17%~2.5%)。而Du等的研究表明^[23],水稻汞累积主要保留在水稻根部,数据表明水稻根部积累的汞浓度大约是水稻地上部汞浓度的20倍。地上部汞迁移率不同水稻略有差异,其中J2迁移率最低、J1最高。而水稻的地上部汞迁移总量与根表面积呈线性显著正相关($R=0.896, P<0.01$),且与根体积呈线性显著正相关($R=0.871, P<0.01$)。所以水稻根系对气态单质汞向地上部的转运量与水稻根系密切相关。

本实验还发现水稻单位叶面积汞挥发量与水稻蒸腾作用强度呈线性显著正相关($R=0.73, P<0.01$)。而蒸腾作用主要是以气孔蒸腾进行的,气孔是气体交换和水分散失的通道,植物的蒸腾作用一般可表征气孔活动情况。当进行蒸腾作用的时候,植物叶片气孔处于开放的状态^[24]。Borah等^[25]发现水稻的 CH_4 排放量与水稻的叶片蒸腾作用强度和气孔导度呈显著正相关。Philippot等^[26]的研究发现在水稻淹水培养下,产生的 CH_4 中90%通过通气组织释放到大气中。Battke等^[27]通过室内培养实验发现,植物可吸收 Hg^{2+} ,在体内转化为汞单质并通过植物叶片释放到空气中。Leonard等^[28]通过气体交换系统发现植物能作为汞从土壤到大气中的运输管道。所以水稻根部吸收气态单质汞后,转运到地上部,再通过叶片的气孔排放到大气中去。

4 结论

水稻根系能吸收气态单质汞,并通过根系的通气组织向地上部少量转运,转运量与水稻根系结构相关。转运到地上部的气态单质汞通过通气组织转移到叶片,并通过叶片上的气孔释放到空气中。

参考文献:

- [1] 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 Pollut*, 1991, **55**(1-2): xi-261.
- [2] Lindberg S, Bullock R, Ebinghaus R, *et al.* A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2007, **36**(1): 19-33.
- [3] 丁振华, 刘金铃, 李柳强, 等. 中国主要红树林湿地沉积物中汞的分布特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(8): 2210-2215.
- [4] 何天容, 冯新斌, 郭艳娜, 等. 红枫湖沉积物中汞的环境地球化学循环[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1768-1774.
- [5] He T R, Feng X B, Guo Y N, *et al.* Geochemical cycling of mercury in the sediment of Hongfengreservoir[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(7): 1768-1774.
- [6] Zhang H, Lindberg S E. Air/water exchange of mercury in the Everglades I: the behavior of dissolved gaseous mercury in the Everglades nutrient removal project[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **259**(1-3): 123-133.
- [7] Fantozzi L, Ferrara R, Frontini F P, *et al.* Dissolved gaseous mercury production in the dark: evidence for the fundamental role of bacteria in different types of Mediterranean water bodies[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(2): 917-924.
- [8] Bouffard A, Amyot M. Importance of elemental mercury in lake sediments[J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(8): 1098-1103.
- [9] Obrist D, Fañ X, Berger C. Gaseous elemental mercury emissions and CO_2 respiration rates in terrestrial soils under controlled aerobic and anaerobic laboratory conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(7): 1691-1700.
- [10] Lindberg S E, Dong W J, Chanton J, *et al.* A mechanism for bimodal emission of gaseous mercury from aquatic macrophytes[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(7): 1289-1301.
- [11] Lindberg S E, Dong W J, Meyers T. Transpiration of gaseous elemental mercury through vegetation in a subtropical wetland in Florida[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(33): 5207-5219.
- [12] Chen Z, Tang Y T, Zhou C, *et al.* Mechanisms of Fe biofortification and mitigation of Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown hydroponically with Fe chelate fertilization[J]. *Chemosphere*, 2017, **175**: 275-285.
- [13] Colmer T D. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Annals of Botany*, 2003, **91**(2): 301-309.
- [14] 戴志聪, 杜道林, 司春灿, 等. 用扫描仪及 Image J 软件精确测量叶片形态数量特征的方法[J]. *广西植物*, 2009, **29**(3): 342-347.
- [15] Dai Z C, Du D L, Si C C, *et al.* A method to exactly measure the morphological quantity of leaf using scanner and Image J software[J]. *Guihaia*, 2009, **29**(3): 342-347.
- [16] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 林木蒸腾作用测定和估算方法[J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(6): 1051-1058.
- [17] Deng D Z, Fan Z P, Wang H, *et al.* Determination and estimation methods of tree transpiration: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(6): 1051-1058.
- [18] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(1): 88-96.
- [19] Ma L, Zhao P, Rao X Q, *et al.* Main determination methods of tree transpiration[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(1): 88-96.
- [20] 傅志强, 黄璜, 何保良, 等. 水稻植株通气系统与稻田 CH_4 排放相关性研究[J]. *作物学报*, 2007, **33**(9): 1458-1467.
- [21] Fu Z Q, Huang H, He B L, *et al.* Correlation between rice plant aerenchyma system and methane emission from paddy field[J].

- Acta Agronomica Sinica, 2007, **33**(9): 1458-1467.
- [17] Abiko T, Obara M. Enhancement of porosity and aerenchyma formation in nitrogen-deficient rice roots [J]. Plant Science, 2014, **215-216**: 76-83.
- [18] Drew M C, He C J, Morgan P W. Programmed cell death and aerenchyma formation in roots [J]. Trends in Plant Science, 2000, **5**(3): 123-127.
- [19] Butterbach-Bahl K, Papen H, Rennenberg H. Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields [J]. Plant, Cell & Environment, 1997, **20**(9): 1175-1183.
- [20] 樊明寿, 张福锁. 植物通气组织的形成过程和生理生态学意义 [J]. 植物生理学通讯, 2002, **38**(6): 615-618.
Fan M S, Zhang F S. Aerenchyma formation in plant and its physiological and ecological significance [J]. Plant Physiology Communications, 2002, **38**(6): 615-618.
- [21] 孔好, 王忠, 顾蕴洁, 等. 植物根内通气组织形成的研究进展 [J]. 植物学通报, 2008, **25**(2): 248-253.
Kong Y, Wang Z, Gu Y J, *et al.* Research progress on aerenchyma formation in plant roots [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2008, **25**(2): 248-253.
- [22] Greger M, Wang Y D, Neuschütz C. Absence of Hg transpiration by shoot after Hg uptake by roots of six terrestrial plant species [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**(2): 201-208.
- [23] Du X, Zhu Y G, Liu W J, *et al.* Uptake of mercury (Hg) by seedlings of rice (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture and interactions with arsenate uptake [J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, **54**(1): 1-7.
- [24] 江苏农学院. 植物生理学 [M]. 北京: 农业出版社, 1986. 102-103.
- [25] Borah L, Baruah K K. Effects of foliar application of plant growth hormone on methane emission from tropical rice paddy [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, **233**: 75-84.
- [26] Philippot L, Hallin S. Towards food, feed and energy crops mitigating climate change [J]. Trends in Plant Science, 2011, **16**(9): 476-480.
- [27] Battke F, Ernst D, Fleischmann F, *et al.* Phytoreduction and volatilization of mercury by ascorbate in *Arabidopsis thaliana*, European beech and Norway spruce [J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(3): 494-502.
- [28] Leonard T L, Taylor Jr G E, Gustin M S, *et al.* Mercury and plants in contaminated soils: 1. Uptake, partitioning, and emission to the atmosphere [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1998, **17**(10): 2063-2071.



CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)