

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM₁₀可替代源成分谱的建立方法及其应用 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe²⁺和 Fe³⁺对厌氧氨氧化污泥活性的影响 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N₂O 产生量的影响 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N₂O 产生的影响 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集

郑顺安^{1,2}, 韩允垒³, 郑向群²

(1. 农业部农业生态与资源保护总站, 北京 100125; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3. 中国农学会, 北京 100125)

摘要: 污灌区土壤相当于一个巨大的汞(Hg)源向水体和大气释放汞, 挥发的气态汞可以通过植物叶片的气孔进入植物体内, 严重威胁着当地农产品安全及人类健康. 天津污灌区是汞污染的重灾区之一, 本研究选取天津污灌区内某稻田(污灌约 30 a)、菜田(污灌约 15 a)和污灌区边缘某草地(无污灌史, 对照)作为监测地点, 以 5 种常见叶菜(菠菜、苋菜、油菜、生菜、韭菜)作为生物监测实验对象, 考察污灌区内产地土壤、大气汞的浓度及其在叶菜中的富集特征. 结果表明: ①经过长期污灌, 稻田和菜田土壤汞含量已显著高于区域土壤汞背景含量和土壤环境质量标准一级标准, 但未超过二级. 对照草地土壤汞含量在背景含量与一级标准之间. 稻田和菜地大气环境已受到较为严重的汞污染, 气态总汞均值分别为 $71.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $39.2 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 远高于北半球大气总汞含量的背景水平($1.5 \sim 2.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$), 对照草地总汞含量平均为 $9.4 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. ②叶菜汞含量与污灌区气态汞含量对数之间呈现极显著的线性关系, 5 种叶菜对污灌区气态汞的敏感程度依次为菠菜 > 苋菜 > 韭菜 > 油菜 > 生菜. 菠菜和苋菜 Hg 含量的中位值及平均值均超出食品卫生限量标准, 其中菠菜的中位值及均值在 $20 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上, 其余 3 种叶菜中位值及均值在限量值标准以下. ③污灌区内叶菜 Hg 来源主要通过叶片吸收气态汞进入植株体内, 而非颗粒态汞. 研究表明在污灌地区种植叶菜, 不仅需要考虑土壤污染的因素, 也需要考虑气态汞暴露的风险.

关键词: 污灌区; 汞; 土壤; 气态汞; 叶菜

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4338-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.041

Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables

ZHENG Shun-an^{1,2}, HAN Yun-lei³, ZHENG Xiang-qun²

(1. Rural Energy & Environment Agency, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3. Chinese Association of Agricultural Science Society, Beijing 100125, China)

Abstract: Gaseous Hg can evaporate and enter the plants through the stomata of plat leaves, which will cause a serious threat to local food safety and human health. For the risk assessment, this study aimed to characterize atmospheric mercury (Hg) as well as its accumulation in 5 leafy vegetables (spinach, edible amaranth, rape, lettuce, allium tuberosum) from sewage-irrigated area of Tianjin City. Bio-monitoring sites were located in paddy (wastewater irrigation for 30 a), vegetables (wastewater irrigation for 15 a) and grass (control) fields. Results showed that after long-term wastewater irrigation, the mean values of mercury content in paddy and vegetation fields were significantly higher than the local background value and the national soil environment quality standard value for mercury in grade I, but were still lower than grade II. Soil mercury contents in the studied control grass field were between the local background value and the national soil environment quality standard grade I. Besides, the atmospheric environment of paddy and vegetation fields was subjected to serious mercury pollution. The mean values of mercury content in the atmosphere of paddy and vegetation fields were $71.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ and $39.2 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively, which were markedly higher than the reference gaseous mercury value on the north sphere of the earth ($1.5\text{-}2.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$). The mean value of ambient mercury in the control grass fields was $9.4 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. In addition, it was found that the mercury content in leafy vegetables had a good linear correlation with the ambient total gaseous mercury (the data was transformed into logarithms as the dataset did not show a normal distribution). The comparison among 5 vegetables showed that the accumulations of mercury in vegetables followed this order: spinach > edible amaranth > allium tuberosum > rape > lettuce. Median and mean values of mercury contents in spinach and edible amaranth were greater than the hygienic standard for the allowable limit of mercury in food. Spinach appeared to accumulate more mercury than the other four vegetables, in which the median and mean mercury content were both higher than $20 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The mercury concentrations in rape, lettuce and allium tuberosum were lower than the standard. Moreover, test results indicated that the Hg content in leafy vegetables was mainly the gaseous mercury through leaf adsorption but not the Hg particulates. This study clearly manifested that there should be a great concern on the pollution risk of both

收稿日期: 2014-04-14; 修订日期: 2014-06-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203045); 国家自然科学基金项目(41203084, 41371463)

作者简介: 郑顺安(1981 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为产地环境污染防控, E-mail: zhengshunan@gmail.com

air-and soil borne mercury when cultivating leafy vegetables in long-term wastewater-irrigated area.

Key words: wastewater-irrigated area; mercury; soil; gaseous mercury; leafy vegetable

天津污灌区是具有代表意义的北方典型污灌区之一,引用工业和城市污水进行污灌的历史超过 50 年. 据农业部门的统计,1999 年天津市污灌面积为 $23.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占灌溉总面积的 66.1%,占河水灌溉面积的 96.8%,污灌面积占地表水灌溉面积的比例居全国之首^[1]. 污水灌溉在解决农业用水不足的同时,其中包含的有毒重金属元素也随之进入土壤,带来一系列水土环境、生态安全等问题. 有毒重金属中,汞(Hg)是最危险的环境污染物之一,汞及其化合物特别是甲基汞具有很强的生物毒性、较快的生物富集放大倍率和较长的脑器官生物半衰期,即使在土水环境中只有很小的浓度,也可经过食物链被生物浓缩放大从而达到极其危险的浓度. 相比其它重金属,汞还具有很强的挥发性,土壤中汞的释放是大气汞最主要的来源之一.

天津污灌区是汞污染的重灾区之一. 早在 1988 年,就有调查表明,天津污灌区土壤汞含量高达 $0.292 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,约是普通河水灌溉区的 3~4 倍;有效态汞含量达 $0.153 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态所占的比例超过 50%^[2]. 1999 年的调查显示,在天津市典型污灌区(东丽区)的 9 个采样区域中,有 78% 的区域土壤汞超出轻度污染水平,其中重度污染水平为 33%,严重污染为 11%,污灌区土壤汞的最大含量值超过背景值的近 20 倍. 蔬菜中有 76.92% 的采样点位达到中度以上污染,重度污染为 43.33%,最大值为 $0.096 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过国家食品卫生标准($0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)近 10 倍^[1]. 2005 年根据王祖伟等^[3]对天津污灌区内 31 个水田土壤样品和 29 个菜田土壤样品的采样调查,灌区内土壤-作物系统中汞的污染等级达到了重度污染,部分农作物中汞的质量分数已经远超过国家食品卫生标准,严重威胁到人民群众身体健康.

一般来说,单质汞是土壤向大气释放汞的主要形态,土壤中汞的溶解度越大,汞的释放率越高. 影响土壤汞挥发的因素有土壤温度、土壤总汞含量、阳光、微生物活性、土壤中汞的形态及络合物等^[4]. 由于测定技术的影响,国内对自然过程(土壤、水面、植物表面)汞的释放研究开展得较少,进入 20 世纪 90 年代以后,国内才开始对汞释放通量有了一些报道. 中国科学院地球化学研究所的冯新斌研究员和西南大学的王定勇教授所领导的课题组

对土/水/气界面汞的交换通量进行了较多研究,如冯新斌研究组对汞矿化带土/气界面汞交换通量的研究^[5],对中/富营养化水库水/气界面汞交换通量的研究^[6]等;王定勇研究组对不同类型紫色土土/气界面汞释放通量的研究^[7],对重庆不同环境汞源挥发特征的研究^[8]及对水稻田及早地土/气界面汞交换通量的研究^[9]等. 已有研究表明^[10],植物的叶片对气态汞有较强的富集作用,可以通过叶片气孔的呼吸作用从大气中吸收汞,包括单质汞和甲基汞. 叶菜类蔬菜的主要食用部分是叶部和茎部,在汞污染地区存在较大风险. 随着重金属污染问题日益严重,污灌区土壤相当于一个巨大的汞源向水体和大气释放汞,不仅造成区域及全球性的危害,还威胁着当地农产品安全及人类健康. 本研究选取天津污灌区内某菜地和稻田作为研究地点,以 5 种常见叶菜作为生物监测(biomonitoring)实验对象,考察污灌区内产地土壤、大气汞的浓度及其在叶菜中的富集特征,以期深入了解汞在土壤-植物-大气连续体中的固持、转化及迁移规律提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究地点

大气 Hg 暴露生物监测实验设置在 3 个点进行,S1 为天津市东丽区李明庄某稻田,该地距离天津三大排污河之一的北塘排污河约 200 m,排污河内水体发黑发臭. 该稻田内长期大量污水淹灌,污灌历史接近 30 年. S2 为李明庄内某菜地,距离北塘排污河约 600 m,属于间歇性清污混灌区,污灌口位于菜地的东北角,污灌时间约 15 a. S3 为对照地,位于李明庄正北方向 2 500 m 处某草地,无污灌历史. 监测实验期间 3 块地区均未种植作物.

1.2 暴露实验

用于大气 Hg 暴露生物监测的蔬菜品种为市场上常见的 5 种叶菜,包括大叶菠菜、苏州青油菜、花红苋菜、汉中冬韭菜和结球生菜. 种子购买于天津农科院. 叶菜种植于订购的工程塑料箱(天津九州塑业)中,工程塑料箱内径尺寸为 500 mm(长)×325 mm(宽)×200 mm(高),每箱置放采集于天津市宝坻区某蔬菜地的潮土约 40 kg. 土壤全 Hg 含量为 $0.082 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (测定方法见 1.3 节),按照土壤环境质量标准(GB 15618-1995),属于未受 Hg 污染

的土壤. 将 20~30 颗饱满菜籽直接播种在塑料箱 5~10 cm 处. 水分模式采用干湿交替法, 开始时保持大约 75% 的田间持水量, 自然风干后定期添加去离子水. 大约 7 d 后, 进行第一次间苗, 选择健壮、长势均匀的苗, 每箱留苗 15~25 株. 间苗前塑料箱置于 S3 对照点, 该处大气总汞均值低于 $10 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (测定方法见 1.3 节). 间苗后将塑料箱分散于 S1~S3 开始暴露监测实验. 每种叶菜 Hg 暴露实验时间为 28 d, 暴露系统设计详见文献[11], 在每个监测点设置 5 个重复. 暴露实验结束后, 采集可食部分的植株, 放入塑料袋内, 详细编号. 将采集到的植株样品运回实验室后, 将植株分为 2 部分, 一部分不水洗, 直接称取鲜重, 另一部分先用自来水冲洗干净, 约冲洗 1~2 min, 再用去离子水冲洗 3 遍, 最后滤纸吸去表面水分, 称取鲜重. 将鲜样放入烘箱中, 在 105°C 杀青 20 min, 再 70°C 烘干至恒重, 时间约为 2 d 左右, 记录干重. 烘干后的植株进行粉碎, 装于纸袋存储于干燥器内待测.

1.3 汞的测定

(1) 植株样品汞的测定

测定: 叶菜中 Hg 的测定采用 GB/T 5009.17-2003 标准方法. 称取植株样品 0.5 g (精确至 0.0001 g) 于 50 mL 带塞比色管中, 加入 10 mL 硝酸(优级纯), 加塞后隔夜放置. 转天放置于多孔炉中, 80°C 加热 20 min, 再升至 120°C 加热 30 min 后升至 150°C , 消解 2~3 h 至消解完全后, 加去离子水定容至 50 mL 待测. 测定仪器为 AFS-9130 双道原子荧光光度计(北京吉天公司).

质控: 以标准样品 GBW10015(GSB-6, 菠菜)作为质控样, 方法检出限为 $0.15 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 回收率为 92.3%~105.9%, 相对标准偏差(RSD) <5%.

(2) 土壤采集及汞的测定

采集: 参照农田土壤环境质量监测技术规范(NYT 395-2012), 在 S1-S3 监测点采集土壤样品, 密封标记后送至实验室.

测定: 土壤中总汞的测定参考《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法》(GB/T 22105.2-2008), 称取土壤样品 0.5 g (精确至 0.0001 g) 于 50 mL 带塞比色管中, 加入 10 mL 王水(1:1), 加塞后摇匀隔夜, 再放入多孔炉中, 设定加热温度为 125°C 消解 2~3 h, 消解完全后加去离子水定容至 50 mL, 待测. 测定仪器同上.

质控: 以标准土壤样品 ESS-4(褐土)作为质控样, 方法检出限为 $0.15 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 回收率为 94.7%

~102.9%, 相对标准偏差(RSD) <5%.

(3) 土壤气态总汞的测定

测定: 采用高时间分辨率大气汞分析仪 Tekran 2537A(加拿大)外接聚四氟乙烯采样管(8.5 m)对污灌区气态总汞进行 24 h 不间断采样. 采样管进气口位于地面以上约 2 m 高度. Tekran 2537A 采用 A、B 两个金管采样富集气态汞(流速约 $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$), 热解析后冷原子荧光法测定, 检出限为 $0.1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 采样时间为 5 min, 所有原始数据按小时平均后匹配同步气象数据, 24 h 后取平均值作为 1 次测定数据.

质控: 仪器分别经过自动校正和人工注射校正以控制气态总汞测定的数据质量. 自动校正由 Tekran 2537A 内部进行, 仪器每 25 h 自动校正 1 次; 人工校正利用 Tekran 2505 标准汞蒸气源, 在与外界相同温度下, 吸取原子汞蒸气注射到仅通有零气(不含汞的空气)的 2537A 中进行测定. 汞分析仪 Tekran 2537A 的 A、B 两个金管测定结果之间误差 <5%, 3 次校正之间误差 <5%.

1.4 统计及制图

分别采用 Origin 8.6 SR2 软件(美国 Origin 公司)和 Minitab 16.2 软件(美国 Minitab 公司)进行回归分析.

2 结果与讨论

2.1 污灌区土壤及气态总汞含量

表 1 为 S1~S3 土壤总汞及气态汞含量的统计值. 从中可以看出, S1 稻田和 S2 菜地由于污灌时间较长, 土壤汞含量已显著高于区域土壤 Hg 背景含量($0.073 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和土壤环境质量标准一级($0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 但未超过土壤环境质量二级标准(稻田和菜地土壤 pH 均 7.8, 根据土壤环境质量标准, pH >7.5 的土壤二级标准为 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 污染程度低于王婷等调查的结果^[12]. 根据王婷等对天津 3 条排污河污灌区重金属污染农田的 22 个土壤及油麦菜样品的调查, 有 7 个样点土壤 Hg 超标(土壤三级标准, $1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 100% 的油麦菜都受到 Hg 污染, 且都处于重污染级别. 对照草地土壤汞含量在该区域土壤 Hg 背景含量与一级标准之间, 仍然属于清洁土壤范围. 稻田和菜地气态总汞均值分别为 $71.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $39.2 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 远高于北半球大气总汞含量的背景水平^[13] ($1.5\sim 2.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$), 分别是其 35 倍和 20 倍以上, 这表明经过长期污灌, 该地区大气环境已受到较为严重的汞污染. 对照草地处于

污灌区外缘,为污灌区主导风向(西北风)平行方向,无污灌历史,气态总汞可以作为区域内空白对照. 数据表明, S3 草地的总汞含量平均为 $9.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 显著低于 S1 和 S2 ($P < 0.05$, 下同), 远高于北半球大气总汞背景(4~5 倍), 也显著高于欧美地区城市气态总汞的均值水平 ($2.0 \sim 4.6 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), 但仍然低于国内其他一些城市的测定结

果, 如北京的大气气态总汞浓度为 $8.3 \sim 24.7 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[14], 长春的大气气态汞含量约为 $18.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[15], 兰州市采暖和非采暖季大气气态总汞平均浓度为 $28.6 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[16], 广州城区的大气气态总汞浓度为 $13.5 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[17]. 考虑到该处与城市距离较远且无人为汞源, 推测该地区气态汞浓度受污灌区影响较大, 由污灌区汞源通过大气运动迁移而至.

表 1 污灌区土壤总汞及气态汞含量统计

Table 1 Statistical summary of total mercury concentration in soil and atmosphere of wastewater irrigated area

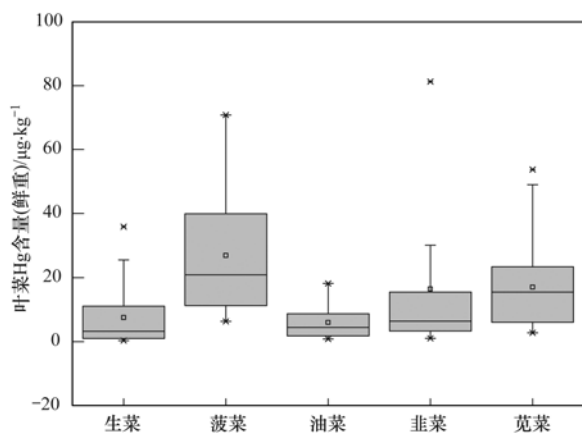
编号	土地 利用类型	土壤总汞平均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-3}$	气态总汞/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$			
			测定次数	最小值	最大值	平均值 \pm 标准差
S1	稻田	0.65	59	13.7	161.2	71.3 ± 23.7
S2	菜地	0.42	47	9.8	102.1	39.2 ± 16.8
S3	对照草地	0.14	51	2.6	14.9	9.4 ± 1.9

2.2 叶菜中汞含量及与气态汞含量的关系

图 1 为 5 种叶菜中 Hg 含量(以鲜重计)的箱式图分布(由于单一监测点位统计样本较少, 将 3 个监测点位按照叶菜种类合并后进行统计制图). 根据食品中 Hg 限量标准(GB 2762-2012), 叶菜中 Hg 含量的限量值为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 从中可以看出, 菠菜和苋菜的含量菠菜中 Hg 含量的中位值及平均值均超出限量标准, 其中菠菜的中位值及均值在 $20 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上. 其余 3 种叶菜的 90% 及 75% 分位数超标, 但中位值及均值在限量值标准以下. 由于叶菜汞含量与气态汞浓度分布并非正态分布, 将两者进行对数转化后进行相关性比对, 从图 2 可以看出, 叶菜汞含量与污灌区气态汞含量对数之间呈现极显著的线性关系 ($P < 0.01$), 决定系数在 $0.8584 \sim 0.9233$ 之间. 线性方程的斜率表征了叶菜对污灌区气态汞的敏感程度(图 2), 监测用 5 种叶菜依次为

菠菜(1.11) > 苋菜(0.89) > 韭菜(0.84) > 油菜(0.79) > 生菜(0.74).

大气汞包含气态单质汞、活性气态汞和颗粒态汞, 其中气态单质汞和活性气态汞合称气态(总)汞, 约占大气汞的 90% 以上. 气态汞又以气态单质汞 Hg^0 为主, 气态单质汞具有较低的水溶性和干沉降速率, 且化学反应惰性大, 在大气中的滞留时间可达 $0.5 \sim 2 \text{ a}$, 能随大气环流迁移数千到数万公里. 活性气态汞和颗粒态汞具有较高的水溶性和干沉降速率, 其大气滞留时间通常在几小时到几周, 一般不参与长距离的大气传输, 但与大气中细粒气溶胶结合的颗粒态汞也可以在大气中长距离迁移^[18]. Millhollen 等^[19] 阐述了气态汞对于植物属于高度有效性的形态, 植株可以通过叶片气孔的呼吸作用从大气中吸收汞(单质汞和甲基汞), 这个过程受到大气中汞含量、叶片气孔的呼吸状况和植物年龄的影响. 叶片也可以从大气中吸收或吸附二价汞、活性二价汞及颗粒态汞^[20]. 不同类型的植物从环境中吸收汞的方式和程度有一定的差异, 如研究表明^[21], 苔鲜中汞几乎全部来自大气和降水, 这使得苔鲜成为地区汞沉降的指示性植物, 是区域汞污染的一种简单有效的指示植物. Qiu 等^[22] 近年来开展了用苔鲜研究区域性汞沉降的工作. 本研究中, 菠菜和苋菜是对气态汞比较敏感的叶菜类型. 在 Niu 等^[23] 及 De Temmerman 等^[24, 25] 的研究中, 菠菜 (spinach) 属于对汞特别是气态汞富集能力较强的叶菜种类, 这与本研究的结果相一致. 某些研究者^[26, 27] 认为大气汞是植物体内汞的主要来源, 而植物从土壤中吸收的汞比较有限, 这主要是由于从土壤中吸收汞受到各种条件的制约, 例如土壤中含量



箱式(不含点)从上往下依次为 90% 分位数、75% 分位数、中位值、25% 分位数、10% 分位数, 星点表示异常值, 空心方点表示平均值

图 1 5 种叶菜 Hg 含量分布箱式图

Fig. 1 Box plots of Hg contents in leafy vegetables

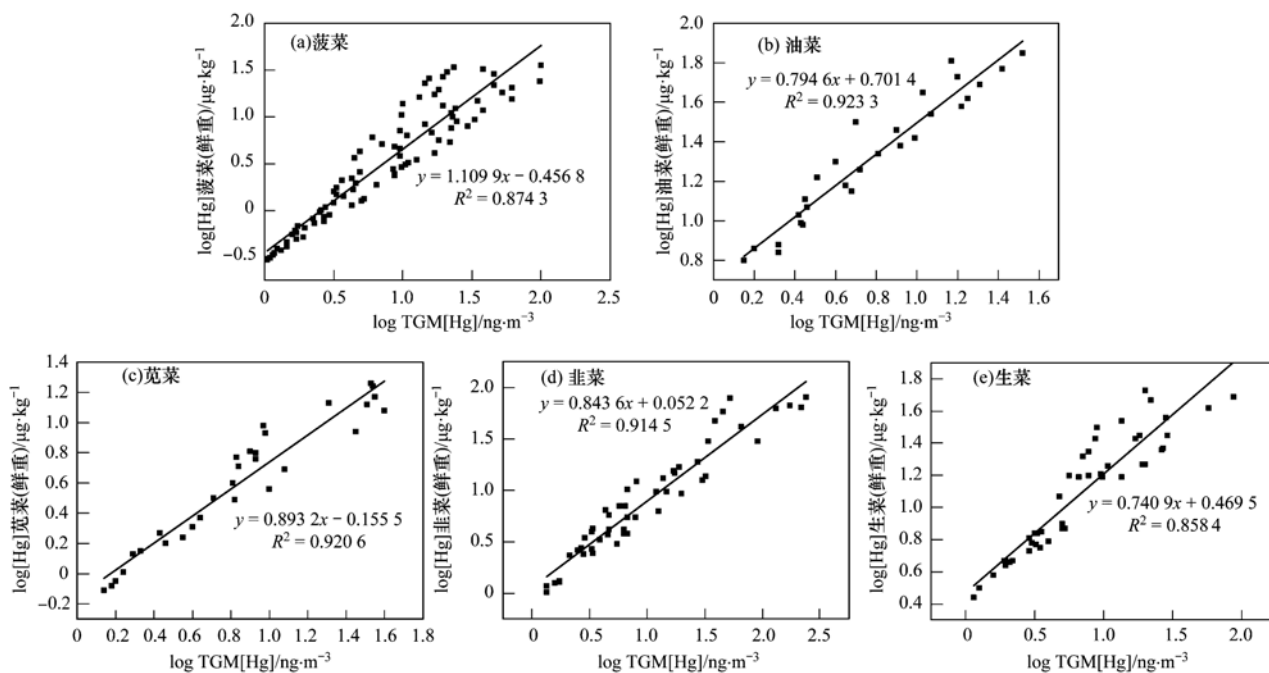


图2 污灌区气态总汞浓度与叶菜汞含量之间(对数)的相关性

Fig. 2 Correlation between the logarithm of the ambient air TGM concentrations and the logarithm of the mercury concentrations in leafy vegetables

较高的腐殖酸和有机质能与汞形成惰性化合物,影响汞的迁移^[28];另一方面土壤中吸收的汞绝大部分滞留在根部,很少向茎部和叶片迁移.由于植物根部生物量较小,根部吸收也可能会达到饱和,所以限制了吸收^[29].这与本研究的结果相一致,综合图1和图2可以看出,污灌区浓度较高的气态汞是导致叶菜汞暴露的重要途径,由于本研究监测实验期间2块污灌地区未种植作物,未能采集到田间环境中的叶菜与本研究在清洁基质上生长的叶菜作对比,但即使在清洁基质上生长的叶菜,当环境气态汞升高的情况下也受到污染,出现超标的情况.在实际污灌区田间环境中,叶菜受到土壤和气态汞的双重胁迫,污染状况可能更严重,因此在污灌地区种植叶菜,不仅需要考虑土壤污染的因素,也需要考虑气态汞暴露的风险.类似地,刘德绍等^[30]研究表明,在气态Hg浓度为 $(57.6 \pm 14.7) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 条件下,红萝卜、莴苣叶中Hg含量超过了食品卫生标准,气态Hg和土壤Hg对蔬菜Hg的贡献率分别为70.4%~90.7%和9.3%~29.6%,气态Hg较土壤Hg是蔬菜更为重要的Hg源.不仅是叶菜,Meng等^[31,32]研究表明水稻生长期间叶片中Hg主要来自于大气Hg,周俊等^[33]认为当大气Hg浓度较低时,水稻中Hg主要来自于土壤,而在水稻生长后期,叶片中Hg主要受大气Hg控制.有研究用同位素示踪法测定了丹麦东部一些植物对气态汞的吸收^[34],发现植物

绿色部分吸收的汞甚至90%以上来自大气汞,即使地下部所含的汞也有50%来自于大气汞.

2.3 水洗与未水洗植株样品汞含量差异

大气中的颗粒态汞可以沉降附着在植物表面,该形态汞可以通过水洗冲去.经过双样本配对Wilcoxon符号-秩检验,本研究的5种叶菜水洗和未水洗的样品在Hg含量上没有显著性差异($P < 0.05$),这表明,污灌区内叶菜中Hg来源主要通过叶片吸收气态汞进入植株体内,而非通过沉降附着在植株表面的颗粒态汞.这与氯碱工厂周边大气汞污染状况有所不同,Wängberg等^[35]及Reis等^[36]研究表明,这些地区沉降的颗粒态汞是植物汞的重要来源.目前受限于研究手段,气态汞进入植物体内途径及机制仍然不完全清楚,对于植株体内汞形态的研究还比较有限,明确的是植物中的汞含量和分布受周围汞污染状况的影响,主要含 Hg^0 、 Hg^{2+} 、 CH_3Hg^+ 与 $\text{C}_2\text{H}_5\text{Hg}^+$ ^[37],Friedli等^[38]通过对植物燃烧的研究表明,植物体内的汞通过燃烧几乎全部释放到大气中,绝大部分是 Hg^0 和颗粒态汞.植物不仅可作为全球汞循环的汇,也可以作为源,由于植物对汞具有较强的富集特性,植物死亡腐烂或叶片脱落后,体内所含的汞几乎全部进入土壤或水体中,导致生态系统汞暴露风险增大.有研究表明^[39],汞暴露的植物对土壤和湿地污染风险很大,一般是湿沉降的2~5倍.因此污灌区内汞暴露的叶菜对食物

链和生态系统的风险较高,值得高度重视。

3 结论

(1)污灌区内稻田、菜地及边缘对照草地气态总汞均值显著高于北半球大气总汞含量的背景水平。

(2)叶菜汞含量与污灌区气态汞含量对数之间呈现极显著的线性关系,5种叶菜对污灌区气态汞的敏感程度依次为菠菜>苋菜>韭菜>油菜>生菜。菠菜和苋菜 Hg 含量的中位值及平均值均超出限量标准,其余3种叶菜中位值及均值在限量值标准以下。

(3)污灌区内叶菜中 Hg 来源主要通过叶片吸收气态汞进入植株体内,而非通过沉降附着在植株表面的颗粒态汞。

参考文献:

- [1] 农业部环境监测总站. 1996~1999 第二次中国污水灌溉普查报告[R]. 1999.
- [2] 张学询,王连平,宋胜焕. 天津污灌区土壤作物重金属污染状况的研究[J]. 中国环境科学, 1988, **8**(2): 20-26.
- [3] 王祖伟,张辉. 天津污灌区土壤重金属污染环境质量与环境效应[J]. 生态环境, 2005, **14**(2): 211-213.
- [4] Schlüter K. Review: evaporation of mercury from soils. An integration and synthesis of current knowledge [J]. *Environmental Geology*, 2000, **39**(3-4): 249-271.
- [5] Wang S F, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Mercury concentrations and air/soil fluxes in Wuchuan mercury mining district, Guizhou province, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(28): 5984-5993.
- [6] Fu X W, Feng X B, Wan Q, *et al.* Probing Hg evasion from surface waters of two Chinese hyper/meso-eutrophic reservoirs [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(23): 5887-5896.
- [7] 林陶,张成,石孝均,等. 不同类型紫色土土/气界面汞释放通量及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(10): 1955-1960.
- [8] Wang D Y, He L, Shi X J, *et al.* Release flux of mercury from different environmental surfaces in Chongqing, China [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(11): 1845-1854.
- [9] Zhu J S, Wang D Y, Liu X, *et al.* Mercury fluxes from air/surface interfaces in paddy field and dry land [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(2): 249-255.
- [10] Zhang L M, Wright L P, Blanchard P. A review of current knowledge concerning dry deposition of atmospheric mercury[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(37): 5853-5864.
- [11] De Temmerman L, Hoenig M. Vegetable crops for biomonitoring lead and cadmium deposition [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2004, **49**(1-3): 121-135.
- [12] 王婷,王静,孙红文,等. 天津农田土壤镉和汞污染及有效态提取剂筛选[J]. 农业环境科学学报. 2012, **31**(1): 119-124.
- [13] Valente R J, Shea C, Lynn Humes K, *et al.* Atmospheric mercury in the Great Smoky Mountains compared to regional and global levels [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(9): 1861-1873.
- [14] Liu S L, Nadim F, Perkins C, *et al.* Atmospheric mercury monitoring survey in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2002, **48**(1): 97-107.
- [15] Fang F M, Wang Q C, Li J F. Urban environmental mercury in Changchun, a metropolitan city in Northeastern China: source, cycle, and fate [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **330**(1-3): 159-170.
- [16] 苏静,程金平,叶笑风,等. 汞在兰州市多介质环境中的分布特征及成因初探[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 381-385.
- [17] Wang Z W, Chen Z S, Duan N, *et al.* Gaseous elemental mercury concentration in atmosphere at urban and remote sites in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(2): 176-180.
- [18] Li P, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Mercury pollution in Asia: a review of the contaminated sites [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **168**(2-3): 591-601.
- [19] Millhollen A G, Gustin M S, Obrist D. Foliar mercury accumulation and exchange for three tree species [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(19): 6001-6006.
- [20] Rutter A P, Schauer J J, Shafer M M, *et al.* Dry deposition of gaseous elemental mercury to plants and soils using mercury stable isotopes in a controlled environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(4): 848-855.
- [21] Lodenius M. Dry and wet deposition of mercury near a chlor-alkali plant [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **213**(1-3): 53-56.
- [22] Qiu G L, Feng X B, Wang S F, *et al.* Mercury and methylmercury in riparian soil, sediments, mine-waste calcines, and moss from abandoned Hg mines in east Guizhou province, southwestern China [J]. *Applied Geochemistry*, 2005, **20**(3): 627-638.
- [23] Niu Z C, Zhang X S, Wang S, *et al.* The linear accumulation of atmospheric mercury by vegetable and grass leaves: Potential biomonitors for atmospheric mercury pollution [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(9): 6337-6343.
- [24] De Temmerman L, Waegeneers N, Claeys N, *et al.* Comparison of concentrations of mercury in ambient air to its accumulation by leafy vegetables: An important step in terrestrial food chain analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(4): 1337-1341.
- [25] De Temmerman L, Claeys N, Roekens E, *et al.* Biomonitoring of airborne mercury with perennial ryegrass cultures [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **146**(2): 458-462.
- [26] 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.
- [27] Erickson J A, Gustin M S, Schorran D E, *et al.* Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(12): 1613-1622.
- [28] Wang D Y, Qing C L, Guo T Y, *et al.* Effects of humic acid on transport and transformation of mercury in soil-plant systems[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **95**(1-4): 35-43.
- [29] Niu Z C, Zhang X S, Wang S, *et al.* Field controlled experiments on the physiological responses of maize (*Zea mays* L.) leaves to low-level air and soil mercury exposures [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(2): 1541-1547.
- [30] 刘德绍, 青长乐. 大气和土壤对蔬菜汞的贡献[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(3): 315-318.
- [31] Meng B, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Distribution patterns of inorganic mercury and methylmercury in tissues of rice (*Oryza sativa* L.) plants and possible bioaccumulation pathways [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, **58**(8): 4951-4958.
- [32] Meng B, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Inorganic mercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, **31**(9): 2093-2098.
- [33] 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.
- [34] Patra M, Sharma A. Mercury toxicity in plants [J]. *The Botanical Review*, 2000, **66**(3): 379-422.
- [35] Wängberg I, Edner H, Ferrara R, *et al.* Atmospheric mercury near a chlor-alkali plant in Sweden [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **304**(1-3): 29-41.
- [36] Reis A T, Rodrigues S M, Araújo C, *et al.* Mercury contamination in the vicinity of a chlor-alkali plant and potential risks to local population [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(8): 2689-2700.
- [37] Lindberg S E, Stratton W J. Atmospheric mercury speciation: Concentrations and behavior of reactive gaseous mercury in ambient air [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(1): 49-57.
- [38] Friedli H R, Radke L F, Lu J Y, *et al.* Mercury emissions from burning of biomass from temperate North American forests: laboratory and airborne measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(2): 253-267.
- [39] St. Louis V L, Rudd J W M, Kelly C A, *et al.* Importance of the forest canopy to fluxes of methyl mercury and total mercury to boreal ecosystems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(15): 3089-3098.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行