

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 MCBMBR 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)	

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

(华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241)

摘要: 分析比较上海市郊工业区附近露天蔬菜样品清洗前后 Cd、Zn、Pb、Cu、Hg 和 As 含量, 并利用目标危害商数对蔬菜可食部分进行健康风险评价。结果表明, 清洗蔬菜样品中 Cd、Zn、Pb、Cu、Hg 和 As 的平均含量(以鲜重计)分别为 0.023、4.444、0.112、0.826、0.004、0.094 mg·kg⁻¹。苋菜对于重金属 Cd、Zn、Pb 和 Cu 的富集能力最大, 而杭白菜对重金属 Hg 和 As 的富集能力最强。不同重金属在空间分布特征上没有表现出显著性差异。食用蔬菜前进行清洗可一定程度上降低摄食蔬菜导致的重金属危害风险。健康风险评价结果表明, As 元素对 TTHQ 的贡献率均达到了 55% 以上, 其余元素 THQ 均小于 1, 长期食用可能造成 As 健康风险。食用相同的蔬菜, 儿童的健康风险高于成人。

关键词: 蔬菜; 重金属; 健康风险; 上海市郊; 清洗

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5292-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702104

Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai

ZHOU Ya, BI Chun-juan*, ZHOU Xiao-xiao, ZHANG Huan-huan, CHEN Zhen-lou, BAO Xin-yi

(Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The concentrations of Cd, Zn, Pb, Cu, Hg, and As in vegetables collected from the industrial areas in suburban Shanghai were analyzed before and after washing. Results showed that the average concentrations (fresh weight) of Cd, Zn, Pb, Cu, Hg, and As in washed vegetables were 0.023, 4.444, 0.112, 0.826, 0.004, and 0.094 mg·kg⁻¹, respectively. Amaranth accumulated the highest Cd, Zn, Pb, and Cu, while pakchoi accumulated the highest Hg and As. There was no significant difference of heavy metals between different sites. Washing vegetables prior to cooking reduced the health risk for heavy metals related to the consumption of vegetables. A health risk evaluation indicated that more than 55% of the Total Target Hazard Quotient (TTHQ) came from As, while the other elements contributed less than 1, indicating that the health risk from vegetable consumption was mainly caused by As. Children have higher health risks than adults when eating the same vegetables.

Key words: vegetables; heavy metals; health risk; suburban Shanghai; washing

随着城市化、工业化进程的迅速发展,工业废弃物、城市生活垃圾等不合规排放,严重污染了区域环境,致使环境介质中的重金属不断累积,蔬菜可以从各种环境介质中积累高含量的有毒重金属。近年来,由重金属污染引起的食品安全问题频繁发生。人体内累积过多重金属会引起癌变、神经受损等严重的健康问题,而人体摄入重金属最主要最常见的途径就是食用受重金属污染的食物^[1]。随着城市菜篮子工程的实施,大量蔬菜生产基地建设在了中心城市周边的郊区,这些蔬菜不仅受重金属污染风险较高,而且适用人群广泛,因此可能带来的潜在危害很大。

目前,国内外已有不少学者对蔬菜中重金属的含量及存在的健康风险做出了评价,秦普丰等^[2]对株洲市不同功能区蔬菜中重金属进行健康风险评价,指出不同功能区蔬菜中重金属危害指数(HI)都大于 10.0,食用受到重金属污染的蔬菜会导致严重的健康危害。葫芦岛炼锌厂附近和孟加拉湾蔬菜

中出现了 Cu、Pb、Cd 等的综合目标危害商数(TTHQ)大于 1 的情况,说明长期食用这些蔬菜会存在一定的健康风险^[3,4]。大量研究表明,重金属在蔬菜内的累积能力表现为叶菜类>根菜类>果菜类,故本文选取对重金属累积能力最强的叶菜类蔬菜作为研究对象,分析上海市郊工业区附近蔬菜在不同种类、食用习惯上对重金属累积作用的差异,以为健康食用蔬菜提供科学合理的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

上海市位于太平洋西岸,亚洲大陆东侧

收稿日期: 2017-02-19; 修订日期: 2017-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271472); 国家自然科学基金人才培养项目(J1310028); 华东师范大学大型仪器设备开放基金项目

作者简介: 周雅(1992~),女,硕士,主要研究方向为城市环境污染过程, E-mail: y_vonnechou@126.com

* 通信作者, E-mail: cjbi@geo.ecnu.edu.cn

(120°51′~122°12′E, 30°40′~31°53′N), 地处长江入海口、太湖流域东缘, 与江苏、浙江两省接壤, 属于北亚热带季风性气候, 四季分明, 温和湿润. 至 2014 年, 上海郊区土地面积为 6 050 km², 占全市总面积的 95%. 郊区耕地面积 18.67 万 hm², 蔬菜播种面积 12.73 万 hm², 蔬菜产量 377.95 万 t. 截至 2014 年底, 全市范围共有常住人口数 2 425.68 万人, 其中户籍人口 1438.69 万人^[5].

1.2 采样点分布

为研究城市工业、交通排放等对近郊蔬菜中重金属含量的影响, 分别于 2014 年的 1、4、7、10 月, 在上海宝山钢铁总厂 (BS)、浦东御桥生活垃圾厂 (PD)、吴泾化工区 (MH1~4)、S4 沪金高速奉贤南桥郊区段 (FX) 这些典型工业区、交通要道周围进行了露天蔬菜的样品采集, 并在远离城镇、交通要道、工业区的青浦区 (QP) 采集蔬菜样品, 用于与其他样点进行对比. 采样点的分布如图 1 所示, 各采

样点的土地使用情况如表 1 所示.

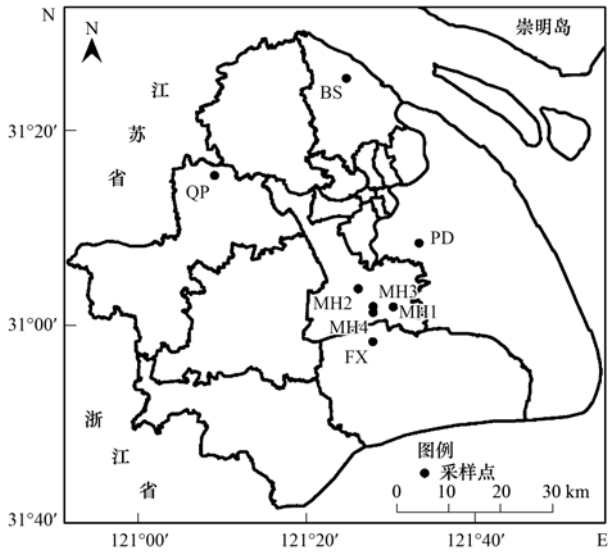


图 1 采样点分布示意
Fig. 1 Map of sampling points

表 1 采样点描述
Table 1 Description of sampling points

采样点	经纬度	地理位置与利用情况
MH1	31.04°N, 121.50°E	吴泾化工区东南, 周围有较多民营小工厂
MH2	31.06°N, 121.43°E	吴泾化工区西侧, 靠近虹梅南路元江路主干道, 周围有钢材交易市场
MH3	31.04°N, 121.46°E	吴泾化工区南面, 毗邻申嘉湖高速
MH4	31.03°N, 121.46°E	吴泾化工区南面, 毗邻学校、居民区
BS	31.43°N, 121.40°E	宝山钢铁厂西侧, 毗邻主干道, 周围多重污染企业
FX	30.98°N, 121.47°E	毗邻大叶公路和 S4 沪金高速
QP	31.24°N, 121.11°E	远离主干道、城镇及工业区
PD	31.15°N, 121.55°E	御桥生活垃圾焚烧厂南

1.3 实验方法

1.3.1 样品采集

蔬菜样品的采集主要针对叶菜类蔬菜, 种类取决于采样当季的时令蔬菜品种, 包括青菜、生菜、白菜、杭白菜、卷心菜、空心菜、苋菜、塌棵菜、油麦菜, 共 83 个样品. 蔬菜样品采集后现场装袋运回实验室, 分清洗和不清洗两批, 需清洗的蔬菜样品依次用自来水、去离子水冲洗干净, 待样品表面水分自然晾干. 样品在 80℃ 烘干, 粉碎后置于干燥皿中待测.

1.3.2 样品分析

称 0.500 g 样品 (清洗、未清洗蔬菜) 于聚四氟乙烯消解罐中, 采用 HNO₃-HClO₄ 在 180℃ 条件下消解 2 h, 冷却后置于加热板上赶酸, 至最后一滴, 移至 50 mL 比色管中, 用 2% HNO₃ 定容, 摇匀后静置过夜, 取上清液上机测试. 重金属 Cd、Zn、Pb、Cu 的含量用原子吸收光谱仪 (AANALYS800,

Perkin-Elmer) 测定, 其中 Zn 用火焰法, 其余用石墨炉法测定. Hg、As 含量用原子荧光光谱仪 (AFS-9230, 北京吉天) 测定.

1.4 质量控制

实验中所有使用的玻璃仪器、容器都先用 10% 优级纯硝酸浸泡 24 h 以上, 然后用自来水洗净后, 再依次使用一级水和超纯水冲洗 3 遍. 在样品消解的过程中, 使用 GBW10014 (GSB-5) 蔬菜标样进行质量控制, 并同步分析空白样品以去除试剂干扰, 以确保实验的准确性. 所有重金属的回收率均符合质量控制要求, 得到金属元素回收率在 72%~96% 之间.

1.5 评价方法

1.5.1 蔬菜重金属污染评价

内梅罗综合污染指数法 (Nemerow index) 是较为常见的一种评价蔬菜重金属污染状况的方法 (表 2), 其具体计算如下^[6,7].

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

$$P_{综合} = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{max}^2}{2}}$$

式中, P_i 为蔬菜中 i 重金属的单项污染指数; C_i 为蔬菜中 i 重金属的实测值; S_i 为蔬菜中 i 重金属的标准值; $P_{综合}$ 为蔬菜中重金属综合污染指数; P_{ave} 为蔬菜中各重金属污染指数的均值; P_{max} 为蔬菜中各单项重金属污染指数的最大值.

表 2 内梅罗指数分级

Table 2 Classification of Nemerow index

等级	综合污染指数值	污染程度
I	$P_i < 0.7$	安全
II	$0.7 < P_i \leq 1.0$	警戒线
III	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻污染
IV	$2.0 < P_i \leq 3.0$	中污染
V	$P_i > 3.0$	重污染

1.5.2 蔬菜摄入健康风险评价

由于重金属 Cd、Zn、Pb、Cu、Hg 和 As 可以通过水、大气、农作物等多种介质在人体内产生慢性积累效应, 最终产生致癌或非致癌风险^[8], 为了研究通过食用蔬菜而带来的健康风险, 本文根据剂量-反应关系采用目标危害商数法 (target hazard quotient, THQ), 评估摄入蔬菜途径中重金属对不同年龄人群的健康风险^[9]. 单一重金属的目标危害商数 (THQ) 和综合目标危害商数 (total target hazard quotient, TTHQ) 的计算公式分别如下:

$$THQ_i = \frac{EF_R \times ED \times F_{IR} \times C_i \times 10^{-3}}{R_i D \times BW_a \times AT_n}$$

$$TTHQ = \sum_{i=7}^7 THQ_i$$

式中, EF_R 为暴露频率, $d \cdot a^{-1}$; ED 是暴露持续时间, a ; F_{IR} 为蔬菜摄入量, $g \cdot d^{-1}$; C_i 为蔬菜中第 i 种重金属的含量, $mg \cdot kg^{-1}$; $R_i D$ 为参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; BW_a 是人体平均体重, kg ; AT_n 为非遗传毒性致癌物平均暴露天数, d ; 各参数的取值见表 3.

当 $TTHQ \leq 1.0$ 时, 表明人体食用蔬菜不会受到健康威胁; 当 $TTHQ > 1.0$ 时, 则表明人体食用蔬菜可能会受到重金属的危害, 数值越大健康风险越大.

大部分重金属污染物的参考剂量已经建立, 本研究中 Cd、Zn、Pb、Cu、Hg 和 As 所对应的分别为 0.001、0.3、0.003 5、0.04、0.000 3 和 0.000 3

$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$.

表 3 健康风险评价模型参数

Table 3 Parameters for health risk assessment

评价参数	成人参考值	儿童参考值	文献
$EF_R/d \cdot a^{-1}$	365	365	[10]
ED/a	70	70	[10]
$F_{IR}/g \cdot d^{-1}$	301.4	231.5	[4]
BW_a/kg	63.9	32.7	[10]
AT_n/d	$ED \times 365$	$ED \times 365$	[11]

2 结果与讨论

2.1 蔬菜重金属含量

上海市郊不同蔬菜中 Cd、Zn、Pb、Cu、Hg 和 As 的范围和平均质量分数等统计量如表 4 所示. 不同蔬菜鲜重中 Cd、Zn、Pb、Cu、Hg 和 As 的平均含量分别为 0.023、4.444、0.112、0.826、0.004、0.094 $mg \cdot kg^{-1}$. 与文献[12]蔬菜中的限量相比, 蔬菜可食部分重金属 Cd、Zn、Pb、Cu 和 As 均低于蔬菜安全限量值; 除了杭白菜中 Hg 含量稍高于安全限量值, 其余蔬菜中 Hg 均低于安全限量值. 且不同蔬菜对于不同重金属的富集能力也有着较为明显的差异, 苋菜对于重金属 Cd、Zn、Pb 和 Cu 的富集能力均表现为最强, 而杭白菜对重金属 Hg 和 As 的富集能力最强. 与李其林等^[13]的研究结果, 叶菜类蔬菜中以苋菜的富集作用较强相一致. 这可能与蔬菜生理特征、生长周期以及对重金属污染物的敏感程度等多种因素有关.

表 5 列举出了国内外不同国家地区蔬菜中重金属含量, 与本文得出的结果相比较可以发现, 上海市郊工业区附近蔬菜中 As 含量较高, 其余重金属含量与其它城市相比处于中间水平, 没有过为严重或异常的污染现象.

2.2 不同地区蔬菜中重金属含量水平

不同重金属的空间分布特征如图 2 所示. 重金属在空间分布上未表现出显著性差异. 比较图 2, 按采样点来看, Cd 含量在 MH1 最高, MH4 最低; Pb 含量 BS 最高, MH1 最低; Hg 含量 MH3 最高, MH1 最低; As 在 FX 最高, MH4 最低, 而各个采样点蔬菜中 Zn 和 Cu 含量差别不大. BS 的蔬菜样品中 Zn、Pb 和 As 含量都处于较高水平, 由于 BS 样点位于宝山钢铁厂西侧, 周围污染企业较多, 且污染类型较为集中, Zn、Pb 和 As 均为炼钢产业较为主要的污染物, 所以 BS 的蔬菜样品受宝钢总厂的累积影响还是较为明显的.

表 4 上海市郊主要蔬菜食用部分重金属含量统计¹⁾ (以鲜重计)/mg·kg⁻¹

Table 4 Concentration of heavy metals in edible vegetables in suburban Shanghai (fresh weight)/mg·kg ⁻¹							
蔬菜种类	类型	Cd	Zn	Pb	Cu	Hg	As
生菜 (n=17)	均值±标准差	0.024±0.022	4.213±1.854	0.081±0.055	0.505±0.155	0.002±0.006	0.051±0.058
	范围值	0.007~0.102	2.165~7.736	0.026~0.267	0.285~0.797	0~0.025	0.005~0.191
青菜 (n=16)	均值±标准差	0.025±0.016	3.883±0.849	0.119±0.082	0.711±0.35	0.004±0.003	0.347±0.685
	范围值	0.008~0.06	2.154~5.547	0.012~0.277	0.406~1.52	0~0.009	0.021~2.659
苋菜 (n=9)	均值±标准差	0.028±0.014	8.121±2.193	0.18±0.109	1.181±0.261	0.003±0.004	0.045±0.042
	范围值	0.012~0.046	4.408~11.135	0.095~0.455	0.769~1.499	0~0.011	0~0.136
空心菜 (n=9)	均值±标准差	0.02±0.012	4.085±2.604	0.085±0.06	1.725±0.859	0.002±0.001	0.028±0.03
	范围值	0.006~0.042	1.739~10.537	0.034~0.204	0.6~3.422	0~0.004	0~0.102
杭白菜 (n=7)	均值±标准差	0.021±0.014	3.082±1.135	0.152±0.077	0.92±0.228	0.011±0.011	0.303±0.183
	范围值	0.009~0.047	1.499~5.076	0.083~0.296	0.647~1.237	0.003~0.031	0.106~0.525
包菜 (n=6)	均值±标准差	0.02±0.02	3.078±0.993	0.039±0.015	0.194±0.037	0.004±0.003	0.054±0.029
	范围值	0.005~0.057	1.944~4.344	0.016~0.051	0.162~0.254	0.002~0.01	0.024~0.103
白菜 (n=4)	均值±标准差	0.017±0.007	3.873±1.103	0.116±0.149	0.609±0.312	0.002±0.003	0.069±0.074
	范围值	0.009~0.026	2.747~5.389	0.023~0.338	0.312~1.006	0~0.007	0.03~0.18
塌菜 (n=3)	均值±标准差	0.025±0.009	3.34±0.584	0.21±0.066	0.937±0.187	0.008±0.006	0.238±0.082
	范围值	0.017~0.035	2.692~3.825	0.169~0.286	0.805~1.151	0.002~0.014	0.182~0.332
油菜 (n=2)	均值±标准差	0.014±0.006	3.753±1.43	0.097±0.06	0.802±0.596	0.004±0.001	0.065±0.066
	范围值	0.01~0.018	2.742~4.764	0.055~0.14	0.38~1.223	0.003~0.005	0.018~0.111
食品安全限量 ²⁾		0.2	20	0.3	10	0.01	0.5

1) n 表示蔬菜样品数量; 2) GB2762-2012《食品中污染物限量》

表 5 国内外蔬菜中重金属水平对比 (以鲜重计)/mg·kg⁻¹

Table 5 Comparison of the heavy metal concentration in vegetables from different areas (fresh weight)/mg·kg ⁻¹							
位置	Cd	Zn	Pb	Cu	Hg	As	文献
上海市郊	0.022	4.444	0.112	0.835	0.003	0.094	本研究
上海浦东	0.035	3.091	0.017	0.485	0.001 2	0.040 2	[14]
广东	0.03	3.5	0.13	0.39	0.002	0.04	[15]
浙江	0.015		0.022		0.003	0.009	[16]
黄海沿岸	0.013	3.651	0.022	0.527	0.002	0.016	[17]
孟加拉	0.008~0.056	0.074~4.750	0.005~0.057	2.254~9.718		0.004~0.018	[3]
意大利	0.353	12.783	0.374			0.065	[18]

考虑到同一采样点采集蔬菜不同可能会消弱重金属在不同采样点蔬菜中含量的差异性,故进一步分析同种蔬菜中重金属含量的空间分布,结果表明 Pb 在杭白菜中的累积有着较为显著的空间分布差异,而空心菜中 Cu 含量以及苋菜中 As 含量有着较为显著的差异($P<0.05$).

2.3 清洗对蔬菜重金属含量的影响

正常在食用蔬菜前一般都会对其进行清洗,而且也有学者曾研究过清洗对于蔬菜中重金属含量的影响.图 3 所示是以蔬菜种类作分类,未清洗和清洗蔬菜中不同重金属的关系,通过 1:1 线可以直观地看出清洗前后蔬菜中重金属含量的高低.研究发现清洗对蔬菜中不同重金属均存在着一定的影响,未清洗蔬菜中重金属含量相对清洗蔬菜中较高,故风险较高.清洗后的蔬菜中,各重金属含量均可达到蔬菜中的安全限量

要求.

Cd 和 Zn 在清洗和未清洗蔬菜中重金属含量差别不大,Cu 在大多数清洗蔬菜中的含量高于未清洗蔬菜[图 3(d)].Cu、Zn 为植物必需元素,蔬菜会从土壤中主动吸收这类元素.Nabulo 等^[19]在研究中也指出,清洗与未清洗蔬菜叶中含量差别不大的重金属可能主要来源于根部吸收.Cd 的迁移性较强,菜地土壤中可交换态 Cd 的含量较高^[20],蔬菜可食部分中的 Cd 主要通过根系从土壤中进行吸收,然后被迁移到蔬菜的地上组织中.因此,叶面降尘对 Cu、Zn 和 Cd 这类主要通过根系吸收的重金属影响较小.清洗对 Pb、Hg 和 As 有着较为明显的去除效果,尤其是 Pb 和 Hg,绝大多数清洗过的蔬菜样品中的重金属含量均低于未清洗蔬菜样品.程珂等^[21]的研究表明叶菜类蔬菜中 Pb、Hg 和 As 主要来源于大气降尘和土壤扬尘,Nabulo 等发现^[19],

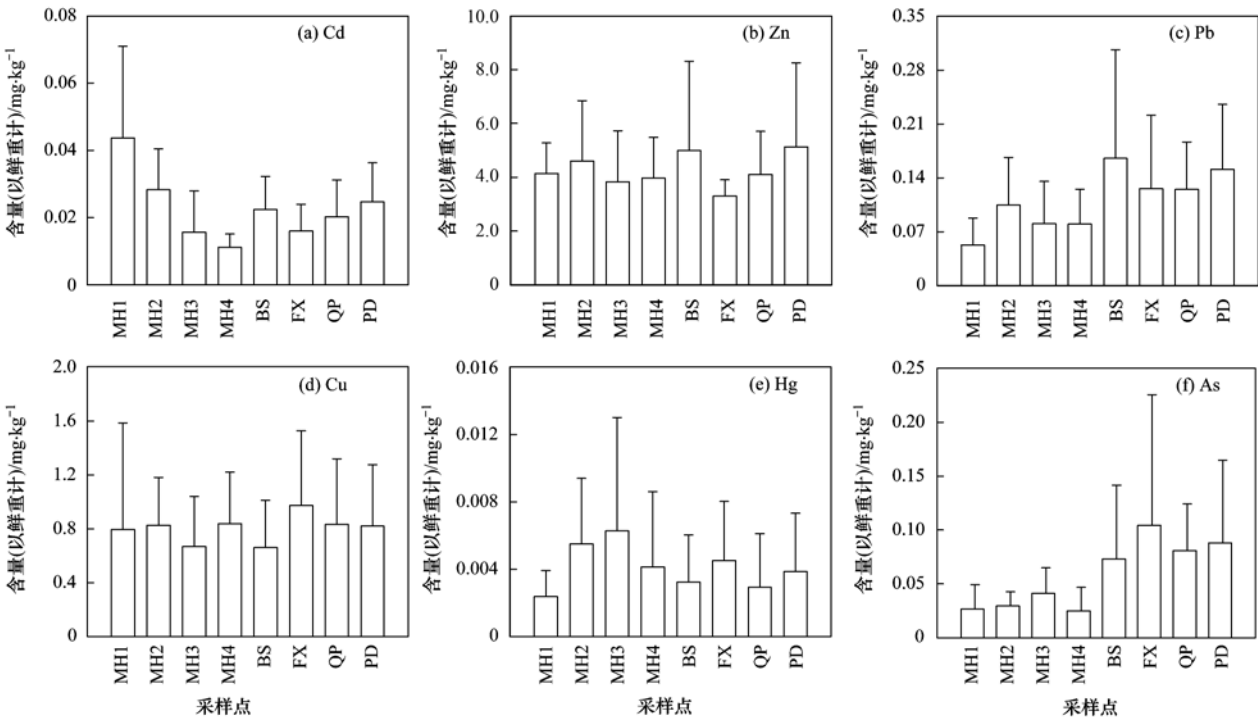


图 2 不同采样点蔬菜重金属含量水平

Fig. 2 Heavy metal concentration in vegetables at different sampling sites

食用蔬菜前进行清洗可以降低未清洗蔬菜中 35% 的 Pb 含量. 从图 3(c)、图 3(e)和图 3(f)也可以看出, Pb、Hg 和 As 在未清洗蔬菜中的含量远远高于清洗后的蔬菜, 与其结论相一致. Pb、Hg 和 As 为植物非必需元素, 根系对其吸收量较少, 进入大气

并吸附在大气颗粒物上的这类元素, 通过大气沉降方式降落在蔬菜叶片表面, 部分通过叶面气孔进入蔬菜叶中富集^[22], 大部分仍以颗粒态形式吸附在叶片表面.

整体来看, 杭白菜清洗后去除重金属效果最为

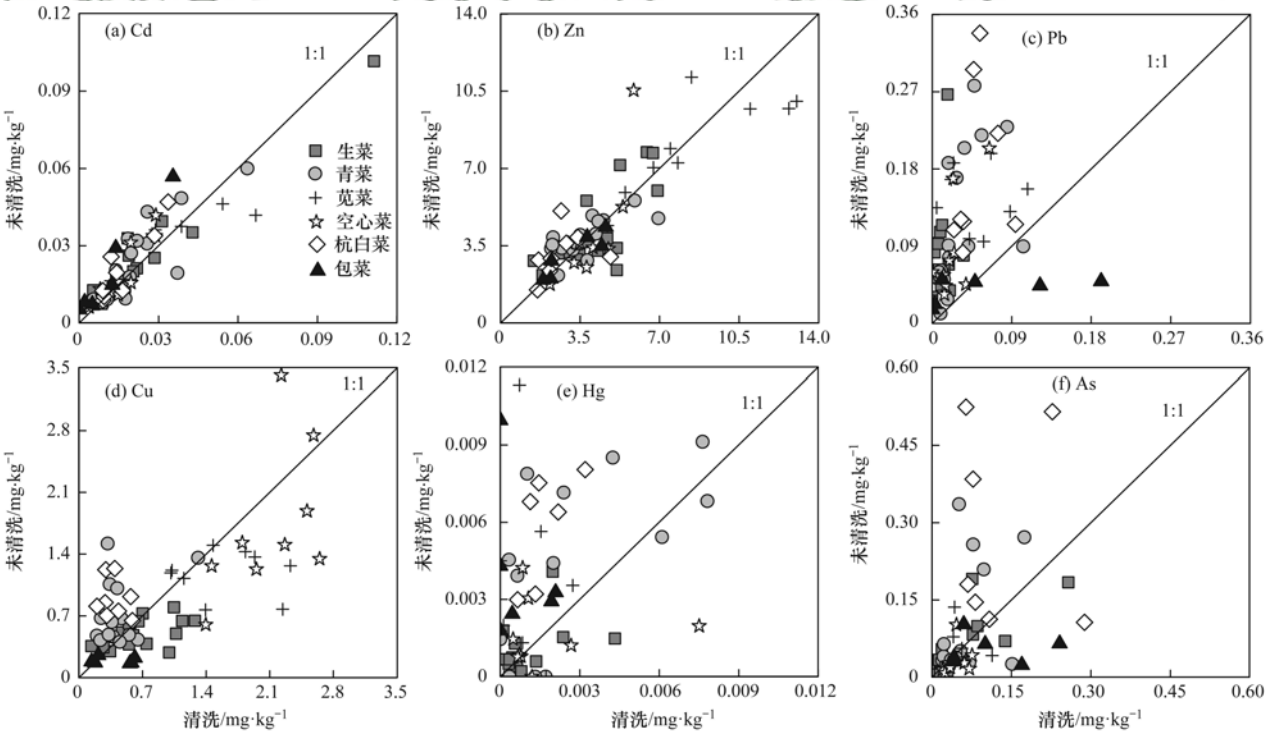


图 3 未清洗和清洗蔬菜中的重金属关系(按蔬菜种类)

Fig. 3 Relationship between heavy metal concentration in washed and unwashed vegetables (grouped by vegetable type)

理想，通过清洗可以大量减少蔬菜中各重金属元素的含量；而苋菜和空心菜中的重金属通过简单清洗并不能达到很好的去除效果，可能是由于苋菜和空心菜都有较为粗壮的茎杆，叶片面积比杭白菜小，叶表面沉降吸附的颗粒物较少。

2.4 蔬菜重金属健康风险评价

对蔬菜中不同重金属的健康风险评价结果显示（见表 6），食用不同蔬菜的健康风险有较明显差异。就单一重金属的 THQ 来看，上海市郊蔬菜中不同重金属 THQ 排序为：As > Cd > Cu > Pb > Zn > Hg，

As 的 THQ 几乎都大于 1，其余重金属的 THQ 均小于 1，且 As 元素在综合健康风险指数值中的贡献率均达到了 55% 及以上。而由于 As 的 THQ 较高，故导致成人和儿童的 TTHQ 均大于 1，说明食用上海市郊蔬菜的综合健康风险主要来源于 As。这与王北洪等^[23]的研究结果相一致。虽然上文蔬菜综合污染指数得出上海市郊蔬菜均处于安全水平，但由于 As 化合物均具有较大的生理毒性，且容易被细胞吸收导致中毒，故长期食用受到 As 污染的蔬菜还是存在健康风险。

表 6 蔬菜重金属的目标危害商数

Table 6 TTHQ of heavy metals in vegetables

类型	项目	Cd	Zn	Pb	Cu	Hg	As	TTHQ
成人	生菜	0.116	0.070	0.014	0.086	0.015	0.848	1.149
	青菜	0.109	0.061	0.047	0.054	0.037	2.864	3.171
	苋菜	0.154	0.144	0.100	0.201	0.014	0.778	1.391
	空心菜	0.084	0.066	0.034	0.263	0.030	0.812	1.288
	杭白菜	0.083	0.045	0.071	0.048	0.028	3.309	3.584
	包菜	0.064	0.058	0.073	0.054	0.015	2.053	2.317
儿童	生菜	0.163	0.099	0.020	0.121	0.021	1.195	1.620
	青菜	0.154	0.086	0.066	0.076	0.052	4.036	4.469
	苋菜	0.216	0.203	0.141	0.283	0.020	1.097	1.960
	空心菜	0.118	0.094	0.048	0.371	0.042	1.144	1.816
	杭白菜	0.117	0.063	0.100	0.068	0.040	4.663	5.051
	包菜	0.091	0.082	0.103	0.076	0.021	2.894	3.266

就不同蔬菜来看，人体健康风险评价从高到低依次为：杭白菜 > 青菜 > 包菜 > 苋菜 > 空心菜 > 生菜。从不同的受众来看，食用等量的蔬菜，儿童的健康风险明显大于成人，这与已有的研究所得的结论相一致，因为儿童仍处于生长发育时期，身体各组织器官功能尚未完全健全，尤其是肝肾等代谢器官的解毒、排泄功能较弱，因此对重金属等有毒有害物质更为敏感^[23]。而无论对成人还是儿童，清洗过的蔬菜中重金属 Zn、Pb、Cu 的健康风险都低于未清洗过的蔬菜，这与图 3 中未清洗和清洗蔬菜中重金属关系所得的结论一致。表明食用前对蔬菜进行清洗，可以有效降低食用蔬菜的潜在健康风险。

3 结论

（1）上海市郊不同蔬菜可食部分重金属 Cd、Zn、Pb、Cu 和 As 含量均低于蔬菜安全限量值；除了杭白菜中 Hg 含量稍高于安全限量值，其余蔬菜中 Hg 均低于安全限量值。苋菜对于重金属 Cd、Zn、Pb 和 Cu 的富集能力最大，而杭白菜对重金属 Hg 和 As 的富集能力最强。

（2）不同重金属在空间分布上未表现出显著性

差异。BS 样点由于位于宝山钢铁厂西侧，周围污染类型集中，蔬菜样品中 Zn、Pb、As 等炼钢产业主要的污染物元素含量相比较其他样点最高。

（3）食用蔬菜前进行清洗可一定程度上降低摄食蔬菜导致的重金属危害风险，尤其是 Pb、Hg 和 As 这类来源于大气沉降及土壤扬尘的重金属元素。食用蔬菜的综合健康风险主要来源于 As。食用相同的蔬菜，儿童的健康风险明显高于成人。

参考文献：

[1] Pandey J, Pandey U. Accumulation of heavy metals in dietary vegetables and cultivated soil horizon in organic farming system in relation to atmospheric deposition in a seasonally dry tropical region of India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 148(1-4): 61-74.

[2] 秦普丰, 刘丽, 侯红, 等. 工业城市不同功能区土壤和蔬菜中重金属污染及其健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1668-1674.

[3] Shaheen N, Irfan N M, Khan I N, et al. Presence of heavy metals in fruits and vegetables: health risk implications in Bangladesh[J]. Chemosphere, 2016, 152: 431-438.

[4] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 基于 THQ 的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 672-678.

Zheng N, Wang QC, Zheng DM. Health risk assessment of heavy metals to residents by consuming vegetable irrigated around zinc

- smelting plant based THQ[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(4): 672-678.
- [5] 上海统计局, 国家统计局上海调查总队. 上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [6] Adamu C I, Nganje T N, Edet A. Heavy metal contamination and health risk assessment associated with abandoned barite mines in Cross River State, southeastern Nigeria [J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2015, **3**: 10-21.
- [7] 杨柳桦, 胡云卿, 林滔, 等. 某市蔬菜基地土壤重金属污染状况研究[J]. *浙江预防医学*, 2015, **27**(3): 240-244, 253. Yang L H, Hu Y Q, Lin T, *et al.* A study on the heavy metal pollution in soils of vegetable plantation bases [J]. *Zhejiang Journal of Preventive Medicine*, 2015, **27**(3): 240-244, 253.
- [8] 杨彦, 陆晓松, 李定龙. 我国环境健康风险评估研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2014, **31**(4): 357-363. Yang Y, Lu X S, Li D L. Research progress of environmental health risk assessment in China[J]. *Journal of Environment and Health*, 2014, **31**(4): 357-363.
- [9] 夏凤英, 李政一, 杨阳. 南京市郊设施蔬菜重金属含量及健康风险分析[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(2): 183-187. Xia F Y, Li Z Y, Yang Y. Concentration analysis and health risk assessment of heavy metals in greenhouse vegetables of Nanjing suburb[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(2): 183-187.
- [10] 杜景东, 高凡, 王敬贤, 等. 京郊蔬菜重金属含量特征及安全评价[J]. *北京农学院学报*, 2014, **29**(3): 42-46. Du J D, Gao F, Wang J X, *et al.* Concentration analysis and health risk assessment of heavy metals in vegetables of Beijing suburban[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2014, **29**(3): 42-46.
- [11] Cherfi A, Achour M, Cherfi M, *et al.* Health risk assessment of heavy metals through consumption of vegetables irrigated with reclaimed urban wastewater in Algeria[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, **98**: 245-252.
- [12] GB2762-2012, 食品中污染物限量[S].
- [13] 李其林, 刘光德, 魏朝富, 等. 重庆市蔬菜区重金属污染现状[J]. *土壤通报*, 2005, **36**(1): 104-107.
- [14] 姚春霞, 陈振楼, 张菊, 等. 上海浦东部分蔬菜重金属污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(4): 761-765. Yao C X, Chen Z L, Zhang J, *et al.* Heavy metal pollution assessment of vegetables in Pudong zone of Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, **24**(4): 761-765.
- [15] Cai L M, Huang L C, Zhou Y Z, *et al.* Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, **20**(1): 121-134.
- [16] Huang Z, Pan X D, Wu P G, *et al.* Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang, China[J]. *Food Control*, 2014, **36**(1): 248-252.
- [17] Hu W Y, Huang B, Tian K, *et al.* Heavy metals in intensive greenhouse vegetable production systems along Yellow Sea of China: Levels, transfer and health risk [J]. *Chemosphere*, 2017, **167**: 82-90.
- [18] Beccaloni E, Vanni F, Beccaloni M, *et al.* Concentrations of arsenic, cadmium, lead and zinc in homegrown vegetables and fruits: estimated intake by population in an industrialized area of Sardinia, Italy[J]. *Microchemical Journal*, 2013, **107**: 190-195.
- [19] Nabulo G, Young S D, Black C R. Assessing risk to human health from tropical leafy vegetables grown on contaminated urban soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(22): 5338-5351.
- [20] Luo C L, Liu C P, Wang Y, *et al.* Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(1): 481-490.
- [21] 程珂, 杨新萍, 赵方杰. 大气沉降及土壤扬尘对天津城郊蔬菜重金属含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(10): 1837-1845. Cheng K, Yang X P, Zhao F J. Effects of atmospheric and dust deposition on content of heavy metals in vegetables in suburbs of Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(10): 1837-1845.
- [22] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 389-398. Chen Z L, Huang L, Zhou C Y, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 389-398.
- [23] 王北洪, 马智宏, 冯晓元, 等. 北京市蔬菜重金属含量及健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, **6**(7): 2736-2745. Wang B H, Ma Z H, Feng X Y, *et al.* Concentrations and health risk evaluation of heavy metals in vegetables in Beijing [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2015, **6**(7): 2736-2745.

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)