

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪博, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋基烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九雄, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)	

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布

于元赫¹, 吕建树^{1,2*}, 王亚梦¹

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 选取黄河下游典型区域——山东省高青县为研究区, 系统采集了 234 个表层土壤样品(0~20 cm), 测定了 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 等 8 种重金属的含量, 综合运用相关分析、主成分分析和方差分析辨识了土壤重金属的来源以及与土地利用、成土母质之间的关系, 并采用地统计方法分析了重金属的空间结构和分布特征。结果表明: ①研究区 8 种重金属元素的平均值均超过黄河下游背景值, 尤其是 As、Cu、Hg 的平均含量分别为各自背景值的 1.23、1.20 和 1.29 倍, 存在不同程度的富集现象。②8 种元素可辨识为两个主成分, PC1(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn) 主要受工农业活动和交通排放等人类活动与成土母质综合影响; PC2(Hg) 主要受纺织、石油化工和塑料制造等工业活动控制。③不同土地利用类型和成土母质中的重金属含量差异明显。8 种元素在城镇建设用地的平均含量显著高于其他地类; 除了 Hg 以外, 其余 7 种元素在湖积物母质发育土壤中的含量最高。④土壤重金属空间分布各异。As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量的高值区主要集中于中部城区和东南部, 而 Hg 的高值区集中于西南部和东北部, 说明工农业活动和交通排放加剧了当地土壤的重金属污染。

关键词: 土壤重金属; 多元统计; 地统计; 污染源; 空间分布

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2865-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708201

Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River

YU Yuan-he¹, LÜ Jian-shu^{1,2*}, WANG Ya-meng¹

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: A total of 234 surface soil samples (0-20 cm) were collected at the nodes of a 2×2 km grid from Gaoqing County (a typical area surrounding the Lower Yellow River) and analyzed for eight heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn). This study investigated the source of the heavy metals in this area based on a correlation analysis, PCA, and ANOVA using multivariate statistical analysis. In addition, the spatial variation and distribution characteristics of the heavy metals were determined by geostatistics based on GIS. The results provided the following conclusions. ① The mean concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn exceeded the background values (BV) of the Lower Yellow River, especially for As, Cu, and Hg (1.23, 1.20 and 1.29 times the BV, respectively), indicating that there was enrichment of the heavy metals in soils at different degrees. ② The results from the multivariate analysis suggested that all eight heavy metals could be classified by two principal components (PCs). The levels of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn were dominated by human activities and the parent soil material (PC1). However, Hg originated mainly from textile printing, petrochemical engineering, and plastic processing (PC2). ③ The differences in heavy metal contents between different land use types and parent soil materials were obvious. The eight elements were highest in land related to urban construction. In addition to Hg, the remaining seven heavy metals were highest in soils in the lacustrine deposit. ④ The spatial distributions of the heavy metals in the soil were different. The high value areas of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn were mainly concentrated in the central urban and southeastern areas, while the high value areas for Hg were concentrated in the southwestern and northeastern areas. This showed that industrial emissions and agricultural production activities caused the degree of heavy metal pollution in the soils while traffic emissions aggravated the levels.

Key words: soil heavy metals; multivariate analysis; geostatistics; pollution source; spatial distribution

随着快速的城市化和工业化进程, 大量含有重金属的污染物进入土壤, 导致土壤环境质量恶化; 目前, 土壤重金属污染问题已成为社会和学术界关注的热点。在过去几十年的时间里, 人为影响造成了土壤中重金属含量显著上升^[1~4]。土壤重金属含量升高不仅可以直接改变土壤的理化性质, 而且可以向大气、水体和生物传播, 甚至可能通过水源供给、食物摄入、皮肤接触等途径危害人类健康。特

别地, 由于重金属性质特殊且难以降解, 可在土壤中长期时间积累, 已成为区域环境质量评价的重要指标^[5]。

收稿日期: 2017-08-24; 修订日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601549, 41701604); 山东省自然科学基金项目(ZR2016DQ11); 河口海岸学国家重点实验室开放基金项目(SKLEC-KF201710)

作者简介: 于元赫(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境质量评价, E-mail: yuyuanhe@stu.sdn.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lvjianshu@126.com

成土母质和人类活动是影响土壤中重金属含量的主要因素. 土壤重金属的自然含量往往取决于成土母质和土壤理化性质. 一般来说, 土壤中黏粒百分比和土壤有机质含量越高, 土壤重金属含量越高, 基性岩和超基性岩发育的土壤中铁族元素的含量远超其他母质发育的土壤^[6]. 随着社会经济的不断发展, 人类活动对土壤中重金属的含量产生显著影响, 如煤炭燃烧、汽车尾气、工业“三废”以及农药化肥的施用等, 甚至超过自然来源对重金属含量的贡献^[7]. 因此, 对土壤中重金属的来源进行解析是非常必要的. 多元统计分析(相关分析、主成分分析)是辨识土壤中重金属自然和人为来源的有效方法. 近年来, 各种各样的多元分析方法已被广泛运用到土壤、沉积物和粉尘中重金属来源的识别^[8~10]. 地统计分析将变异函数和克里格插值估计相结合, 在空间预测与不确定性分析方面具有显著优势^[11]. 不仅可以模拟土壤中重金属的空间结构和变异, 还能对土壤重金属空间分布进行可视化表达. 因此, 将多元统计分析与地统计分析相结合, 有助于解释土壤重金属的来源及空间分布研究.

近年来, 国内学者对土壤重金属展开大量研究^[12~17], 但研究区域大多集中于工农业较发达的地区, 对黄河下游地区土壤重金属的研究还比较匮乏. 随着黄河三角洲高效经济区开发上升为国家战略, 众多环境问题也随之产生. 因此, 对黄河三角洲地区土壤重金属污染的来源及空间分布进行研究具有重要意义和实践价值. 高青县位于黄河下游, 属于典型的黄河冲积平原. 同时, 该县是黄河三角洲的重要开发区, 农业优势独特, 工业门类齐全, 纺织服装、石油化工等是地区优势产业. 鉴于此, 本文以黄河下游典型区域——高青县为例, 系统采集了 234 个土壤样点, 并对土壤中重金属元素进行测试. 利用描述性和多元统计分析来辨识土壤重金属来源, 并利用单因素方差分析(ANOVA)对不同土地利用类型、成土母质之间的重金属含量差异进行比较研究, 以区别自然和人类因素对重金属的差异性影响; 运用地统计方法分析了 8 种重金属的空间分布特征, 旨在为研究区土壤重金属的环境风险监测、预报和修复提供指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

高青县位于黄河下游, 山东省淄博市北部, 地理坐标介于 $117^{\circ}33' \sim 118^{\circ}04'E$ 、 $37^{\circ}04' \sim 37^{\circ}19'N$

之间, 东西宽约 47 km, 南北长约 26 km, 总面积 830 km^2 , 呈狭长廊状. 研究区属鲁西北平原, 地势由西北向东南倾斜, 平均海拔 12 m; 地处华北平原坳陷区(I 级构造)、济阳坳陷区(II 级构造)的南部, 为大型沉积盆地的一部分. 境内以新生界及其发育为特征, 全被第四系黄土所覆盖. 土壤成土母质包括黄河冲积物、洪积物和湖积物, 多形成潮土和盐土两个土类; 从气候条件来看, 研究区属暖温带大陆性季风气候, 年均气温 13.4°C , 年均降水量 598.1 mm , 无霜期长, 农业生产条件优越; 研究区矿产资源丰富, 内有高青油田、正理庄油田、大芦湖油田 3 个油田, 是山东省重要的工业城市.

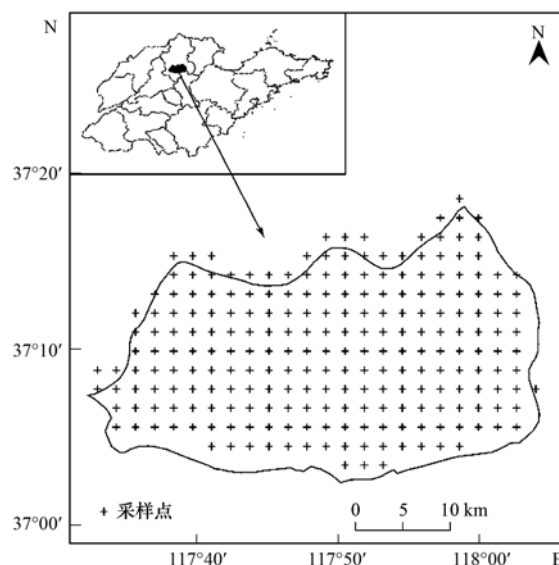


图 1 研究区及采样点位置

Fig. 1 Location of the study area with sampling sites

1.2 样品采样与测试

土壤样品采用网格布样法结合 3S 技术进行采样. 室内在分析研究区土地利用图、土壤类型图的基础上, 利用 ArcGIS 10.2 软件按照 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的规则网格进行采样点的布设, 共 234 个采样点; 在采样点周围利用多点采样方式, 垂直采集 0 ~ 20 cm 的表层土壤, 等量混合后, 装入干净布袋, 样品原始重量大于 1 kg; 土壤样品经过室温自然风干、敲碎、过 20 目(0.84 mm)尼龙筛去除杂物等初步处理后, 将样品研磨至粒径小于 100 目(0.25 mm)备用. 土壤样品经过消煮后, 对 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的含量进行分析测试. 其中 As、Hg 的含量采用 PERSEE 原子荧光光度计(PF-7)测定, Cd 的含量采用石墨炉-原子吸收分光光度计(Z-2000, HITACHI)测定, Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量用火焰原子吸收光谱仪(Agilent 200AA)测定. 分

析测试所用试剂均为优级纯。分析方法的准确度和精密度采用国家一级土壤标准物质(GBW 系列)进行检验,并对样品质量按比例进行严格的随机检查和异常点检查,测试结果符合监控要求^[18]。

1.3 数据处理与分析

本研究对土壤重金属含量和土壤性质进行范围、平均值、中值、标准差、变异系数、峰度和偏度等描述性统计分析,并进行不同地区之间重金属含量的差异比较。运用相关分析、主成分分析等经典的多元统计方法对重金属来源进行解析,然后利用单因素方差分析法(ANOVA)对不同土地利用类型和成土母质之间重金属含量的差异进行比较。以上统计分析均利用 SPSS 19.0 软件进行。变异函数拟合和普通克里格插值分别利用 GS + 9.0 和 ArcGIS 10.2 地统计模块进行^[1]。

2 结果与讨论

2.1 重金属元素的描述性统计分析

高青县土壤重金属描述性统计结果表明(表 1),As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均值分别为 12.68、0.16、70.38、25.87、0.04、31.58、23.08 和 73.51 mg·kg⁻¹,这些元素的平均值均未超过国家二级标准值^[19],但高于黄河下游背景值^[20],尤其是 As、Cu、Hg 的平均含量分别为各自背景值的 1.23、1.20 和 1.29 倍。说明在人类活动的影响

下,研究区土壤重金属发生不同程度的积累,As、Cu 和 Hg 的污染可能较为明显。

土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量变幅都较大,分别为 8.20 ~ 22.60、0.09 ~ 0.31、31.80 ~ 96.70、17.10 ~ 38.90、0.01 ~ 0.12、22.30 ~ 45.80、17.70 ~ 32.60 和 50.70 ~ 102.70 mg·kg⁻¹。研究区土壤 pH 值的范围为 7.68 ~ 8.61,呈碱性。相关研究表明,在碱性条件下,土壤重金属不容易发生迁移^[17,18]。随着时间推移,土壤重金属聚集趋势越来越明显,这说明在研究区工业化和城市化迅速发展的背景下,土壤受到外源重金属污染的影响。

变异系数为标准差与均值的比值,可对量纲不统一的指标进行比较;Wilding^[21]将变异系数由高到低依次分为高度变异(CV > 0.36)、中等变异(0.16 < CV < 0.36)和低度变异(CV < 0.16)这 3 个等级。研究区土壤重金属 As、Cd、Cu 和 Hg 变异系数分别为 21.1%、20.9%、17.0% 和 33.1%,属于中等变异;Cr、Ni、Pb 和 Zn 则均为低度变异;特别是 Hg 的变异系数大于其他元素,这与吕建树等^[1]和戴彬等^[18]的研究结果相似,说明 Hg 分布不均匀可能受到人类活动的影响。偏度从高到低依次为 Hg > As > Cd > Pb > Cu > Ni > Zn > Cr,其中 Hg 较为突出,表明 Hg 可能受人类影响而导致其含量正偏度较大。

表 1 高青县土壤重金属描述性统计结果¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of heavy metals in soils from Gaoqing County									
重金属	范围 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	中值 /mg·kg ⁻¹	标准差	偏度	峰度	变异系数 /%	黄河下游背景值 ^[20] /mg·kg ⁻¹	国家二级标准 ^[19] /mg·kg ⁻¹
As	8.20 ~ 22.60	12.68	12.30	2.67	0.83	0.69	21.1	10.3	40
Cd	0.09 ~ 0.31	0.16	0.16	0.03	0.68	1.27	20.9	0.141	0.3
Cr	31.80 ~ 96.70	70.38	70.30	6.62	-0.40	5.64	9.4	64.5	150
Cu	17.10 ~ 38.90	25.87	25.60	4.40	0.56	0.04	17.0	21.8	50
Hg	0.01 ~ 0.12	0.04	0.04	0.01	2.58	12.19	33.1	0.031	0.3
Ni	22.30 ~ 45.80	31.58	31.50	4.07	0.41	-0.01	12.9	27.6	40
Pb	17.70 ~ 32.60	23.08	22.80	2.82	0.57	0.28	12.2	21.4	250
Zn	50.70 ~ 102.70	73.51	73.00	9.70	0.32	-0.13	13.2	63.8	200
pH	7.68 ~ 8.61	8.18	8.05	0.17	0.072	0.215	2.0	—	—

1) “—”表示文章中没有相关数据

2.2 重金属含量与其他地区的比较

将高青县土壤重金属平均含量与世界典型地区进行比较(表 2)。从表 2 可以看出,研究区 As 的平均含量显著高于其他地区,为日照市的 2.5 倍;Cd 的平均含量低于日照市、扬中市、Alicante、Ebro、Zagred、Galicia、Kavadarci 和 Ireland,高于其他地区;Cr 的平均含量仅低于扬中市,比其他地区都高,与

Ebro 的差值高达 50.11 mg·kg⁻¹;Cu 的平均含量与莒县、六合县、顺义市、正定市、Alicante 比较接近,低于 Piemonte、Zagred;Hg 的平均值明显低于六合县、顺义市、正定市和 Ireland,与日照市、莒县、Duero 和 Ebro 比较接近;Ni 的平均含量与莒县、六合县相近,显著低于 Piemonte 和 Kavadarci;Pb 的平均含量低于日照市、莒县、惠州市、六合县、扬中市、

Zagred 和 Ireland, 高于其他地区; Zn 的平均含量仅低于扬中市、Zagred 和 Galicia, 与顺义市、正定市比较接近, 高于其他地区. 综上所述, 高青县 As、Cr、

Zn 的平均含量与其他地区相比表现出较高的水平, Cd、Cu、Ni、Pb 的平均含量在所有地区中处于中等水平, Hg 的平均含量与其他地区相比水平较低.

表2 高青县土壤重金属平均含量与世界典型地区的比较¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Mean heavy metal contents of Gaoqing County compared with typical regions in the world/mg·kg ⁻¹									
地区	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	文献
高青县	12.68	0.16	70.38	25.87	0.04	31.58	23.08	73.51	本研究
日照市	5.04	0.2	54.09	17.57	0.04	23.52	27.78	63.1	[1]
莒县	—	0.13	68.28	22.97	0.037	29.36	28.4	65.81	[22]
惠州市	10.19	0.1	27.61	16.74	0.22	14.89	44.66	57.21	[13]
六合县	—	0.046	55.01	23.94	0.07	29.37	27.37	65.12	[23]
顺义市	7.85	0.136	—	22.4	0.073	—	20.4	69.8	[24]
正定市	6.16	0.15	57.77	21.22	0.08	25.04	18.8	69.96	[4]
扬中市	—	0.3	77.2	33.9	0.2	38.5	35.7	98.1	[25]
Duero	—	0.159	20.53	11.01	0.0421	—	15.08	42.42	[26]
Alicante	—	0.34	26.5	22.5	—	20.9	22.8	52.8	[5]
Ebro	—	0.42	20.27	17.33	0.035 6	20.5	17.54	57.53	[27]
Piemonte	—	—	46.157	58.309	—	83.163	16.101	62.683	[28]
Zagred	—	0.4	54.6	56.1	—	35.2	23.2	77.9	[29]
Galicia	—	0.31	54.1	20.5	—	23.5	11.7	98.7	[30]
Kavadarci	8.5	0.32	50	30	—	74	21	56	[31]
Ireland	10.2	0.326	42.6	16.2	0.086	17.5	24.8	62.6	[32]

1) “—”表示文章中没有相关数据

2.3 重金属元素的多元统计分析

2.3.1 相关分析

重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 两两之间均存在 0.01 显著性水平上的相关关系(表 3), 并且均与 Fe₂O₃、MgO 和 CaO 之间具有较强的相关性. 由于 Fe₂O₃、MgO 和 CaO 是成土过程中母岩风化形成的重要产物^[14], 一般与具有自然来源的元素存在较强的相关性^[1,16,22]. As-Cu、As-Zn、Cu-Zn、Pb-Cu 和 Pb-Zn 两两之间的相关系数分别为

0.885、0.875、0.915、0.835 和 0.820, 通常 As、Cu、Pb 和 Zn 之间的高相关性指示了人类活动的影响^[1,14]. 有研究结果表明^[22~24], Cr 和 Ni 主要受成土母质影响, 但研究区 Cr、Ni 均与 As、Cd、Cu、Pb、Zn 显著相关, 说明 As、Cd、Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 来源相似性较高. Hg 与其他元素之间的相关系数均小于 0.1, 相关性较弱. 为了更精确地判断重金属来源, 可通过进一步的主成分分析进行验证.

表3 高青县土壤重金属元素之间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation matrix for the heavy metals in soils from Gaoqing County									
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
As	1								
Cd	0.709 **	1							
Cr	0.635 **	0.513 **	1						
Cu	0.885 **	0.685 **	0.641 **	1					
Hg	-0.006	0.018	-0.025	0.011	1				
Ni	0.805 **	0.611 **	0.871 **	0.825 **	0.044	1			
Pb	0.799 **	0.641 **	0.557 **	0.835 **	0.062	0.744 **	1		
Zn	0.875 **	0.719 **	0.665 **	0.915 **	0.078	0.736 **	0.820 **	1	
Fe ₂ O ₃	0.930 **	0.726 **	0.727 **	0.937 **	-0.025	0.861 **	0.856 **	0.934 **	
MgO	0.853 **	0.729 **	0.631 **	0.850 **	-0.018	0.842 **	0.763 **	0.890 **	
CaO	0.819 **	0.658 **	0.582 **	0.780 **	-0.115	0.700 **	0.660 **	0.744 **	

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

2.3.2 主成分分析

主成分分析是辨识重金属来源的有效方法. 从

表 4 可以看出共提取了 2 个主成分, 累积贡献率为 81.3%, 说明这 2 个主成分因子可以基本反映 8 种

表 4 高青县土壤重金属元素因子载荷

Table 4 Factor matrix of heavy metals in soils from Gaoqing County		
重金属	PC1	PC2
As	0.925	-0.044
Cd	0.763	-0.020
Cr	0.711	-0.107
Cu	0.942	-0.020
Hg	0.030	0.994
Ni	0.924	0.040
Pb	0.876	0.047
Zn	0.976	0.057
方差贡献率/%	71.2	10.1
累计方差贡献率/%	71.2	81.3

重金属的大部分信息。

第一主成分 (PC1) 的方差贡献率为 71.2%, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的因子载荷分别为 0.925、0.763、0.711、0.942、0.924、0.876 和 0.976; 相关分析表明, 这些元素与 Fe₂O₃、MgO 和 CaO 之间的相关系数较高。一般来说, Cr 和 Ni 是我国的土壤和沉积物中受污染最少的重金属^[14, 22], 有研究表明在冲积平原为主的区域^[6, 13, 33], 土壤本底对 Cr 和 Ni 含量的影响高于化肥、农药以及有机肥料的使用产生的影响; 王关玉等指出^[34], 湖相沉积物母质发育的土壤中, 除 Hg 以外的其他元素平均含量均高于山东省土壤平均水平, 表明 Cr 和 Ni 主要受成土母质的影响。在利用主成分分析解析重金属来源时, 当其他元素与 Cr 和 Ni 分为一组时, 便认为这些元素受到自然来源的影响^[1, 18, 28]。吕建树等^[1]对日照市土壤重金属的研究中表明, Co、Cr、Mn、Ni、Zn、As 和 Cu 为自然源因子; Nanos 等^[26]对西班牙的研究发现, 土壤中 Co、Cr、Mn、Ni 和 V 的含量取决于它们在母质中的含量, 这些金属在基性和超基性岩中的含量远远高于其他母质; 麦提吐尔逊·艾则孜等^[35]对博斯腾湖流域绿洲农田土壤的研究发现, Cr、Cu、Mn、Ni 与 Zn 主要受到地球化学成因的控制; 李春芳等^[36]对龙口市污水灌溉区的研究表明, Co、Cr、Mn、Ni 和 As 主要受成土母质等自然因素的影响。因此, 可以认为 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的含量受到自然背景的影响。

As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均值高于黄河下游背景值, 最大值分别为背景值的 2.19、2.20、1.50、1.78、1.66、1.52 和 1.61 倍(表 1), 因此说明受到人类活动的影响。众多研究也证实了这一点。刘硕等^[37]对龙口煤矿区的研究表明, Cd、As、Pb、Ni 和 Cr 主要受污水灌溉、工农业及交通

排放的影响; Franco-Uría 等^[30]利用主成分分析对西班牙西北部牧场的土壤重金属进行了研究, 发现 Cd、Cu、Pb 和 Zn 主要来源于人类活动; Lv 等^[22]对莒县的研究中发现, Cd、Cu、Pb 和 Zn 受到自然背景和工农业、交通排放等人类活动共同影响; 刘巍等^[38]对准东煤田露天矿区的研究表明, Zn、Cu、Cr、Pb、Hg 和 As 主要受煤炭燃烧等人为活动的影响。

高青县工业发达, 纺织服装和石油化工是高青县优势产业。纺织排放的废水和石油化工排放的“三废”中含有大量的 As、Cu、Cd、Pb 等重金属^[1]。煤炭燃烧和电镀冶金排放的废气中含有 Cr 和 Ni, 可通过大气沉降进入土壤, 因此工业排放是重要来源; 高青县交通发达, 四条省道全部贯通, 因此汽车尾气排放、车辆轮胎的磨损等也是导致 Pb、Zn 含量升高的重要原因。根据 Chen 等^[15]和 Lv 等^[33]的研究, 土壤中 Pb 含量受煤炭燃烧和汽车尾气排放的影响。研究区有虹桥、丽村等多个大型热电厂, 煤炭燃烧产生的粉煤灰中 Pb 含量较高^[39], 部分粉煤灰扩散到空气中, 通过大气沉降进入周围土壤; 虽然我国从 2000 年开始已全面禁用含铅汽油, 但汽车尾气排放对土壤中 Pb 累积的影响将持续存在^[1]。

高青县是农业大县, 农业发展一直是县域经济发展的重要一环。研究区大力发展以西红柿、鲤鱼、大米、西瓜、桑葚、山东黑牛为代表的“五彩农业”, 农民大量使用农药、化肥(磷酸盐肥料、硝酸盐肥料和有机肥料), 经过长时间的积累, 均可造成 As、Cd、Cu 和 Zn 的富集^[14, 37]。另外, 研究区畜牧业发达, Cu 和 Zn 常作为禽畜饲料的添加剂, 但 Cu 和 Zn 在动物体内吸收不完全, 95% 以上的 Cu 和 Zn 进入到动物粪便中^[40]。Lu 等的研究表明^[24], 在北京顺义区的农田中 Cu、Zn 等元素主要来源于化肥和农药的施用。因此施用动物粪便等有机肥可导致土壤中 Cu 和 Zn 含量明显上升。综上所述, 可认为 PC1 中的 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 受到自然背景和人类活动的共同影响, 其中人类活动主要包括工业污染、交通排放和化肥农药的施用。

第二主成分 (PC2) 解释了总方差的 10.1%, Hg 在 PC2 的因子载荷高达 0.994, 且 Hg 的平均值远超过黄河下游背景值, 变异系数最高(表 1), 与 Fe₂O₃、MgO、CaO 的相关性较低(表 3), 说明 Hg 受人类活动影响明显。很多研究也证实了这一点。Cai 等^[13]和 Davis 等^[41]利用主成分分析证实了土壤

中 Hg 属于人为来源,并将其划分为孤立元素;Liu 等的研究表明^[42],人类排放的 Hg 占到全球排放总量的 60% ~ 80%;Lv 等^[14]对南四湖的研究中发现, Hg 可能来源于造纸、冶金和煤炭开采过程中排放的废水;戴彬等^[18]对莱芜市的研究中表明,钢铁冶炼和煤炭燃烧是 Hg 的主要来源。

Hg 可能有多种人为源,农业生产对 Hg 含量影响较小^[41],工业排放可能是其主要来源. 纺织服装、石油化工和塑料制造是高青县重要工业,也是导致 Hg 含量增加常见的人类活动. 特别地,研究区内有鲁群纺织、隆华化工和兴福塑料等众多大型企业,这些是造成土壤中 Hg 积累的重要来源. Hg 是主要来自于人为源的元素,也是一种高稳定性的环境污染物,一定气压条件下能在大气中存在半年到两年之久,主要通过大气干湿沉降和径流进入土壤^[42]. 因此,可认为 PC2 中的 Hg 主要来源于纺织、石油化工和塑料制造等工业活动。

2.4 不同土地利用类型与成土母质的重金属含量差异

土地利用和成土母质通常代表人类活动和地质背景因素,如图 2 所示. 采用单因素方差分析(ANOVA)对不同组间重金属含量进行比较可以更加深入地探讨重金属来源(表 5). 在土地利用方面,8 种重金属的含量在不同土地利用类型上存在明显差异. As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 平均含量最高的地类均为城镇建设用地,平均含量分别为 18.45、0.2、77.62、34.47、0.065、38.84、28.33 和 90.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于其他土地利用类型,说明城镇建设用地对重金属的富集作用极为显著;另外,农村居民地和耕地的重金属平均含量也超过黄

河下游背景值^[20],主要是由于农业生产施入化肥、农药导致重金属含量升高. 以上分析表明这些元素受到不同程度的人类活动的影响,在土壤中的含量一般是城镇建设用地 > 农村居民地 > 耕地。

在成土母质方面,不同母质类型的重金属含量也存在差异. As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 平均含量最高的母质类型均为湖积物母质发育的土壤,分别为 14.18、0.17、75.67、29.14、33.62、26.53 和 79.99 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过黄河下游背景值^[20],说明这些元素受地质背景的控制;洪积物、湖积物和黄河冲积物发育的土壤之间的 Hg 平均含量则十分接近,无显著性差异,说明 Hg 基本不受成土母质的影响. 将成土母质的空间分布[图 2(b)]与重金属元素的空间分布(图 3)相结合,发现 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的东南部高值区域与湖积物位置基本吻合,也表明这些元素受到成土母质的影响. 总体上方差分析的结果进一步支撑了多元统计分析的结果。

2.5 重金属元素的空间分布特征

2.5.1 变异函数理论模型拟合

普通克里格技术是无偏预测,要求数据符合正态分布;Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验是分析数据是否符合正态分布的有力工具. K-S 检验表明 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 符合正态分布,可直接进行克里格插值;对 As、Cd 和 Hg 进行对数变化后均符合正态分布,然后进行变异函数拟合和插值. 变异函数理论模型主要包括指数、高斯、球状和线性等模型,主要参数包括块金常数(C_0)、基台值($C_0 + C$)、变程(Range)、决定系数(R^2)和残差(RSS)等. 块金常数和基台值的比值 [$C_0/(C_0 + C)$] 代表参数的空间自相关性,可以反映自然和人为因素的作

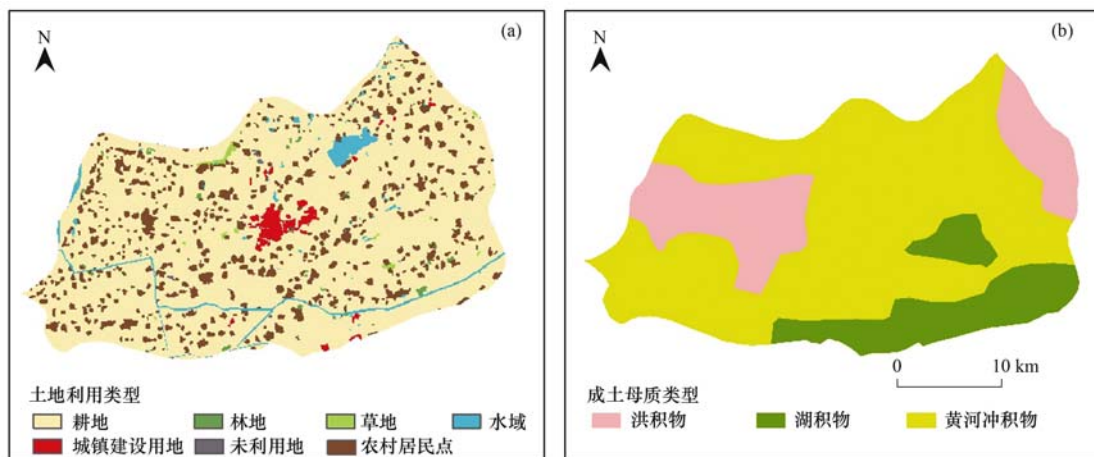


图 2 高青县土地利用类型与成土母质类型

Fig. 2 Land use types and parent material in Gaoqing County

表 5 土地利用和成土母质的方差分析结果¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 5 Result of ANOVA for the heavy metal contents by parent soil material and land usage/mg·kg ⁻¹										
项目	类型	参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
土地利用类型	城镇用地 (n = 11)	范围	16.1 ~ 20.9	0.15 ~ 0.31	47.6 ~ 85.5	29.8 ~ 38.9	0.03 ~ 0.07	34.6 ~ 42.3	26.1 ~ 31.5	80.8 ~ 99.7
		平均值	18.45 ^a	0.2 ^a	77.62 ^a	34.47 ^a	0.065 ^a	38.84 ^a	28.33 ^a	90.63 ^a
		标准差	0.45	0.01	3.26	0.92	0.003	0.63	0.58	1.59
	农村居民地 (n = 35)	范围	9.4 ~ 15.7	0.11 ~ 0.2	61.2 ~ 77.2	20 ~ 32.8	0.02 ~ 0.1	26.1 ~ 42.5	18.3 ~ 29.1	59.4 ~ 89.2
		平均值	12.49 ^b	0.15 ^b	69.62 ^b	25.67 ^b	0.043 ^b	32.23 ^b	23.15 ^b	74.11 ^b
		标准差	0.29	0.004	0.65	0.55	0.001	0.62	0.42	1.2
	耕地 (n = 188)	范围	8.2 ~ 22.6	0.09 ~ 0.25	31.8 ~ 96.7	17.7 ~ 38.2	0.01 ~ 0.12	22.3 ~ 45.8	17.7 ~ 32.6	50.7 ~ 102.7
		平均值	12.37 ^b	0.15 ^b	70.1 ^b	25.4 ^b	0.038 ^b	31.58 ^b	23.08 ^b	72.4 ^b
		标准差	0.18	0.002	0.47	0.3	0.001	0.27	0.18	0.68
	洪积物 (n = 43)	范围	8.2 ~ 16.4	0.09 ~ 0.2	53.4 ~ 71.6	17.1 ~ 32.3	0.01 ~ 0.07	22.3 ~ 37.5	17.7 ~ 26.3	50.7 ~ 81.7
		平均值	11.31 ^b	0.144 ^c	66.29 ^c	23.13 ^b	0.038 ^a	29.31 ^a	21.34 ^b	67.71 ^c
		标准差	0.29	0.004	0.55	0.47	0.002	0.56	0.33	1.14
成土母质类型	湖积物 (n = 41)	范围	9.4 ~ 22.6	0.11 ~ 0.25	67.8 ~ 96.7	21.7 ~ 38.2	0.02 ~ 0.06	25.9 ~ 45.8	20.1 ~ 28.7	62.6 ~ 102.7
		平均值	14.18 ^a	0.170 ^a	75.67 ^a	29.14 ^a	0.036 ^a	33.62 ^a	26.53 ^a	79.99 ^a
		标准差	0.42	0.005	0.88	0.57	0.001	0.63	0.36	1.39
	黄河冲积物 (n = 150)	范围	8.2 ~ 20.9	0.09 ~ 0.31	31.8 ~ 85.8	17.7 ~ 38.9	0.01 ~ 0.12	25 ~ 42.5	17.9 ~ 32.6	53.1 ~ 99.7
		平均值	12.66 ^b	0.157 ^b	70.11 ^b	25.76 ^b	0.038 ^a	31.67 ^a	23.18 ^b	73.4 ^b
		标准差	0.22	0.003	0.54	0.35	0.001	0.32	0.23	0.77

1) 不同小写字母代表 0.05 水平上差异显著

用. 若 $C_0/(C_0 + C) < 0.25$, 表明变量的空间变异以结构变异为主, 变量具有强烈的空间相关性; 当 $0.25 \leq C_0/(C_0 + C) < 0.75$ 时, 变量具有中等程度空间自相关; 而当 $C_0/(C_0 + C) \geq 0.75$ 时, 变异主要以随机变异为主, 空间自相关很弱^[43]. 决定系数 (R^2) 表示理论模型的拟合精度.

由变异函数理论模型拟合的结果可知(表 6), Cu、Pb 和 Zn 的变异函数理论模型均符合指数模型, Cd 和 Cr 符合球状模型, As、Hg 和 Ni 符合高斯模型. 各变量的有效变程介于 2 857 ~ 51 100 m 之间, 决定系数均在 0.420 以上, 且残差平方均接近

于 0, 基本符合模型选择的要求. As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的块金值/基台值 [$C_0/(C_0 + C)$] 分别为 0.564、0.528、0.520、0.674、0.692、0.572 和 0.545, 介于 0.25 ~ 0.75 之间, 具有中等空间相关性, 表明这些元素除受到成土母质、地形等自然因素影响外, 也受到了人为等非自然因素如工业污染、施肥、交通排放的影响; Hg 的块金值/基台值 [$C_0/(C_0 + C)$] 大于 0.75, 说明 Hg 元素主要由工业污染等随机因素引起的空间变异为主. 综述所述, 各变量的块金值、基台值分析与前面的分析结果基本一致.

表 6 土壤重金属含量变异函数模型统计

Table 6 Variation function model of soil heavy metal content							
重金属	模型	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	块金值/基台值 [$C_0/(C_0 + C)$]	有效变程 /m	决定系数 (R^2)	残差平方 (RSS)
As	Gaussian	0.034	0.078	0.564	7 326	0.867	0.014 9
Cd	Spherical	0.054	0.114	0.528	51 100	0.891	0.014 7
Cr	Spherical	0.030	0.632	0.520	51 100	0.925	0.029 7
Cu	Exponential	0.688	2.109	0.674	18 780	0.877	0.012 4
Hg	Gaussian	0.002	0.016	0.860	2 857	0.420	0.032 78
Ni	Gaussian	0.117	0.610	0.692	3 810	0.714	0.007 17
Pb	Exponential	0.365	0.853	0.572	20 100	0.898	0.012
Zn	Exponential	0.468	1.036	0.545	24 750	0.875	0.022 6

2.5.2 重金属含量空间分布特征及成因

本文选用普通克里格方法进行空间插值预测, 结合上述变异函数的结果, 利用 ArcGIS 10.2 得到

研究区 8 种重金属的空间分布特征(图 3). 从图 3 可以看出, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的高值区均分布于高青县中部和东南部. 结合土地利用和成土

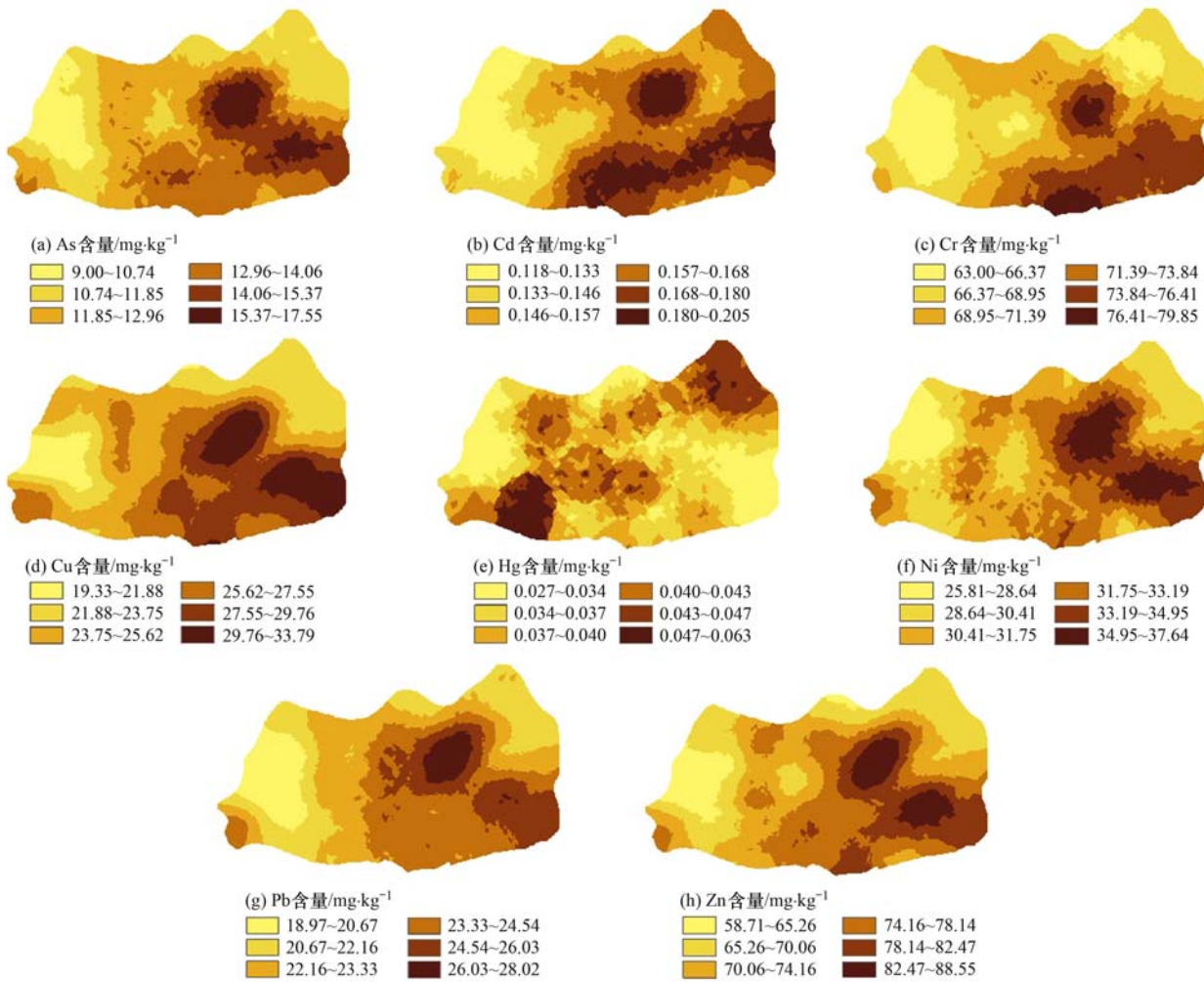


图3 土壤重金属含量空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals in soils

母质的空间分布(图2),发现这些元素的高值区与城镇建设用地和湖积物所在区域基本一致.中部偏高是由于中部城区为高青县政府驻地,纺织服装、石油化工等企业也主要分布于城区,工厂排放的大量废水、废气、废渣和快速城市化进程致使土壤重金属含量升高.而东南部偏高主要与成土母质有关,此处的土壤类型为湖积物母质发育的土壤.在湖相沉积物发育的土壤中,这些元素的平均含量均明显高于全省土壤平均水平^[34].这说明研究区As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn主要受人类活动和成土母质的共同影响,这与前面的变异函数分析结果相一致.

Hg的高值区主要分布于研究区西南部和东北部.西南部偏高的主要原因是西南部黑里寨镇为高青县塑料加工企业密集区,聚集了兴福塑料和彤宇塑料等大型企业,工业排放的污水使该区小清河等河段严重污染,部分地下水也受到污染.东北部高

值区与大芦湖所在区域基本吻合,大芦湖油田也位于该区.一方面城镇生活污水、工业污水大部分排入大芦湖,另一方面纺织、化工等排放的Hg也可通过大气干湿沉降进入大芦湖,导致Hg含量富集.这说明Hg主要受人类活动影响,与前文多元统计分析的结果基本一致.

3 结论

(1)高青县8种土壤重金属含量均低于国家二级标准值,但都超过黄河下游背景值,其中As、Cu、Hg的平均含量分别为各自背景值的1.23、1.20和1.29倍,说明研究区土壤重金属存在不同程度的富集现象.

(2)土壤重金属来源可分为两类:As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn受到成土母质与人类活动综合影响,其中人为源主要包括工农业活动和交通排放;Hg主要来源于塑料制造、纺织和化工等工业排放.

(3)不同土地利用类型和成土母质中的重金属含量差异明显. As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 在城镇建设用地的平均含量显著高于其他地类; 除了 Hg 以外, 其余 7 种元素在湖积物母质发育土壤中的平均含量最高.

(4)土壤重金属空间分布各异. As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量高值区主要分布在中部城区和东南部, 而 Hg 的高值区分布于西南部和东北部. 结合污染物来源分析, 工业、交通排放和农业活动加剧了当地土壤的重金属污染.

参考文献:

- [1] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.
Lv J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao city[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 971-984.
- [2] Qishlaqi A, Moore F, Forghani G. Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(1): 374-384.
- [3] Martín J A R, Ramos-Miras J J, Boluda R, *et al.* Spatial relations of heavy metals in arable and greenhouse soils of a Mediterranean environment region (Spain) [J]. *Geoderma*, 2013, **200-201**: 180-188.
- [4] Yang P G, Mao R Z, Shao H B, *et al.* An investigation on the distribution of eight hazardous heavy metals in the suburban farmland of China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **167**(1-3): 1246-1251.
- [5] Mico C, Recatalá L, Peris M, *et al.* Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 863-872.
- [6] Sun C Y, Liu J S, Wang Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China [J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(5): 517-523.
- [7] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(4): 542-551.
- [8] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J]. 地理学报, 2008, **63**(9): 994-1003.
Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, *et al.* Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong province, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(9): 994-1003.
- [9] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 993-1001.
Yu C C, Zhao W T, Gao X F, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water around electroplating factories [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 993-1001.
- [10] 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 等. 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1516-1522.
Zhang H Z, Tang Y L, Lu J, *et al.* Sources and spatial distribution of typical heavy metal pollutants in soils in Xihu scenic area [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1516-1522.
- [11] 郭怀成, 周丰, 刀谓. 地统计方法学研究进展[J]. 地理研究, 2008, **27**(5): 1191-1202.
Guo H C, Zhou F, Dao X. State-of-art on geostatistical methodology [J]. *Geographical Research*, 2008, **27**(5): 1191-1202.
- [12] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报, 2007, **44**(1): 33-40.
Zhong X L, Zhou S L, Li J T, *et al.* Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta—a case study of Taicang city in Jiangsu province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(1): 33-40.
- [13] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, *et al.* Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong province, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **78**: 2-8.
- [14] Lv J S, Zhang Z L, Li S, *et al.* Assessing spatial distribution, sources, and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of the Nansi Lake, eastern China [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, **299**(3): 1671-1681.
- [15] Chen X D, Lu X W, Yang G. Sources identification of heavy metals in urban topsoil from inside the Xi'an Second Ringroad, NW China using multivariate statistical methods [J]. *CATENA*, 2012, **98**: 73-78.
- [16] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3496-3502.
Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, *et al.* Multivariate geostatistics and GIS-based approach to study the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3496-3502.
- [17] 宋波, 刘畅, 陈同斌. 广西土壤和沉积物砷含量及污染分布特征[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(4): 654-668.
Song B, Liu C, Chen T B. Contents and pollution distribution characteristics of arsenic in soils and sediments in Guangxi Zhuang autonomous region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(4): 654-668.
- [18] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 507-515.
Dai B, Lü J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong province, eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [19] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
GB 15618-1995, Environmental quality standard for soils [S].
- [20] 蔡立梅, 黄兰椿, 周永章, 等. 珠江三角洲典型区农业土壤铬的空间结构及分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(1): 60-65.
Cai L M, Huang L C, Zhou Y Z, *et al.* The Spatial structure and

- distribution of Cr contents in agricultural soils in a typical area of the Pearl River Delta, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(1): 60-65.
- [21] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys[A]. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). *Soil Spatial Variability* [M]. Wageningen: Pudoc Publishers, 1985. 166-194.
- [22] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(1): 163-178.
- [23] Zhao Y C, Wang Z G, Sun W X, *et al.* Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban-rural transition area in Yangtze River Delta region of China [J]. *Geoderma*, 2010, **156**(3-4): 216-227.
- [24] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **425**: 66-74.
- [25] Huang S S, Liao Q L, Hua M, *et al.* Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China[J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(11): 2148-2155.
- [26] Nanos N, Martín J A R. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: spatial variability in the Duero river basin (Spain) [J]. *Geoderma*, 2012, **189-190**: 554-562.
- [27] Martín J A R, Arias M L, Corbí J M G. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geostatistical methods to study spatial variations [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 1001-1012.
- [28] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(3): 313-324.
- [29] Sollitto D, Romić M, Castrignano A, *et al.* Assessing heavy metal contamination in soils of the Zagreb region (Northwest Croatia) using multivariate geostatistics [J]. *CATENA*, 2010, **80**(3): 182-194.
- [30] Franco-Uría A, López-Mateo C, Roca E, *et al.* Source identification of heavy metals in pastureland by multivariate analysis in NW Spain [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 1008-1015.
- [31] Stafilov T, Šajin R, Alijagić J. Distribution of arsenic, antimony, and thallium in soil in Kavadarci and its surroundings, Republic of Macedonia [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2013, **22**(1): 105-118.
- [32] Zhang C S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **142**(3): 501-511.
- [33] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial Kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **261**: 387-397.
- [34] 王关玉, 潘懋, 刘锡大, 等. 山东省土壤中元素含量与母质的关系[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1992, **28**(4): 475-485.
- Wang G Y, Pan M, Liu X D, *et al.* On the relationship between the concentrations of elements in soil and the types of soil-forming parent material in Shandong province, China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium University Pekinensis*, 1992, **28**(4): 475-485.
- [35] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地理学报*, 2017, **72**(9): 1680-1694.
- Eziz M, Mamut A, Mohammad A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(9): 1680-1694.
- [36] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou city[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [37] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 270-279.
- Liu S, Wu Q Y, Cao X J, *et al.* Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 270-279.
- [38] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- Liu W, Yang J J, Wang J, *et al.* Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of east Junggar Basin in Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- [39] 王菲, 吴泉源, 吕建树, 等. 山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3144-3150.
- Wang F, Wu Q Y, Lü J S, *et al.* Spatial characteristics and environmental risk of heavy metals in typical gold mining area of Shandong province[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3144-3150.
- [40] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **107**: 140-147.
- [41] Davis H T, Aelion C M, McDermott S, *et al.* Identifying natural and anthropogenic sources of metals in urban and rural soils using GIS-based data, PCA, and spatial interpolation [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2378-2385.
- [42] Liu Y, Ma Z W, Lv J S, *et al.* Identifying sources and hazardous risks of heavy metals in topsoils of rapidly urbanizing East China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, **26**(6): 735-749.
- [43] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(4): 1266-1273.
- Zhong X L, Zhou S L, Huang M L, *et al.* Chemical form distribution characteristic of soil heavy metals and its influencing factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(4): 1266-1273.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)