

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM_{2.5}中元素浓度特征及其源分析 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM_{2.5}浓度分阶段改善目标情景分析 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM_{2.5}排放特征及减排潜力估算 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施氮对菜地CH₄排放的影响 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH₄和N₂O排放的影响 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜评价多环芳烃污染土壤的农用风险 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)

《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应

舒心¹, 李艳^{1*}, 李锋², 冯靖仪¹, 沈嘉瑜¹, 史舟³

(1. 浙江大学公共管理学院, 土地科学与不动产研究所, 杭州 310058; 2. 杭州电子科技大学材料与环境学院, 环境工程系, 杭州 310018; 3. 浙江大学环境与资源学院, 农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310058)

摘要: 土地利用/覆被既能反映重金属污染物的主要来源, 亦能通过改变土壤物理、化学和生物性质从而控制重金属在土壤中的迁移性和活性, 造成土壤中重金属的累积直至污染。基于2003年和2013年宁波市土壤重金属采样点数据和土地利用数据, 采用面向对象的决策树分类方法进行土地利用/覆被分类, 采用单项污染指数、内梅罗综合污染指数评价土壤重金属污染状况, 采用景观格局指数探索重金属不同累积程度下的土地利用变化和景观格局演变, 采用冗余和偏冗余分析识别对研究区土壤重金属累积影响最为显著的景观格局因子及不同因子之间的交互作用。结果表明: ① 2003~2013年研究区8种土壤重金属元素均出现了不同程度的累积, 其中以Hg、Ni和Cr的累积程度最高; 研究区大多数区域已受到了土壤重金属的污染且重度污染区的污染程度仍在加剧。② 较高的重金属累积程度并不完全出现在土地利用类型一直为建设用地的区域, 或由其他类型转为建设用地的区域, 有相当一部分发生在利用类型一直为耕地或者是由其他类型转为耕地的区域。③ 重金属污染地区都有着破碎、复杂和聚集的景观格局特征, 其中耕地、住宅用地和工业用地的这种特征与土壤重金属累积的相关性最大; ④ 建设用地的斑块聚集程度越高, 大多数重金属元素的累积程度会显著增加; 景观的多样性程度和农用地的形状复杂程度越高, Cu、Hg、Pb和Cd的累积程度会显著增加; 距离采矿用地越近, Cd含量增加的效应越明显。

关键词: 土壤重金属; 土地利用; 景观格局; 污染程度; 冗余分析

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2471-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809052

Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil

SHU Xin¹, LI Yan^{1*}, LI Feng², FENG Jing-yi¹, SHEN Jia-yu¹, SHI Zhou³

(1. Institute of Land Science and Property, School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Department of Environmental Engineering, College of Materials and Environmental Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 3. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Land use cover change (LUCC) is one of the most important human activities that drive the evolution of the environment. It has great effect on the accumulation, distribution, and migration of heavy metals in the environment. Vegetation can absorb heavy metals directly, and it can also change the physical, chemical, and biological properties of soil and then control the mobility and activity of heavy metals in soil, which will eventually cause pollution of heavy metals in soil. In addition, the migration of heavy metals in soil is also affected by changes of landscape element composition and landscape pattern at sample points, plots, watersheds, and regional scales. Based on the soil sampling data and land use data of Ningbo city in 2003 and 2013, the decision tree classification method based on classification and regression tree algorithm was used to classify the land use and cover type. Single-factor pollution index and Nemerov composite pollution index were used to evaluate the soil heavy metal pollution status. The landscape pattern indexes were used to explore the change of landscape patterns under different degrees of heavy metal accumulation. Finally, redundancy analysis and partial redundancy analysis were used to identify those landscape pattern factors that had the most significant impacts on the soil heavy metal accumulation in the study area. The results showed that: ① The eight soil heavy metal elements including As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn presented different degree of accumulation from 2003 to 2013 in the study area, of which Hg, Ni, and Cr had the highest degree of accumulation. Most of the study area has been polluted by heavy metals, and the pollution degree in the heavily polluted areas is still increasing. ② Higher accumulation degrees of heavy metals was not distributed entirely in areas where land use types have always been construction land, or in areas where other types of land use had been converted to construction land. A considerable proportion of heavy metals accumulated in areas where land use types have always been cultivated land or converted from other types to cultivated land. ③ Heavy metal polluted areas have fragmented, complex, and aggregated landscape pattern, and the correlation between this kind of landscape pattern characteristics and soil heavy metal accumulation in arable land, residential land, and industrial land was the highest. ④ The higher the aggregation degree of construction land patch, the higher the accumulation degree of most heavy metals. The accumulation degree of Cu, Hg, Pb, and Cd increased significantly with the increase of landscape diversity and shape complexity of agricultural land. The closer the distance to the mining site, the more obvious the effect on the increase of Cd

收稿日期: 2018-09-06; 修订日期: 2018-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201200); 国家自然科学基金项目(41771244); 中央高校基本科研业务费专项; 浙江大学文科教师教学科研发展专项

作者简介: 舒心(1993~), 女, 硕士, 主要研究方向为土地利用的生态环境效应, E-mail: Leewin26@163.com

* 通信作者, E-mail: liyan522@zju.edu.cn

content.

Key words: soil heavy metals; land use; landscape pattern; pollution degree; redundancy analysis

作为土壤质量的重要评价指标之一,土壤重金属含量关乎食品安全、农业生产、生态环境保护和人类健康^[1,2]. 重金属在土壤中的累积受到外源输入为主(如工业“三废”排放、汽车尾气排放、化肥农药过量施用等)的人类活动的巨大影响^[3]. 土地利用是人类活动的集中体现,是控制土壤重金属累积和空间分布的重要因子,它既能反映污染物的主要来源,又能反映影响重金属移动和传输的土壤属性(如 pH、有机质含量、电导率)^[4,5]. 此外,土壤重金属的累积是其迁移扩散过程的直接结果,作为一类物质流,其迁移扩散过程还受到从样点、样地、生态系统、流域和区域尺度上景观要素组成和景观格局变化的影响^[6,7]. 因此,探究土地利用和景观格局对土壤重金属累积的影响成为一个重要方向,研究结果不仅有助于提高人们对土壤重金属的累积过程、发生机制和内在规律的认识,而且为重金属污染管控、修复与治理的景观生态学途径提供了可能性.

人类活动干扰下的土壤污染极其复杂,兼有点源和非点源污染特征^[8],且不同景观格局和土地利用类型输出的重金属污染负荷差异巨大^[9]. 近年来,国内外学者对不同土地利用方式下土壤重金属累积特征^[10~16]、景观格局对土壤重金属污染的影响^[5,17]、重金属污染与景观异质性尺度效应^[1]等方面开展了不少工作,证明了不同土地利用类型/覆被下土壤重金属污染程度和空间分布不同,受产业布局、功能分区、工业活动及距污染源距离的影响,受景观多样性、斑块规模、形状复杂度、景观破碎化程度和聚集度等的影响. 但从宏观角度研究景观要素的结构和格局对土壤重金属累积的影响仍属少数,且已有研究^[18,19]中景观格局特征是最为关注的因素之一,研究方法仍以相关性分析^[20]为主,且多聚焦于单一时点.

近 30 年来宁波市城市化、工业化和农业集约化快速发展,土地利用和景观格局变化剧烈,农业土壤质量受到严重威胁^[21]. 本研究利用 2003 年和 2013 年土壤重金属和土地利用数据,探究宁波市土壤重金属污染状况、累积特征和空间变异,对比重金属不同累积程度下的土地利用/覆被变化和景观格局演变,实现不同景观格局对土壤重金属累积影响的定量分解与提取,识别对土壤重金属累积影响最为显著的景观格局因子及不同因子之间的交互作用,旨在为优化土地利用/覆被格局、控制重

金属在土壤中的积累和分布提供科学依据和决策支持.

1 材料与方法

1.1 研究区与数据来源

本研究以浙江省宁波市为研究区. 作为我国首批沿海对外开放城市、计划单列市和副省级城市,宁波是浙江省乃至长三角地区重要的经济中心和加工制造基地,是中国重要的化工基地,是长三角地区的交通枢纽. 宁波港是世界第四大港口,是海上丝绸之路的始发港. 过去 30 年工业化和城镇化的高速发展为该区域的土壤带来了严重的重金属污染问题^[22].

本研究中所用到的基础数据有:2003 年和 2013 年研究区 Landsat TM 遥感影像,来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>); 2003 年和 2013 年研究区 8 种土壤重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)的含量数据,分别来自于 2003 年浙江省农产品产地重金属污染调查和 2013 年浙江省土壤重金属污染普查项目; 2013 年宁波市土地利用变更调查数据,由宁波市国土资源局提供.

1.2 土壤样品采集与测定

2003 年样品按照 2 km × 2 km 网格布点,根据梅花形采样法布设 5 个采样点在 0 ~ 20 cm 土层进行混合采样,按四分法取 1.0 kg 土样装入样品袋备用. 2013 年调查区每个土壤采样点至少由 3 个采样点组成,每个采样点为土壤混合样. 采集方法有梅花点法、棋盘式法和蛇形法; 采样深度(一般农作物耕作层)为 0 ~ 20 cm, 果林类农作物为 0 ~ 60 cm, 城镇和工矿仓储用地周边土壤为 0 ~ 60 cm. 采样过程中用差分 GPS 准确定位采样点,所有土样带回实验室,经室内自然风干,剔除植物残体和石块,研磨后过 100 mm 筛. 采样点空间分布情况见图 1.

土壤样品测定指标包括 8 种重金属元素全量含量. 其中,采用等离子体原子发射光谱法(ICP-AES, iCAP6300DUO, 美国热电公司)测定 Cd、Cr、Ni、Zn、Cu 和 Pb 含量,采用原子荧光法(AFS-820, 北京吉天仪器有限公司)测定 As、Hg 含量. 每一批次处理采用国家土壤标准物质(GBW 07404, GSS-4)进行全程质量控制和跟标测定,包括前处理、上机测试等. 采用从国家标准物质中心购买的国家标

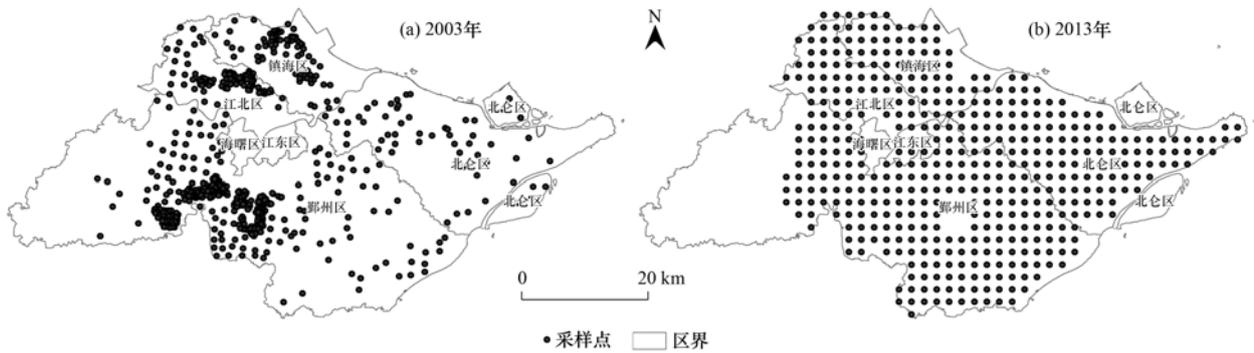


图1 2003年、2013年两期重金属采样点点位分布

Fig. 1 Distribution of soil heavy metal sampling points in 2003 and 2013

准物质溶液制定标准曲线, 标准物质编号为 Cd-GBW 08612, Cr-GBW 08614, Hg-GBW 08617, Pb-GBW 08619, Cu-GBW 08615, As-GBW 08611, Zn-GBW 08620, Ni-GBW 08618. 测定过程中每测定 10 个样品后用标准溶液进行标准曲线的校正, 以保证仪器测定误差范围控制在 2% 以内. 标准溶液在使用过程中按期进行检查, 保证浓度值在标准物质证书标示的范围之内. 每一批次样品在测试时, 同步测试标准物质的消解液, 满足待测元素的回收率为 90% ~ 110% 之间的前提下, 进行样品的测试.

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用/覆被变化遥感监测

利用 2003 年和 2013 年两个时期研究区的 Landsat TM 遥感影像, 结合面向对象分类与基于 CART (Classification And Regression Tree) 算法的决策树分类方法, 对两期遥感影像进行土地利用分类, 采用 ArcGIS 的地图代数运算进一步得到 2003 ~ 2013 年间土地利用变化的可视化结果. 土地利用/覆被类型的划分参照了土地利用现状分类国家标准 (GB/T 21010-2017), 结合研究区土地利用特点, 将遥感影像中待提取的土地利用/覆被类型划分为耕地、林地、住宅用地、工矿仓储用地和水域共 5 种类型, 其中, 将用于水产养殖的设施农用地划分至耕地大类中.

1.3.2 土壤重金属污染指数评价法

采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法分别对 2003 年和 2013 年研究区土壤重金属污染状况进行评价. 单因子指数法适用于单一因子污染特定区域的评价, 内梅罗综合污染指数法能够全面综合地反映土壤的污染程度.

单因子污染评价指数:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

内梅罗综合污染指数:

$$P = \sqrt{\frac{(P_{i,\max})^2 + (\bar{P}_i)^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_i 为重金属元素 i 的单项污染指数, C_i 为重金属 i 的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S_i 为重金属 i 的评价标准值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 这里以浙江省土壤环境背景值为参考. $P_i > 1$ 表示重金属 i 的含量超标, P_i 的值越大, 重金属 i 的超标程度越大. P 为所有重金属元素的内梅罗综合污染指数, $P_{i,\max}$ 为单项污染指数的最大值, \bar{P}_i 为单项污染指数的平均值.

一般将污染程度作如下划分^[23]: $P_i \leq 1.00$ 为非污染、 $1.00 \leq P_i \leq 2.00$ 为轻度污染、 $2.00 \leq P_i \leq 3.00$ 为中度污染、 $P_i > 3.00$ 为重度污染; $P \leq 0.70$ 为安全、 $0.70 < P \leq 1.00$ 为尚清洁 (警戒线)、 $1.00 < P \leq 2.00$ 为轻度污染、 $2.00 < P \leq 3.00$ 为中度污染、 $P > 3.00$ 为重度污染.

1.3.3 景观格局指数

景观格局分析能够揭示不同用地类型的几何形态、镶嵌结构与空间布局. 景观格局指数 (或景观指数) 是一种能够高度浓缩景观格局信息、反映其结构组成和空间配置某些方面特征的定量指标^[24]. 本研究选取了类型和景观水平上包括: 类型面积占比 (PLAND)、斑块密度 (PD)、最大斑块指数 (LPI)、景观形状指数 (LSI)、平均斑块分维数 (MFPD)、平均最近邻体距离 (MNN)、聚合度 (AI)、聚集度 (CONTAG)、香农多样性指数 (SHDI)、丰富度 (PR) 等景观格局指数, 它们能从景观的破碎化程度、异质性程度等多个方面综合反映对象的景观格局特征.

1.3.4 冗余分析

冗余分析是一种约束排序 (或直接梯度排序), 即在已知的环境因子中寻找最能影响物种变化的解释变量, 它将环境因子对响应变量的影响集中在了几个排序轴上, 又称典范轴, 典范轴是参与排序的环境因子的线性组合. 冗余分析的过程基于一定的物种响应环境梯度模型来表达物种对连续变化的环境梯度的响应方式, 反映某种环境条件下物种与环境因子的关系^[25].

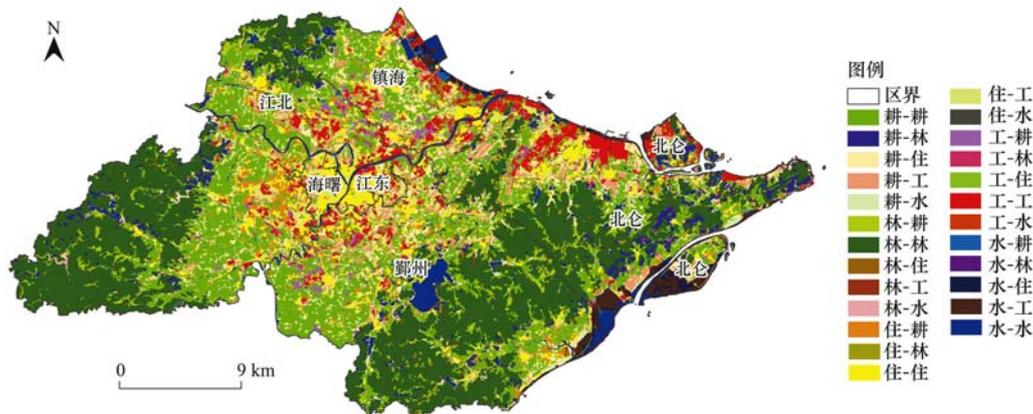
为了考察某个环境因子对响应变量的单独解释力度,或不同环境因子组合对响应变量的共同解释力度,将需要考察的环境因子(组)作为主变量,将需要剔除其影响的剩余环境因子(组)作为协变量,利用偏冗余分析(partial analysis)探究主变量对响应变量的解释,通过一定的计算还可以得到因子之间的交互作用^[26].为了提高结果的精确程度,冗余分析采用了2013年研究区的土地变更调查数据,解释变量中的景观格局指数等均基于该数据计算

而得.

2 结果与讨论

2.1 土地利用/覆被变化

基于面向对象的决策树分类模型完成对2003年和2013年研究区土地利用/覆被的分类,将分类后的两期影像栅格数据进行地图代数运算,得到2003~2013年间研究区土地利用/覆被变化图(图2).



耕-林表示从2003~2013年,土地利用/覆被类型由耕地变为林地,以此类推,下同

图2 2003~2013年研究区土地利用/覆被变化

Fig. 2 Land use/cover change in the study area from 2003 to 2013

图2中不同颜色代表不同的土地利用/覆被变化类型,如“耕-住”指在2003~2013年由耕地变化为住宅用地的区域,“耕-耕”表示耕地类型没有发生变化,以此类推.从中可知,变化比较明显的地区主要位于研究区中部、北部、东部和西南沿海一带,耕地上虽有少量土地利用/覆被发生变化,但数量并不多,林地集中分布的地区变化很小.研究区中,数量较多且程度较为剧烈的变化类型有:耕

地变化为住宅用地和工矿仓储用地、住宅用地和工矿仓储用地内部转移、水域变化为工矿仓储用地以及部分耕地变化为林地等.

2.2 土壤重金属累积特征

对研究区2003年采集的465个土壤样品和2013年采集的665个土壤样品进行描述性统计,得出8种重金属元素含量的算术平均数、最大最小值、标准差、变异系数等结果(见表1).

表1 2003年和2013年研究区8种土壤重金属含量描述性统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Statistical analysis of soil heavy metals in 2003 and 2013/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

年份	元素	最小值	最大值	平均值	标准差	浙江省土壤背景值	全国土壤背景值	变异系数/%	偏度	峰度
2003	Cr	13.16	120.94	63.93	24.03	52.90	61.00	37.58	0.13	1.27
	Pb	20.00	313.00	47.26	23.52	23.70	26.00	49.78	6.10	52.26
	Cd	0.02	0.57	0.20	0.07	0.07	0.10	33.58	1.31	3.38
	Hg	0.02	3.42	0.37	0.38	0.086	0.065	102.10	3.21	15.89
	As	1.80	20.30	6.88	2.22	9.20	11.20	32.22	1.13	3.80
	Cu	4.20	685.40	37.49	38.03	17.60	22.60	101.45	11.33	183.81
	Zn	43.10	368.00	110.27	34.96	70.60	74.20	31.70	2.05	8.33
	Ni	6.30	124.40	25.02	12.22	24.60	26.90	48.85	1.70	11.29
2013	Cr	19.90	326.00	80.33	22.69	52.90	61.00	28.24	1.55	21.61
	Pb	25.00	263.00	51.77	15.51	23.70	26.00	29.97	4.47	52.47
	Cd	0.03	0.89	0.21	0.08	0.07	0.10	39.70	2.29	10.81
	Hg	0.05	2.26	0.55	0.39	0.086	0.065	70.67	1.25	1.64
	As	1.76	19.10	7.23	1.99	9.20	11.20	27.46	0.86	3.29
	Cu	8.92	118.00	40.23	12.88	17.60	22.60	32.02	1.70	6.85
	Zn	44.40	714.00	123.85	38.69	70.60	74.20	31.24	6.58	85.46
	Ni	8.09	55.80	32.13	8.56	24.60	26.90	26.65	-0.62	0.65

除 As 外, 两期重金属元素的含量平均值都超过了浙江省土壤背景值和国家土壤背景值, 2003 年 Cr、Pb、Cd、Hg、Cu、Zn 和 Ni 的含量平均值分别是浙江土壤环境背景值的 1.21、1.99、2.86、4.30、2.13、1.56、1.02 倍; 2013 年的是 1.52、2.18、3.00、6.40、2.29、1.75 和 1.31 倍, 说明土壤总体表现为以 Cd、Hg 为主的多种重金属富集. 2003 年~2013 年所有重金属元素的含量平均值都增大, 说明 10 年间重金属整体污染程度加剧. 不同元素平均含量的增幅不同, 按增幅由大到小排序为 Hg > Ni > Cr > Zn > Pb > Cu > As > Cd. 可见, 10 年来, 研究区土壤重金属累积程度加剧, 形成了以 Hg、Ni、Cr 为主的污染格局, 环境安全风险加大.

变异系数反映了总体中各样点的平均变异程度, 变异系数小于 20% 为低变异, 20% ~ 50% 为中等变异, 50% ~ 100% 为高变异, 大于 100% 为极度变异^[27]. 2003 年 Hg 和 Cu 表现为极度变异, 其他

元素为中等变异; 2013 年 Hg 表现为高变异, 其他元素为中等变异, 这表明研究区重金属元素采样点的含量值变化幅度较大, 连续性较差, 受人类活动等外源因素输入的可能性大.

对两期土壤重金属综合污染指数进行正态分布检验并对经对数转换后的指数利用普通克里格插值法进行空间插值, 得到图 3. 2003 年和 2013 年研究区土壤重金属综合污染指数的高值区域均位于研究区西北部. 总体上, 2013 年整体污染程度比 2003 年显著提高, 其中警戒区 ($0.7 < P \leq 1$) 面积减少, 轻度污染区 ($1 < P \leq 2$) 向西南方向扩散, 面积占比由 2003 年的 58.89% 上升到 2013 年的 80.57%, 重度污染区 ($P > 3$) 向海曙、江东、江北和镇海区扩大, 面积占比由 2003 年的 1.50% 上升到 2013 年的 6.97%. 研究区大多数地区已经受到了土壤重金属的污染, 重度污染区的污染程度仍在加重.

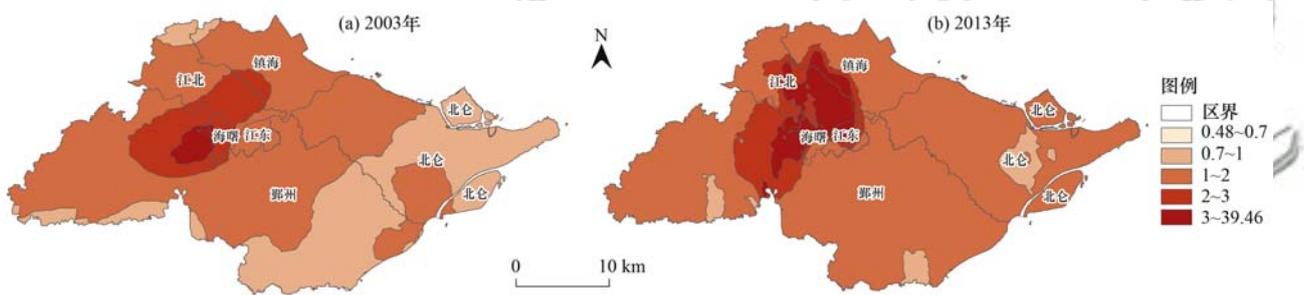


图 3 2003 年和 2013 年研究区土壤重金属综合污染指数的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of comprehensive pollution index for soil heavy metals in 2003 and 2013

2.3 不同累积程度下的土地利用/覆被变化与景观格局演变

将遥感解译得到的 2003 ~ 2013 年间土地利用/覆被变化图(图 2)与 2013 年综合污染指数的空间分布[图 3(b)]进行叠加, 探讨土地利用变化对重金属污染累积的影响, 这里仅分析轻度、中度和重

度污染区土地利用/覆被变化情况(见图 4 ~ 6). 从中可以看出, 研究区大部分已经受到了重金属的轻度污染, 其覆盖区域绝大部分为用地类型不变或变化程度较小的区域. 中度污染区的覆盖区域有很大一部分与城乡过渡带高度重合, 主要为类型没有发生变化的耕地, 或为耕地与住宅用地相互转移、耕

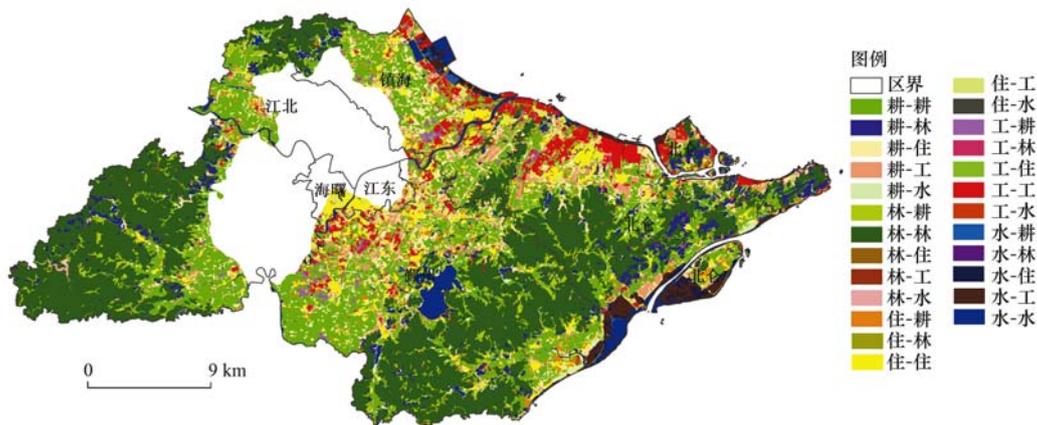


图 4 轻度污染区土地利用/覆被变化类型

Fig. 4 Land use and cover change of slightly polluted area in 2013

地变化为工矿仓储用地的区域. 重度污染区呈块状分布, 鄞州、江北、镇海、海曙和江东区均有所覆盖, 其中江北区覆盖面积最大. 重度污染区中除了海曙区和江东区有着较多的建设用地, 其余有很大一部分是建设用地向耕地过渡的地带. 除了耕地转为建设用地和建设用地内部转移的变化类型, 住宅用地和工业用地向耕地转移之后的区域也受到了重金属的重度污染. 说明研究区较高的重金属累积并不完全出现在土地利用类型一直为建设用地的区域, 或者由其他类型转为建设用地的区域, 相反, 有相当一部分发生在利用类型一直为耕地或者是由其他类型转为耕地的区域.

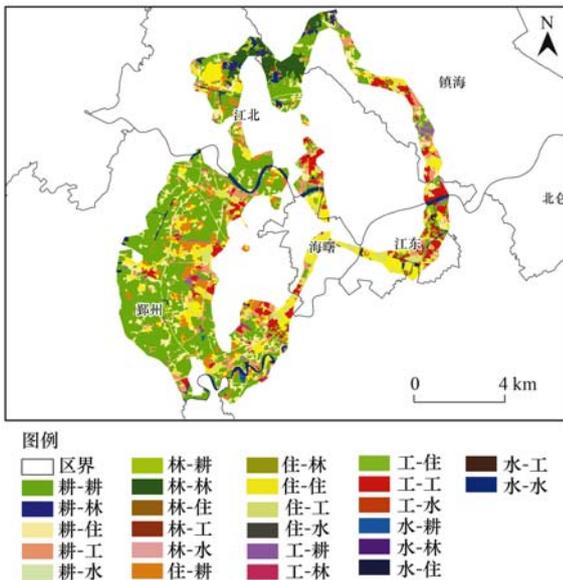


图5 中度污染区土地利用/覆被变化类型
Fig. 5 Land use and cover change of moderately polluted area in 2013

2003 ~ 2013 年土壤重金属不同累积程度下的景观格局指数及其变化见表 2 (景观水平) 和表 3 (类型水平). 可见, 同一景观格局指数在 3 种累积程度下的变化方向几乎是相同的, 只是程度不同: 斑块密度 (PD) 增大且最大斑块指数 (LPI) 减小, 景观形状指数 (LSI) 增大而平均斑块分维数 (MFPD) 减小, 平均最近邻体距离 (MNN) 和聚集度 (CONTAG) 均有所减小, 景观丰富度 (PR) 和多样性 (SHDI) 的变化很小. 说明污染地区有着极为相似的景观格局特征: 斑块破碎、整体形状复杂、空间分布聚集. 其中, 重度污染区的最大斑块指数 (LPI)、平均斑块分维数 (MFPD) 和平均最近邻体距离 (MNN) 的减小程度最大, 说明污染程度与以上景观格局特征的相关性很大, 污染程度越高, 这种特征越明显.

表 3 显示了 2003 年和 2013 年重金属不同累积程度下耕地、住宅用地、工矿仓储用地的景观格局指

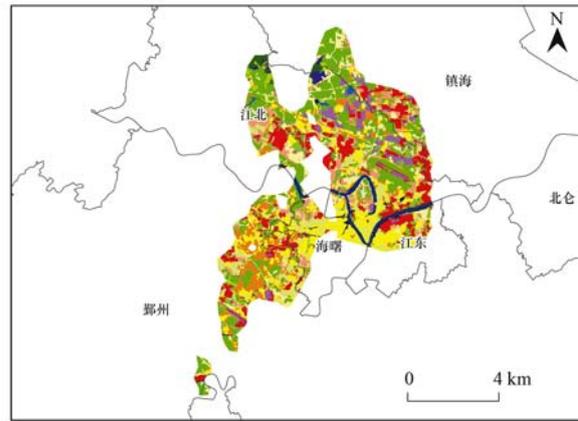


图6 重度污染区土地利用/覆被变化

Fig. 6 Land use and cover change of heavily polluted area in 2013

数. 比较得出: 在重度污染区, 3 种地类的斑块密度 (PD) 和景观形状指数 (LSI) 均增大, 最大斑块指数 (LPI)、平均最近邻体距离 (MNN) 和聚合度 (AI) 均减小, 可知它们的破碎化程度、形状复杂程度和聚集程度均提高, 且斑块在聚集的同时形态也更加复杂.

表 2 研究区重金属不同累积程度下的景观格局指数 (景观水平)

Table 2 Landscape pattern metrics (landscape level) under different heavy metal accumulation levels in study area

指数	年份	累积水平		
		重度污染区	中度污染区	轻度污染区
PD	2003	1.515 7	1.191 5	0.832 2
	2013	3.571	4.326 9	2.332
LPI	2003	39.516 7	31.024 3	16.790 5
	2013	6.504 4	10.583 9	12.954 1
LSI	2003	7.479 1	14.595 2	30.219 4
	2013	25.848 8	28.27	63.820 1
MFPD	2003	1.094 4	1.088 5	1.096 4
	2013	1.090 4	1.085 9	1.095 6
MNN	2003	420.702	347.641 1	397.964 9
	2013	162.117 9	254.389	236.280 6
CONTAG	2003	53.999 1	55.232	49.958 8
	2013	47.950 5	49.072 7	45.127 2
PR	2003	4	5	5
	2013	5	5	5
SHDI	2003	1.007 2	1.195 9	1.396 3
	2013	1.248 8	1.237 8	1.416 1

综上, 重金属不同累积程度下的景观格局演变表明污染地区有着极为相似的景观格局特征: 斑块破碎、整体形状复杂、空间分布聚集, 且污染程度越高以上特征越明显. 耕地、住宅用地和工矿仓储用地这 3 种地类中, 又以工矿仓储用地的这种景观破碎化程度、形状复杂程度和聚集程度加大的变化特征最为显著.

表 3 研究区重金属不同累积程度下的景观格局指数(类型水平)

Table 3 Landscape pattern metrics (type level) under different heavy metal accumulation levels in study area

地类	指数	年份	累积程度			
			重度污染区	中度污染区	轻度污染区	
耕地	PLAND	2003	21.6316	51.0486	41.9241	
		2013	36.5773	49.0746	27.9294	
	PD	2003	0.5955	0.2076	0.1631	
		2013	1.1845	1.2721	0.6195	
	LPI	2003	5.9414	31.0243	11.1326	
		2013	4.6365	10.5839	3.1128	
	LSI	2003	7.5556	13.2972	32.9415	
		2013	24.2292	25.4708	75.243	
	MPFD	2003	1.0927	1.08	1.0921	
		2013	1.0876	1.0896	1.1105	
	MNN	2003	210.6767	197.5986	258.2289	
		2013	138.3256	188.1634	160.6693	
	AI	2003	92.9486	96.5164	96.1039	
		2013	91.1620	92.6271	90.5100	
	住宅用地	PLAND	2003	55.6698	27.1788	11.6230
			2013	28.2506	25.6393	15.3946
PD		2003	0.3248	0.4423	0.2820	
		2013	0.8811	1.1886	0.5958	
LPI		2003	39.5167	9.636	1.5583	
		2013	6.5044	4.0724	1.7205	
LSI		2003	8.2442	17.3224	38.2740	
		2013	33.0022	36.6411	90.5473	
MPFD		2003	1.0957	1.0923	1.1062	
		2013	1.1107	1.0971	1.1109	
MNN		2003	150.4053	217.4259	327.0108	
		2013	145.8064	143.6690	220.6412	
AI		2003	95.1655	93.6572	91.3514	
		2013	86.1390	85.1298	84.5774	
工矿仓储用地		PLAND	2003	22.4574	15.9281	10.6734
			2013	30.9467	18.4970	13.5539
	PD	2003	0.5413	0.3746	0.1915	
		2013	1.3012	1.5176	0.7853	
	LPI	2003	8.8159	1.9977	1.4054	
		2013	3.7821	1.5679	2.0798	
	LSI	2003	8.2280	15.0227	26.3112	
		2013	26.0926	26.5049	59.6712	
	MPFD	2003	1.0963	1.0836	1.0856	
		2013	1.0770	1.0716	1.0719	
	MNN	2003	258.5634	317.1452	432.8262	
		2013	154.9035	232.7237	215.4570	
	AI	2003	92.3541	92.8653	93.8701	
		2013	89.6101	87.4439	89.2316	

2.4 土壤重金属累积对景观格局特征的响应

将 8 种土壤重金属元素的含量作为响应变量(即物种), 8 个景观格局因子作为解释变量(即环境因子)。这 8 个景观格局因子为: 农用地的斑块密度(PD)、农用地的景观形状指数(LSI)、香农景观多样性指数(SHDI)、建设用地的斑块类型面积(PLAND)、建设用地的平均最近邻体距离(MNN)、样方与交通用地的距离、与采矿用地的距离、与水体的距离。在研究区范围内划定 10 个边长为 10 km

的正方形网格为样方, 收集所有样方上 8 种土壤重金属元素的含量和 8 个景观格局因子的值, 其中, 距离数据选取样方中所有栅格与最邻近的相应地类的欧几里得距离(Eucdistance)的平均值, 重金属含量数据同样选取插值后样方中所有栅格的含量均值, 但由于软件所能处理的数据量有限, 在提取该部分数据时以样方中心点为圆心, 3.5 km 为半径创建缓冲圆, 以缓冲圆的外接正方形(边长为 7 km)内的重金属含量均值作为整个样方的均值。

8 种土壤重金属元素含量的去趋势对应分析结果表明, 典范轴梯度长度的最大值(即第一轴)为 0.28, 小于 3, 故适用于线性模型. 利用前向选择法选取变异膨胀因子小于 20 的景观格局因子作为解释变量, 筛选

后的解释变量为: 与采矿用地的距离、香农多样性指数、农用地的景观形状指数、建设用地的平均最近邻体距离. 对 8 种土壤重金属元素的含量和经筛选后的 4 个景观格局因子进行冗余分析(表 4).

表 4 土壤重金属含量和 4 个景观格局因子的冗余分析结果

Table 4 Results of redundancy analysis for soil heavy metal content and four landscape pattern factors

统计量	典范轴			
	第 1 轴	第 2 轴	第 3 轴	第 4 轴
特征值	0.737	0.037	0.008	0
土壤重金属含量-景观格局因子相关度	0.896	0.927	0.584	0.528
土壤重金属含量变化累计解释量/%	73.7	77.4	78.2	78.2
土壤重金属含量-景观格局因子相关度累计解释量/%	94.3	99	100	100
典范特征值	0.782			
总特征值	1			
第 1 轴检验	<i>F</i> 统计量	14.013		
	<i>P</i> 值	0.046		
所有轴检验	<i>F</i> 统计量	4.479		
	<i>P</i> 值	0.042		

由表 4 可知, 对第一轴和所有轴的蒙特卡罗置换检验得到的 *P* 值均小于 0.05, 说明冗余分析的结果在 5% 的显著性水平下是可信的. 解释变量对响应变量的累计解释量为 78.2%, 表明这些景观格局因子在很大程度上影响着土壤重金属含量的高低. 第一典范轴对响应变量的解释量达到了 73.7%, 前两轴对响应变量的累计解释量达到了 77.4%, 对响应变量和解释变量之间关系的累计解释量高达 99%, 说明土壤重金属含量完全可以由前两个典范轴解释, 前两轴已经能够充分反映土壤重金属含量对景观格局因子之间的响应关系.

表 5 给出了 4 个景观格局因子与前两个典范轴之间的相关系数. 第一轴中建设用地的斑块聚集程度贡献很大, 相关度达到了 0.8632, 第二轴则综合反映了距离因素、景观的多样性和农用地斑块的复杂程度对土壤重金属含量的影响.

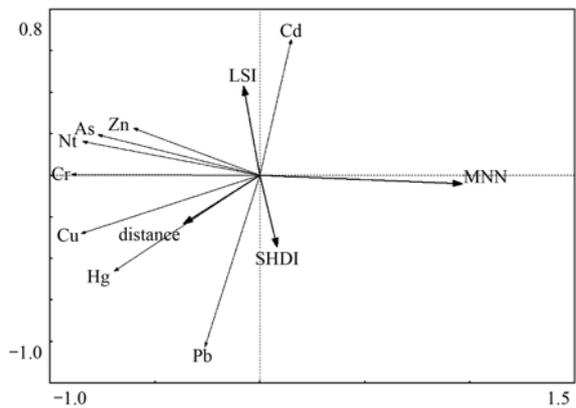
表 5 景观格局因子与第 1、2 轴的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between landscape pattern factors and the first and second canonical axes

因子	典范轴	
	第 1 轴	第 2 轴
与采矿用地的距离	-0.3253	-0.2169
香农多样性指数	0.0734	-0.3207
农用地景观形状指数	-0.0695	0.3972
建设用地平均最近邻体距离	0.8632	-0.0379

从冗余分析的物种-环境排序(图 7)可以得出物种的分布、物种与环境因子之间的关系以及不同环境因子之间的关系. 其中, 蓝色箭头表示物种, 即 8 种土壤重金属元素的含量, 红色箭头表示环境因子, 即 4 种景观格局因子. 环境因子与物种箭头之间的夹角可以表示环境因子与物种的相关性, 二

者箭头之间的夹角小于 90° 表示它们之间呈正相关, 大于 90° 为负相关, 接近 90° 则相关性较弱. 环境因子箭头的长短表示它对物种数据的影响程度, 箭头越长则该环境因子对响应变量的解释量越大. 建设用地的平均最近邻体距离(MNN)与多数重金属元素的含量呈负相关, 且负相关的程度很高; 多样性指数(SHDI)和农用地的形状指数(LSI)与部分重金属元素的含量呈正相关; 距离采矿用地越近, 对 Cd 含量增加的效应就越明显.



distance 表示与采矿用地的距离, 下同

图 7 土壤重金属与景观格局因子的冗余分析排序结果
Fig. 7 Ranking results of redundant analysis of soil heavy metals and landscape pattern factors

为了进一步验证各个景观格局因子对土壤重金属含量影响的显著性, 对冗余分析的结果作 *t*-value 双序图(图 8). 图中部分元素的含义同物种-环境排序图类似, 箭头的方向和长度代表物种和环境因子之间的相关关系; 若某一物种的箭头完全落在某一环境因子正相关的圆圈(红色)内, 则表示该物种与该环境因子呈显著正相关; 同样, 若某一物种的箭

头完全落在某一环境因子负相关的圆圈(蓝色)内,则表示该物种与该环境因子呈显著负相关. 箭头落在某一圆圈内的部分越多,可以认为该物种与该环境因子的这种相关性越显著. 除 Cd 和 Pb 的相关性较小外,其余 6 种元素与建设用地的平均最近邻体

距离(MNN)呈较为显著的负相关; Cd 与距离采矿用地的远近呈较为显著的负相关; Cu、Hg、Pb 与景观多样性指数(SHDI)之间存在不同程度的正相关关系,其中 Pb 与景观多样性指数呈完全正相关; Cd 与农用地的形状指数(LSI)呈显著正相关.

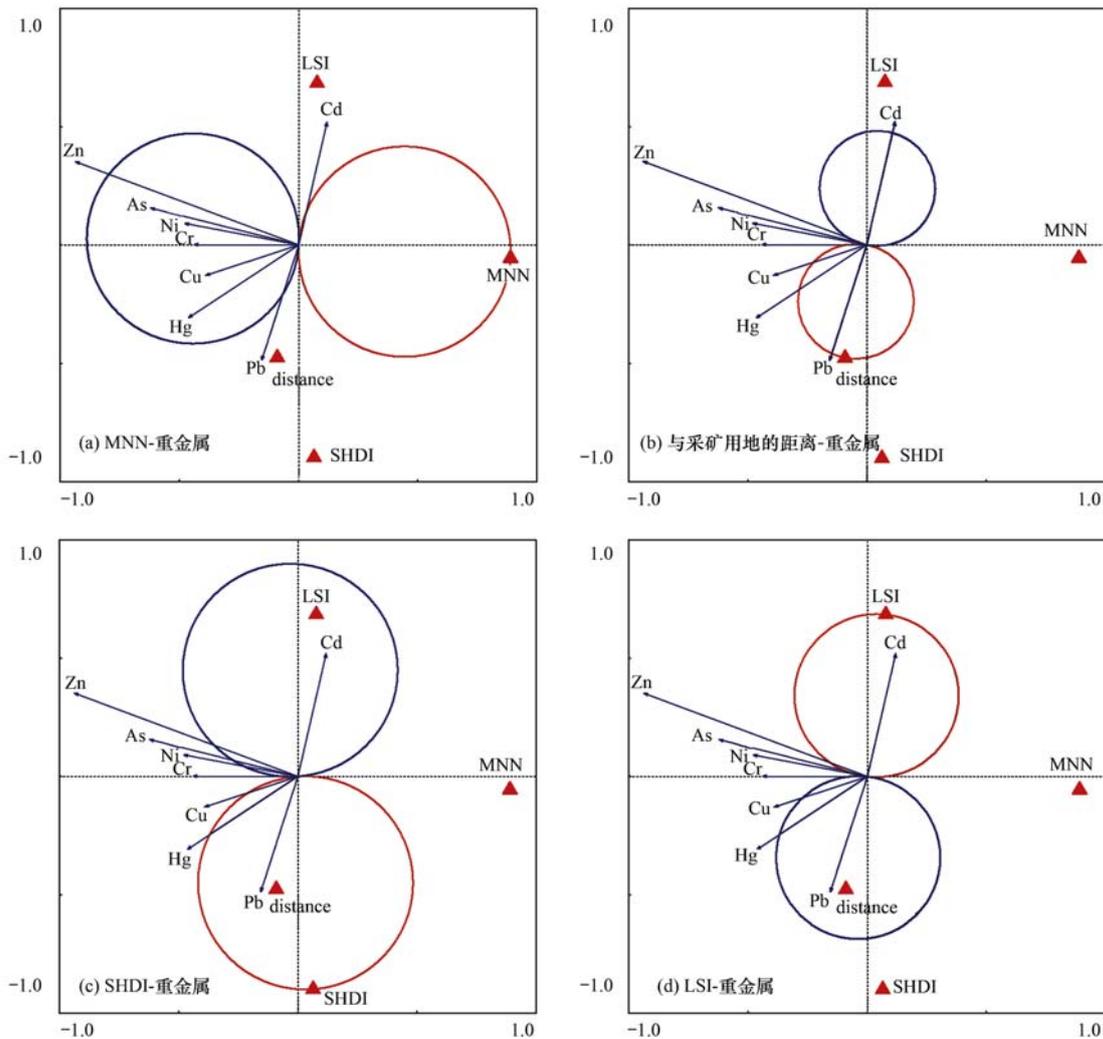


图 8 景观格局因子与土壤重金属的相关关系(t-value)

Fig. 8 Correlation between landscape pattern factors and soil heavy metals (t-value)

在冗余分析的基础上,以所能反映的景观格局特征为依据,将参与冗余分析的 4 个景观格局因子归并为:距离因子(与采矿用地的距离、建设用地的平均最近邻距离)、形状因子(农用地的景观形状指数)和异质性因子(景观多样性指数)共 3 种类型的景观格局因子,分别将这 3 类景观格局因子单独作为解释变量参与偏冗余分析,再将它们依次两两组合,以组合后的因子组作为主变量,剩余的因子作为协变量,对土壤重金属污染与主变量之间的响应关系进行偏冗余分析. 表 6 为偏冗余分析结果,表 7 为偏冗余分析蒙特卡罗检验结果.

由表 6 和表 7 可知,距离因子、距离-形状因子

和距离-异质性因子的偏冗余分析结果均通过了 5% 显著性水平下的蒙特卡罗置换检验. 3 个主变量(组)的 4 个典范轴对土壤重金属含量的累计解释量均达到了 95% 以上,说明它们能够在很大程度上解释土壤重金属含量的变化.

表 8 给出了景观格局因子各个部分的解释量,3 类因子中距离因子的单独解释力度最大,为 72.4%,说明建设用地平均最近邻体距离和与采矿用地的距离是影响土壤重金属含量高低的重要因子. 只有形状-异质性的交互作用和距离-形状-异质性的交互作用的典范特征值小于 0,表示它们的交互作用大于各自单独的解释量之和.

表 6 土壤重金属与景观格局因子偏冗余分析结果

Table 6 Partial redundancy analysis of soil heavy metals and landscape pattern factors

主变量	统计量	第 1 轴	第 2 轴	第 3 轴	第 4 轴
距离因子	特征值	0.714	0.01	0.188	0.021
	重金属含量-因子相关度	0.893	0.823	0	0
	重金属含量变化累计解释量/%	75.8	76.9	96.8	99
	重金属含量-因子相关度累计解释量/%	98.6	100	0	0
形状因子	特征值	0.022	0.188	0.021	0.009
	重金属含量-因子相关度	0.541	0	0	0
	重金属含量变化累计解释量/%	9.1	87.5	96.1	99.9
	重金属含量-因子相关度累计解释量/%	100	0	0	0
异质性因子	特征值	0.033	0.188	0.021	0.009
	重金属含量-因子相关度	0.831	0	0	0
	重金属含量变化累计解释量/%	13.3	88.1	96.3	99.9
	重金属含量-因子相关度累计解释量/%	100	0	0	0
距离-形状因子	特征值	0.732	0.033	0.002	0.188
	重金属含量-因子相关度	0.895	0.93	0.34	0
	重金属含量变化累计解释量/%	74.3	77.7	77.8	96.9
	重金属含量-因子相关度累计解释量/%	95.5	99.8	100	0
距离-异质性因子	特征值	0.733	0.031	0.005	0.188
	重金属含量-因子相关度	0.895	0.903	0.512	0
	重金属含量变化累计解释量/%	74.3	77.4	77.9	97
	重金属含量-因子相关度累计解释量/%	95.4	99.4	100	0
形状-异质性因子	特征值	0.035	0.012	0.188	0.021
	重金属含量-因子相关度	0.922	0.255	0	0
	重金属含量变化累计解释量/%	13.3	17.9	88.7	96.5
	重金属含量-因子相关度累计解释量/%	74.3	100	0	0

表 7 土壤重金属与景观格局因子偏冗余分析蒙特卡罗检验结果

Table 7 Partial redundancy analysis of soil heavy metals and landscape pattern factors by Monte Carlo test

主变量	第 1 轴检验		所有轴检验	
	F 统计量	P 值	F 统计量	P 值
距离因子	15.645	0.01	8.3	0.006
形状因子	/	/	0.5	0.596
异质性因子	/	/	0.766	0.472
距离-形状因子	14.478	0.026	5.857	0.024
距离-异质性因子	14.455	0.022	5.866	0.02
形状-异质性因子	0.769	0.724	0.546	0.692

表 8 景观格局因子各部分解释量

Table 8 Interpretation of each landscape pattern factor

变量	典范特征值
距离因子(A)	0.724
形状因子(B)	0.022
异质性因子(C)	0.033
距离-形状交互作用(A∩B)	0.021
距离-异质性交互作用(A∩C)	0.011
形状-异质性交互作用(B∩C)	-0.007
距离-形状-异质性交互作用(A∩B∩C)	-0.022

本研究中土壤重金属累积对建设用地斑块聚集程度的响应是正向的. 建设用地的聚集会增加单位面积上的污染源数量, 也提高了斑块之间的连通度, 对重金属在斑块之间的迁移运动有一定的促进作用. 通过对比 10 个样方的景观多样性指数, 可以

发现, 指数较大的样方的共同特点是有较多的耕地, 且这些样方都有较大一部分位于城乡过渡带上, 城乡过渡带上的土地利用类型复杂多样, 多种不同的污染源在此交汇, 容易出现含量较高的情况. 景观形状指数较高的斑块在形态和功能上更接近于廊道的特征, 可能会同时出现污染物的输送与截留, 从而使该类型的斑块上有较多污染物累积, 这或许是景观形状指数与土壤重金属污染呈正相关的原因之一. Cd 元素含量与距离采矿用地远近呈显著负相关可能与开采区的矿种或岩性有关. 研究区非金属矿产资源丰富, 盛产建筑石料、石材和萤石等矿种, 司万童等^[28]也发现萤石矿区内的单一元素污染程度以 Cd 最严重. 同时, 本研究中的采矿用地中, 一部分是北仑区沿海区域的盐场, 这与方淑波等^[29]发现海岸带周围和海湾潮间带的 Cd 含量超标在多种重金属元素中最为严重的结论也是较为一致的.

本研究发现农用地的形状复杂程度与景观多样性程度的交互作用能够对土壤重金属含量产生显著影响. 布仁仓等^[30]研究了不同景观指数之间的相关性, 发现包括景观形状指数、平均形状指数和平均分维数在内的形状指数与多样性指数不存在有意义的相关关系, 它们描述的是截然不同的格局特点. 因此, 可以从指数的生态学意义出发来探讨景

观形状指数和景观多样性指数的交互作用及其在元素累积过程中可能会起到的作用。

3 结论

(1) 2003 ~ 2013 年研究区 8 种土壤重金属元素出现了不同程度的累积, 其中以 Hg、Ni 和 Cr 的累积程度最高; 8 种土壤重金属元素含量空间变异的波动性更强, 局部高值区域面积增加; 2013 年研究区综合污染程度比 2003 年显著提高, 大部分地区已经受到重金属污染, 重度污染区的污染程度继续加重。

(2) 其他地类转移为建设用地和耕地会提高重金属的累积程度; 重金属污染地区都有着破碎、复杂和聚集的景观格局特征, 其中耕地、住宅用地和工矿仓储用地的这种特征与土壤重金属累积的相关性最大。

(3) 建设用地的斑块聚集程度越高, 大多数重金属元素的累积程度会显著增加; 景观的多样性和农用地形状复杂程度越高, Cu、Hg、Pb 和 Cd 的累积程度会显著增加; 距离采矿用地越近, 对 Cd 含量增加的效应越明显。此外, 景观格局中形状因子和异质性因子之间的交互作用也不可忽视。

参考文献:

- [1] 徐慧秋, 黄银华, 吴志峰, 等. 广州市农业土壤 As 和 Cd 污染及其对景观异质性的多尺度响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3283-3289.
- Xu H Q, Huang Y H, Wu Z F, *et al.* Agricultural soil contamination from As and Cd and its responses to landscape heterogeneity at multiple scales in Guangzhou, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3283-3289.
- [2] 邱孟龙, 李芳柏, 王琦, 等. 工业发达城市区域耕地土壤重金属时空变异与来源变化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 298-305.
- Qiu M L, Li F B, Wang Q, *et al.* Spatio-temporal variation and source changes of heavy metals in cultivated soils in industrial developed urban areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 298-305.
- [3] 李娇, 吴劲, 蒋进元, 等. 近十年土壤污染源解析研究综述[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 232-242.
- Li J, Wu J, Jiang J Y, *et al.* Review on source apportionment of soil pollutants in recent ten years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(1): 232-242.
- [4] Liu Y, Su C, Zhang H, *et al.* Interaction of soil heavy metal pollution with industrialisation and the landscape pattern in Taiyuan City, China[J]. PLoS One, 2014, 9(9): e105798.
- [5] 李铨, 李芳柏, 吴志峰, 等. 景观格局对农业表层土壤重金属污染的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1137-1144.
- Li C, Li F B, Wu Z F, *et al.* Impacts of landscape patterns on heavy metal contamination of agricultural top soils in the Pearl River Delta, South China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 1137-1144.
- [6] Li C, Li F B, Wu Z F, *et al.* Effects of landscape heterogeneity on the elevated trace metal concentrations in agricultural soils at multiple scales in the Pearl River Delta, South China [J]. Environmental Pollution, 2015, 206: 264-274.
- [7] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 等. 国际景观生态学研究新进展[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 798-804.
- Fu B J, Lv Y H, Chen L D, *et al.* The latest progress of landscape ecology in the world [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 798-804.
- [8] 刘世梁, 傅伯杰. 景观生态学原理在土壤学中的应用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 102-106.
- Liu S L, Fu B J. Application of landscape ecology principle in soil science[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(3): 102-106.
- [9] 张燕, 张志强, 张俊卿, 等. 密云水库土门西沟流域非点源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 183-191.
- Zhang Y, Zhang Z Q, Zhang J Q, *et al.* Estimation of non-point source pollution load in Tumengigou watershed of Miyun Reservoir [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 183-191.
- [10] Fu B J, Chen L D, Ma K M, *et al.* The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shaanxi, China [J]. CATENA, 2000, 39(1): 69-78.
- [11] Mahmoudabadi E, Sarmadian F, Moghaddam R N. Spatial distribution of soil heavy metals in different land uses of an industrial area of Tehran (Iran) [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(10): 3283-3298.
- [12] Krami L K, Amiri F, Sefiyanian A, *et al.* Spatial patterns of heavy metals in soil under different geological structures and land uses for assessing metal enrichments [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(12): 9871-9888.
- [13] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响——以河北省遵化市为例[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 447-455.
- Guo X D, Fu B J, Chen L D, *et al.* Effects of land use on soil quality in a hilly area—a case study in Zunhua county of Hebei province [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 447-455.
- [14] 赵淑苹, 陈立新. 大庆地区不同土地利用类型土壤重金属分析及生态危害评价[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 195-199.
- Zhao S P, Chen L X. Soil heavy content analysis and ecological risk assessment of different landuse types in Daqing region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 195-199.
- [15] 靳治国, 施婉君, 高扬, 等. 不同土地利用方式下土壤重金属分布规律及其生物活性变化[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 74-77, 96.
- Jin Z G, Shi W J, Gao Y, *et al.* Distribution of heavy metals and changes of soil biological activity under different land use patterns [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 74-77, 96.
- [16] 陈宗娟, 张倩, 张强, 等. 天津东南部某区域不同土地利用方式下土壤重金属的累积特征[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(2): 166-173.
- Chen Z J, Zhang Q, Zhang Q, *et al.* Accumulation characteristics of heavy metals in soils as affected by land use in southeast Tianjin [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(2): 166-173.
- [17] 隋传嘉, 潘剑君, 余泓, 等. 苏南村镇耕地景观格局对土壤重金属污染的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2302-2311.

- Sui C J, Pan J J, Yu H, *et al.* Impacts of farming landscape patterns on soil heavy metal pollution in towns of Southern Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(8): 2302-2311.
- [18] Lin Y P, Teng T P, Chang T K. Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua county in Taiwan[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2002, **62**(1): 19-35.
- [19] 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 等. 苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2313-2321.
Chen X, Pan J J, Wang W Y, *et al.* Landscape patterns characteristics of soil heavy metal pollution in a town of southern Jiangsu[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2313-2321.
- [20] 田壮, 方淑波, 印春生, 等. 盐城海岸带景观格局变化和重金属空间分布相关分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, **22**(6): 912-921.
Tian Z, Fang S B, Yin C S, *et al.* Evaluation of spatial correlation between landscape pattern changes and heavy metals spatial interpolation analysis along Yancheng coast[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, **22**(6): 912-921.
- [21] Hu B F, Jia X L, Hu J *et al.* Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze River Delta, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14**(9): 1042.
- [22] Hu B F, Wang J Y, Jin B, *et al.* Assessment of the potential health risks of heavy metals in soils in a coastal industrial region of the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(24): 19816-19826.
- [23] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. 2013, **34**(5): 1887-1894.
Fang X G, Mi J B, Ma Z Y, *et al.* Spatial and temporal characteristics of heavy metal concentration of surface soil in Hebin industrial park in Shizuishan northwest China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 1887-1894.
- [24] 郭建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
Wu J G. *Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy* (2nd ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [25] Horak J, Pavlicek J. Tree level indicators of species composition of saproxylic beetles in old-growth mountainous spruce-beech forest through variation partitioning [J]. *Journal of Insect Conservation*, 2013, **17**(5): 1003-1009.
- [26] Legendre P. Studying beta diversity: ecological variation partitioning by multiple regression and canonical analysis [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, **1**(1): 3-8.
- [27] Nezhad M T K, Tabatabaie S M, Gholami A. Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **152**: 91-109.
- [28] 司万童, 李海东, 林乃峰, 等. 内蒙古达茂旗萤石矿区土壤重金属分布特征与复合污染评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(3): 404-409.
Si W T, Li D H, Lin N F, *et al.* Distribution of heavy metals in soil of fluorite mining area in Damao county, Inner Mongolia and evaluation of their composite pollution [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(3): 404-409.
- [29] 方淑波, 贾晓波, 安树青, 等. 盐城海岸带土壤重金属潜在生态风险控制优先格局[J]. *地理学报*, 2012, **67**(1): 27-35.
Fang S B, Jia X B, An S Q, *et al.* The priority pattern for managing the potential ecological risks associated with heavy metals of the top soil on Yancheng coast [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(1): 27-35.
- [30] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 等. 景观指数之间的相关分析[J]. *生态学报*, 2005, **25**(10): 2764-2775.
Bu R C, Hu Y M, Chang Y, *et al.* A correlation analysis on landscape metrics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(10): 2764-2775.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)