

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



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析

李艳玲^{1,2}, 卢一富³, 陈卫平^{1,2}, 杨阳^{1*}, 蔡斌¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河南省土壤重金属污染监测与修复重点实验室, 济源 459000)

摘要: 环境政策调控对农田土壤重金属富集趋势影响显著. 本研究以典型工业城区周边农田为例, 采用经典统计与地统计方法分析土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量变化及时空分布特征, 并采用 PCA/APCS 模型对土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 污染来源及变化进行分析. 结果表明, 与 2011 年相比, 2017 年研究区土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量整体呈增加趋势. 空间分布上 Cd 和 Pb 含量在 2 个时期均表现为从西北向东南逐渐降低, Cu 和 Zn 含量在 2011 年表现为从北向南逐渐降低, 2017 年表现为从西北向东南逐渐降低. 与 2011 年相比, 2017 年工业污染源对 Cd、Cu 和 Zn 贡献率分别增加 5.58%、10.4% 和 20.4%, 对 Pb 贡献率降低 19.7%; 其它源对 Cd 和 Pb 贡献率分别增加 3.76% 和 24.8%, 对 Cu 和 Zn 贡献率分别降低 9.27% 和 4.31%. 相关举措降低了工业污染源带来的区域土壤 Pb 累积, 但对 Cd、Cu 和 Zn 污染防控并不明显, 新的 Cd 和 Pb 污染源需引起重视.

关键词: 农田土壤; 重金属; 工业发展; 时空变异; 源识别

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1432-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201907254

Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City

LI Yan-ling^{1,2}, LU Yi-fu³, CHEN Wei-ping^{1,2}, YANG Yang^{1*}, CAI Bin¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory for Monitoring and Remediation of Heavy Metal Polluted Soils of Henan Province, Jiyuan 459000, China)

Abstract: Environmental policy regulation affects the accumulation of heavy metals in soil. Two soil surveys were conducted in farmland in industrial cities. Classical statistical and geostatistical methods were applied to examine the content changes and spatial-temporal distribution characteristics of Cd, Pb, Cu, and Zn in soil. The pollution sources and their contribution rates were further analyzed by a principal component analysis/absolute principal component scores (PCA/APCS) model. The results indicated that the concentrations of Cd, Pb, Cu, and Zn increased during the two periods. The content of Cd and Pb in the spatial distribution decreased from northwest to southeast in both periods. The content of Cu and Zn decreased from north to south in 2011, and gradually decreased from northwest to southeast in 2017. Compared with 2011, the contribution rate of industrial activities increased by 5.58%, 10.4%, and 20.4% for Cd, Cu, and Zn, respectively, but decreased by 19.7% for Pb. The contribution rates of the other factors to Cd and Pb increased by 3.76% and 24.83%, respectively, and decreased by 9.27% and 4.31% for Cu and Zn, respectively. Relevant measures have reduced the accumulation of Pb in regional soil caused by industrial activities, but not Cd, Cu, or Zn. In addition, new Cd and Pb pollution sources need to be paid attention to.

Key words: cropland soil; heavy metal; industrial development; spatial-temporal variation; source identification

重金属元素容易被农作物富集并通过食物链威胁人体健康^[1]. 我国土壤重金属污染形势严峻, 约有 1/6 农田土壤受到重金属污染^[2], 其中 Cd、Pb、Cu 和 Zn 点位超标率分别达 3.8%、0.2%、0.3% 和 1.2%^[3]. 土壤重金属累积趋势在短时间内也难以逆转^[4], Luo 等^[5]通过估算重金属输入/输出通量, 结果表明我国农田 Cd 和 Pb 输入通量分别是输出通量的 7.96 和 140 倍. 在经济发展过程中, 土壤重金属含量容易受经济模式的影响而发生改变^[6], 在进行土壤污染防治时, 分析重金属时空变异及来源变化有助于从源头上监控主要污染源进而降低农产品健康风险. 目前, 国内外关于农田土壤重金属污染方面的研究主要集中于空间分布、风险评价和来源解析^[7,8], 但对时空变异以及来源变化方面的研究

则相对较少.

地统计分析可以直观显示土壤重金属含量空间分布, 常与主成分分析相结合来辨识土壤重金属污染源^[9], 但此方法不能量化各污染源对重金属的绝对贡献量. 绝对主成分分数受体模型 (absolute principal component scores, APCS) 的提出弥补了其不足, 常被用来估算污染源对重金属的贡献量, 该方法最早由 Thurston 提出, 用来定量评价大气中可吸入颗粒物主要来源^[10], 后逐渐在水体沉积物、道路扬尘和土壤等介质中也得到广泛应用. 如 Duodu

收稿日期: 2019-07-30; 修订日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41907353, 41977146)

作者简介: 李艳玲 (1988 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤污染与生态风险评价, E-mail: ylli_st@rcees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yyang@rcees.ac.cn

等^[11]通过定量分析河口沉积物重金属污染源,结果表明重金属主要来源于岩石、航运和交通 3 种途径,贡献率分别占 72%、15% 和 13%; Mummullage 等^[12]采用 PCA/APCS 方法分析城市道路扬尘,结果表明扬尘中有 62% 碳氢化合物来源于柴油; Zhou 等^[8]和 Zhang 等^[13]也采用 PCA/APCS 方法来定量解析土壤重金属污染源. PCA/APCS 不需要确定土壤污染源成分谱,即可较为准确地定量解析污染物的主要来源及其贡献率^[14].

济源市是我国典型的铅锌冶炼集中区域,早期经济快速发展造成当地土壤重金属污染严重^[15],自 2009 年发生“血铅儿童”事件以来,当地政府采取多种措施(优化布局、企业整合和技术改进等)对重金属污染进行管控.为探讨政府管控和经济发展对农田土壤污染的影响,本研究选取济源市城区周边农田为例,应用地统计方法分析不同时期农田土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 空间分布及含量变化,结合主成分分析/绝对主成分分数受体模型量化分析当地经济发展过程中土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 污染来源及贡献率变化,以期为进一步实施土壤污染防治与修复等提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(E112°30′~112°45′、N35°0′~35°10′)位于河南省西北部,北部和西部均为山地,南部为丘陵,东部与华北平原接壤,海拔高度 131~200 m,面积 363 km²,占济源市总面积 19.2%,为当地人口集中区和粮食主产区.研究区属暖温带季风气候,年平均气温为 14.5℃.年平均降雨量为 567 mm.主要盛行东风,其次为西南风和西风.土壤类型为褐土和潮土,土壤 pH 范围为 6.07~8.16.主要种植冬小麦、玉米、棉花、大豆等作物.

济源市是亚洲最大的铅锌冶炼基地,2017 年全市铅产量 1.12×10^6 t,占全国 24%.从 20 世纪 50 年代发展至今,济源市已形成以豫光金铅集团、万洋冶炼(集团)有限公司和河南金利金铅集团有限公司等为代表的有色金属产业集群,主要分布于北部的玉川产业集聚区和西南部的虎岭产业集聚区(见图 1).随着有色金属产业的快速发展,研究区农田土壤和小麦籽粒中均出现重金属累积现象^[16,17],有研究表明豫光金铅附近农田土壤 Cd 和 Pb 含量分别为 0.81~4.30 mg·kg⁻¹和 64.5~435 mg·kg⁻¹^[18],对当地居民带来较高健康风险^[19].

1.2 样品采集与分析

依据研究区农田分布,采取随机布点法分别于

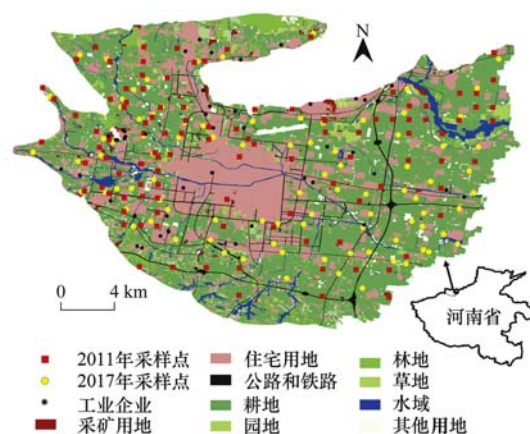


图1 研究区土地利用类型与采样点分布示意

Fig. 1 Land use types and sampling locations in the study area

2011 年和 2017 年各采集土壤样品 108 个和 93 个,每个样点按照梅花形采样法用土钻对表层土壤(0~20 cm)进行混合采样,按四分法取 1.0 kg 样品装袋备用.采样过程中用手持 GPS (Garmin eTrex Legend HCx, USA)精确定位,采样点分布如图 1 所示.

样品在室内阴凉处自然风干后,剔除杂物,于玛瑙研钵中研磨,过孔径 0.15 mm (100 目)尼龙筛后装袋储存备用.采用四酸法“盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸”对土壤样品进行消解^[20],利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 7500a, USA)测定 Cd、Pb、Cr 和 Ni 含量,利用电感耦合等离子体光谱仪 (ICP-OES, PerkinElmer Optima 8300, USA)测定 Cu 和 Zn 含量,采用国家土壤标准物质 (GSS-13) 进行质量控制,回收率在 83.5%~108% 之间.分析过程中采用的试剂均为优级纯.

1.3 数据分析

采用 SPSS 23.0 和 Origin 2018 对土壤 Cd 和 Pb 含量进行基本统计分析和主成分分析/绝对主成分分数受体模型 (PCA/APCS) 分析.利用 ArcGIS 10.2.2 进行重金属含量和主成分因子得分空间分析.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量特征分析

研究区土壤重金属分析结果见表 1.与 2011 年相比,2017 年土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 平均含量分别由 0.918、82.7、24.3 和 78.2 mg·kg⁻¹增加至 1.51、97.1、29.0 和 79.5 mg·kg⁻¹,增幅分别为 65.0%、17.5%、19.4% 和 1.66%,2017 年土壤 Cr 和 Ni 平均含量则由 78.5 mg·kg⁻¹和 29.6 mg·kg⁻¹降低至 49.6 mg·kg⁻¹和 24.3 mg·kg⁻¹,降幅分别为 36.8% 和 18.1%.除 2017 年土壤 Cr 和 Ni 外,2 个时期土壤重金属平均含量均高于河南省土壤元素背

景值^[21].

从变异系数(CV)来看,Cd 和 Pb 含量在 2 个时期内变异系数最高,2017 年 Cd 变异系数达到强变异水平(>100%),说明研究区土壤 Cd 和 Pb 含量受人为干扰最大.2 个时期均有部分样点土壤 Cd 和 Pb 含量超过国家农田土壤风险筛选值,点位超标

率分别由 56.5%和 7.41%(2011 年)增加至 74.2%和 10.8%(2017 年).相较于我国农田土壤污染调查结果(综合超标率为 19.4%)^[22],研究区土壤 Cd 和 Pb 污染程度较为严重,考虑到土壤 Cu 和 Zn 含量也呈增加趋势,因此本研究重点对研究区土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 污染特征及来源变化进行分析.

表 1 研究区土壤重金属含量统计特征

Table 1 Statistical characteristics of heavy metals in soils of the study area										
重金属	年份	样本量	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差 /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%	偏度	峰度	背景值 /mg·kg ⁻¹
Cd	2011	108	0.138	4.16	0.918	0.649	70.8	1.65	5.44	0.074
	2017	93	0.308	17.8	1.51	2.12	140	5.76	40.3	
Pb	2011	108	19.0	443.0	82.7	68.2	82.5	2.34	8.66	19.6
	2017	93	35.8	378.7	97.13	68.6	70.6	1.88	4.60	
Cu	2011	108	9.0	47.1	24.3	8.93	36.8	0.381	-0.642	19.7
	2017	93	15.1	52.1	29.01	7.29	25.1	1.20	1.75	
Zn	2011	108	36.0	189	78.2	28.4	36.4	1.12	2.32	60.1
	2017	93	26.8	219	79.45	30.6	38.5	1.82	4.84	
Cr	2011	108	11.9	201	78.5	33.3	42.4	1.10	2.09	63.8
	2017	93	35.7	68.8	49.6	6.08	12.3	0.412	0.588	
Ni	2011	108	19.0	38.9	29.6	4.48	15.1	-0.007	-0.551	26.7
	2017	93	15.2	32.0	24.3	3.15	13.0	-0.022	-0.233	

2.2 土壤重金属含量时空分布

土壤重金属含量空间分布结果见图 2.2011 年的 Cd 和 Pb 及 2017 年 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量在整体上空间分布相似,均表现为由西北向东南逐渐降低,2011 年 Cu 和 Zn 含量在整体上空间分布相似,表现为由北向南逐渐降低.2011 年土壤 Cd、Pb 和 Cu 含量高值区(Cd>3.0 mg·kg⁻¹、Pb>370 mg·kg⁻¹和 Cu>40 mg·kg⁻¹)主要分布在研究区西北部,面积分别为 0.271、0.072 和 0.570 km².Zn 高值区(Zn>150 mg·kg⁻¹)主要分布在北部,面积为 1.26 km².

2017 年土壤 Cd、Pb 和 Cu 含量高值区主要分布在研究区西北部和中东部,总面积分别为 13.5、0.054 和 1.82 km²,其中 Cd 在西北部和中东部的高值区分别为 1.08 km²和 12.4 km²,Pb 在西北部和中东部的高值区分别为 0.027 km²和 0.027 km²,Cu 在西北部、中东部的高值区分别为 1.75 km²和 0.078 km².Zn 高值区主要分布在研究区北部,面积为 1.61 km².与 2011 年相比,2017 年 Cd、Cu 和 Zn 含量高值区总面积均有所增加,且有向东扩展趋势,Pb 含量高值区总面积略有降低,但也有向东扩展现象,分析原因可能与研究区北部玉川产业聚集区工业发展有关.

重金属含量空间变化分析结果如图 3 所示,相对增加量(RI)计算公式为:(X₂₀₁₇-X₂₀₁₁)/X₂₀₁₁×

100%;绝对增加量(AI)计算公式为:X₂₀₁₇-X₂₀₁₁,式中 X 为重金属含量空间分布栅格图层^[23].土壤 Cd 和 Pb 含量 RI 高值区(>100%)在西北部、中东部、东部和西南部均有分布.Cu 和 Zn 含量 RI 高值区主要分布在西北部、中东部和东南部.Cd 和 Pb 含量 AI 高值区(Cd>3.00 mg·kg⁻¹和 Pb>170 mg·kg⁻¹)均分布在中东部,面积分别为 6.16 km²和 0.434 km².Cu 含量 AI 高值区(Cu>40 mg·kg⁻¹)分布在西北部、中东部和东南部,面积分别为 0.294、0.086 和 0.138 km².Zn 含量 AI 高值区(Zn>150 mg·kg⁻¹)分布在西北部和中东部,面积分别为 0.104 km²和 0.294 km².分析结果显示,与 2011 年相比,2017 年研究区土壤 Cd 和 Pb 含量累积有向东扩展趋势,Cu 和 Zn 含量累积有向东南扩展趋势,4 种重金属在中东部地区累积趋势均较为严重.

2.3 土壤重金属污染来源分析

用 KMO 和 Bartlett's 检验分别对 2011 年和 2017 年数据结构进行分析,结果表明:KMO 检验系数分别为 0.638 和 0.697,均大于 0.6;Bartlett's 检验 P 值小于 0.001,表明主成分分析结果在本研究中具有较好的实用性.主成分分析结果见表 2 和图 4.2011 年和 2017 年 2 个主成分对 2 个时期总方差的累积贡献值均为 76.7%.2011 年 2 个主成分方差贡献率分别为 51.9%和 24.8%.PC1 中 Cu、Zn、Cr 和 Ni 具有较大载荷.研究区土壤 Cu、Zn、Cr 和

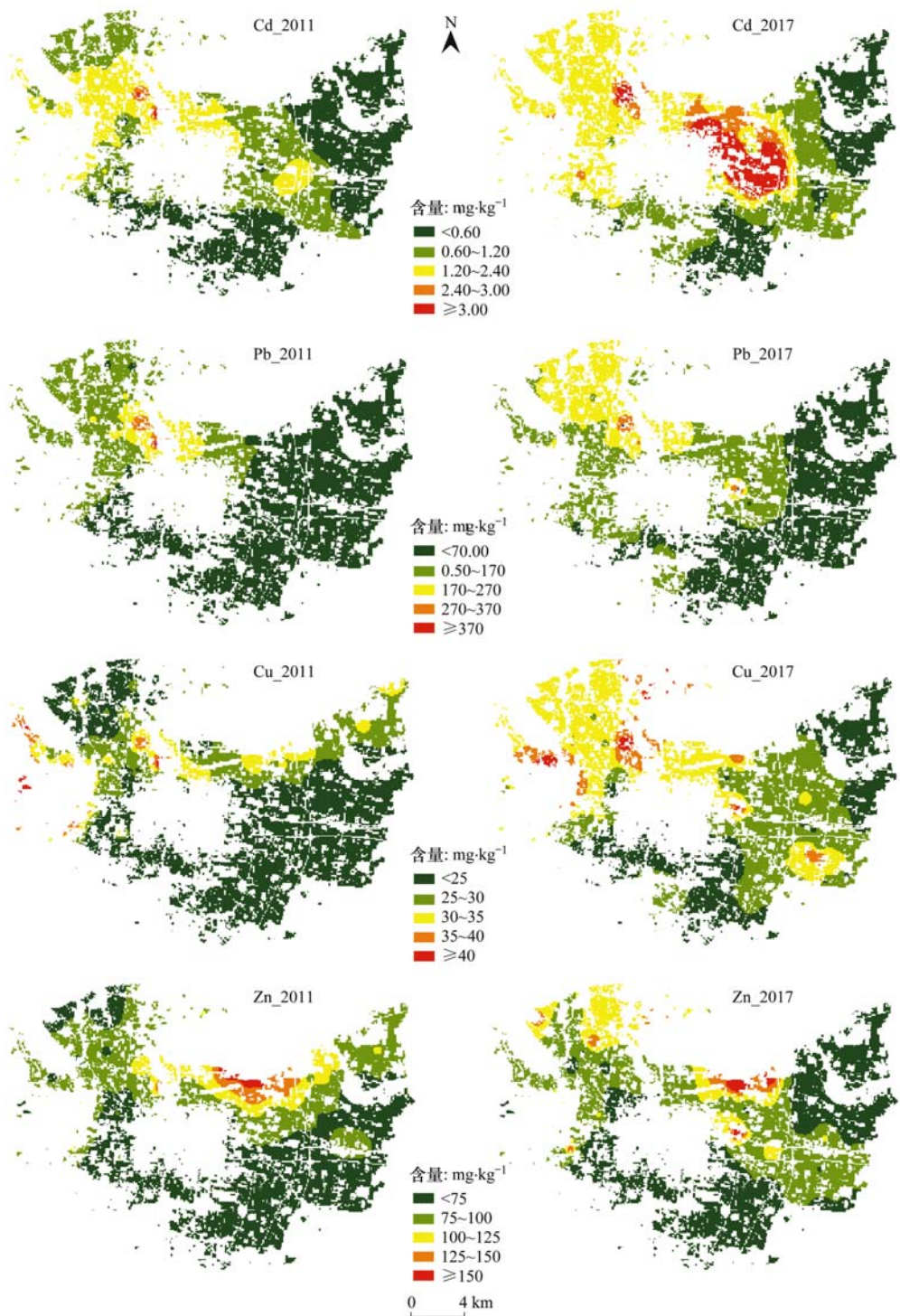


图2 研究区土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in soils of the study area

Ni 平均含量接近土壤背景值(表 1), 变异系数也较小, 说明这几种元素受人类活动影响较小, 故 PC1 代表成土母质源。

2011 年 PC2 中 Cd 和 Pb 具有较大载荷, Cd 和 Pb 平均含量远高于土壤背景值, 变异系数也较高, 说明 Cd 和 Pb 受人为活动影响较大。结合空间分布可以看出, 2011 年土壤 Cd 和 Pb 含量高值区分布在研究区西北部, 与豫光金铅冶炼厂位置相符, 其它

较高污染区也分布在西部万洋冶炼和金利金铅冶炼厂附近。Qiu 等^[24]的研究表明豫光金铅 1 000 m 处采样点的 Cd 和 Pb 大气沉降通量分别为对照点的 29.2 倍和 29.4 倍。成永霞等^[25]研究表明, 该冶炼厂明显造成附近农田土壤 Cd 和 Pb 含量累积。据调查, 济源市缺乏铅锌矿产资源, 主要依靠外源矿石进行铅锌冶炼, 因此可以认为, 研究区 Cd 和 Pb 污染主要来源于冶炼厂排放。Cd 和 Pb 空间分布表现为

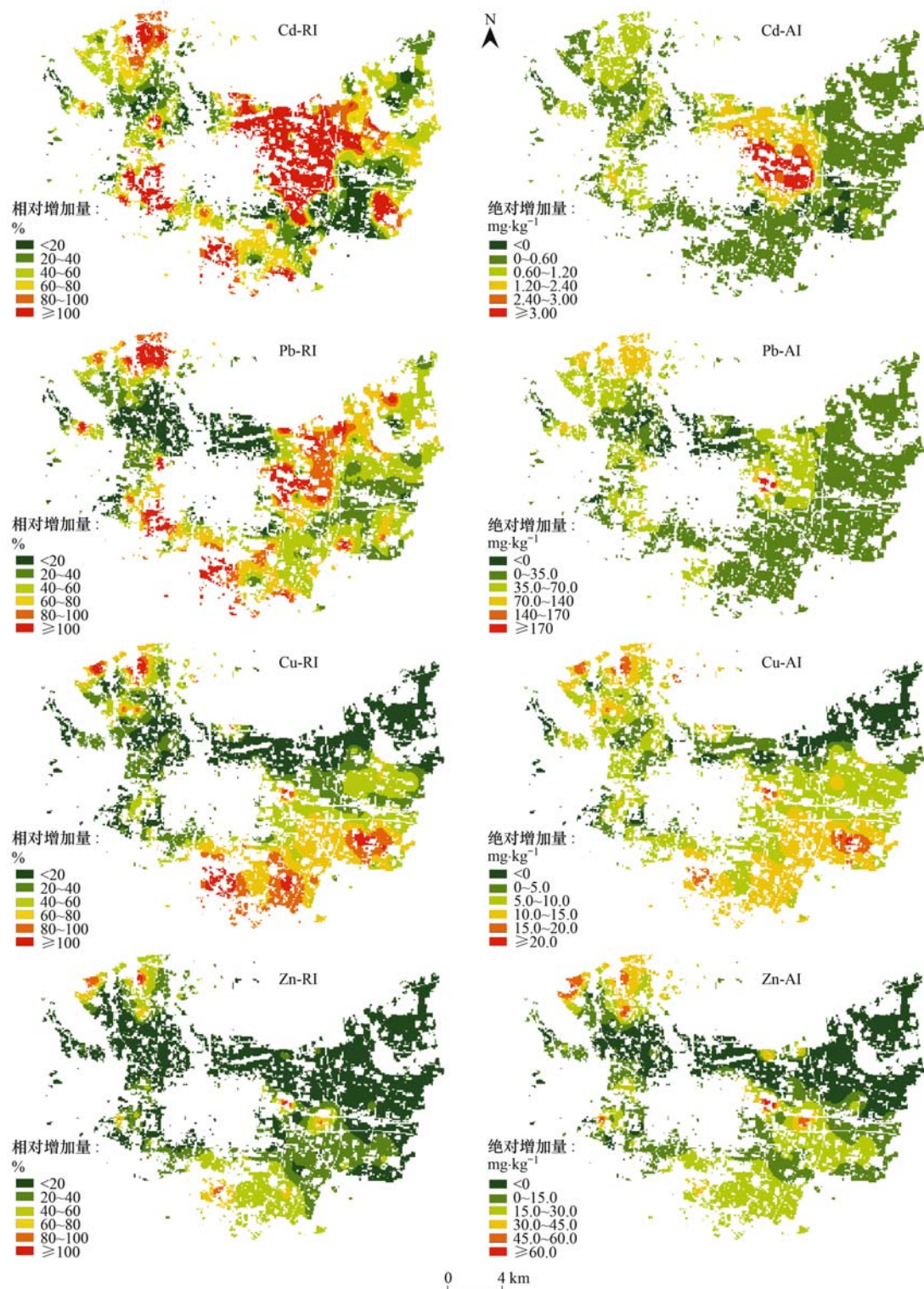


图3 土壤重金属含量相对增加量 (RI) 与绝对增加量 (AI) 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil heavy metal relative increments (RI) and absolute increments (AI)

由西北向东南逐渐降低,这可能是受当地风向的影响. PC2 得分高值区主要分布在研究区北部和西北部,与三大冶炼企业分布也基本一致,进一步说明研究区土壤 Cd 和 Pb 含量主要来源于工业污染. 另有研究表明我国土壤 Pb 含量容易受交通运输(汽车尾气和轮胎磨损)影响^[26, 27],但在本研究中,PC2 空间分布格局与交通运输在空间上差异较大. 所以,

PC2 代表工业污染源.

2011 年 Cu 和 Zn 在 PC1 和 PC2 均有较高的载荷,说明 Cu 和 Zn 含量可能受成土母质源和工业污染源共同影响. Cu 含量高值区主要分布在西北部, Zn 含量高值区主要分布在北部,成永霞等^[25]的研究表明当地铅冶炼活动与土壤 Cu 和 Zn 含量关系密切. 王洋洋等^[28]的研究也表明焦作某铅锌冶炼厂

表 2 研究区土壤重金属元素因子载荷				
Table 2 Factor matrix for heavy metals in soils of the study area				
重金属元素	2011 年		2017 年	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Cd	0.155	0.931	0.825	-0.087
Pb	0.076	0.938	0.881	-0.074
Cu	0.700	0.541	0.730	0.429
Zn	0.763	0.376	0.731	0.270
Cr	0.846	-0.238	0.046	0.938
Ni	0.714	0.185	0.080	0.959
特征根	3.11	1.49	2.85	1.76
贡献率/%	51.9	24.8	47.4	29.3
累计贡献率/%	51.9	76.7	47.4	76.7

造成周边农田 Cu 和 Zn 含量轻微污染. 另外, 研究区西部也分布着鑫鑫铜业等铜冶炼企业, 北部分布着豫光锌业等锌冶炼企业, 这些冶炼厂地理位置与

Cu 和 Zn 含量高值区空间分布基本一致, 因此 Cu 和 Zn 除受成土母质影响外, 还可能来源于有色金属冶炼.

2017 年 2 个主成分方差贡献率分别为 47.4% 和 29.3%. PC1(2017 年) 中 Cd、Pb、Cu 和 Zn 具有较高载荷. 与 2011 年相比, 2017 年 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量均有所增加, 说明这些元素受到人类活动的影响. PC1(2017 年) 得分高值区主要分布在北部和西北部的工业发展区, 受工业活动强烈影响, 与 2011 年 PC2 空间分布基本一致, 故 PC1(2017 年) 代表工业污染源. PC2(2017 年) 中 Cr 和 Ni 具有较高载荷. 与 2011 年相比, Cr 和 Ni 含量未表现出明显累积趋势, 空间分布与 2011 年 PC1 基本一致, 因此 PC2(2017 年) 代表成土母质源.

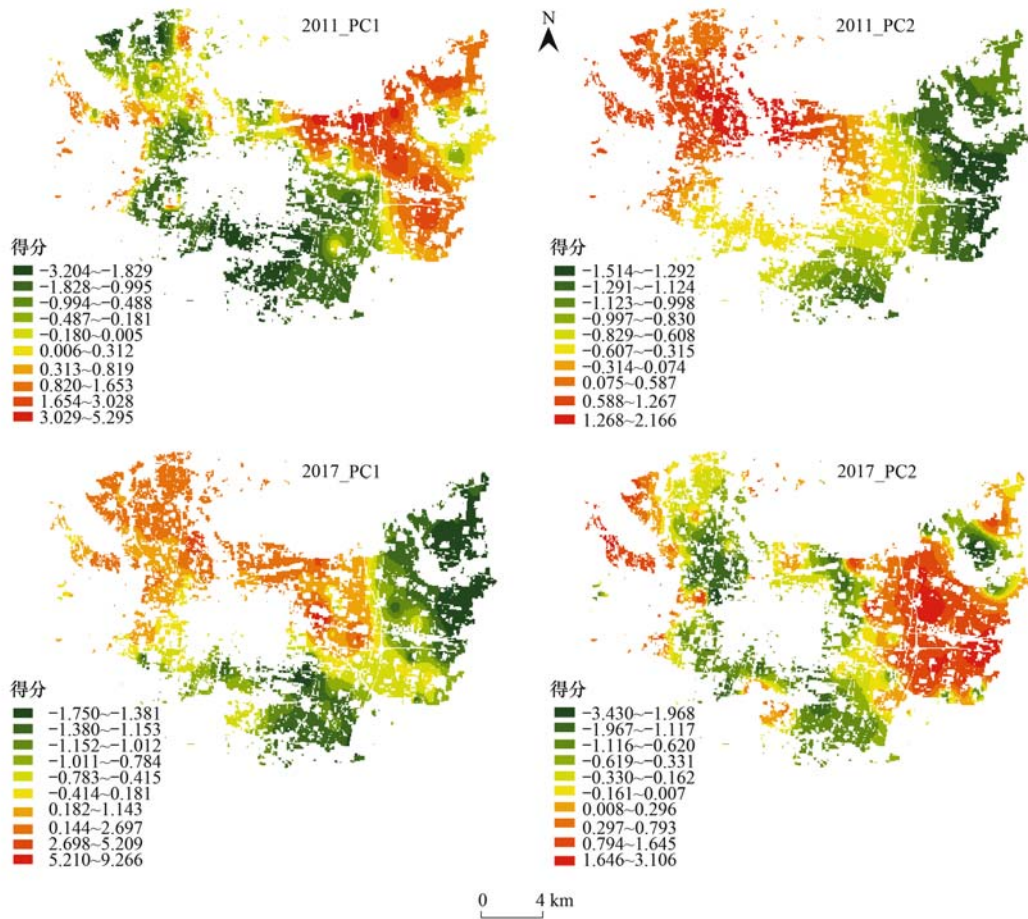


图 4 研究区 2011 年和 2017 年主成分因子得分空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of principal component factor score in 2011 and 2017 in the study area

2.4 各污染源对土壤重金属贡献率分析

在主成分分析基础上采用绝对主成分分数受体模型对 2011 年和 2017 年土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 污染来源进行定量化分析(图 5), 结果显示与 2011 年相比, 2017 年工业污染源对 Cd、Cu 和 Zn 贡献率分别增加 5.58%、10.4% 和 20.4%, 对 Pb 贡献率降低 19.7%, 说明 2 个时期期间, 研究区工业发展仍存在一

定程度的 Cd、Cu 和 Zn 污染, 但 Pb 污染在工业发展方面得到一定有效防控, 这可能与冶炼企业现有除尘技术难以去除 Cd、Cu 和 Zn 细颗粒有关. 卢一富等^[29]的研究表明该冶炼厂废气铅污染趋势达到有效控制, 但镉污染控制缺失, 本研究与其结果基本一致.

与 2011 年相比, 2017 年其它源对 Cd 和 Pb 贡

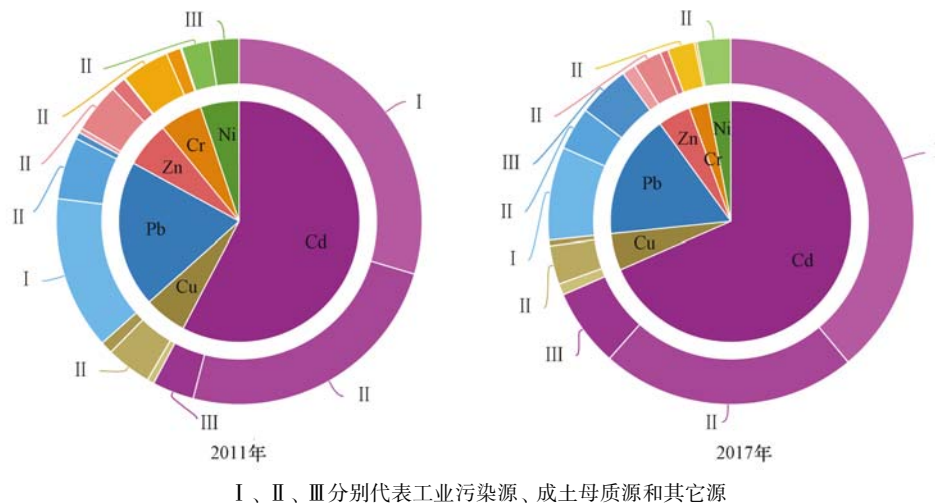


图5 各污染源对研究区土壤重金属含量贡献率

Fig. 5 Source contribution ratios of heavy metals in soils of the study area

献率分别增加 3.76% 和 24.8%, 说明随着社会发展, 当地逐渐出现其它 Cd 和 Pb 污染来源. 2011~2017 年, 研究区农用化肥施加量表现为先增加 5.9% (2011~2015 年) 后降低 3.6% (2015~2017 年), 农药施加量增加 8.0% (2011~2017 年), 故其它源可能包含化肥和农药. 在我国, 施加有机肥、化肥、农药等农业活动很容易造成土壤 Cu 和 Zn 污染^[30], 但本研究 2017 年其它源对 Cu 和 Zn 贡献率分别降低 9.27% 和 4.31%, 结合工业污染源对 Cu 和 Zn 贡献率的增加, 说明研究区土壤 Cu 和 Zn 含量主要受工业活动影响, 且日益加剧, 虽然目前未超过国家农田土壤风险筛选值, 但需给予足够重视.

3 结论

(1) 与 2011 年相比, 2017 年研究区土壤 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量累积趋势明显, 其中土壤 Cd 和 Pb 含量超标率增幅分别为 17.7% 和 3.39%.

(2) 2011 年和 2017 年土壤 Cd 和 Pb 含量空间格局相似, 呈现从西北向东南逐渐降低趋势, 且高值区在原有基础上向东扩展. 2011 年 Cu 和 Zn 含量在整体上表现为由北向南逐渐降低, 2017 年表现为由西北向东南逐渐降低.

(3) 2011 年和 2017 年土壤 Cd 和 Pb 主要来源均为工业排放. 相比于 2011 年, 2017 年工业污染源对土壤 Cd、Cu 和 Zn 污染贡献率增加, 对 Pb 污染则有所降低, 说明研究区土壤 Pb 污染管控取得一定效果. 其它源对土壤 Cd 和 Pb 污染贡献率均有所增加, 新的 Cd 和 Pb 污染来源需当地政府予以重视并加强防治.

参考文献:

- [1] Wang P, Chen H P, Kopittke P M, *et al.* Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 1038-1048.
- [2] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(2): 293-298.
Song W, Chen B M, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, **20**(2): 293-298.
- [3] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
- [4] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, **55**(2): 261-272.
Chen W P, Yang Y, Xie T, *et al.* Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(2): 261-272.
- [5] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [6] Zhang Y H, Hou D Y, O'Connor D, *et al.* Lead contamination in Chinese surface soils: source identification, spatial-temporal distribution and associated health risks [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, **49**(15): 1386-1423.
- [7] Yang Y, Christakos G, Guo M W, *et al.* Space-time quantitative source apportionment of soil heavy metal concentration increments [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 560-566.
- [8] Zhou X Y, Wang X R. Impact of industrial activities on heavy metal contamination in soils in three major urban agglomerations of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **230**: 1-10.
- [9] Hou D Y, O'Connor D, Nathanail P, *et al.* Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: a critical review [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 1188-1200.
- [10] Thurston G D, Spengler J D. Authors' reply [J]. *Atmospheric Environment*, 1987, **21**(1): 259-260.
- [11] Duodu G O, Goonetilleke A, Ayoko G A. Potential bioavailability assessment, source apportionment and ecological risk of heavy metals in the sediment of Brisbane River estuary, Australia [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **117**(1-2): 523-531.
- [12] Mummullage S, Egodawatta P, Ayoko G A, *et al.* Sources of hydrocarbons in urban road dust: identification, quantification

- and prediction[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 80-85.
- [13] Zhang L X, Zhu G Y, Ge X, *et al.* Novel insights into heavy metal pollution of farmland based on Reactive Heavy Metals (RHMs): pollution characteristics, predictive models, and quantitative source apportionment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **360**: 32-42.
- [14] 陈秀端, 卢新卫. 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2513-2521.
Chen X D, Lu X W. Source apportionment of soil heavy metals in city residential areas based on the receptor model and geostatistics[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- [15] Xing W Q, Cao E Z, Scheckel K G, *et al.* Influence of phosphate amendment and zinc foliar application on heavy metal accumulation in wheat and on soil extractability impacted by a lead smelter near Jiyuan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(31): 31396-31406.
- [16] Xing W Q, Zhao Q, Scheckel K G, *et al.* Inhalation bioaccessibility of Cd, Cu, Pb and Zn and speciation of Pb in particulate matter fractions from areas with different pollution characteristics in Henan Province, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **175**: 192-200.
- [17] Jiang N, Liu X H, Wang S S, *et al.* Pollution characterization, source identification, and health risks of atmospheric-particle-bound heavy metals in PM₁₀ and PM_{2.5} at multiple sites in an emerging megacity in the central region of China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, **19**(2): 247-271.
- [18] Xing W Q, Zheng Y L, Scheckel K G, *et al.* Spatial distribution of smelter emission heavy metals on farmland soil [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, **191**(2): 115.
- [19] Wu H Y, Yang F, Li H P, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soil near a smelter in an industrial city in China [J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2019, doi: 10.1080/09603123.2019.1584666
- [20] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3532-3539.
Wang M E, Peng C, Chen W P. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3532-3539.
- [21] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2014-04-17.
- [23] He M J, Shen H R, Li Z T, *et al.* Ten-year regional monitoring of soil-rice grain contamination by heavy metals with implications for target remediation and food safety [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 431-439.
- [24] Qiu K Y, Xing W Q, Scheckel K G, *et al.* Temporal and seasonal variations of As, Cd and Pb atmospheric deposition flux in the vicinity of lead smelters in Jiyuan, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, **7**(1): 170-179.
- [25] 成永霞, 赵宗生, 王亚洲, 等. 河南省某铅冶炼厂附近农田土壤重金属污染特征[J]. *土壤通报*, 2014, **45**(6): 1505-1510.
Cheng Y X, Zhao Z S, Wang Y Z, *et al.* Soil heavy metals pollution in the farmland near a lead smelter in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, **45**(6): 1505-1510.
- [26] Chen X, Xia X H, Zhao Y, *et al.* Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 640-646.
- [27] 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.
- [28] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 437-444.
Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 437-444.
- [29] 卢一富, 邱坤艳. 铅冶炼企业周边大气降尘中铅、镉、砷量及其对土壤的影响[J]. *环境监测管理与技术*, 2014, **26**(3): 60-63.
Lu Y F, Qiu K Y. The Quantum of Pb, Cd and As in the ambient air of lead smelting enterprises and their effects on soils [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2014, **26**(3): 60-63.
- [30] Liang J, Feng C T, Zeng G M, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **225**: 681-690.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvio-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)