

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.1

第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张显, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及耐药基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤钾空间分布及农作物钾富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪艺凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

基于 PMF 模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析

黄华斌^{1,2}, 林承奇², 胡恭任^{1*}, 于瑞莲¹, 郝春莉², 陈枫桦²

(1. 华侨大学化工学院, 厦门 361021; 2. 厦门华厦学院环境与公共健康学院, 厦门 361024)

摘要: 选取九龙江流域农田土壤为研究对象, 运用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)和原子荧光光谱(AFS)测定了土壤中重金属含量, 通过正定矩阵因子分析模型(PMF)解析农田土壤中重金属的主要来源。结果表明, 研究区域农田土壤中大部分金属相对福建省土壤环境背景值已存在一定程度的富集, 部分土壤中 Cd、Zn、Pb 和 Cu 含量超过农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618-2018), 且各金属在研究区不同区域(北溪流域、西溪流域和河口区)分布存在中等变异。Cr、Ni、Cu、Zn 和 Cd 的含量在北溪流域的龙岩区域较高, Pb 的含量在西溪流域较高, 而 Co、Hg 和 As 的含量在河口区域较高。正定矩阵因子分析模型(PMF)得出的源成分谱和源贡献率具有非负性质, 土壤中重金属实测值与模型预测值拟合曲线呈现较好相关性, 结果相对合理, 能满足研究需要。正定矩阵因子分析模型(PMF)解析得出: 研究区农田土壤中重金属主要来源有自然源、农业活动、燃煤释放和工业活动, 其对农田土壤中重金属的综合贡献率分别为 37.0%、26.7%、17.6% 和 18.7%。

关键词: 农田土壤; 正定矩阵因子分析模型(PMF); 重金属; 源解析; 九龙江流域

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0430-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907156

Source Apportionment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization

HUANG Hua-bin^{1,2}, LIN Cheng-qi², HU Gong-ren^{1*}, YU Rui-lian¹, HAO Chun-li², CHEN Feng-hua²

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. College of Environment and Public Health, Xiamen Huaxia University, Xiamen 361024, China)

Abstract: In order to study the source apportionment of heavy metals in agricultural soils of the Jiulong River Basin, Fujian Province, China, 71 agricultural soil samples were collected in July 2017. The concentrations of heavy metals in agricultural soils were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and atomic fluorescence spectrometry (AFS). Here, we use a positive matrix factorization (PMF) model for the source apportionment of heavy metals in the sampled soils. The results showed that most of the heavy metal concentrations in the sampled agricultural soils were higher than soil background concentrations for the Fujian Province. The concentrations of Cd, Zn, Pb, and Cu in some soil samples were greater than the screening value of the Chinese soil pollution risk levels for agricultural land (GB 15618-2018). The spatial distributions of heavy metals showed a moderate variation across three regions of the study area (i.e., the North River watershed, West River watershed, and the estuary area). The highest concentration of Cr, Ni, Cu, Zn, and Cd were found in Longyan City (North River watershed), the highest concentrations of Pb were found in the West River watershed, and the highest concentrations of Co, Hg, and As were found in the estuary area. The non-negative properties of the source component spectrum and source contribution rate (obtained by the PMF model), as well as the significant correlation between the measured and PMF predicted concentrations, indicated that the results of the PMF model were relatively reasonable and can meet research needs. The source apportionment results of the PMF model showed that natural sources, agricultural sources, coal combustion, and industrial sources were the four major potential sources for heavy metals in the sampled agricultural soils, contributing 37.0%, 26.7%, 17.6%, and 18.7%, respectively.

Key words: agricultural soils; positive matrix factorization (PMF); heavy metals; source apportionment; Jiulong River Basin

从我国的《全国土壤污染状况调查公报》可知, 当前我国土壤环境存在污染问题, 其中耕地土壤环境质量堪忧^[1]。而在众多污染物中, 重金属因具有毒性、生物蓄积性且难以降解等特性而成为一类重要的污染物^[2]。近年来, 随着经济社会的快速发展, 工业化和城市化进程不断推进, 土壤重金属污染已引起了众多学者的极大关注^[3~5]。农田土壤是农作物生长的基础, 其在农业经济发展中占有重要地位。在农业生产过程中, 农药和化肥等的大量使用以及污水灌溉的劳作方式都会导致重金属进入农田土壤并在其中累积^[6,7]。累积在农田土壤中的重金属一方面会影响土壤的理化性质, 导致土壤养分损失和

功能退化, 从而影响作物生长^[5,8]。例如, 当 Cd 含量较高时会抑制水稻的生长^[9]; 另一方面, 土壤中重金属可通过直接暴露途径(手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触)或食物链途径(土壤-农作物-人体)对人体健康产生潜在危害^[10~12]。一般来说, 土壤中重金属主要有自然源和人为源。其中, 自然源主要是土壤母质^[13]; 而人为源则比较复杂, 金属工业、采矿、汽

收稿日期: 2019-07-17; 修订日期: 2019-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(21777049); 福建省自然科学基金项目(2011J01273); 环境地球化学国家重点实验室开放基金项目(SKLEG2016901)

作者简介: 黄华斌(1983~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: hhhb@hxxy.edu.cn

* 通信作者, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

车尾气、农业活动、燃煤以及大气沉降等都可能成为土壤中重金属的人为源^[14~16]。2019 年开始实施的《中华人民共和国土壤污染防治法》对我国土壤污染防治有着里程碑式的意义。查明农田土壤中重金属污染来源是实施源头治理的一个重要环节,其对农田土壤重金属污染防治、农业经济发展以及人体健康风险评估等具有重要意义。

多元统计分析结合地质统计学方法已被广泛应用于分析土壤中重金属的分布及来源^[14,17,18]。目前,常用受体模型对研究污染区进行源解析,主要有已知源成分谱方法如化学质量平衡法(CMB)和未知源成分谱方法如正定矩阵因子分析模型(PMF)、主成分多元线性回归(APCS-MLR)和 UMIX 模型等^[19]。如前所述,土壤中重金属来源复杂且难以确定,故常采用未知源成分谱的解析方法。正定矩阵因子分析模型(PMF)最早于 20 世纪 90 年代被应用于大气颗粒物的源解析^[20],并于近年来被应用于土壤、沉积物和水生系统中,是一种操作简单有效的新型源解析方法^[14,17,21]。

有研究指出,我国南方水稻田土壤重金属已存在不同程度的富集^[22]。福建省是我国南部的产粮大省,其农田土壤已存在重金属污染^[23]。九龙江流域是福建省西南部主要水稻种植区,但该区域农田土壤中重金属的来源及贡献率尚未有报道。本文以闽西南九龙江流域农田土壤为研究对象,通过分析农田土壤中重金属元素含量,探讨其空间分布,并运用正定矩阵因子分析模型(PMF)解析农田土壤中重金属来源及贡献率,以期为该区域农田土壤重金属污染防治及经济可持续发展提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

九龙江流域(24°24' N ~ 25°53' N, 116°47' E ~ 118°02' E)位于福建省西南部,其流域面积(1.47 万 km²)约为福建省陆域面积(12.4 万 km²)的 11.9%。该流域属于亚热带季风湿润气候,降水丰富,森林覆盖率高。九龙江流域主要土壤类型是红壤等地带性土壤,其次是水稻土等人为性土壤,土地利用类型主要为森林(70%)、耕地(18%)、城市及住宅用地(5%)等^[24]。九龙江流域主要包含龙岩市、漳州市和厦门市等地,现有人口 500 多万,该流域农业经济发达,在福建省农业经济发展中具有重要地位。双季水稻是该区域的主要作物之一^[23]。本文选取九龙江流域(北溪流域、西溪流域和河口区域)农田土壤为研究对象,该区域水稻土主要沿河分布^[24]。

1.2 样品采集与预处理

2017 年夏季,采集了九龙江北溪流域(主要是龙岩市区域)、西溪流域(主要是漳州市区域)和河口区(主要是厦门市和龙海市区域)共 71 个农田土壤样品(图 1)。根据土壤监测技术规范,采集水稻种植耕作层土壤(表层 20 cm)。以梅花布点采集混合样约 1 kg。所有土壤样品于室温下自然风干,剔除植物根等杂物后置于玛瑙研钵中轻轻研磨并将研磨后土壤样品过 200 目尼龙筛,筛下样保存备用。

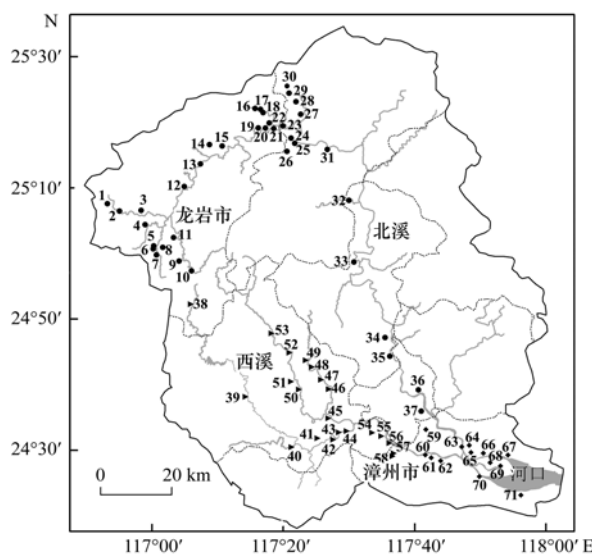


图 1 九龙江流域农田土壤采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of agricultural soils in the Jiulong River Basin

1.3 土壤中重金属含量测定及质量控制

土壤中重金属 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量采用混酸消解提取。准确称取 0.2000 g 预处理后的土壤样品于消解罐中,依次加入 2 mL 氢氟酸、2 mL 盐酸和 6 mL 硝酸进行微波消解,消解液赶酸后其中重金属元素含量用电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司 7700x 型)测定。土壤中重金属 As 和 Hg 的含量采用王水水浴消解提取。准确称取 0.2000 g 预处理后的土壤样品于消解管中,加入 10 mL 现配王水,摇匀放置过夜后置于沸水水浴消解 2 h,消解液中重金属含量用原子荧光光谱仪(北京吉天仪器公司,AFS-820 型)测定。

为确保实验结果的准确性和精密性,进行全程试剂空白以减少试剂误差;每批次抽取 10% 的样品进行平行样测定,相对标准偏差控制在 $\leq 5\%$;同步分析土壤标准物质 GBW07405,各元素相对误差控制在 $\leq 10\%$;ICP-MS 测定时用 Rh 和 Ge 作为内标校正以减少仪器误差,内标回收率控制在 80% ~ 120%。各元素的检出限见表 1。

1.4 正定矩阵因子分析模型

本研究中,采用 EPA PMF 5.0 进行源解析。根

表 1 土壤中重金属检出限/mg·kg⁻¹

Table 1 Detection limits for the examined heavy metals in soils/mg·kg⁻¹

元素	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
检出限	0.03	0.01	0.01	0.02	0.2	0.03	0.01	0.02	0.002

据 PMF 5.0 用户指南,PMF 模型的基本公式如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p (G_{ik} \times F_{kj}) + E_{ij} \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}}{U_{ij}} \right) \quad (2)$$

$$U_{ij} = \begin{cases} \frac{5}{6} \times \text{MDL}, & c \leq \text{MDL} \\ \sqrt{(\delta \times c)^2 + \text{MDL}^2}, & c > \text{MDL} \end{cases} \quad (3)$$

式中, X 为样品的含量矩阵; G 为源贡献率矩阵; F 为源成分谱矩阵; E 为残差矩阵; Q 为 PMF 定义的目标函数,当 Q 值接近数据集的自由度时表示拟合结果较理想; U 为不确定度;MDL 为检出限; δ 为相对标准偏差; c 为元素含量; i 表示第 i 个样品; j 表示第 j 种元素; k 表示第 k 种潜在源; p 表示一共 p 种潜在源; n 表示一共 n 个样品; m 表示一共 m 种元素.

2 结果与讨论

2.1 农田土壤中重金属含量及分布特征

各重金属在研究区农田土壤中含量(mg·kg⁻¹)分别为:Cr(61.8±21.8)、Co(13.9±6.1)、Ni(12.9±5.2)、Cu(35.1±15.6)、Zn(152±64)、As(10.2±2.2)、Cd(0.34±0.16)、Pb(72.3±27.6)和 Hg(0.167±0.041).与福建省土壤环境背景值^[25]相比,除 Ni 元素外,其余元素的总平均含量均超出福建省土壤环境背景值.根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018),农田土壤中 Cd、Zn、Pb 和 Cu 的含量分别有 32.4%、15.5%、14.1% 和 12.7% 超过农用地土壤污染风险筛选值,可能存在农用地土壤污染风险;而 Cr、Ni、As 和 Hg 的含量均低于农用地土壤污染风险筛选值.

根据九龙江支流分布情况,可将图 1 中采样点 1~37 区域划分为北溪流域;将采样点 38~58 划分为西溪流域;将采样点 59~71 划分为河口区域,各区域农田土壤中重金属含量统计见图 2.通常可以用农田土壤中重金属含量的变异系数来表征重金属元素在不同区域的分异程度,研究区农田土壤中重金属元素的变异系数均在 0.2~0.5 范围内,说明重金属为中等变异^[26].分析重金属元素在各区域农田土壤中的分布可知,Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As 和 Cd 元素最高值均出现在北溪区域,含量分别为 111、

34.8、25.5、81.3、438、16.9 和 0.92 mg·kg⁻¹;Pb 和 Hg 元素最高值出现在西溪区域,其含量分别为 168 mg·kg⁻¹ 和 0.286 mg·kg⁻¹.从图 2 可以看出,重金属含量最高值并不能代表其在流域内的空间分布,例如 Co 元素最高值出现在北溪区域,但各区域 Co 元素的平均含量为河口区域>西溪区域>北溪区域.为了更好地了解重金属在研究区的分布特征,采用 Kriging 插值法进行分析.该方法可用于表征重金属元素在一定区域的空间变异性,已被广泛应用于评估土壤中重金属^[27].运用 ArcGIS 10.2 软件对九龙江流域农田土壤中重金属元素含量进行 Kriging 插值分析,结果见图 3.从结果可知,Cu、Zn、Cd 在各区域的空间分布趋势为北溪区域>西溪区域>河口区域;Cr 在各区域的空间分布趋势为北溪区域>河口区域>西溪区域;Pb 在各区域的空间分布趋势为西溪区域>河口区域>北溪区域;Co、Ni 在各区域的空间分布趋势为河口区域>北溪区域>西溪区域;As、Hg 在各区域的空间分布趋势为河口区域>西溪区域>北溪区域.

2.2 农田土壤中重金属来源解析及相对贡献

2.2.1 相关性分析

重金属污染防治的一个关键问题是明确重金属污染来源.重金属元素之间的相关性可以提供一些重金属来源的信息^[28].研究区农田土壤中重金属含量的 Pearson 相关系数分析结果见表 2.

Pb、Zn 和 Cd 两两之间呈显著性正相关($P < 0.01$),说明这些元素可能有相似的来源;Cr、Ni、Cu 和 Zn 之间两两呈显著性正相关($P < 0.01$),说明这些元素可能有相似的来源;Co 与 As 和 Hg 之间呈显著性正相关($P < 0.01$),说明这几个元素的来源之间可能具有相似性.

2.2.2 PMF 解析重金属来源及相对贡献

为进一步分析九龙江流域农田土壤中重金属的来源,采用正定矩阵因子分析模型(PMF)进行源解析.采用 EPA PMF 5.0 进行源解析,因为土壤中重金属来源解析属于未知源成分谱的解析方法,需要设置因子数,因子数设置过多或过少均会对解析结果造成误差.因此,需要通过多次运行调试,最终实现 Q 值最小化,以得到最优解析结果,确定最终因子数及其相对贡献.本研究中,经过多次运行调试,最终确定 4 个因子,进行 20 次迭代运算,得到较低

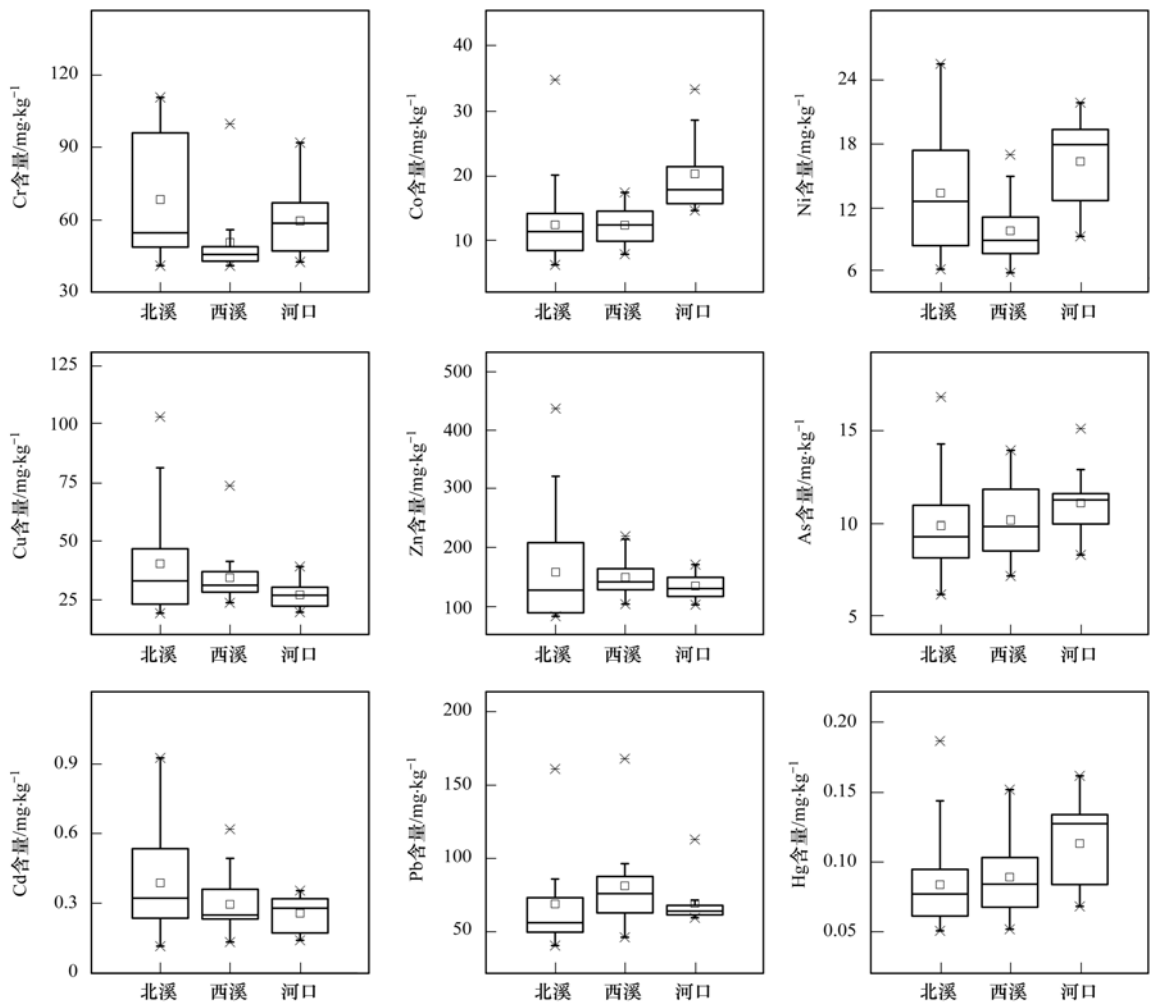


图2 农田土壤中重金属含量
Fig. 2 Contents of heavy metals in agricultural soils

表2 研究区农田土壤重金属 Pearson 相关系数¹⁾

Table 2 Pearson's correlation coefficient of heavy metals in agricultural soils of the study area									
	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
Cr	1								
Co	0.077	1							
Ni	0.801 **	0.492 **	1						
Cu	0.562 **	0.256 *	0.476 **	1					
Zn	0.385 **	0.095	0.369 **	0.531 **	1				
As	0.022	0.328 **	0.196	0.168	0.283 *	1			
Cd	0.393 **	-0.066	0.302 *	0.438 **	0.783 **	0.229	1		
Pb	-0.001	-0.045	0.058	-0.035	0.468 **	0.133	0.487 **	1	
Hg	-0.036	0.472 **	0.208	0.107	0.081	0.12	-0.052	0.067	1

1) ** 表示在 .01 水平 (双侧) 上显著相关; * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

的 Q 值为 92.7, 且所有残数值均在 $-3 \sim 3$ 之间, 计算结果趋于稳定. 通过正定矩阵因子分析模型 (PMF) 进行源解析, 实测含量值与模型预测值之间的拟合结果见表 3, 除了 Cu 元素拟合曲线的 R^2 为 0.57 外, 其余元素的 R^2 均大于 0.70, As 的 R^2 更是达到了 0.96, 说明 PMF 模型整体解析效果较好, 所选择的因子数能较充分解释原始数据所包含的信息, 能较好满足源解析的需要^[29].

根据正定矩阵因子分析模型 (PMF) 解析结果, 各来源因子对各重金属的相对贡献率见图 4. 从源解析结果可知, 因子 1 对 Cr、Ni、Cu 和 Zn 的相对贡献较高, 其对 Cr 和 Ni 的贡献率分别达到 55.6% 和 51.3%. 从前述讨论可知, 农田土壤中 Ni 的平均含量略低于福建省土壤环境背景值, Cr 和 Cu 的平均含量分别为背景值的 1.5 和 1.6 倍, 相对其他元素含量更接近背景值. 且因子 1 对各重金属元素均有

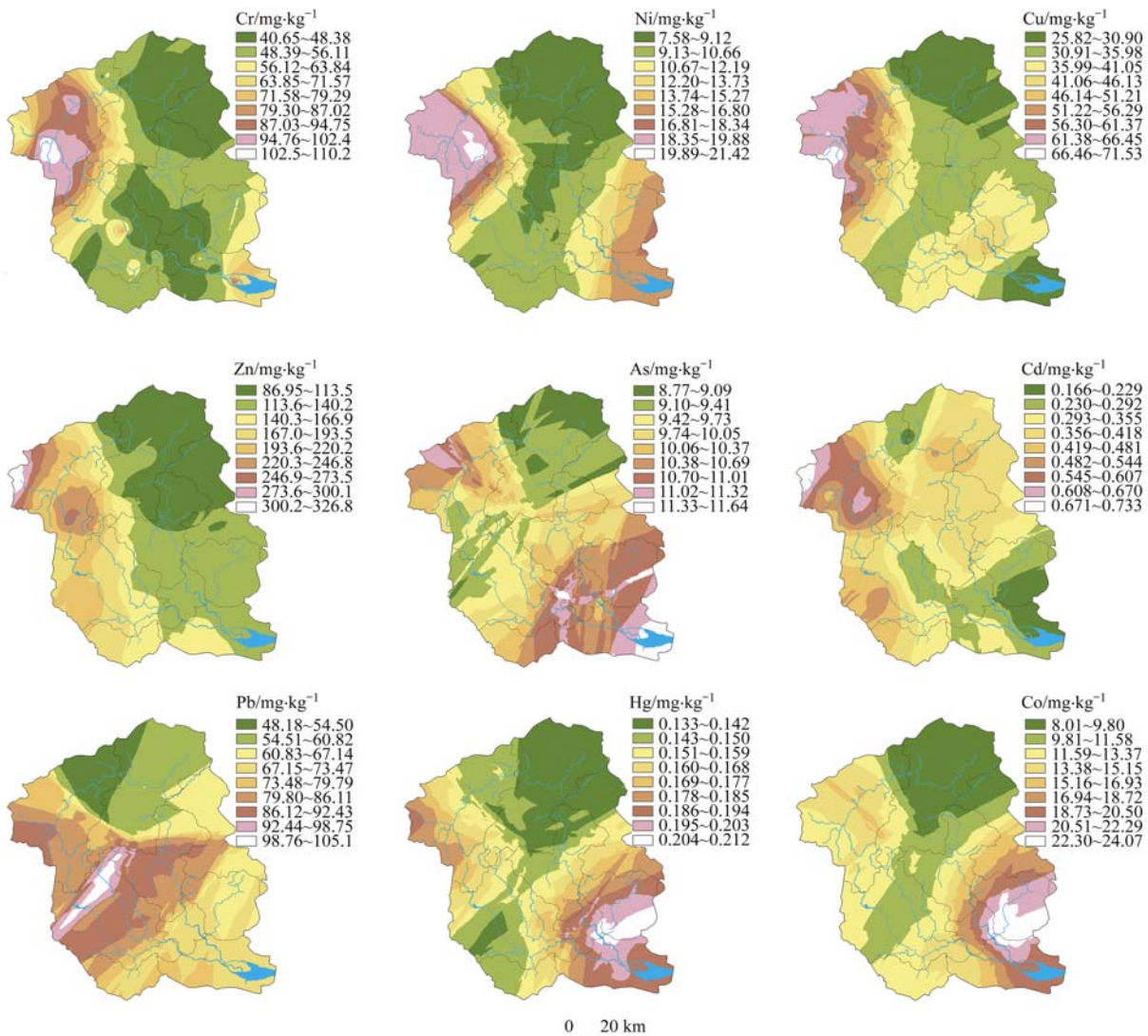


图3 农田土壤中重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals in agricultural soils

一定的贡献率,其范围为 17.8%~55.7%,因此,可认为因子 1 代表自然源;结合图 3 农田土壤中重金属空间分布可知,Cr、Ni、Cu 和 Zn 的较高值均出现在北溪流域的龙岩区域.该区域地处闽西,矿产资源丰富,分布有金、铜、铁、锰和铅锌等矿种^[30].该区域土壤母质中可能含有较高的 Cr、Ni、Cu 和 Zn 等元素,农田土壤中 Cr、Ni、Cu 和 Zn 等均表现为:龙岩区域含量较高的趋势可能正是受到土壤母质的影响,另一方面说明因子 1 可能代表自然源.因子 2 对 Cd、Pb 和 Zn 的相对贡献较高,其对 Cd 和 Pb 的贡献率分别达到 49.9% 和 40.9%.有研究表明,肥料和农药中通常含有 Zn、Cd 和 Pb 元素,且 Cd 可指示农药和化肥等农业活动的影响^[31].同时,也有研究表明 Pb 可能来源于汽车尾气排放^[32],结合九龙江流域环境情况,汽车尾气不是九龙江沉积物中 Pb 的主要来源^[33].汽车尾气排放主要通过大气沉降的方式进入土壤和沉积物中,因此可推断汽车尾气也不

是农田土壤中 Pb 的主要来源,因此,可认为因子 2 代表农业活动源.因子 3 对 Co 和 Hg 的相对贡献较高,其贡献率分别达到 48.5% 和 40.5%.有研究表明,Hg 主要来源于燃煤等化石燃料燃烧^[34].Co 元素在燃煤过程释放的产物中含量也较高^[35].从前述讨论可知,较高含量的 Co 和 Hg 主要出现在河口流域,区域环境调查结果表明河口区域周边分布有燃煤电厂等工业,较高的 Co 和 Hg 含量可能是受其影响.因此,可认为因子 3 代表燃煤释放.因子 4 对 As 的相对贡献较高,其贡献率为 50.9%.有研究表明,As 可能与工业排放和污水污泥等工业活动有关^[36].从前述讨论可知,较高含量的 As 主要出现在河口流域,该区域分布有工业活动区,较高的 As 含量可能受其影响.因此,可认为因子 4 代表工业活动源.

综上,九龙江流域农田土壤中重金属主要来源为自然源、农业活动、燃煤释放和工业活动,通过

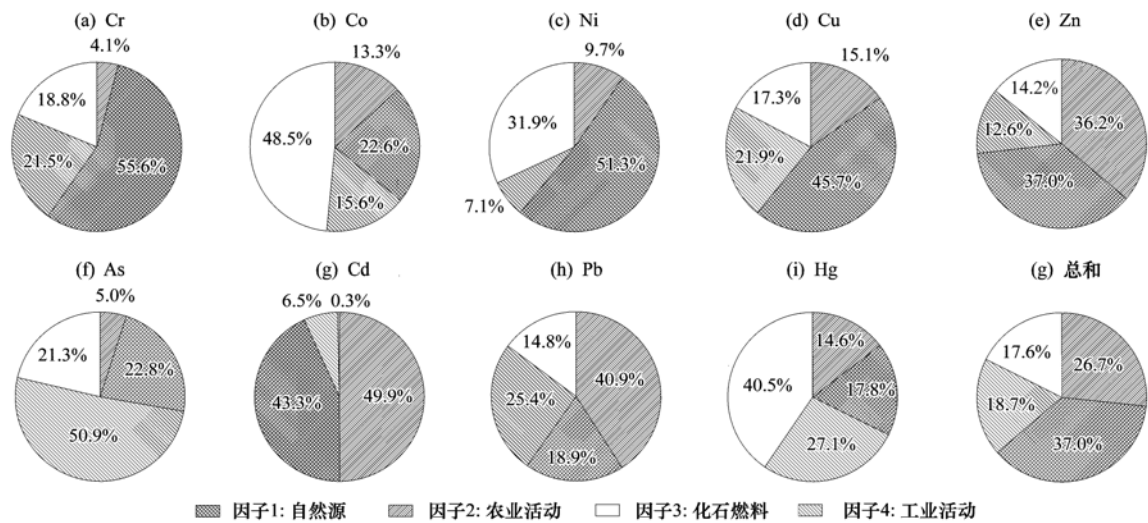


图 4 不同来源对农田土壤中重金属的贡献率

Fig. 4 Contribution rates of different sources to heavy metals in agricultural soils

计算各来源对重金属的综合贡献率可知,这 4 种来源的综合贡献率分别为 37.0%、26.7%、17.6% 和 18.7%。从这一结果可以看出,正定矩阵因子分析模型(PMF)得出的源成分谱和源贡献率具有非负性质,结果相对合理。

表 3 元素测定值与 PMF 模型预测值拟合结果

Table 3 Fitting result of the determined contents and the predicted contents by PMF model

元素	斜率	截距	R ²
Cr	0.94	2.55	0.86
Co	0.52	5.31	0.70
Ni	0.77	2.36	0.80
Cu	0.41	15.99	0.57
Zn	0.62	48.15	0.74
As	0.85	1.5	0.96
Cd	0.87	0.03	0.86
Pb	0.84	8.77	0.81
Hg	0.92	0.01	0.84

3 结论

(1) 九龙江流域农田土壤中重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别为:Cr(61.8 ± 21.8)、Co(13.9 ± 6.1)、Ni(12.9 ± 5.2)、Cu(35.1 ± 15.6)、Zn(152 ± 64)、As(10.2 ± 2.2)、Cd(0.34 ± 0.16)、Pb(72.3 ± 27.6)和Hg(0.167 ± 0.041)。除 Ni 元素外,其余元素的平均含量均超出福建省土壤环境背景值。各重金属元素在研究区不同区域(北溪流域、西溪流域和河口区)分布存在中等变异,其中 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Cd 的含量在北溪流域的龙岩区域较高,Pb 的含量在西溪流域含量较高,而 Co、Hg 和 As 的含量在河口区域含量较高。

(2) 运用正定矩阵因子分析模型(PMF)解析得出研究区农田土壤中重金属主要来源有 4 个,分别为自然源、农业活动、燃煤释放和工业活动。其中,

自然源对 Cr、Ni、Cu 和 Zn 的相对贡献较高,分别为 55.6%、51.3%、45.7% 和 37.0%;农业源对 Cd、Pb 和 Zn 的相对贡献较高,分别为 49.9%、40.9% 和 36.2%;燃煤释放对 Co 和 Hg 的相对贡献较高,分别为 48.5% 和 40.5%;工业活动对 As 的相对贡献较高,为 50.9%。自然源、农业活动、燃煤释放和工业活动对农田土壤中重金属的综合贡献率分别为 37.0%、26.7%、17.6% 和 18.7%。

(3) 正定矩阵因子分析模型(PMF)得出的源成分谱和源贡献率具有非负性质,土壤中重金属实测值与模型预测值拟合曲线呈现较好相关性,结果相对合理。

参考文献:

[1] 王玉军,刘存,周东美,等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1465-1473.

Wang Y J, Liu C, Zhou D M, et al. A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in China: Discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1465-1473.

[2] 王振中,张友梅,邓继福,等. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1948-1952.

Wang Z Z, Zhang Y M, Deng J F, et al. Enrichment and toxicity effect of heavy metals in soil ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(10): 1948-1952.

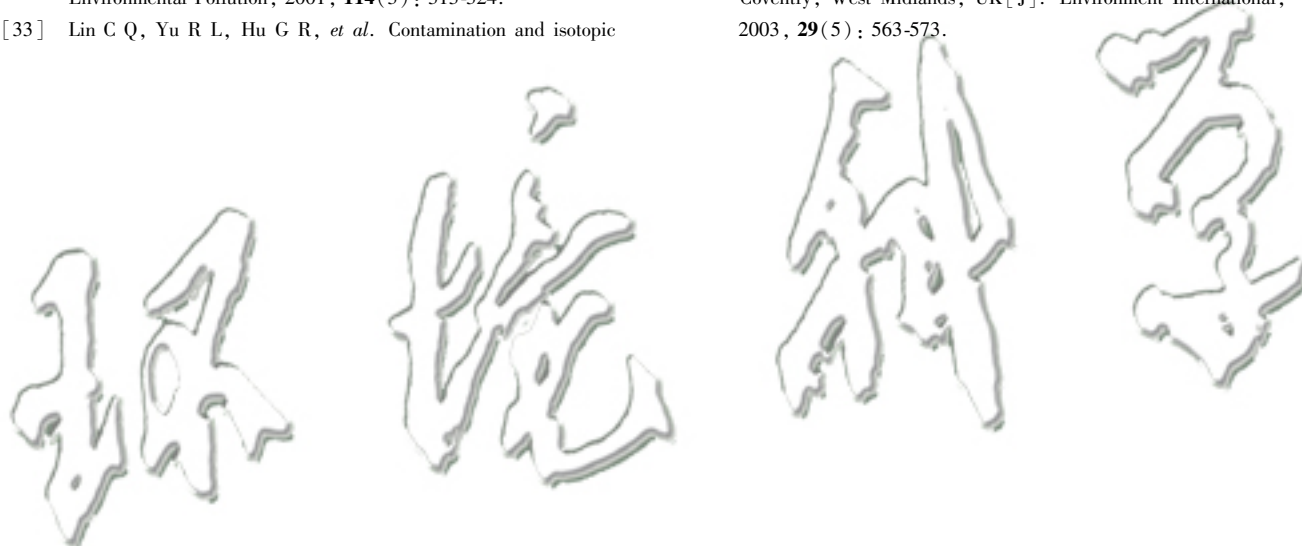
[3] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. Science of The Total Environment, 2018, 642: 690-700.

[4] 李一蒙,马建华,刘德新,等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1037-1044.

Li Y M, Ma J H, Liu D X, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng

- City, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [5] 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.
- [6] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 692-703.
- Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, *et al.* Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 692-703.
- [7] Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **207**: 159-168.
- [8] Zhang C, Nie S, Liang J, *et al.* Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **557-558**: 785-790.
- [9] 彭鸥, 李丹阳, 刘寿涛, 等. 镉胁迫对水稻生长发育的影响及伤流液与稻米镉含量的相关性研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(1): 76-82.
- Peng O, Li D Y, Liu S T, *et al.* Effects of cadmium stress on rice growth and correlation between bleeding sap and cadmium content in rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(1): 76-82.
- [10] Bhatia A, Singh S, Kumar A. Heavy metal contamination of soil, irrigation water and vegetables in peri-urban agricultural areas and markets of Delhi [J]. *Water Environment Research*, 2015, **87**(11): 2027-2034.
- [11] Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 712-723.
- [12] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- Chen F, Dong Z Q, Wang C C, *et al.* Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- [13] Liu J Y, Liang J, Yuan X Z, *et al.* An integrated model for assessing heavy metal exposure risk to migratory birds in wetland ecosystem: A case study in Dongting Lake Wetland, China[J]. *Chemosphere*, 2015, **135**: 14-19.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 等. 天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1095-1101.
- Xu M M, Liu A F, Shi R G, *et al.* Characteristics of heavy metals pollution of farmland and the leaching effect of rainfall in Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1095-1101.
- [17] Chen H Y, Teng Y G, Chen R H, *et al.* Contamination characteristics and source apportionment of trace metals in soils around Miyun Reservoir [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(15): 15331-15342.
- [18] 尹国庆, 江宏, 王强, 等. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(1): 96-104.
- Yin G Q, Jiang H, Wang Q, *et al.* Analysis of the sources and characteristics of heavy metals in farmland soil from a typical district in Anhui Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(1): 96-104.
- [19] 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.
- [20] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [21] Chen H Y, Teng Y G, Li J, *et al.* Source apportionment of trace metals in river sediments: a comparison of three methods[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **211**: 28-37.
- [22] 尚二萍, 张红旗, 杨小唤, 等. 我国南方四省集中连片水稻田土壤重金属污染评估研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(4): 1469-1478.
- Shang E P, Zhang H Q, Yang X H, *et al.* Assessment of soil heavy metal of paddy field in four provinces in southern China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1469-1478.
- [23] 陈穗玲, 李锦文, 陈南, 等. 福建沿海地区不同区域稻田土壤重金属元素富集特征与环境质量评价[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(2): 34-40.
- Chen S L, Li J W, Chen N, *et al.* Fujian coastal areas in different regions of paddy soil heavy metal elements enrichment characteristics and assessment of environmental quality [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(2): 34-40.
- [24] Chen N W, Wu J Z, Chen Z H, *et al.* Spatial-temporal variation of dissolved N_2 and denitrification in an agricultural river network, southeast China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **189**: 1-10.
- [25] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 1992, **13**(4): 70-75.
- Chen Z J, Chen C X, Liu Y Q, *et al.* Study on soil environmental background values in Fujian Province [J]. *Environmental Science*, 1992, **13**(4): 70-75.
- [26] Phil-Eze P O. Variability of soil properties related to vegetation cover in a tropical rainforest landscape[J]. *Journal of Geography and Regional Planning*, 2010, **3**(7): 177-184.
- [27] Yang Y, Christakos G. Uncertainty assessment of heavy metal soil contamination mapping using spatiotemporal sequential indicator simulation with multi-temporal sampling points [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(9): 571.
- [28] Guo G H, Wu F C, Xie F Z, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(3): 410-418.
- [29] 宁翠萍, 李国琛, 王颜红, 等. 细河流域农田土壤重金属污

- 染评价及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(3): 487-495.
- Ning C P, Li G C, Wang Y H, *et al.* Evaluation and source apportionment of heavy metal pollution in Xihe watershed farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(3): 487-495.
- [30] 刘兰英, 涂杰峰, 黄薇, 等. 福建闽西矿区周边土壤 Cd、Pb、Cr 含量及风险评价[J]. 福建农业学报, 2017, **32**(1): 68-74.
- Liu L Y, Tu J F, Huang W, *et al.* Monitoring and risk assessment on heavy metals in soil at a mining area in Fujian[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **32**(1): 68-74.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Lin C Q, Yu R L, Hu G R, *et al.* Contamination and isotopic composition of Pb and Sr in offshore surface sediments from Jiulong River, Southeast China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 644-650.
- [34] 王帅, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江河口表层沉积物中重金属污染评价及来源[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(10): 1110-1118.
- Wang S, Hu G R, Yu R L, *et al.* Pollution assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments from Jiulong River Estuary[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(10): 1110-1118.
- [35] 王文峰, 秦勇, 宋党育. 燃煤电厂中微量元素迁移释放研究 [J]. 环境科学学报, 2003, **23**(6): 748-752.
- Wang W F, Qin Y, Song D Y. Study on the mobility and release of trace elements in coal-fired power plant [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(6): 748-752.
- [36] Charlesworth S, Everett M, McCarthy R, *et al.* A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK [J]. *Environment International*, 2003, **29**(5): 563-573.



CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshangang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)