

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.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琚(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文辉, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张凤雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氧胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

太湖运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析

李伟迪¹, 崔云霞^{1*}, 曾撑撑², 朱永青¹, 彭月¹, 王凯¹, 李士俊¹

(1. 南京师范大学环境学院, 南京 210023; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:为探明太湖运河流域农田土壤重金属污染分布特征及主要影响因素, 保证土壤环境质量及农产品安全. 采集并分析了太湖运河流域 118 个农田表层土壤样品中 Cr、Hg、As、Cu、Zn、Ni、Pb 和 Cd 等 8 种重金属元素含量. 以太湖流域土壤背景值为评价标准, 利用单因子指数和内梅罗指数评价土壤重金属污染状况, 利用多元统计分析与地统计相结合的方法, 对土壤重金属空间分布及来源进行解析. 结果表明: 8 种重金属元素 (Cr、Hg、As、Cu、Zn、Ni、Pb 和 Cd) 的平均含量分别为 63.25、0.25、7.83、35.24、77.25、31.48、38.37 和 0.16 mg·kg⁻¹, 除 Cr 和 As 外, 其余元素含量均超过太湖流域土壤背景值. 土壤样点重金属含量多低于国家农用地土壤污染风险筛选值. 内梅罗综合指数显示 87.29% 样点的土壤重金属呈现轻度污染, 5.93% 样点呈现中度污染, 6.78% 样点呈现重度污染, 整体已经超过警戒值, 处于轻度污染状态. 流域农田土壤中 Hg、Cu、Zn、Pb 和 Cd 受到农业活动和大气沉降的共同影响; Cr 和 Ni 则受成土母质以及工业生产活动的共同影响; As 则主要来源于成土母质.

关键词:太湖运河流域; 土壤重金属; 空间分布; 污染评价; 来源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-5073-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201903252

Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley

LI Wei-di¹, CUI Yun-xia^{1*}, ZENG Cheng-cheng², ZHU Yong-qing¹, PENG Yue¹, WANG Kai¹, LI Shi-jun¹

(1. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To determine the distribution characteristics of heavy metal pollution in farmland soils and related influencing factors in the Taige canal valley, and guarantee soil environmental quality and safety of agricultural products, 118 topsoil samples were collected from the Taige canal valley's farmland soils, and contents of chromium (Cr), mercury (Hg), arsenic (As), copper (Cu), zinc (Zn), nickel (Ni), lead (Pb), and cadmium (Cd) were measured. A single factor index and comprehensive index were used to assess soil heavy metal contamination with the soil background value of the Taihu Lake basin as the evaluation standard. The multivariate statistical analysis and the geostatistical analysis were combined to identify and apportion the pollution sources of soil heavy metals. The results showed that: The average concentrations of Cr, Hg, As, Cu, Zn, Ni, Pb, and Cd in soils were 63.25, 0.25, 7.83, 35.24, 77.25, 31.48, 38.37, and 0.16 mg·kg⁻¹, respectively, all of which except for Cr and As were higher than the local soil background values. The content of each heavy metal in most soil samples were lower than the risk screening values for soil contamination of agricultural land. The comprehensive index showed that the degree of pollution of soil heavy metals were at a slightly polluted level in 87.29%, moderately polluted level in 5.93%, and severely polluted level in 6.78% of the sampling. Hg, Cu, Zn, Pb, and Cd in the watershed soil were affected by agricultural activities and atmospheric deposition. Cr and Ni were affected by the parent material and industrial production activities. As was mainly derived from the parent material.

Key words: Taige canal valley; soil heavy metal; spatial distribution; pollution assessment; source apportionment

近年来, 土壤重金属污染已成为世界性的环境问题, 农田土壤重金属因关系到农产品质量和人体健康, 而受到广泛关注^[1~6]. 长江三角洲地区农耕历史悠久, 工业化程度高, 是我国工农经济最为发达的地区之一, 农田土壤重金属污染时有发生^[7]. 徐兰等人对苏南农田土壤重金属开展研究, 发现 Cd 含量明显高于江苏土壤背景值, Pb 主要来源于大气沉降^[8]; 王成等人评价苏州地区表层水稻土重金属污染状况, 发现多数重金属元素含量明显高于当地土壤背景值, 其中 Cd 和 Hg 的污染程度最为突出^[9]; 杨彦等对常州市某农业活动区农田表层、中层和底层土壤重金属进行评价, 发现 Cd 和

Pb 的超标率较高, 对于农田土壤污染较为严重^[10].

当前长江三角洲农田土壤重金属含量呈现逐年累积趋势, 污染也日趋复杂化, 土壤重金属污染形式严峻^[7]. 而要开展有效的土壤重金属污染防治工作, 最首要和关键的问题是明确重金属的来源. 自然条件下, 土壤重金属主要受成土母质影响, 而农业生产活动中灌溉、农药化肥施用以及人类活动造成的大气沉降等也是土壤重金属污染的主要来

收稿日期: 2019-03-28; 修订日期: 2019-05-31

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07202-004-001)

作者简介: 李伟迪 (1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向环境规划与管理, E-mail: 1198368181@qq.com

* 通信作者, E-mail: 445112237@qq.com

源^[11~14]. 在识别土壤重金属来源中多元统计分析和地统计分析得到了广泛地应用^[15~18].

太漏运河流域为长江三角洲太湖流域典型农业区, 工农业经济发达, 但有关农田土壤重金属的相关报道较少. 因此, 本研究选取太漏运河流域农田土壤中 Cr、Hg、As、Cu、Zn、Ni、Pb 和 Cd 这 8 种重金属元素作为分析对象, 以太湖流域土壤背景值为基准, 利用单因子指数和内梅罗指数评价土壤重金属污染状况. 并在评价农田土壤重金属状况的基础上, 结合地统计和多元统计分析, 明确土壤重金属的空间分布特征与污染来源, 以期以太漏运河流域农田土壤污染综合防治及污染修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太漏运河位于常州市武进区南部, 是武进区“三横三纵”骨干河道之一, 是贯通漏湖和太湖的主要水力通道, 也是太湖主要入湖河流之一. 太漏运

河与武宜运河、锡溧漕河、永安河等地区主要水系关联, 具有引排水、通航、灌溉等多种水体功能^[19]. 太漏运河流域共覆盖前黄镇和雪堰镇共 27 个行政村及一个圩区, 总面积约 115 km², 常住人口约 10.89 万人. 本研究区位于长江三角洲太湖平原, 常年气候温和, 雨量充沛, 农业生产活动发达, 主要农作物有水稻、小麦、瓜果蔬菜和油菜等; 工业较为发达, 主要以冶金、机械制造、纺织、电镀为主^[10,20].

1.2 样品采集

2018 年 5 月, 采用网格布点法对研究区进行土壤采样布点, 为充分考虑样点的典型性和代表性, 在农业生产活动较为密集的区域, 进行加密布点, 共布设农田土壤表层样点 118 个, 采样点分布见图 1. 土壤样点多以耕地为主, 涵盖瓜果、林木、苗木、蔬菜等其他主要用地类型, 利用多点采样法采集 0~20 cm 表层土壤样品, 等量混合后用四分法取约 1 kg 装入聚乙烯密封袋内, 并用 GPS 记录实地坐标^[18].

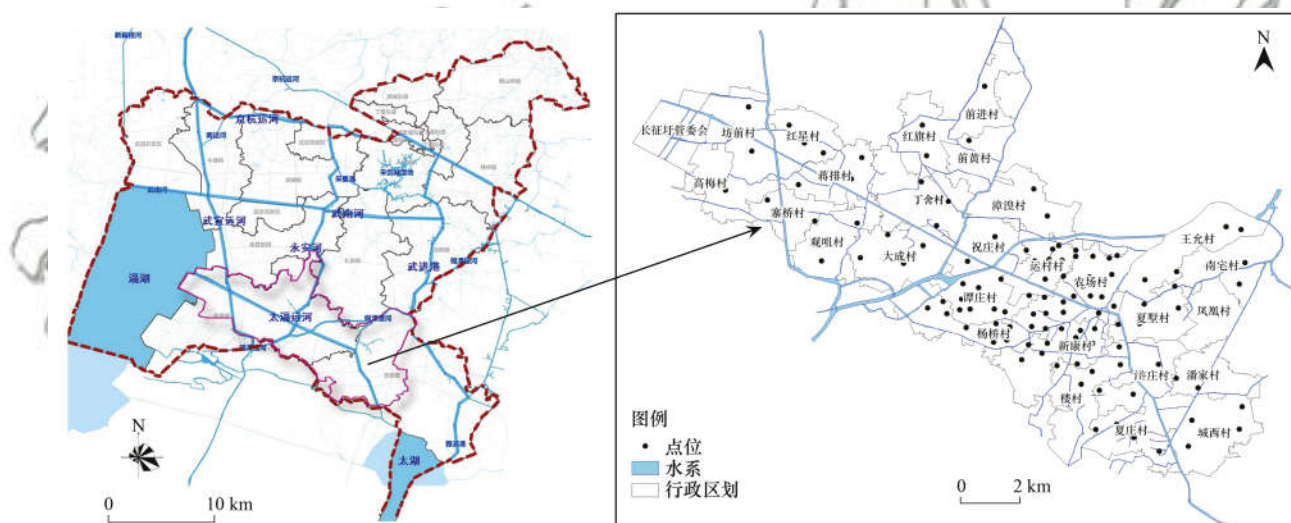


图 1 太漏运河流域区位及采样点分布示意图

Fig. 1 Location of Taige canal valley and the distribution of sampling points

1.3 样品测定

土壤样品在室内风干, 研磨前去除碎石与植物残体等杂物, 过 0.149 mm 尼龙筛. 采用 pH 计测定土壤样品的 pH(水土比, 2.5:1), 经过 HNO₃-HCl-HF-HClO₄ 法消解后, 供 8 种重金属项目测定: 原子荧光光谱法(HG-AFS)测定土壤 As、Hg 含量, 石墨炉原子吸收分光光度法(GF-AAS)测定 Cd、Pb 含量, 火焰原子吸收分光光度法(F-AAS)测定 Cu、Zn、Ni、Cr 含量^[5,21]. 样品分析所用试剂均为优级纯, 分析过程采用国家一级土壤标准物质进行全程质量控制, 测定结果均在误差允许范围内.

1.4 评价方法

以太湖流域土壤元素背景值^[22]作为污染评价

参考值, 采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法, 对研究区土壤重金属污染状况进行评估. 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^[23,24].

单因子指数法:

$$P_i = C_i/S_i$$

内梅罗指数法:

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

式中, P_i 为重金属元素 i 的单因子污染指数, 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($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，这里以太湖流域土壤环境背景值为标准。 $P_{\text{综}}$ 为所有重金属元素的内梅罗综合污染指数， $P_{i,\text{max}}$ 为单因子污染指数的最大值， $\bar{P}_i$ 为单因子污染指数的平均值。土壤污染程度分级标准详见表 1。

表 1 土壤污染程度分级标准

Table 1 Standard for grading of soil pollution levels		
分级	单因子指数法 (P_i)	内梅罗污染指数法 ($P_{\text{综}}$)
1	无污染 ($P_i \leq 1$)	安全 ($P_{\text{综}} \leq 0.7$)
2	轻微污染 ($1 < P_i \leq 2$)	警戒线 ($0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$)
3	轻度污染 ($2 < P_i \leq 3$)	轻度污染 ($1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$)
4	中度污染 ($3 < P_i \leq 5$)	中度污染 ($2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$)
5	重度污染 ($P_i > 5$)	重度污染 ($P_{\text{综}} > 3.0$)

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 23.0 对土壤重金属含量、污染指数、聚类 and 主成分进行统计与分析；采用 ArcGIS 10.3 对土壤采样点、重金属空间分布、主成分得分进行作图与分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量描述

土壤重金属含量描述性统计结果见表 2。太滬运河流域农田土壤 pH 均值为 5.35，范围在 3.58 ~ 8.16，其中 pH 小于 6.0 的点位占 80.51%，表明流域农田土壤 pH 以酸性为主。土壤中 Cr、Hg、As、Cu、Zn、Ni、Pb 和 Cd 等的平均含量分别为 63.25、0.25、7.83、35.24、77.25、31.48、38.37 和 0.16

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，除 Cr 和 As 外，Hg、Cu、Zn、Ni、Pb 和 Cd 等 6 种重金属含量均超过太湖流域土壤背景值，超背景值倍数分别为 0.53、0.55、0.06、0.08、0.88、0.38 倍。8 种重金属元素超背景值点位比例分别为 48.31%、81.36%、33.05%、99.15%、45.76%、57.63%、96.61% 和 66.95%，超背景程度依次为 $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{As}$ 。与《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中农用地土壤污染风险筛选值^[25]相比，Cr、As 和 Ni 并不存在超标点位，Hg、Cu、Zn、Pb 和 Cd 等 5 种重金属元素超标率分别为 0.85%、0.85%、0.85%、3.39% 和 5.08%，Pb 和 Cd 的超标情况相对较重，这与杨彦等人的研究结果较为一致^[10,26]。

土壤中 8 种重金属元素变异系数介于 0.21 ~ 0.97 之间，变异程度大小为 $\text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{As}$ ，其中 Pb、Hg 和 Cd 变异系数达到 0.5 以上，属于高变异，Zn、Cr、Cu、Ni 和 As 变异系数在 0.2 ~ 0.5 之间，属于中等变异，表明太滬运河流域内农田土壤受人类活动影响可能性大。通常情况下，微量元素在自然背景中含量很低^[27]。除 As 外，其余元素的偏度系数均为正，数据呈现右偏离；除 As、Ni 外，其余元素峰度系数呈现高峰态，数据分布较为集中；Cr、Ni 呈正态分布，其余元素经对数转换后进行 K-S 检验仍不具备正态特征，表明流域内农田土壤受到人为活动的影响，出现重金属不断富集的现象。

表 2 太滬运河流域土壤重金属描述性统计特征

Table 2 Descriptive statistical characteristics for heavy metals in the soil of the Taige canal valley									
项目	最小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差	变异 系数	偏度系数	峰度系数	K-S 检验	太湖流域土壤背景值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Cr	20.00	157.00	63.25	18.48	0.29	0.95	4.30	0.200	65.72
Hg	0.042	1.490	0.25	0.18	0.72	4.37	25.11	0	0.163
As	3.88	11.80	7.83	1.68	0.21	-0.24	-0.39	0.034	8.8
Cu	21.00	86.00	35.24	9.07	0.26	3.00	13.03	0	22.78
Zn	1.90	301.00	77.25	33.04	0.43	3.06	17.84	0	73.02
Ni	17.00	49.00	31.48	7.00	0.22	0.17	-0.67	0.061	29.12
Pb	4.60	269.00	38.37	37.22	0.97	5.61	31.86	0	20.39
Cd	0.03	0.87	0.16	0.10	0.63	3.88	21.39	0	0.116
pH	3.58	8.16	5.35	0.93	0.17	0.71	0.47	/	/

2.2 土壤重金属空间分布特征

利用 GIS 地统计分析的插值技术可以将离散的数据点转化为面，实现从点状数据到面状数据的表达，更加直观地反映土壤重金属的空间变异特征^[18]。由于流域内土壤重金属元素多呈非正态分布，因此选用反距离权重(inverse distance weighted, IDW)插值法^[3]，明确空间分布特征。通过图 2 可

以看出，Cr 和 Ni 的分布格局相似，其高值主要分布于流域上中游南部以及下游北部等区域，低值主要分布在流域北部边缘的红旗村和前进村等村庄。流域北部 Hg 和 Cu 含量明显高于南部，高值主要集中于流域北部边缘的漳湟村和运村村。流域内 Cd 和 Pb 空间分布较为均匀，高值集中在流域中部的运村村和新康村。流域下游的 As 元素含量明显高

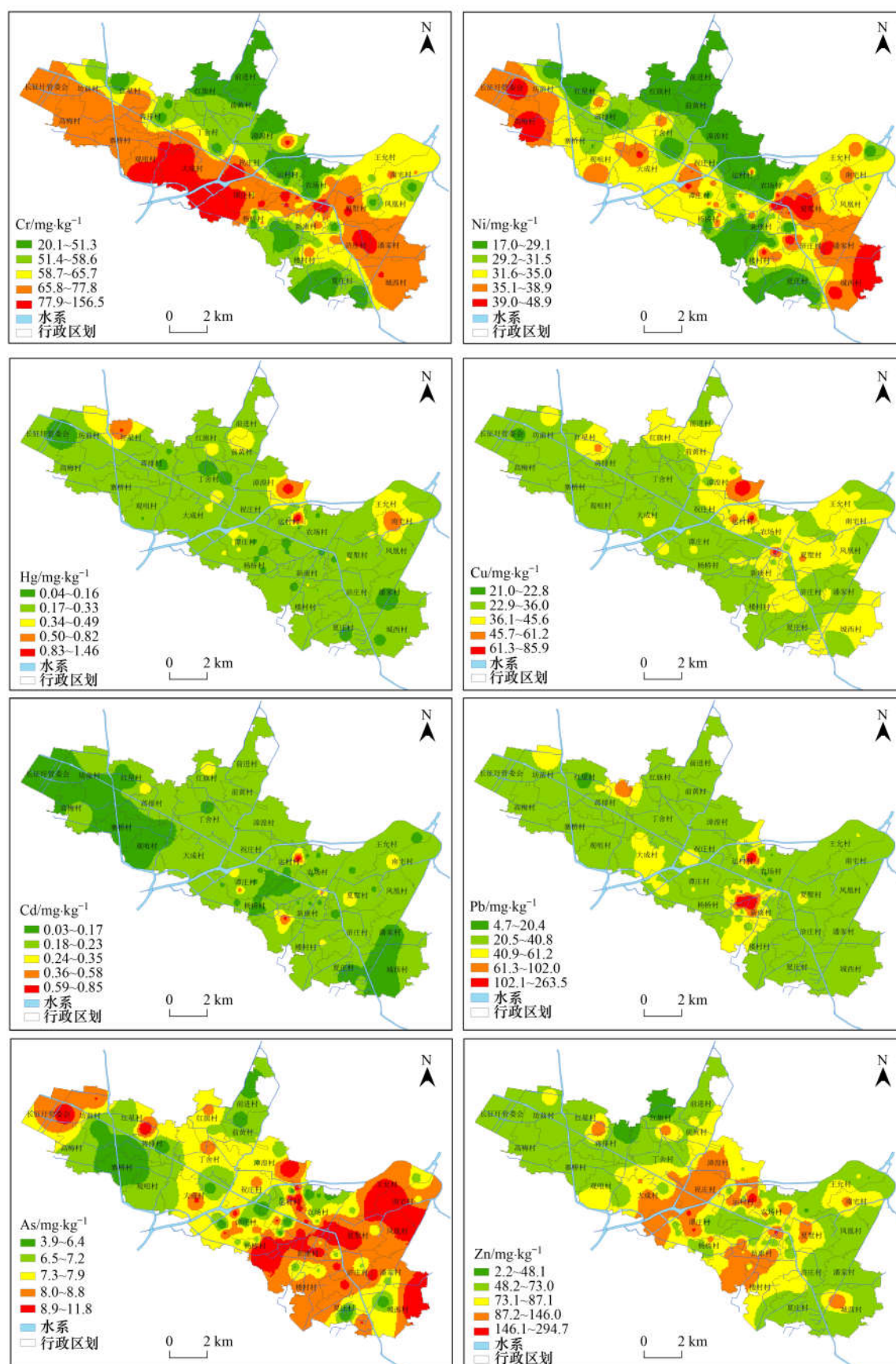


图2 土壤重金属空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in soil

于上游, 高值集中分布在南宅村、夏墅村和凤凰村等村庄. 流域中部地区 Zn 含量明显高于其他地区, 高值主要集中在运村村、谭庄村和祝庄村等村庄.

2.3 土壤重金属污染评价

根据 P_i 和 $P_{\text{综}}$ 的评价标准, 对采样点土壤重金属不同污染级别所占比例进行分析(表 3). 通过 P_i 可以看出, 8 种重金属元素污染程度为 $\text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{As}$, 其中 Pb、Hg、Cu、Cd、Ni 和 Zn 等 6 种重金属元素处于轻微污染, Cr 和 As 处于无污染状态. Cr、As 和 Ni 等 3 种重金属元素

污染样点均处于轻微及轻度污染状态, 并不存在中度和重度污染点位, 而 Hg、Cu、Zn、Pb 和 Cd 等 5 种重金属元素则出现中度及重度污染样点, 分别占总样点的 3.39%、2.54%、0.85%、3.39% 和 3.38%. 通过 $P_{\text{综}}$ 可以看出, 流域内所有农田土壤样点均已超过警戒值, 整体处于轻度污染状况, 其中轻度污染、中度污染、重度污染样点比例分别为 87.29%、5.93% 和 6.78%, 表明太滷运河流域农田土壤受到一定程度的重金属污染, 需要在日后的农业生产上加以重视.

表 3 太滷运河流域土壤重金属评价指数(P_i)结果

Table 3 Statistics for evaluation indices (P_i) for the soil of the Taige canal valley

元素	均值	不同污染级别样点比例/%				
		无	轻微	轻度	中度	重度
Cr	0.96	51.69	47.46	0.85	0	0
Hg	1.56	18.64	65.25	12.71	0.85	2.54
As	0.89	66.95	33.05	0	0	0
Cu	1.55	0.85	94.07	2.54	2.54	0
Zn	1.06	54.24	42.37	2.54	0.85	0
Ni	1.08	42.37	57.63	0	0	0
Pb	1.88	3.39	82.2	11.02	0.85	2.54
Cd	1.36	33.05	57.63	5.93	1.69	1.69
$P_{\text{综}}$	1.85	0(安全)	0(警戒线)	87.29(轻度)	5.93(中度)	6.78(重度)

2.4 土壤重金属源解析

环境学领域中常将多元统计分析中的聚类分析与主成分分析相结合研究土壤重金属来源^[28,29]. 本研究中对土壤重金属数据进行 Z-score 标准化处理后, 采用平方欧式距离测定数据之间的距离, 基于组间联接法进行 R 型聚类, 绘制 8 种重金属元素的树状图(图 3). 聚类距离代表重金属元素间的密切程度, 值越小, 表明元素间关系越密切^[4]. 根据聚类距离可以将 8 种重金属归为 3 类, 其中 Zn、Cd、Hg、Cu 和 Pb 是 I 类, As 是 II 类, Cr 和 Ni 是 III 类,

I 类可以分为 3 个小类, Zn 和 Cd 是 I_1 类, Hg 和 Cu 是 I_2 类, Pb 是 I_3 类.

主成分分析通过降维的方式将多个变量归结为相互独立的综合因子, 分析识别环境中污染物的来源^[10]. KMO 检验和 Bartlett 球形检验(KMO 为 0.7, $P < 0.05$)说明变量之间相关性较强, 适合进行主成分分析. 基于主成分方法, 采用 Kaiser 标准化的正交旋转法提取因子, 采用最大方差法对因子载荷矩阵进行正交旋转(表 4), 共提取了 3 个主成分因子, 主成分因子的累积贡献率为 73.91%, 可以反映原始数据的大部分信息.

表 4 土壤重金属元素主成分分析结果¹⁾

Table 4 Results of principle component analysis for heavy metals in soil

项目	因子		
	PC1	PC2	PC3
Cr	0.086	0.946	-0.090
Hg	0.760	-0.141	0.190
As	0.261	0.127	0.938
Cu	0.717	0.203	0.231
Zn	0.863	0.167	-0.006
Ni	0.061	0.886	0.298
Pb	0.637	0.119	0.058
Cd	0.824	-0.045	0.208
特征值	3.00	1.80	1.11
方差贡献率/%	37.51	22.50	13.91
累积贡献率/%	37.51	60.00	73.91

1) 黑体字表示因子载荷 > 0.5

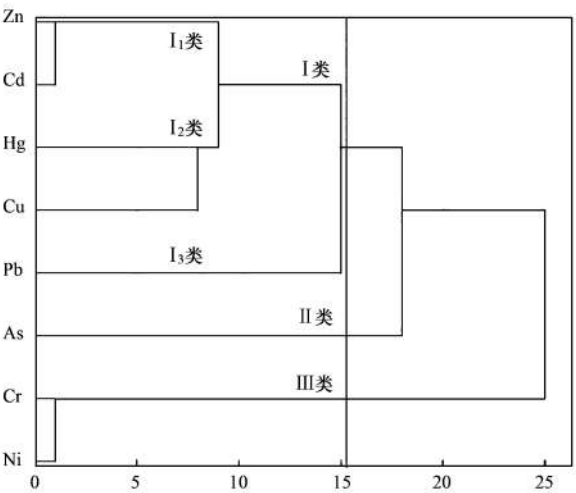


图 3 重金属聚类分析树状图

Fig. 3 Dendrogram results of hierarchical cluster analysis for heavy metals

为更好判别主成分, 利用 IDW 法进行空间插值, 明确主成分得分空间分布(图 4), 并结合聚类分析结果与流域内道路以及工业企业分布等信息, 识别土壤重金属来源。

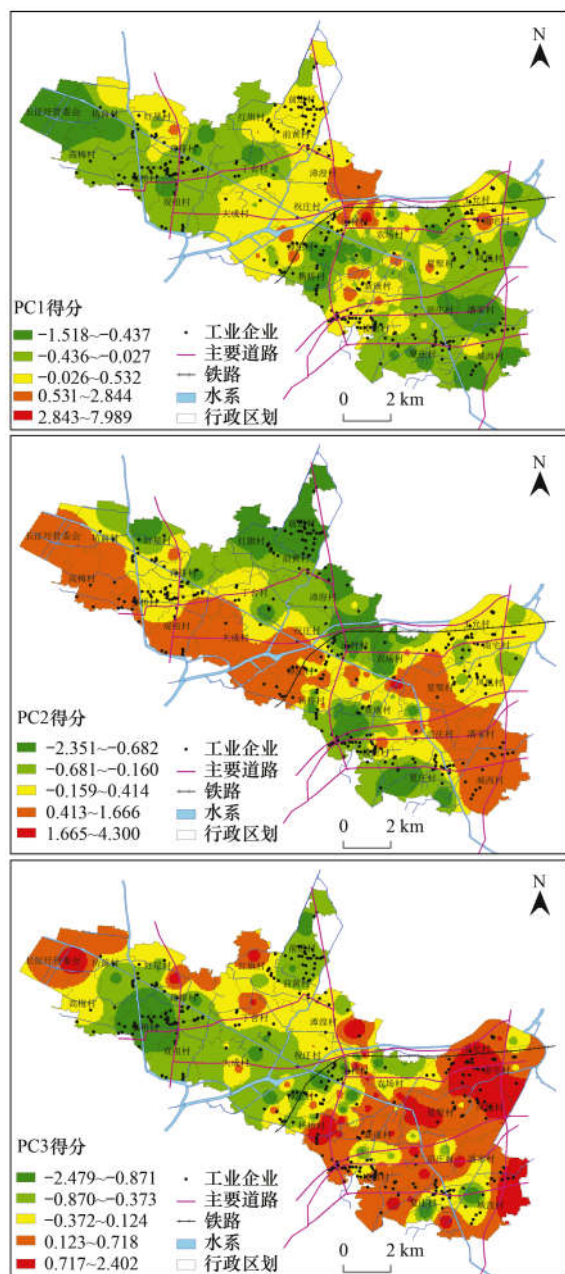


图 4 土壤重金属元素各主成分空间插值

Fig. 4 Spatial interpolation of principal components of heavy metals

第一主成分的贡献率为 37.51%, Hg、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的因子载荷较高, 聚类同为 I 类。相关研究表明, 多元统计分析中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的组合表征人类活动的影响, Hg 也多受人类活动影响^[30-32], 因此可将该主成分判定为人类活动影响。

虽然 Hg、Cu、Zn、Pb 和 Cd 在第一主成分具有较大的载荷, 但可能受到不同人为源的影响。太湖流域内实施稻麦轮作, 长期施用尿素和磷肥等

增加土壤肥力, 相关肥料中 Cd 和 Pb 含量较高^[33]。流域内畜禽养殖业发达, 存在动物粪便等有机肥料施用的情况。Cu 和 Zn 常作为畜禽饲料的微量元素添加剂, 用来防治疾病和促进生长, 然而饲料中 95% 以上的 Cu 和 Zn 不会被畜禽吸收, 随粪便排出体外^[15], 用于农田土壤培肥。Cu、Hg、Cd 和 Zn 等是农药的重要组成元素, 流域内农药过量投入的现象虽有所改善, 但其绝对量仍较高^[10], 加上长时间的积累, 重金属的富集效应更加明显。此外, 污水灌溉也是造成土壤重金属富集的原因, 太湖流域水体中 Hg 和 Cd 呈普遍污染状态^[34], 而流域内长期使用周边河道受污染水体进行灌溉, 导致农田土壤重金属不断富集。结合图 4 中 PC1 得分, 发现流域北部由于耕作时间比南部早, PC1 得分明显较高, 河流周边农田土壤 PC1 得分较其他区域较高。此外, 经实地走访发现漳湟村、王允村和谭庄村等村庄种植面积和畜禽养殖规模较其他村庄较高, PC1 得分也较高, 进一步验证 PC1 受到流域农业生产活动的影响。

大气沉降现已成为区域农田土壤重金属的重要来源^[35]。流域内工业发达, 需要大量的燃煤作为能源支撑, 并且拥有沪宜高速、常泰高速等快速通道, 交通运输频繁。Hg 是燃煤排放的标志物, 并在大气中具有较强的稳定性和可移动性, 可通过大气干湿沉降进入土壤^[15,16]。煤炭燃烧和汽车尾气排放是土壤中 Pb 的重要来源, 虽然我国已经全面禁用含铅汽油, 但是汽车尾气对于土壤中 Pb 的累积影响依然存在。Zn 常用作汽车轮胎硬度添加剂, Cu 用来制备汽车散热器, 轮胎和散热器的磨损, 会产生含 Cu、Zn 的粉尘从而进入土壤^[14,15,29]。公路沿线土壤重金属的相关研究表明, Pb 和 Cd 的含量存在较强的相关性, 并且沪宁高速(常州段)两侧农田土壤重金属 Pb、Cd 和 Cu 已受到不同程度的污染^[10,36]。主要道路周边和工业分布较为密集的区域 PC1 得分相对高, 验证了大气沉降对于流域农田土壤重金属的影响。因此, 流域内农田土壤中 Hg、Cu、Zn、Pb 和 Cd 主要是通过大气沉降及农业活动等途径进入农田土壤, 属于人类活动造成的复合污染。

第二主成分的贡献率为 22.50%, Cr 和 Ni 的因子载荷分别高达 0.946、0.886, 并且聚为 II 类。通常来说, 土壤中 Cr 和 Ni 主要来源于成土母质, 受人为影响较小^[37]。但是流域中 50% 左右的土壤样点中 Cr 和 Ni 含量超过土壤背景值, 处于受污染的状态, 因此判断流域农田土壤中 Cr 和 Ni 除受到成土母质影响外, 还受到人为活动的影响^[16,29]。结

合图 4 中 PC2 得分,发现 PC2 空间分布格局与 Cr 和 Ni 相似,主要分布在流域上中游南部以及下游北部等工业较为密集的区域.电镀、冶金等工业生产活动会使用含有 Cr、Ni 等重金属元素的原料,生产过程中产生的“三废”排入土壤环境,造成农田土壤重金属累积^[10,14,38].因此,流域内农田土壤中的 Cr 和 Ni 主要受成土母质以及工业生产活动的影响.

第三主成分的贡献率为 13.91%,As 的因子载荷高达 0.938,整体处于无污染状态,部分点位受到轻微污染.此外,As 变异系数最低,接近低变异水平,偏度系数和峰度系数均呈现负值.结合图 4 中 PC3 得分,发现得分较高的区域集中在太滬河河的上下游段,靠近滬湖和太湖.据此推断,流域土壤中 As 受人为活动干扰较小,主要受成土母质的影响,这与北京顺义地区^[39]、上海宝山区^[40]农用土壤 As 主要受控于成土母质的结论相一致.

3 结论

(1)太滬河流域农田土壤 Cr、Hg、As、Cu、Zn、Ni、Pb、Cd 含量分别为 63.25、0.25、7.83、35.24、77.25、31.48、38.37 和 0.16 mg·kg⁻¹,除 Cr 和 As 外,其余元素重金属含量均超过太湖流域土壤背景值,农田土壤重金属存在一定程度的富集.土壤重金属元素多低于国家农用地土壤污染风险筛选值,Pb 和 Cd 的点源污染现象较为明显.

(2)以太湖流域土壤背景值为标准, P_i 值依次为 Pb > Hg > Cu > Cd > Ni > Zn > Cr > As,Cr 和 As 处于无污染状态,其余元素处于轻微污染; $P_{\text{综}}$ 值表明 87.29% 样点的土壤重金属呈现轻度污染,5.93% 样点呈现中度污染,6.78% 样点呈现重度污染,整体已经超过警戒值,处于轻度污染状态.

(3)多元统计分析和地统计分析结果表明,土壤中 Hg、Cu、Zn、Pb 和 Cd 受到农业活动和大气沉降的共同影响;Cr 和 Ni 则受成土母质以及工业生产活动的共同影响;As 则主要来源于成土母质.

参考文献:

- [1] Solgi E, Esmaili-Sari A, Riyahi-Bakhtiari A, *et al.* Soil contamination of metals in the three industrial estates, Arak, Iran [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(4): 634-638.
- [2] Arao T, Ishikawa S, Murakami M, *et al.* Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan [J]. *Paddy and Water Environment*, 2010, **8**(3): 247-257.
- [3] 夏敏,赵炳梓,张佳宝.基于 GIS 的江淮海平原典型潮土区土壤重金属累积研究[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(4): 684-692.
- Xia M, Zhao B Z, Zhang J B. GIS-based research on soil heavy metal accumulation in a fluvo-aquic soil area typical of the Huang-Huai-Hai plain [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(4): 684-692.
- [4] 秦先燕,李运怀,孙跃,等.环巢湖典型农业区土壤重金属来源解析[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(4): 455-463.
- Qin X Y, Li Y H, Sun Y, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in typically agricultural region around Chaohu lake, China [J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(4): 455-463.
- [5] 宋波,张云霞,庞瑞,等.广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- Song B, Zhang Y X, Pang R, *et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang river draining of Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- [6] 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.
- [7] 杭小帅,王火焰,周健民.长江三角洲地区土壤重金属污染的防治与调控[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(1): 245-251.
- Hang X S, Wang H Y, Zhou J M. Prevention and regulation countermeasures of soil heavy metal contamination in Yangtze River Delta [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(1): 245-251.
- [8] 徐兰,周敏,袁旭音,等.苏南区域农田土壤和大气颗粒中镉和铅含量及对水稻的贡献研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, **34**(3): 201-206.
- Xu L, Zhou M, Yuan X Y, *et al.* Study on cadmium and lead concentrations in soils and atmospheric particles and their contributions to rice in the typical agricultural area of southern Jiangsu Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, **34**(3): 201-206.
- [9] 王成,袁旭音,陈旸,等.苏州地区水稻土重金属污染源解析及端元影响量化研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(10): 3269-3275.
- Wang C, Yuan X Y, Chen Y, *et al.* Quantification of contributions from different sources on heavy metals accumulation in the paddy soil from Suzhou area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(10): 3269-3275.
- [10] 杨彦,李良忠,于云江,等.基于统计分析的太湖流域某市农业活动区重金属污染特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(12): 1319-1327.
- Yang Y, Li L Z, Yu Y J, *et al.* Analysis of heavy metals distribution characteristics and sources based on agricultural region statistics of Taihu Lake basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(12): 1319-1327.
- [11] 穆莉,王跃华,徐亚平,等.湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(3): 573-582.
- Mu L, Wang Y H, Xu Y P, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in paddy soils in a county of Hunan Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 573-582.
- [12] 戴彬,吕建树,战金成,等.山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.
- Dai B, Lü J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, Eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [13] 艾建超,王宁,杨净.基于 UNMIX 模型的夹皮沟金矿区土壤

- 重金属源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3530-3536.
- Ai J C, Wang N, Yang J. Source apportionment of soil heavy metals in Jiapigou goldmine based on the UNMIX model[J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3530-3536.
- [14] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- Yu Y H, Lü J S, Wang Y M. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the Lower Yellow River[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- [15] 吕建树, 何华春. 江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2853-2864.
- Lü J S, He H C. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in the soils of the Jiangsu Coast [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2853-2864.
- [16] 郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 等. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9): 1875-1883.
- Guo X D, Sun Q F, Zhao Y S, *et al.* Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(9): 1875-1883.
- [17] 杨之江, 陈效民, 景峰, 等. 基于 GIS 和地统计学的稻田土壤养分与重金属空间变异[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(6): 1893-1901.
- Yang Z J, Chen X M, Jing F, *et al.* Spatial variability of nutrients and heavy metals in paddy field soils based on GIS and geostatistics[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(6): 1893-1901.
- [18] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, **54**(1): 81-91.
- Song J X, Zhu Q, Jiang X S, *et al.* GIS-based heavy metals risk assessment of agricultural soils-A case study of Baguazhou, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(1): 81-91.
- [19] 张文艺, 韩有法, 陆丽巧, 等. 太浦河流域水环境污染解析[J]. 中国农村水利水电, 2012, (9): 47-50.
- Zhang W Y, Han Y F, Lu L Q, *et al.* An analysis of water environmental pollution in the Taige canal watershed[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, (9): 47-50.
- [20] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from lake Taihu basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [21] Duan B, Zhang W, Zheng H, *et al.* Disposal situation of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants (WWTPs) and assessment of the ecological risk of heavy metals for its land use in Shanxi, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, **14**(7): 823.
- [22] 夏增禄, 李森照. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987. 315-319.
- [23] Brady J P, Ayoko G A, Martens W N, *et al.* Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(5): 306.
- [24] Ogunkunle C O, Fatoba P O. Pollution loads and the ecological risk assessment of soil heavy metals around a mega cement factory in southwest Nigeria [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2013, **22**(2): 487-493.
- [25] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [26] 李良忠, 杨彦, 蔡慧敏, 等. 太湖流域某农业活动区农田土壤重金属污染的风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 60-65.
- Li L Z, Yang Y, Cai H M, *et al.* Health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils in Taihu lake basin agricultural area[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(S1): 60-65.
- [27] 付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 城乡结合带土壤重金属时空变异特征与源解析——以南京市柘塘镇为例[J]. 土壤学报, 2014, **51**(5): 1066-1077.
- Fu C C, Wang W Y, Pan J J, *et al.* Spatial-temporal variation and source apportionment of soil heavy metals in peri-urban area—a case study of Zhetang town, Nanjing [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(5): 1066-1077.
- [28] 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.
- [29] 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 等. 基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- Bai Y R, Zhang X, Zhao Y P, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Chinese wolfberry land based on GIS and the receptor model[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- [30] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, *et al.* Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, **78**: 2-8.
- [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] Franco-Uría A, López-Mateo C, Roca E, *et al.* Source identification of heavy metals in pastureland by multivariate analysis in NW Spain [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **165**(1-3): 1008-1015.
- [33] 王海, 席运官, 陈瑞冰, 等. 太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J]. 农业环境与发展, 2009, **26**(3): 10-15.
- Wang H, Xi Y G, Chen R B, *et al.* Investigation on excessive application of fertilizer and pesticide in Taihu Lake area [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2009, **26**(3): 10-15.
- [34] 邵劲松, 郝国辉, 金雨洁, 等. 太湖流域农用水、农田土壤及作物重金属污染风险评估[J]. 农产品质量与安全, 2015, (4): 67-70, 76.
- Shao J S, Hao G H, Jin Y J, *et al.* Risk assessment of agricultural water, farmland soil and crop heavy metal pollution in Taihu lake basin [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2015, (4): 67-70, 76.
- [35] 刘鹏, 胡文友, 黄标, 等. 大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J]. 土壤学报, 2019, **56**(5): 1048-1059.
- Liu P, Hu W Y, Huang B, *et al.* Advancement in researches on effect of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in

- soils and crops [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(5): 1048-1059.
- [36] 许海, 邵婉晨, 李光辉, 等. 沪宁高速公路(常州段)两侧农田土壤重金属污染状况检测评价[J]. *江苏农业学报*, 2009, **25**(1): 123-126.
- Xu H, Shao W C, Li G H, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in roadside soils along Shanghai-Nanjing highway (Changzhou section) [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2009, **25**(1): 123-126.
- [37] 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [38] 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 等. 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1509-1515.
- Li J H, Weng S, Fang J, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil around Haining electroplating industrial park [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1509-1515.
- [39] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **425**: 66-74.
- [40] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 768-774.
- Xie X J, Kang J C, Li W J, *et al.* Analysis on heavy metal concentrations in agricultural soils of Baoshan, Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(3): 768-774.

环境科学

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)