Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

$PM_{2.5}$污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇，廖琴，赵秀阁，白云，陶燕

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年4月
第42卷 第4期
Vol.42 No.4

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 42 卷　第 4 期
2021 年 4 月 15 日

目　次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析 …… 唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_x)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素 …… 颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨土士, 王雪梅, 刘婵芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析 …… 裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析 … 赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘水桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后 24 h 内大气中多环芳烃的变化规律 …… 范慧泽, 祝富杰, 胡鹏抟, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征 …… 李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 …… 高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 淡默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险 …… 倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性 …… 赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例 …… 李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响 …… 李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析 …… 金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素 …… 张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价 …… 黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近 20 年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化…… 李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义 …… 刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析 …… 李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算…… 曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险 …… 杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源 …… 韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物 PAHs 污染特征及来源解析 …… 吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评估 …… 张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价 …… 丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石浚哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价 …… 程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物 PAHs 和 PCBs 的分布、来源及风险评价 …… 詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析…… 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估 …… 辛慧敏, 林建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体 …… 李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解 …… 张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析 … 魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于 EEMs 与 UV-vis 分析苏州汛期景观河道中 DOM 光谱特性与来源 …… 何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为 …… 范秀磊, 邹晔锋, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮 …… 王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响 …… 于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析 …… 王晓曈, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响 …… 程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料 PES 与 2,4-DCP 复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响 …… 林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄娴, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价 …… 李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响…… 王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响…… 王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例 …… 周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析…… 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质高背景农田土壤下不同水稻品种对 Cd 的累积特征及影响因素 …… 代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响 …… 刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素…… 陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd 胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及 Cd 吸收积累的影响…… 张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响 …… 李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性 …… 陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动 AM 真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力 …… 张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播 …… 张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用 …… 万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738)　《环境科学》征稿简则(1790)　信息(1860, 1878, 1900)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第42卷第4期 2021年4月
Vol.42, No.4 Apr., 2021

近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化

李括[1,2,3,4,5], 杨柯[2,3,4,5], 彭敏[1,2,3,4,5], 刘飞[2,3,4,5], 杨峥[2,3,4,5], 赵传冬[2,3,4,5*], 成杭新[2,3,4,5*]
(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000; 3. 中国地质调查局土地质量地球化学调查评价研究中心, 廊坊 065000; 4. 中国地质调查局地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 廊坊 065000; 5. 中国地质科学院地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 廊坊 065000)

摘要: 查明鄱阳湖流域微量元素的污染状况、识别其潜在来源并评估生态风险,对制定保护流域生态系统的有效策略至关重要. 为了全面了解鄱阳湖流域5条主要支流泛滥平原沉积物中Cd、Hg、Pb、As、Cu、Zn、Cr、Ni、Mn、Sb、W和Sn等12种微量元素间隔近20 a的含量、污染水平和生态风险的时空变化状况,采用富集因子(EF)和修正综合污染指数(MPI)评价了微量元素的污染水平,应用潜在生态风险因子(E_r)和修正生态风险指数(MRI)量化了微量元素引发的生态风险,并对污染水平显著变化区域的污染源进行了分析和探讨. 研究结果显示,近20年来,鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中Cd、Zn、Mn、W和Pb含量分别升高了134%、26%、41%、25%和8%, Hg、As、Cr、Ni、Sb和Sn含量分别降低了35%、15%、22%、10%、14%和13%, Cu含量无明显变化; 饶河、赣江和信江流域的Cd含量分别升高了331%、151%和107%,抚河、赣江和修水流域的Hg含量分别降低了87%、41%和40%; 其污染变化主要表现为Cd污染加剧和Hg污染降级,整个赣江流域Cd污染升级至中度和中度-重度,饶河乐安江Cd污染升级至重度,抚河流域Hg污染降至无或轻微; Cd污染加剧导致综合污染升级,极度和重度污染点位比例由17%升至33%; 极高生态风险点位的比例由11%升至22%,其高MRI贡献率元素由Hg变为Cd,源于Hg污染的极高生态风险点降至中等生态风险. 鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中微量元素的显著污染变化主要源于矿产开发与冶炼、工业和农业生产等人为活动. 研究成果可为河流污染防治和流域生态系统的优化管理提供科学依据.

关键词: 鄱阳湖流域; 泛滥平原沉积物; 微量元素; 污染水平; 生态风险; 赣江; 乐安江
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)04-1724-15 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202008083

Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years

LI Kuo[1,2,3,4,5], YANG Ke[2,3,4,5], PENG Min[1,2,3,4,5], LIU Fei[2,3,4,5], YANG Zheng[2,3,4,5], ZHAO Chuan-dong[2,3,4,5*], CHENG Hang-xin[2,3,4,5*]
(1. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 3. Research Center of Geochemical Survey and Assessment on Land Quality, China Geological Survey, Langfang 065000, China; 4. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, China Geological Survey, Langfang 065000, China; 5. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: Investigating the pollution conditions of trace elements in the Poyang Lake basin, identifying the pollution sources, evaluating the ecological risks play an important part in formulating the effective strategies for protecting the basin ecosystem. To understand the concentration characteristics, pollution levels, and ecological risks of twelve trace elements (Cd, Hg, Pb, As, Cu, Zn, Cr, Ni, Mn, Sb, W, and Sn) in the floodplain sediments of the five main tributaries in Poyang Lake basin in the past twenty years, we used the enrichment factor (EF) and modified pollution index (MPI) to quantify the pollution levels of the trace elements, and analyzed and discussed the pollution sources in the areas with significant pollution level changes. The results indicated that the concentrations of cadmium, zinc, manganese, tungsten and lead in the floodplain sediments of the Poyang Lake basin during the past twenty years have increased by 134%, 26%, 41%, 25%, and 8%, respectively, and mercury, arsenic, chromium, nickel, antimony, and tin have decreased by 35%, 15%, 22%, 10%, 14%, and 13%, respectively, while copper has not changed significantly. The concentrations of cadmium in the Raohe River, Ganjiang River, and Xinjiang River basins have increased by 331%, 151%, and 107%, while mercury decreased in the Fuhe River, Ganjiang River, and Xiushui River basins by 87%, 41%, and 40%, respectively. The classification results based on the EF indicated that the changes in the pollution levels of trace elements in the Poyang Lake basin were characterized by the aggravation of cadmium pollution and the degradation of mercury pollution, the pollution level of cadmium in the

收稿日期: 2020-08-08; **修订日期**: 2020-09-18
基金项目: 自然资源部中国地质调查局地质调查项目(DD20160326, DD20190527, DD20190518)
作者简介: 李括(1985~),女,博士研究生,工程师,主要研究方向为环境地球化学,E-mail: likuo@cugb.org
* 通信作者,E-mail: zhaochuandong@igge.cn; chenghangxin@igge.cn

Ganjiang River basin was upgraded to moderate and significant, the pollution level of cadmium in the Le'an River was upgraded to very high, and the pollution level of mercury in the Fuhe River basin was reduced to unpolluted or minimal. The MPI classification results established that the increase in the cadmium pollution had intensified the comprehensive pollution in the Poyang Lake basin, causing the proportion of severely and heavily polluted sites to be raised from 17% to 33%. The MRI classification results also demonstrated that the proportion of very high ecological risk sites have increased from 11% to 22%. The element with the highest MRI contribution rate changed from mercury to cadmium, which was caused by the reduction of the ecological risk level from very high to moderate. The results demonstrated that the significant pollution changes in the trace elements in the floodplain sediments of the Poyang Lake basin were primarily caused by human activities, such as mineral exploitation, smelting, and industrial and agricultural production. Our findings can provide scientific evidence for the prevention and control of river pollution and the optimal management of a watershed ecosystem.

Key words: Poyang Lake basin; floodplain sediments; trace element; pollution level; ecological risk; Ganjiang River; Le'an River

由于 Hg、As、Pb、Cd、Cu、Zn、Ni 和 Cr 等微量元素的毒性、持久性和不可生物降解等特性,其在河流生态系统中的环境行为引起了广泛关注[1~3]. 泛滥平原是水生、半水生和陆生环境相互连接不断变化的镶嵌区域,是陆地上最具生产力和异质性的生态系统之一[1],在全球范围内约占陆地面积的 1.3%[4]. 泛滥平原上的土壤是由周期性洪水搬运和沉积的物质发育而成,土壤连同河流沉积物和河水一起可能接收了来自工业、农业活动或自然风化的溶解性和颗粒性物质/污染物的输入[5,6]. 已有研究发现在许多河流沿岸的泛滥平原土壤中积累了各种有机和无机污染物[1,7~10]. 由于泛滥平原处于河流系统的地貌敏感区且表现出强烈的空间和季节异质性,它们既是微量金属的汇,又是微量金属的源[3,8]. 从地球化学填图的观点来说,泛滥平原沉积物可代表较大的汇水盆地,对整个流域疏松沉积物成分具有充分的代表性[11~14]. 因此,泛滥平原沉积物中保存的地球化学记录可以让人们进一步了解流域的污染历史,对河流污染防治和改善流域生态系统环境质量具有重要意义.

工业化、城市化和集约化农业等人类活动改变着人们赖以生存的环境, 20 世纪 80 年代以来,伴随我国经济快速增长而出现的生态系统环境质量问题日趋显著. 鄱阳湖是我国第一大淡水湖,入湖水系由赣江、抚河、信江、饶河和修水等五大主要河流组成. 由于工业或矿业活动和农业面源污染等原因,鄱阳湖流域的环境质量遭遇了严峻的挑战. 多年来,为了监测和评估鄱阳湖及其流域的环境质量状况,开展了湖泊沉积物、河流沉积物和河流悬浮物等介质中的微量元素污染程度调查和生态风险评价[15~31],但鲜见有从流域尺度监测泛滥平原沉积物中微量元素的含量、污染水平及生态风险的时空变化.

本文采用鄱阳湖流域 5 条主要支流泛滥平原沉积物 2 期间隔近 20 a 的数据,对 Cd、Hg、Pb、As、Cu、Zn、Cr、Ni、Mn、Sb、W 和 Sn 等 12 种微量元素含量、污染水平和生态风险的时空变化进行研究,并对污染水平显著变化区域的污染源进行了分析和探讨. 采用富集因子(EF)和修正综合污染指数(MPI)评价了微量元素的污染程度; 应用潜在生态风险因子(E_r)和修正生态风险指数(MRI)量化了沉积物中微量元素引发的生态风险,以期为鄱阳湖流域生态系统的优化管理提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部,是我国最大的淡水湖,它北连长江,赣江、抚河、信江、饶河和修水等五大河流,是鄱阳湖的主要入湖水系(图 1). 赣江是鄱阳湖水系第一大河,包括章水和贡水两大源流,由南到北纵贯整个江西中部地区,全长约 751 km,流域面积约 8.35×10^4 km^2; 赣江流域分为上、中、下游,上游流经矿产资源丰富的地区,中游流经吉泰盆地水稻

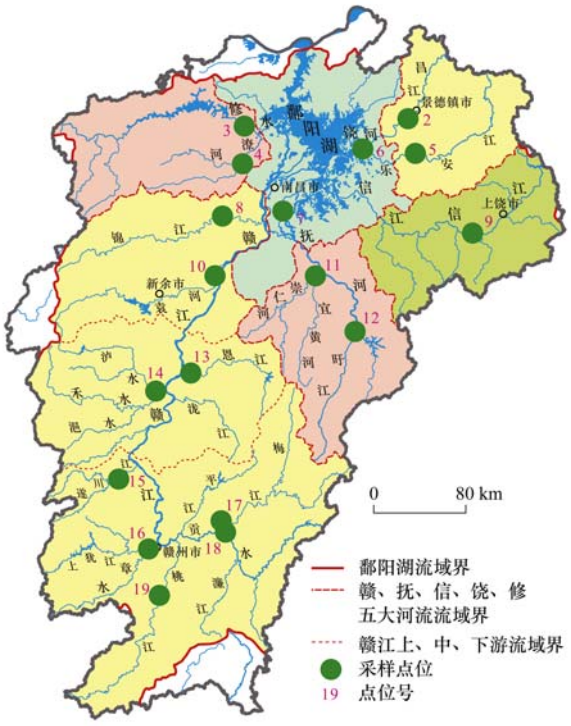


图 1　鄱阳湖流域泛滥平原沉积物采样点位示意

Fig. 1　Locations of the floodplain sediment sampling sites in the Poyang Lake basin

种植区,下游流经宜春、新余和南昌等城市. 抚河全长约 312 km,流域面积约 1.58×10^4 km^2; 信江全长约 313 km,流域面积约 1.59×10^4 km^2; 饶河由乐安江和昌江南北两大支流汇合而成,流域面积约 1.55×10^4 km^2; 修水全长约 357 km,流域面积约 1.40×10^4 km^2. 鄱阳湖流域内矿产资源丰富,分布有乐安江中下游的德兴铜矿,信江中游的永平铜矿和赣南有色金属矿区等.

1.2 样品采集

在中国土壤环境质量地球化学监控网络(1992~1995 年)[32]的基础上,分别于 1994 年和 2015 年在鄱阳湖流域五大入湖水系 18 个超级汇水盆地出口处采集泛滥平原沉积物样品,采样深度 5~25 cm(图 1). 2 期样品(1994 年的样品是一直保留至今的副样)均经自然干燥,初加工后过 10 目尼龙筛,送实验室进一步加工和分析检测.

1.3 分析方法和质量控制

2 期样品在实验室进行同批次分析. 样品混匀后用无污染球磨机粉碎至 200 目粒度以备分析测试. 采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定样品中的 Cr、Mn 和 Al; 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测试 Cd、Cu、Ni、Pb、W 和 Zn; 原子荧光光谱法(AFS)测试 Sb、As 和 Hg; 发射光谱法(ES)测试 Sn. 样品测试按照分析质量控制要求插入了 5 种国家一级标准物质(GSS21、GSS22、GSS25、GSS26 和 GSS27)[33],其准确度和精密度合格率均达到 100%.

1.4 富集因子(EF)

富集因子(EF)已被广泛用于评估土壤、河流和湖泊沉积物等介质中微量元素的污染状况,并可区分人为来源和自然来源. 计算需选用参考元素对目标元素进行地球化学归一化,EF 计算公式如下[34]:

$$\mathrm{EF}=\frac{(C_n/C_{\mathrm{ref}})_{\mathrm{sample}}}{(B_n/B_{\mathrm{ref}})_{\mathrm{background}}}$$

式中,C_n 和 C_{ref}分别是泛滥平原沉积物中元素 n 和归一化参考元素的实测含量,B_n 和 B_{ref}分别是江西省土壤元素背景值中元素 n 和归一化参考元素的含量[35]. Al 是在地壳中自然丰度高的主量元素,一般不受人为输入的影响,且鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中 Al 含量的空间变异较小,因此本文选用 Al 作为地球化学归一化元素.

当元素的 EF 值小于或接近 1 时,被认为是源于自然作用过程,EF 值高于 1.5 则表明受人为源的影响. 根据 EF 值可将污染等级划分为 5 级: EF≤2,无或轻微污染; 2 < EF≤5,中度污染; 5 < EF≤20,中度-重度污染; 20 < EF≤40,重度污染; EF > 40,极度污染[36].

1.5 修正综合污染指数(MPI)

基于尼梅罗污染指数(PI),Brady 等[37]提出了一种适用于河口和海洋沉积环境的修正综合污染指数(MPI)的计算方法,并得到广泛应用[38,39]. 此方法的优点是既考虑了河口沉积物中微量元素的自然变化,并且弥补了沉积物中矿物的天然粒度变异和多种沉积物源的可能性,又调整了沉积物限定阈值以提供更准确的限定[37,40]. MPI 计算公式如下:

$$\mathrm{MPI}=\sqrt{[(\overline{\mathrm{EF}})^2+(\mathrm{EF}_{\max})^2]/2}$$

式中,$\overline{\mathrm{EF}}$和 $\mathrm{EF}_{\max}$分别是泛滥平原沉积物中 12 种微量元素 EF 的算数平均值和极大值. MPI 是基于 EF 计算的,以 EF 阈值作为 MPI 分级的基础,MPI < 1、1~2、2~3、3~5、5~10 和 > 10 的沉积物分别被划分为未污染、轻度污染、中度污染、中度-重度污染、重度污染和极度污染等级[37].

1.6 修正生态风险指数(MRI)

Håkanson[41]于 1980 年提出了潜在生态风险指数(RI)的计算方法,其目标主要是用于水污染控制的评估. 此方法综合考量了介质中微量元素的含量、毒性及敏感性因素,为定量评估环境介质的综合污染风险提供了参考,现已广泛应用于评估水、土壤及沉积物等介质中微量元素的潜在生态风险. RI 计算公式如下[41]:

$$\mathrm{RI}=\sum_{i=1}^{n}E_{\mathrm{r}}^{i}=\sum_{i=1}^{n}T_{\mathrm{r}}^{i}\times C_{\mathrm{f}}^{i}$$

由于 RI 在计算中使用污染因子(C_{f}^{i}),没有考虑陆相沉积作用过程的自然变化和粒度等影响因素,尤其对河口沉积环境的风险评估具有一定的局限性. 鉴于上述原因,为了更准确地评估沉积物的生态风险水平,有学者提出用富集因子(EF^{i})代替污染因子(C_{f}^{i})计算生态风险指数,即修正生态风险指数(MRI)[42],且在相关研究领域得到了应用[17,43]. MRI 计算公式如下:

$$\mathrm{MRI}=\sum_{i=1}^{n}E_{\mathrm{r}}^{i}=\sum_{i=1}^{n}T_{\mathrm{r}}^{i}\times\mathrm{EF}^{i}$$

$$E_{\mathrm{r}}^{i}=T_{\mathrm{r}}^{i}\times\mathrm{EF}^{i}$$

式中,T_{r}^{i}是元素 i 的毒性反应因子,其诠释了毒性和敏感性要求,Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn 元素的 T_{r}^{i} 分别为 40、30、10、5、5、2 和 1; C_{f}^{i} 是元素 i 的污染因子; E_{r}^{i} 是元素 i 的潜在生态风险因子,分级标准见表 1; EF^{i} 是元素 i 的富集因子; MRI 是修正生态风险指数代表沉积物中微量元素引发的风险之和.

Håkanson 是根据 PCB、Hg、Cd、As、Pb、Cu、

Cr 和 Zn 等 8 个指标提出 RI 等级划分的阈值,本文研究了其中 7 种微量元素(未涉及 PCB 指标),基于这些指标的参考值,调整后的 MRI 分级标准[44]见表 1.

表 1　潜在生态风险因子(E_r^i)和修正生态风险指数(MRI)的分级标准

Table 1　Classification of potential ecological risk factor (E_r^i) and modified ecological risk index (MRI)

E_r^i	生态风险等级	MRI	生态风险等级
<40	低潜在生态风险	<95	低生态风险
[40, 80)	中等潜在生态风险	[95, 190)	中等生态风险
[80, 160)	中等-高潜在生态风险	[190, 380)	高生态风险
[160, 320)	高潜在生态风险	≥ 380	极高生态风险
≥ 320	极高潜在生态风险		

本文使用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19 对数据进行统计分析,使用 Surfer 12、ArcGIS 10.4 和 CorelDRAW X7 制作图件.

2　结果与讨论

2.1　含量特征

鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中 Cd、Hg、Pb、As、Cu、Zn、Cr、Ni、Mn、Sb、W 和 Sn 等 12 种微量元素含量的统计值和参考值见表 2.

1994 年,12 种微量元素含量的中位值分别为 0.13、0.106、36.2、10.4、22.9、70.5、56.5、20.5、440.6、0.85、3.0 和 7.4 mg·kg^{-1},高于江西省土壤元素背景值的点位比例分别为 94%、78%、78%、33%、78%、56%、78%、83%、89%、44%、28% 和 94%. 其中 Cd、Hg、Mn 和 Sn 的中位值分别为背景值的 1.79、1.52、1.97 和 1.57 倍,Hg、Sb 和 W 的变异系数均大于 1,表明流域内存在高含量异常值. 鄱阳湖流域 Hg 的极大值出现在抚河旰江点位(12 号),含量为 1.282 mg·kg^{-1},高达背景值的 18.3 倍,Hg 在抚河下游点位(7 号)的含量较高,是背景值的 6.3 倍; Sb 的极大值出现在赣江上游贡水点位(18 号),含量为 33.41 mg·kg^{-1},高达背景值的 35.5 倍; W 的极大值出现在赣江上游章水点位(16 号),含量为 23.0 mg·kg^{-1},是背景值的 5 倍.

2015 年,12 种微量元素含量的中位值分别为 0.31、0.069、39.0、8.8、22.9、89.1、43.9、18.4、622.3、0.74、3.7 和 6.5 mg·kg^{-1},高于背景值的点位比例分别为 94%、50%、83%、28%、67%、78%、50%、72%、100%、22%、44% 和 94%. 其中 Cd 和 Mn 的中位值分别为背景值的 4.18 和 2.78 倍,Cd、Cu 和 W 的变异系数均大于 0.89,表明流域内存在高含量异常值. 鄱阳湖流域 Cd 的极大值出现在饶河乐安江点位(5 号),含量高达 1.42 mg·kg^{-1},其连

表 2　鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中微量元素含量的统计汇总和参考值/mg·kg^{-1}

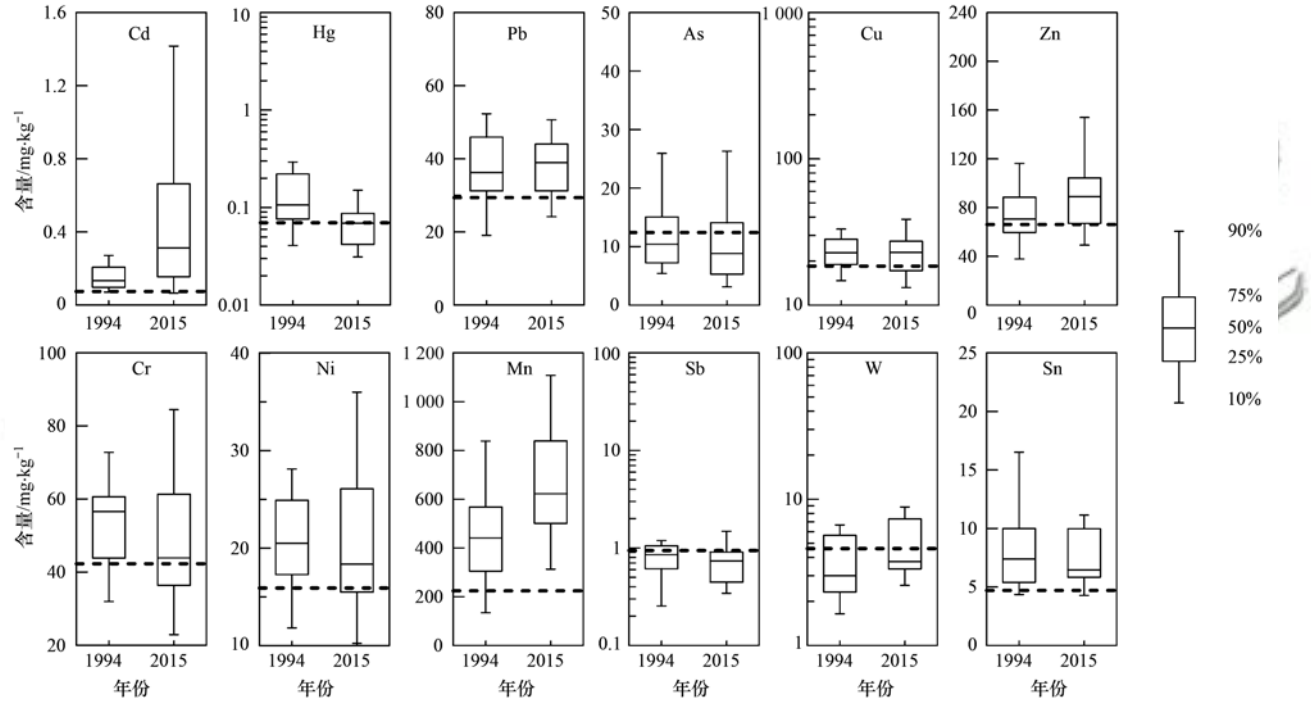
Table 2　Summary of the statistics and reference values of trace element concentrations in floodplain sediments of the Poyang Lake basin/mg·kg^{-1}

	项目	Cd	Hg	Pb	As	Cu	Zn	Cr	Ni	Mn	Sb	W	Sn
赣江	中位值(1994 年)	0.14	0.113	36.3	11.2	19.0	65.5	46.4	20.0	320.8	0.69	3.8	8.3
(n=9)	中位值(2015 年)	0.35	0.066	40.2	9.8	17.6	84.9	37.0	15.5	553.9	0.65	6.0	10.0
抚河	中位值(1994 年)	0.13	0.441	46.2	6.9	22.9	65.2	57.6	23.9	409.8	0.44	2.0	10.2
(n=3)	中位值(2015 年)	0.18	0.056	40.0	4.9	25.9	92.5	48.4	20.7	766.9	0.45	3.8	6.3
信江	含量(1994 年)	0.24	0.082	45.9	8.4	33.1	91.6	57.6	28.1	471.3	0.84	2.6	6.4
(n=1)	含量(2015 年)	0.50	0.087	31.3	6.2	21.1	78.8	36.3	16.7	497.3	0.81	2.6	5.9
饶河	中位值(1994 年)	0.12	0.069	32.4	11.0	29.8	80.7	60.6	20.3	537.4	1.12	2.5	5.5
(n=3)	中位值(2015 年)	0.51	0.135	41.0	20.8	79.1	153.9	61.3	31.6	893.6	1.71	3.4	5.8
修水	平均值(1994 年)	0.15	0.062	26.2	12.9	24.1	83.2	59.9	23.5	570.7	0.96	5.0	5.3
(n=2)	平均值(2015 年)	0.08	0.037	24.9	6.4	19.7	65.9	55.1	22.3	403.0	0.81	5.4	5.0
鄱阳湖流域 (n=18) (1994 年)	平均值	0.15	0.209	36.9	13.2	23.6	73.8	52.8	20.7	459.4	2.60	4.5	8.5
	中位值	0.13	0.106	36.2	10.4	22.9	70.5	56.5	20.5	440.6	0.85	3.0	7.4
	标准差	0.07	0.287	9.2	9.7	5.6	18.8	11.8	4.8	208.1	7.69	4.9	4.2
	变异系数	0.43	1.37	0.25	0.73	0.24	0.25	0.22	0.23	0.45	2.95	1.07	0.49
	极小值	0.07	0.041	19.1	5.4	14.7	37.8	32.0	11.8	134.2	0.25	1.6	4.3
	极大值	0.27	1.282	52.3	45.4	33.1	116.3	72.7	28.1	838.6	33.41	23.0	18.5
鄱阳湖流域 (n=18) (2015 年)	平均值	0.44	0.080	39.1	10.7	37.8	96.7	46.5	20.6	686.7	0.81	7.3	8.2
	中位值	0.31	0.069	39.0	8.8	22.9	89.1	43.9	18.4	622.3	0.74	3.7	6.5
	标准差	0.39	0.050	11.9	7.2	54.7	41.8	17.9	7.8	226.6	0.46	10.6	4.6
	变异系数	0.89	0.63	0.30	0.68	1.45	0.43	0.39	0.38	0.33	0.57	1.46	0.56
	极小值	0.06	0.031	24.2	3.1	13.2	49.2	22.9	10.2	312.8	0.34	2.6	4.3
	极大值	1.42	0.210	75.3	26.3	248.7	215.9	84.4	36.0	1 107.9	1.85	49.2	24.8
江西省土壤元素背景值[35]	中位值	0.075	0.070	29.4	12.4	18.5	66.1	42.3	15.9	224	0.94	4.6	4.7

同赣江上游桃江点位(19 号)和赣江下游锦江点位(8 号)Cd 含量均达到背景值的 12 倍以上; Cu 的极大值出现在饶河乐安江点位(5 号),含量为 248.7 $mg\cdot kg^{-1}$,高达背景值的 13.4 倍; W 的极大值出现在赣江上游章水点位(16 号),含量为 49.2 $mg\cdot kg^{-1}$,是背景值的 10.7 倍.

近 20 年来, 12 种微量元素含量总体上增加的是 Cd、Zn、Mn、W 和 Pb,分别升高了 134%、26%、41%、25% 和 8%; 总体上减少的是 Hg、As、Cr、Ni、Sb 和 Sn,分别降低了 35%、15%、22%、10%、14% 和 13%; Cu 无明显变化(表 2 和图 2). Cd 在饶河、赣江和信江流域显著升高,分别升高了 331%、151% 和 107%; Zn 在饶河流域明显升高,升高了 91%; Mn 在抚河、赣江和饶河流域明显升高,分别升高了 87%、73% 和 66%; W 在抚河和赣江流域明显升高,升高了 92% 和 59%; Hg 在抚河、赣江和修水流域分别降低了 87%、41% 和 40%.

饶河流域 12 种微量元素含量均显示出不同程度的增长,其中 Cd 和 Cu 升高了 331% 和 166%,Hg、As 和 Zn 升高均超过 90%,Ni、Mn 和 Sb 升高均超过 50%. 饶河乐安江点位(5 号)显示出多元素含量的高幅增长,其中 Cu 和 Cd 升高了 703% 和 421%, As、Zn 和 Hg 分别升高了 180%、168% 和 137%. 在修水流域,除了 W 含量略有升高外,其他 11 种微量元素含量均出现不同程度的降低.



虚线表示江西省土壤元素背景值

图 2 鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中 12 种微量元素含量箱型图

Fig. 2 Boxplots for the concentrations of twelve trace elements in floodplain sediments of the Poyang Lake basin for two periods

2.2 污染水平

1994 年, 12 种微量元素 EF 中位值排序为 Mn(2.4) > Cd(2.2) > Sn(1.9) > Ni = Hg(1.7) > Cr = Cu(1.6) > Pb(1.5) > Zn(1.4) > Sb(1.3) > As(1.1) > W(0.8)(图 3),Cd、Hg、Mn 和 Sn 达到中度及以上污染的比例分别为 61%、44%、61% 和 33%,表明鄱阳湖流域的主要污染元素是 Cd、Hg、Mn 和 Sn. Hg 和 Sn 的中度及以上污染主要分布于赣江流域和抚河流域,Cd 和 Mn 的中度及以上污染在 5 条主要支流均有分布. 12 种微量元素的 EF_{max} 排序为 Sb(31.2) > Hg(24.4) > W(6.1) > Cd(5.5) > Sn(5.2) > Mn(3.9) > As(3.2) > Cu(2.6) > Pb(2.4) > Cr = Ni(2.1) > Zn(1.9),Sb 的 EF_{max} 出现在赣江上游贡水点位(18 号),Hg 和 Sn 的 EF_{max} 均出现在抚河盱江点位(12 号),W 的 EF_{max} 出现在赣江上游章水点位(16 号),Cd 的 EF_{max} 出现在饶河乐安江点位(5 号).

2015 年, 12 种微量元素 EF 中位值排序为 Cd(3.9) > Mn(3.1) > Sn(1.6) > Ni = Zn = Cu(1.4) > Pb(1.3) > Cr(1.2) > Hg(1.0) > Sb = W(0.9) > As(0.8)(图 3). Cd 的中度及以上污染比例为 72%,其中重度、中度-重度和中度污染比例分别为 6%、33% 和 33%,整个赣江流域 Cd 处于中度和中度-重度污染(图 4); Mn 的中度污染比例为 94%,表明鄱

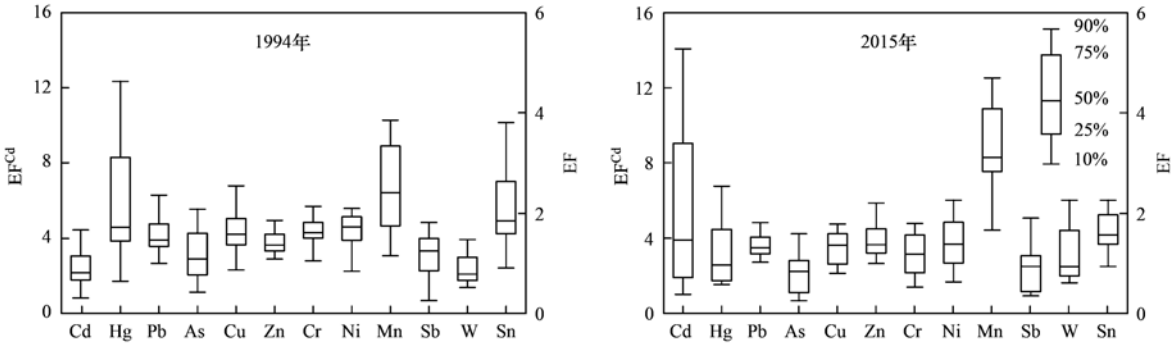


图 3　鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中 12 种微量元素富集因子箱型图

Fig. 3　Boxplots for enrichment factors of twelve trace elements in floodplain sediments of the Poyang Lake basin for two periods

阳湖流域的主要污染元素是 Cd 和 Mn，且 Cd 是主导污染元素. 12 种微量元素 EF_{max} 排序为 Cd(21.6) > Cu(15.3) > W(14.2) > Sn(7.0) > Mn(4.7) > Hg(4.0) > Zn(3.7) > As(2.8) > Pb = Ni(2.3) > Sb(2.2) > Cr(1.8)，Cd 和 Cu 的 EF_{max} 均出现在饶河乐安江点位(5 号)，W 和 Sn 的 EF_{max} 均出现在赣江上游章水点位(16 号)，同时该点位的 EF^{Cd} 高达 11.8.

近 20 年来，鄱阳湖流域微量元素的污染水平和污染空间分布发生了变化，总体表现为 Cd 污染加剧和 Hg 污染降级，Mn 污染有所提升，其他元素变化不明显. Cd 污染加剧主要表现在 EF^{Cd} 中位值从 2.2 升至 3.9，EF_{max} 从 5.5 升至 21.6，重度和中度-重度污染点位比例从 6% 升至 39%，整个赣江流域 Cd 污染升级至中度和中度-重度，饶河乐安江点位(5 号) Cd 污染升级至重度(图 4)；Hg 污染降级主要表现在 EF^{Hg} 中位值从 1.7 降至 1.0，EF_{max} 从 24.4 降至 4.0，中度及以上污染点位比例从 44% 降至 11%，抚河流域 Hg 污染降至无或轻微(图 5).

整个赣江流域，Cd 污染升级至中度和中度-重度(图 4)，尤其在桃江点位(19 号)、章水点位(16 号)、袁河点位(10 号)和锦江点位(8 号)的 EF^{Cd} 分别从 3.0、3.9、1.9 和 2.1 升至 14.1、11.8、8.6 和 14.0(图 6)；Hg 污染水平降低主要表现在 EF^{Hg} 中位值由 1.86 降至 0.94，且在遂川江点位(15 号)、恩江点位(13 号)和锦江点位(8 号)的污染均降至无或轻微(图 5)；Sb 在贡水点位(18 号)从重度污染降至无或轻微污染；W 在桃江点位(19 号)从无或轻微污染升至中度污染，虽然 W 在章水点位(16 号)的污染等级不变，但 W 的污染水平明显升高，EF^{W} 从 6.1 升至 14.2(图 6).

饶河流域 Cd 污染升级表现在乐安江点位(5

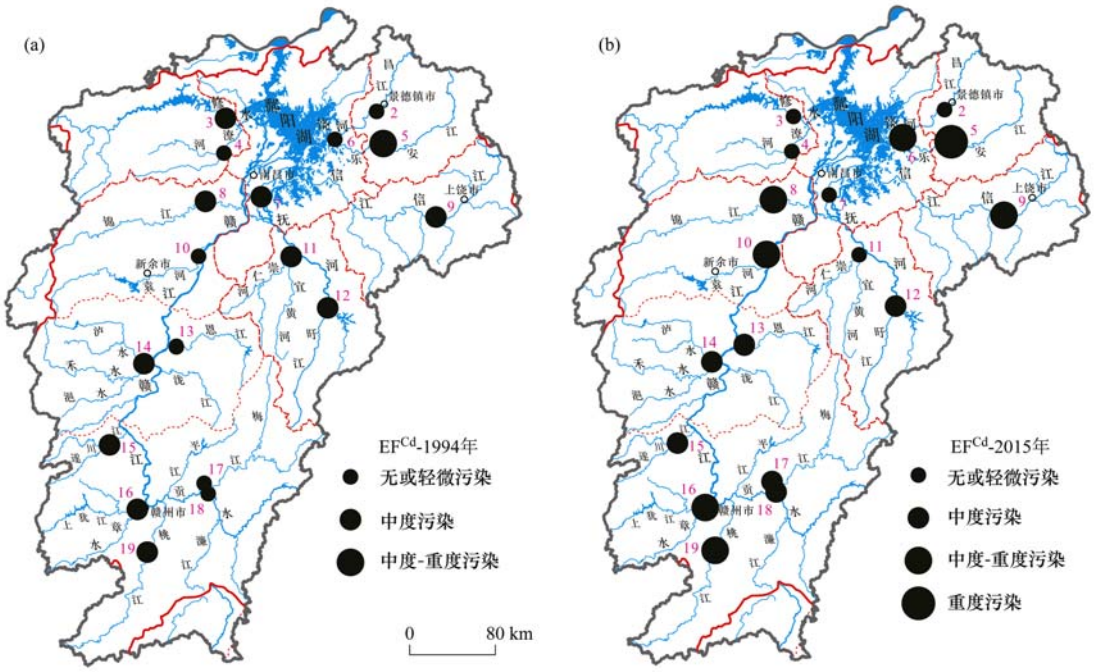


图 4　基于 EF 的鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中 Cd 污染分级

Fig. 4　Classification based on EF for cadmium in floodplain sediments of the Poyang Lake basin

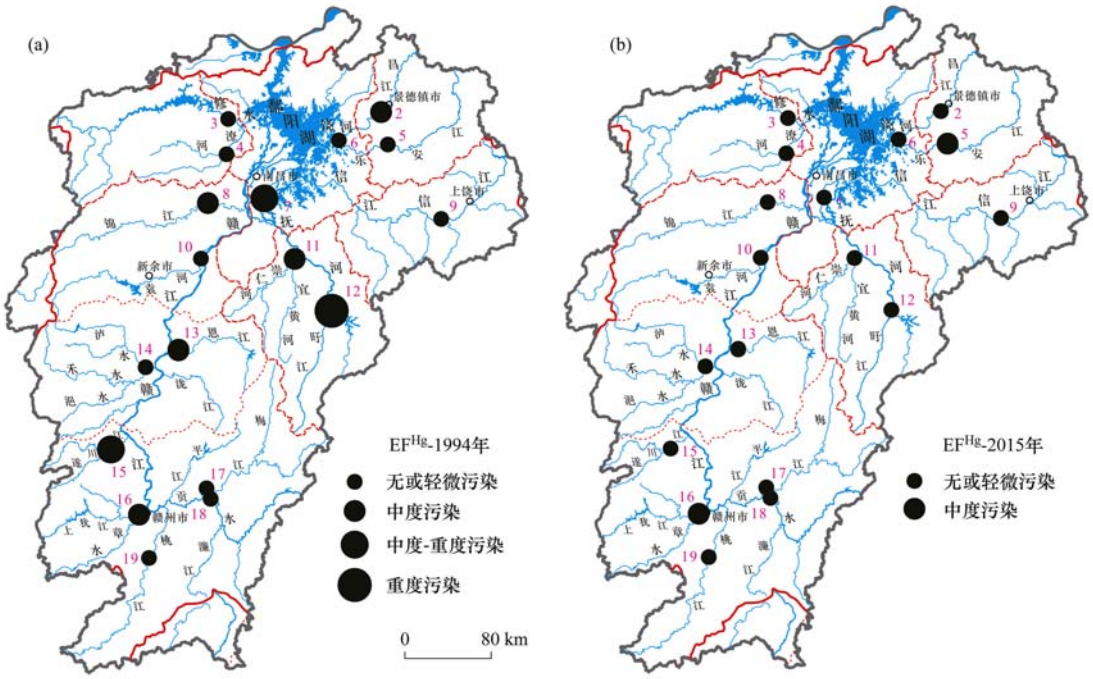


图 5 基于 EF 的鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中 Hg 污染分级

Fig. 5 Classification based on EF for mercury in floodplain sediments of the Poyang Lake basin

号)的 EF^{Cd}从 5.5 升至 21.6,饶河下游点位(6 号)的 EF^{Cd}从 1.5 升至 6.4. 乐安江点位(5 号)的 Cu 由中度污染升至中度-重度污染,Hg、As、Zn、Ni 和 Sb 均由无或轻微污染升级至中度污染.

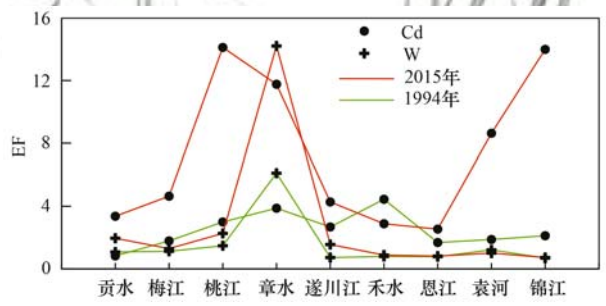


图 6 赣江流域两期泛滥平原沉积物中 Cd 和 W 富集因子对比

Fig. 6 Comparison of enrichment factors for Cd and W in floodplain sediments of the Ganjiang River basin for two periods

基于 MPI 的污染分级结果显示, 1994 年鄱阳湖流域泛滥平原沉积物极度、重度、中度-重度、中度和轻度污染点位比例分别为 11%、6%、28%、44% 和 11%. 极度污染点位分布于赣江上游贡水(18 号)和抚河旰江(12 号),主导因素分别为 Hg 和 Sb 重度污染; 重度污染点位于抚河下游(7 号),主导因素为 Hg 中度-重度污染; 中度-重度污染点位分布于赣江和饶河,其中赣江上游章水点位(16 号)为 W、Sn、Cd 和 Hg 多元素组合污染,赣江上游遂川江点位(15 号)为 Hg、Mn、As 和 Cd 多元素组合污染,赣江中游禾水点位(14 号)和饶河乐安江点位(5 号)污染主控元素为 Cd 和 Mn,饶河昌江点位(2 号)为 Hg、Mn 和 Sn 组合污染(图 7).

2015 年鄱阳湖流域泛滥平原沉积物极度、重度、中度-重度、中度和轻度污染点位比例分别为 22%、11%、22%、33% 和 11%. 极度污染点位分布于赣江和饶河,其中赣江上游桃江点位(19 号)、赣江下游锦江点位(8 号)和饶河乐安江点位(5 号)的 EF^{Cd}均为 12 种微量元素的 EF_{max},赣江上游章水点位(16 号)是以 W、Cd 和 Sn 为主的多元素组合污染; 重度污染点位分布于赣江下游袁河(10 号)和信江(9 号),主导因素是 Cd 中度-重度污染; 中度-重度污染点位分布于赣江和饶河,其中赣江上游梅江点位(17 号)、遂川江点位(15 号)和饶河下游点位(6 号)以 Cd 污染为主,饶河昌江点位(2 号)污染源于 Mn(图 7).

近 20 年来鄱阳湖流域综合污染升级,极度和重度污染点位比例由 17% 升至 33%,且均源于中度-重度和中度污染升级(图 7),Cd 污染加剧是主导因素. 升级至极度污染的点位分布于赣江和饶河乐安江,源于 Hg 或 Sb 污染的极度和重度污染点位均降至中度污染(图 7).

2.3 生态风险

1994 年鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中微量元素的 E_r 排序为 Hg > Cd > Pb/As/Cu/Zn/Cr. 其中 E_r^{Hg}处于 26 ~ 975 之间,极高、高、中等-高、中等和低潜在生态风险点位比例分别为 11%、11%、22%、44% 和 11%,极高潜在生态风险点位于抚河旰江(12 号)和抚河下游(7 号),高潜在生态风险点位于饶河昌江(2 号)和赣江上游遂川江(15 号)(图 8); E_r^{Cd}

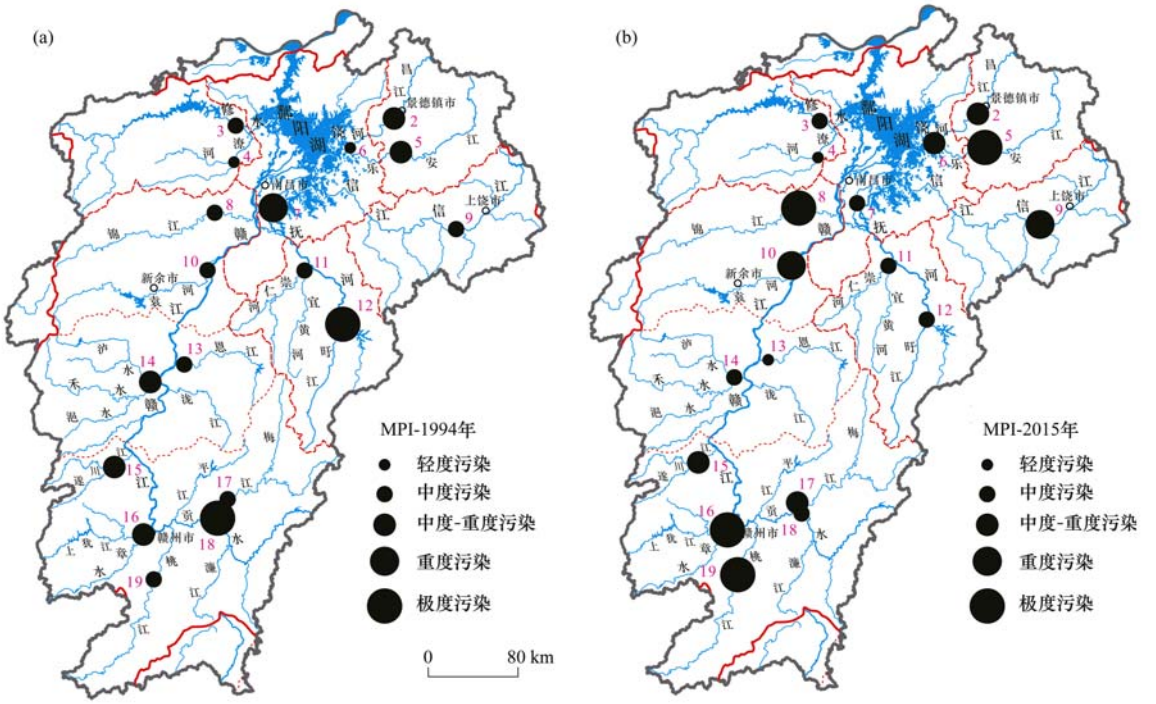


图 7　基于 MPI 的鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中微量元素污染分级

Fig. 7　Classification based on MPI for twelve trace elements in floodplain sediments of the Poyang Lake basin

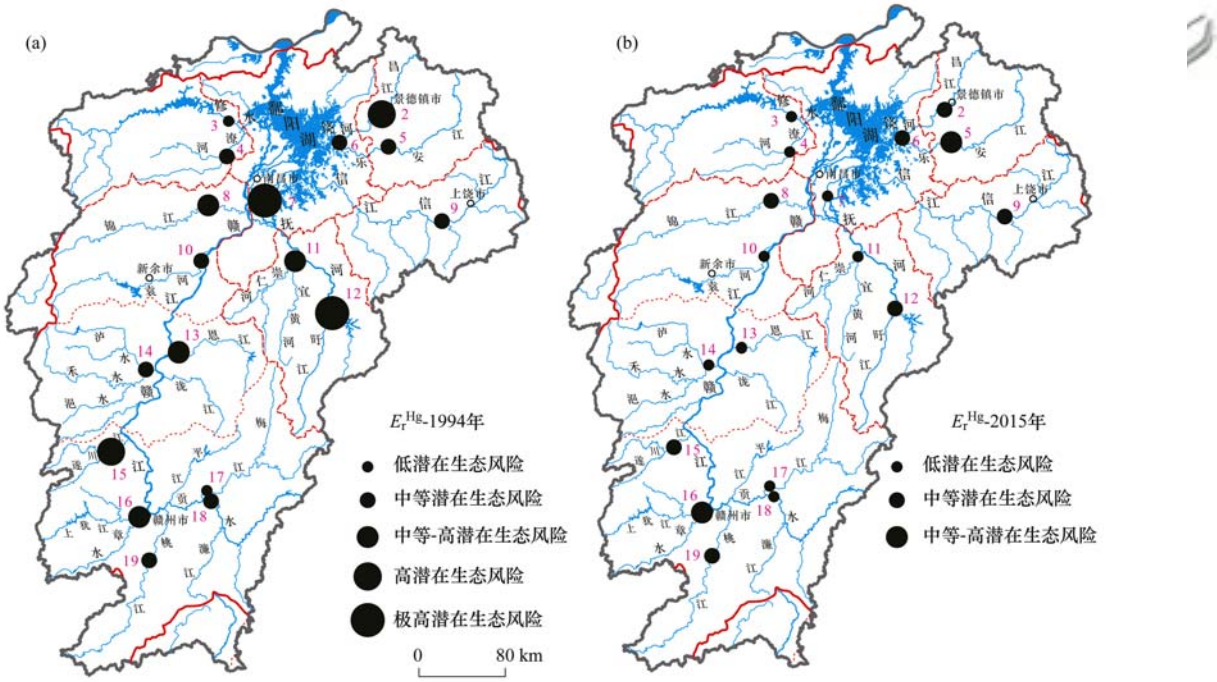


图 8　基于 E_r 的鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中 Hg 潜在生态风险分级

Fig. 8　Classification based on E_r for mercury in floodplain sediments of the Poyang Lake basin

处于 25 ~ 166 之间，高、中等-高、中等和低潜在生态风险点位比例分别为 6%、33%、56% 和 6%，高潜在生态风险点位于饶河乐安江(5 号)，中等-高潜在生态风险点主要分布于赣江中上游、信江和修水(图 9)；E_r 结果显示 Pb、As、Cu、Zn 和 Cr 均为低潜在生态风险.

2015 年微量元素的 E_r 排序为 Cd > Hg > Cu > Pb/As/Zn/Cr. 其中 E_r^{Cd} 处于 31 ~ 647 之间，极高、高、中等-高、中等和低潜在生态风险点位比例分别为 22%、17%、28%、28% 和 6%，极高潜在生态风险点位分布于赣江和饶河乐安江，高潜在生态风险点位于饶河下游(6 号)、信江(9 号)和赣江下游袁河(10 号)，中等-高潜在生态风险点位主要分布于赣江上游和中游(图 9)；E_r^{Hg} 处于 23 ~ 159 之间，中

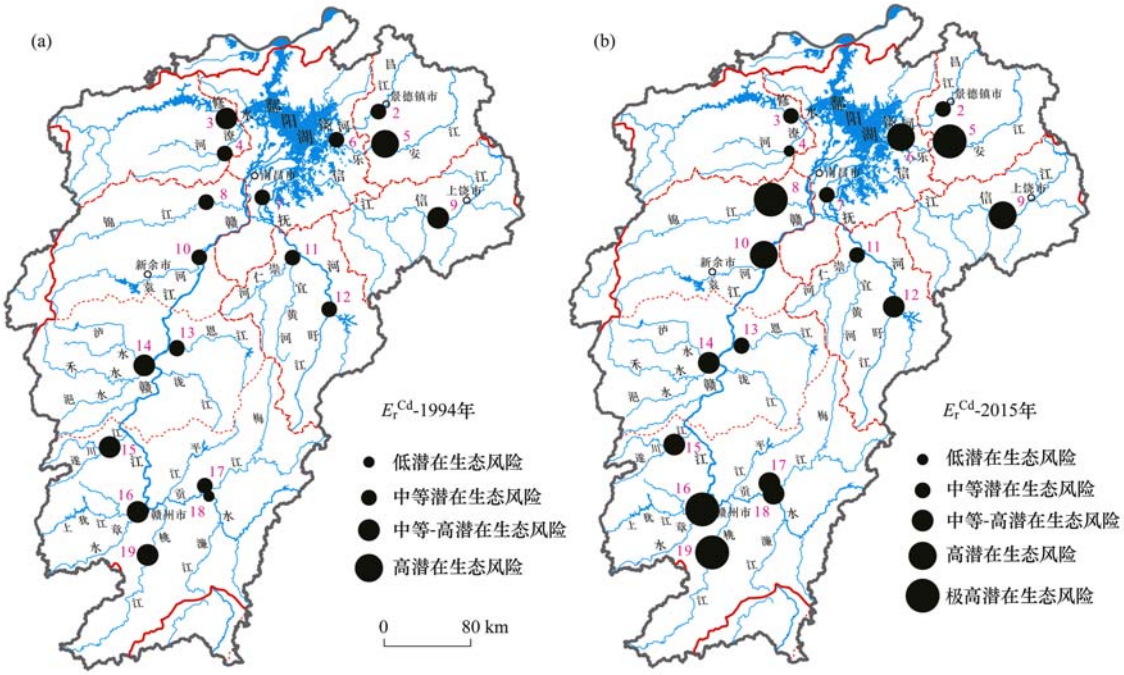


图 9 基于 E_r 的鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中 Cd 潜在生态风险分级

Fig. 9 Classification based on E_r for cadmium in floodplain sediments of the Poyang Lake basin

等-高、中等和低潜在生态风险点位比例分别为 11%、39% 和 50%,中等-高潜在生态风险点位于赣江上游章水(16 号)和饶河乐安江(5 号)(图 8);E_r^{Cu}表明饶河乐安江点位(5 号)为中等潜在生态风险;E_r 结果显示 Pb、As、Zn 和 Cr 均为低潜在生态风险.

近 20 年来鄱阳湖流域引发极高和高潜在生态风险的因素由 Hg 变为 Cd,其点位比例发生明显变化,Hg 由 22% 降至 0,Cd 由 6% 升至 39%.

1994 年,鄱阳湖流域基于 MRI 的极高、高和中等生态风险点位比例分别为 11%、50% 和 39%,极高生态风险点位分布于抚河流域,其高 MRI 贡献率元素是 Hg,高生态风险点的高 MRI 贡献率元素是 Hg 和 Cd(图 10).

2015 年,鄱阳湖流域基于 MRI 的极高、高、中等和低生态风险点位比例分别为 22%、22%、50% 和 6%,极高生态风险点位分布于赣江和饶河流域,极高和高生态风险点的高 MRI 贡献率元素是 Cd(图

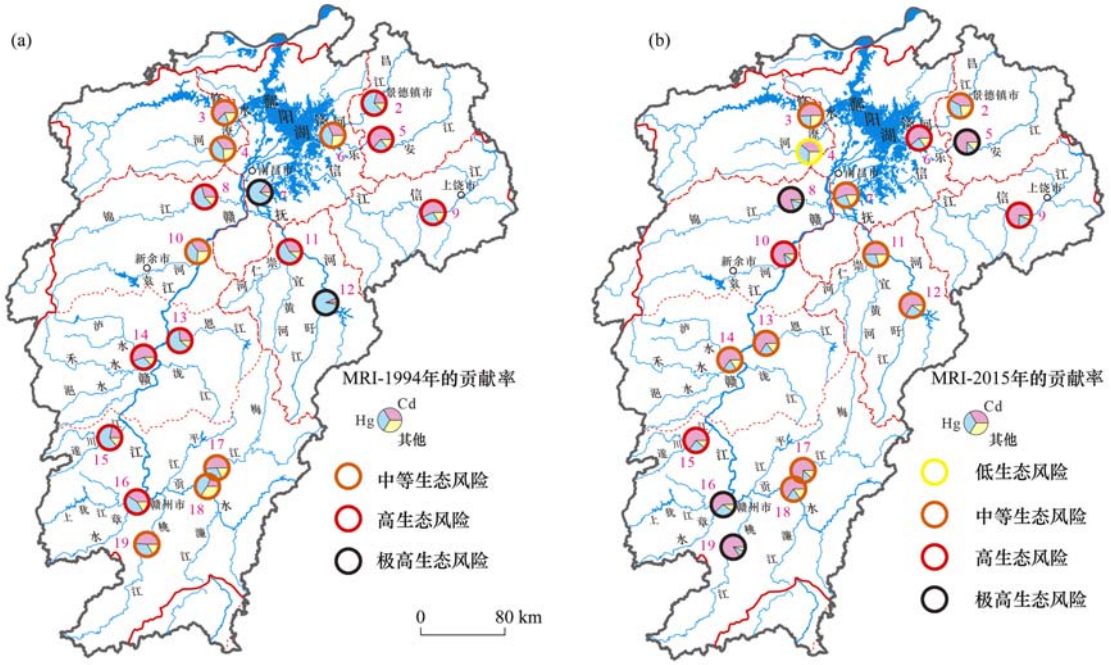


图 10 基于 MRI 的鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中微量元素生态风险分级

Fig. 10 Classification based on MRI for selected elements in floodplain sediments of the Poyang Lake basin

10).

近 20 年来鄱阳湖流域极高生态风险点位的比例由 11% 升至 22%,且均由中等和高生态风险升级而来,其高 MRI 贡献率元素由 Hg 变为 Cd; 源于 Hg 污染的极高生态风险点降至中等生态风险(图 10).

2.4　显著变化原因分析

近 20 年来,赣江、信江和饶河流域 Cd 含量显著升高,其中 Cd 污染在赣江流域升级至中度和中度-重度,在饶河乐安江升级至重度,在信江升级至中度-重度.

赣江是江西省农业灌溉和工业生产的重要水源. 赣州地区是具有规模开采百年历史的钨矿资源区[45],也是我国离子型稀土资源的重要产区. 经过 40 多年的发展,稀土开采污染遍布赣州 18 个县(市、区),涉及废弃稀土矿山 302 个,遗留尾矿 1.91 亿 t[46]. 相关研究表明,赣江章水上游大余县具有百年开采历史的钨矿尾矿堆积区尾砂中 Cd 严重超标,平均含量高达 11 $mg\cdot kg^{-1}$[47]; 大余县 4 大钨矿尾砂库周边地区土壤 Cd 和 W 的平均含量高达 8.88 $mg\cdot kg^{-1}$ 和 221.35 $mg\cdot kg^{-1}$[48]. 2011 ~ 2017 年,不同时间在赣江流域采集的河流沉积物和水样均发现赣江上游高 Cd 的特征(表 3)[49~52],赣江上游章水、桃江和贡水河流沉积物 Cd 和 W 平均含量分别为 2.85 $mg\cdot kg^{-1}$ 和 12.30 $mg\cdot kg^{-1}$,分别是江西省土壤元素背景值的 28.5 倍和 2.41 倍,尤其章水的 Cd 和 W 相对较高[53]; 赣江上游章水和桃江水体中可溶态 Cd 浓度在丰水期和枯水期均处于较高水平[54]. 调查发现大余北部山区钨矿集区周边及其下游章水冲积平原沿岸农田土壤存在以 Cd 和 As 为主的较大面积重金属复合异常区,农田土壤中的 Cd、As 和 W 呈显著正相关[55]; 1987 ~ 2006 年,章水上游沿岸污染区的稻米 Cd 平均含量从 0.23 $mg\cdot kg^{-1}$ 升至 0.59 $mg\cdot kg^{-1}$,在 19 年内增加了 1.5 倍[56]. 在尾矿堆积区尾砂、尾砂库周边土壤、流域内河流沉积物和水体以及河流沿岸农田土壤和作物中,赣江上游章水流域 Cd 均处于较高水平; 钨矿尾砂库周边土壤和河流沉积物中 W 含量也远超背景值,以上都说明赣州地区的矿产开采、尾矿库及废水排放等因素对赣江上游章水流域环境质量产生了长期深远的影响.

桃江流域分布有大大小小的稀土矿区[49],稀土矿残渣和尾矿中含有大量与稀土矿物伴生的重金属元素[57],桃江流域某稀土尾矿区表层土壤 Cd 含量高达 1.80 $mg\cdot kg^{-1}$[58],某稀土矿区周边河流水体 pH 较低且 Mn 浓度远超地表水限量值,88% 的河水已不适用于农业生产[59]; 桃江上游河流沉积物和水体具有高 Cd 的特征[49,52](表 3); 稀土矿开采过程释放到环境中的氨氮具有较强的络合能力,对 Cd 等元素的迁移能力影响较大,容易引发再生污染问题[60],以上都说明桃江流域长期受到矿山开采的影响.

表 3　鄱阳湖流域及各支流多介质微量元素含量/浓度汇总[1)]

Table 3　Summary of the statistics of multi-medium trace element concentrations of the Poyang Lake basin and tributaries

位置	采样介质	层位/cm	样品数	年份	Cd	Pb	As	Cu	Zn	Cr	Ni	Mn	Sb	W
饶河乐安江上游[50]	河流沉积物	0 ~ 10	1	2015	0.48	29.9	10.4	25.4	147	54.4	22.8	723	1.1	—
饶河乐安江中游[50]	河流沉积物	0 ~ 10	1	2015	10.6	45.9	33.3	166	371	67.7	47.3	1 120	1.4	—
饶河乐安江下游[50]	河流沉积物	0 ~ 10	1	2015	5.3	34.2	13.3	56.9	167	57.8	25	646	1.1	—
饶河乐安江[68]	河流沉积物	2 ~ 5	47	2017	0.44	55.90	43.52	545.4	132.0	56.15	—	587	—	—
饶河乐安江[69]	水样-枯水期	0 ~ 50	3	2015	4.23	—	—	5.98	—	—	—	124.13	—	—
饶河乐安江[69]	水样-丰水期	0 ~ 50	3	2015	2.33	—	—	5.28	68.64	—	2.69	183.23	—	—
赣江上游[51]	河流沉积物	0 ~ 20	4	2011	57.48	84.79	18.09	95.94	232.24	40.48	47.11	—	—	—
赣江上游[50]	河流沉积物	0 ~ 10	1	2015	1.24	48.9	21.8	28.7	116	41	19.2	606	0.7	—
赣江上游桃江[49]	河流沉积物	0 ~ 10	10	2017	—	—	16.42	43.09	135.55	—	—	—	—	17.23
赣江上游桃江[49]	水样	10 ~ 50	10	2017	—	—	1.71	53.12	38.92	—	—	—	—	0.15
赣江桃江上游[52]	河流沉积物	0 ~ 20	12	2017	9.09	48.72	15.95	43.1	156.8	38.94	38.94	—	—	17.56
赣江桃江上游[52]	水样	10 ~ 50	12	2017	19.4	33.47	3.24	153.0	101.2	10.5	10.5	—	—	0.35
赣江中游[50]	河流沉积物	0 ~ 10	1	2015	2.52	66	26.5	37.9	185	65.6	31.1	1 070	1.2	—
赣江下游[50]	河流沉积物	0 ~ 10	1	2015	1.29	51.7	22.1	29.2	116	40.8	19.2	622	0.7	—
信江上游[70]	河流沉积物	0 ~ 20	4	2011	2.19	34.77	2.10	27.42	137.11	17.20	28.42	—	—	—
信江上游[50]	河流沉积物	0 ~ 10	1	2015	6.15	241	16.4	733	699	106	42.7	1 728	2.3	—
信江中游[70]	河流沉积物	0 ~ 20	8	2011	3.13	44.59	7.03	68.39	163.78	32.76	39.69	—	—	—
信江中游[50]	河流沉积物	0 ~ 10	1	2015	5.8	64	19.9	74.4	212	43.7	23.6	900	1	—
信江下游[70]	河流沉积物	0 ~ 20	4	2011	6.26	34.21	15.17	66.51	103.00	56.26	44.22	—	—	—
信江下游[50]	河流沉积物	0 ~ 10	1	2015	0.6	57	17.4	25.7	122	56.4	23.5	747	0.9	—
鄱阳湖流域[50]	河流沉积物	0 ~ 10	15	2015	2.7	62.5	16.8	95.4	208.4	60.2	28.4	963.7	1	—

1)河流沉积物中元素含量单位为$mg\cdot kg^{-1}$,水样中元素浓度单位为$\mu g\cdot L^{-1}$

赣江下游袁河和锦江流经赣西萍乡-丰城矿集区,矿集区内主要集中分布了铁矿和煤矿,煤矿主要赋存于萍乡-丰城一带广泛出露的上二叠统乐平组和上三叠统安源组含黑色岩系的地层[61]. 有研究表明,黑色岩系通常富含有机质和微量金属元素,且含有高含量的硫化物,Cd 主要赋存于硫化物组分中[62~64],在暴露于氧气和水的环境中 Cd 容易释放出来,Cd 的浸出会提高河流系统中 Cd 的浓度,且采矿或农业生产等人为活动会加速 Cd 释放进入环境中[64],多流域环境中的 Cd 富集主要源于黑色岩系[65,66]. 袁河和锦江水体中溶解态 Cd 平均浓度相对较高[67],因此黑色岩系的自然风化、采矿及农业生产活动可能会是导致赣江下游袁河和锦江 Cd 污染的重要因素.

信江上游是一个典型的农业区,有效灌溉面积占信江总流域面积的 79%[50]; 永平和贵溪铜矿等矿产分布在信江中游地区[70],且流域内分布有大量的煤矿资源[61]. 2011 年和 2015 年,在信江全流域采集的河流沉积物中均发现了高含量的 Cd(表 3),研究结果表明农业生产和矿产开发等人为活动对信江流域环境造成了污染[50,70].

饶河乐安江流域内有色金属矿产资源丰富,流经中国最大的露天铜矿德兴铜矿区和银山铅锌矿区. 近年来,矿山开采与冶炼及酸性矿山废水排放引发的生态环境影响越来越受到人们的关注. 从 1990s 开始至今,已有一系列对乐安江流域包括河水[23,71~75]、河流沉积物[15,23,68,71~74,76,77]、泛滥平原沉积物[75,78,79]以及近岸农田土壤[23,77]等介质中微量元素含量、空间分布特征及生态风险的相关研究. 较早的研究可以追溯到 1987 年, 1987~1995 年,对河水和河流沉积物中 Cu、Pb 和 Zn 的调查研究结果表明,矿山排放的酸性废水对河流生态系统会产生不良影响[71]; 邻近乐安江的矿山开采和冶炼活动向乐安江排放了大量酸性矿山废水,尤其是难以控制尾矿库的非点源污染和渗漏,会有大量的微量金属流入乐安江[77,80]. 随着时间推进,在乐安江流域开展的多时间、多介质和多指标的调查研究,基本都显示流域环境质量不容乐观(表 3). 不同时间对乐安江流域的详查结果表明,Cd 和 Cu 是主要污染元素[15,23,68], Cd、Cu 和 Hg 是生态风险的主要贡献者[15,68],与本文的研究结果一致. 采用 PMF[22,68]、MCR-ALS[15]、MCR-WALS[22]和 APCS-MLR[23]等不同污染源识别方法得出了相似的结果,结果显示乐安江沉积物中微量金属主要是源于铜矿、铅锌矿和金矿等矿产的开采与冶炼以及农业生产等人为活动. 且有研究结果表明,污染主要源于乐安江中游大乌河和吉水河,从元素组合特征判别污染主要源自铜矿和金矿的开采与冶炼[68]. 因此乐安江流域的污染在很大程度上源于近几十年来长期的矿产开发与冶炼.

大气沉降也会导致微量元素在泛滥平原富集[3]. 2010 年江西省大气 Cd 年排放量为 80.3 t,主要排放源是铅冶炼、锌冶炼和煤燃烧,分别占总排放量的 73%、11% 和 9%,Cd 排放量较 2000 年明显增加[81]; 对比中国生态系统研究网络各监测点降水中可溶微量元素的结果显示,位于江西庐山的监测点 Cd 年沉降通量是全国平均值的 3 倍以上,高于全国 94% 的监测点[82]. 因此大气沉降的 Cd 可能会是近 20 年来鄱阳湖流域 Cd 普遍升高的一个影响因素.

以上结果表明,近 20 年来鄱阳湖流域污染变化的主要因素是 Cd 污染加剧,污染主要源于矿产开发与冶炼、工业和农业生产等人为活动. 采矿活动长期以来一直是河流系统微量金属的一个潜在来源[83],其会向环境中释放大量微量金属,随后这些金属被运送到下游并在洪泛区积累. 如今,泛滥平原沉积物带有流域内曾发生的采矿活动的化学印记,为历史的采矿活动和由此产生的微量金属污染提供了一个“档案”[84]. 在可预见的将来,泛滥平原沉积物可能成为河流下游微量元素污染的潜在来源,最终汇入鄱阳湖流入长江. 因此有必要在鄱阳湖流域污染变化显著的重点地区开展持续监测,以充分了解微量元素在河流系统的积累变化过程,评估生态风险,为鄱阳湖流域环境保护决策提供更合理和更有效的信息.

3 结论

(1) 近 20 年来,鄱阳湖流域 12 种微量元素含量总体上增加的是 Cd、Zn、Mn、W 和 Pb,总体上减少的是 Hg、As、Cr、Ni、Sb 和 Sn,Cu 无明显变化.

(2) 饶河、赣江和信江流域的 Cd 含量显著升高,分别升高了 331%、151% 和 107%,抚河、赣江和修水流域的 Hg 含量分别降低了 87%、41% 和 40%.

(3) EF 结果表明,近 20 年来鄱阳湖流域微量元素的污染变化主要表现为 Cd 污染加剧和 Hg 污染降级,整个赣江流域 Cd 污染升级至中度和中度-重度,饶河乐安江 Cd 污染升级至重度,抚河流域 Hg 污染降至无或轻微.

(4) MPI 结果表明,近 20 年来鄱阳湖流域 Cd 污染加剧导致综合污染升级,极度和重度污染点位比例由 17% 升至 33%.

(5) MRI 结果显示,近 20 年来鄱阳湖流域极高

生态风险点位的比例由 11% 升至 22%,其高 MRI 贡献率元素由 Hg 变为 Cd,源于 Hg 污染的极高生态风险点降至中等生态风险.

(6) 鄱阳湖流域泛滥平原沉积物中微量元素的显著污染变化主要源于矿产开发与冶炼、工业和农业生产等人为活动.

参考文献:

[1] Lair G J, Zehetner F, Fiebig M, *et al*. How do long-term development and periodical changes of river-floodplain systems affect the fate of contaminants? results from European rivers[J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(12): 3336-3346.

[2] Viers J, DupréB, Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(2): 853-868.

[3] Du Laing G, Rinklebe J, Vandecasteele B, *et al*. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: a review[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(13): 3972-3985.

[4] Tockner K, Stanford J A. Riverine flood plains: present state and future trends[J]. Environmental Conservation, 2002, **29**(3): 308-330.

[5] Rennert T, Rabus W, Rinklebe J. Modelling the concentrations of dissolved contaminants (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) in floodplain soils[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017, **39**(2): 331-344.

[6] Zhuang Q F, Li G, Liu Z Y. Distribution, source and pollution level of heavy metals in river sediments from South China[J]. CATENA, 2018, **170**: 386-396.

[7] Grosbois C, Meybeck M, Horowitz A, *et al*. The spatial and temporal trends of Cd, Cu, Hg, Pb and Zn in Seine River floodplain deposits (1994-2000)[J]. Science of the Total Environment, 2006, **356**(1-3): 22-37.

[8] Martin C W. Trace metal storage in recent floodplain sediments along the Dill River, central Germany[J]. Geomorphology, 2015, **235**: 52-62.

[9] Bhatti S S, Kumar V, Kumar A, *et al*. Potential ecological risks of metal(loid)s in riverine floodplain soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **164**: 722-731.

[10] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Use of the geochemical record preserved in floodplain deposits to reconstruct recent changes in river basin sediment sources[J]. Geomorphology, 1997, **19**(1-2): 151-167.

[11] 成杭新, 谢学锦. 泛滥平原沉积物的超低密度采样代表性研究(一)[J]. 长春地质学院学报, 1997, **27**(3): 289-295.
Cheng H X, Xie X J. Research on representativity sampling of floodplain sediments[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1997, **27**(3): 289-295.

[12] 成杭新, 谢学锦. 泛滥平原沉积物的超低密度采样代表性研究(二): 统计学检验及地质意义[J]. 有色金属矿产与勘查, 1997, **6**(4): 238-242.
Cheng H X, Xie X J. Representativity of wide-spaced floodplain sediment sampling: its statistical test and geological significance[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 1997, **6**(4): 238-242.

[13] Xie X J, Cheng H X. The suitability of floodplain sediment as a global sampling medium: evidence from China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, **58**(1): 51-62.

[14] Xie X J, Cheng H X. Global geochemical mapping and its implementation in the Asia-Pacific region[J]. Applied Geochemistry, 2001, **16**(11-12): 1309-1321.

[15] Chen H Y, Chen R H, Teng Y G, *et al*. Contamination characteristics, ecological risk and source identification of trace metals in sediments of the Le'an River (China)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **125**: 85-92.

[16] Yuan G L, Liu C, Chen L, *et al*. Inputting history of heavy metals into the inland lake recorded in sediment profiles: Poyang Lake in China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **185**(1): 336-345.

[17] Zhang H, Jiang Y H, Ding M J, *et al*. Level, source identification, and risk analysis of heavy metal in surface sediments from river-lake ecosystems in the Poyang Lake, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(27): 21902-21916.

[18] Dai L J, Wang L Q, Li L F, *et al*. Multivariate geostatistical analysis and source identification of heavy metals in the sediment of Poyang Lake in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **621**: 1433-1444.

[19] Luo M B, Li J Q, Cao W P, *et al*. Study of heavy metal speciation in branch sediments of Poyang Lake[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(2): 161-166.

[20] Yan F, Liu C L, Wei B W. Evaluation of heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake based on stochastic geo-accumulation model (SGM)[J]. Science of the Total Environment, 2019, **659**: 1-6.

[21] Wang H, Zhao Y J, Liang D F, *et al*. 30 + year evolution of Cu in the surface sediment of Lake Poyang, China[J]. Chemosphere, 2017, **168**: 1604-1612.

[22] 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.

[23] Zhang H, Zeng H, Jiang Y H, *et al*. Using the compound system to synthetically evaluate the enrichment of heavy metal(loid)s in a subtropical basin, China[J]. Environmental Pollution, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113396.

[24] Xie Z L, Jiang Y H, Zhang H Z, *et al*. Assessing heavy metal contamination and ecological risk in Poyang Lake area, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(7), doi: 10.1007/s12665-015-5240-7.

[25] 匡荟芬, 胡春华, 吴根林, 等. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 964-976.
Kuang H F, Hu C H, Wu G L, *et al*. Combination of PCA and PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(4): 964-976.

[26] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 732-736.
Gong X F, Chen C L, Zhou W B, *et al*. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake[J]. Environmental Science, 2006, **27**(4): 732-736.

[27] 伍恒赟, 罗勇, 张起明, 等. 鄱阳湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(6): 114-119.
Wu H Y, Luo Y, Zhang Q M, *et al*. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Poyang Lake[J]. Environmental Monitoring in China, 2014, **30**(6): 114-119.

[28] 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 等. 鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**

(5): 1759-1765.
Jian M F, Li L Y, Xu P F, *et al*. Spatiotemporal variation characteristics of heavy metals pollution in the water, soil and sediments environment of the Lean River-Poyang Lake wetland [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1759-1765.

[29] 杨期勇, 曾明, 谢琪, 等. 鄱阳湖北部湖区沉积物重金属分布及其潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(3): 556-564.
Yang Q Y, Zeng M, Xie Q, *et al*. The distribution of heavy metals and potential ecological risk in the Northern Poyang Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(3): 556-564.

[30] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2599-2606.
Wang L, Wang Y P, Xu C X, *et al*. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of the Yangtze River [J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2599-2606.

[31] 李文明, 杨忠芳, 周雷, 等. 鄱阳湖水系重金属元素地球化学特征及入湖通量[J]. 现代地质, 2014, **28**(3): 512-522.
Li W M, Yang Z F, Zhou L, *et al*. Geochemical characteristic and fluxes of heavy metals in water system of the Poyang Lake [J]. Geoscience, 2014, **28**(3): 512-522.

[32] 成杭新, 严光生, 沈夏初, 等. 化学定时炸弹: 中国陆地环境面临的新问题[J]. 长春科技大学学报, 1999, **29**(1): 68-73.
Cheng H X, Yan G S, Shen X C, *et al*. Chemical time bomb: a new problem faced by China's terrene environment[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999, **29**(1): 68-73.

[33] Zheng K L, Ye J Y, Jiang B L. Selected analytical methods of 57 elements for multi-purpose geochemical survey [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. 295-306.

[34] Rahn K A, Mceaffrey R J. Compositional differences between Arctic aerosol and snow[J]. Nature, 1979, **280**(5722): 479-480.

[35] 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.

[36] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(6): 611-627.

[37] 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), doi: 10.1007/s10661-015-4563-x.

[38] Karageorgis A P, Botsou F, Kaberi H, *et al*. Geochemistry of major and trace elements in surface sediments of the Saronikos Gulf (Greece): assessment of contamination between 1999 and 2018[J]. Science of the Total Environment, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137046.

[39] Martínez-Guijarro R, Paches M, Romero I, *et al*. Enrichment and contamination level of trace metals in the Mediterranean marine sediments of Spain [J]. Science of the Total Environment, 2019, **693**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.372.

[40] Loring D H. Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments[J]. ICES Journal of Marine Science, 1991, **48**(1): 101-115.

[41] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

[42] Duodu G O, Goonetilleke A, Ayoko G A. Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metal in Brisbane River sediment[J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 1077-1091.

[43] Yavar Ashayeri N, Keshavarzi B. Geochemical characteristics, partitioning, quantitative source apportionment, and ecological and health risk of heavy metals in sediments and water: a case study in Shadegan Wetland, Iran[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **149**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110495.

[44] Yi Y J, Yang Z F, Zhang S H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2575-2585.

[45] 陈明, 杨涛, 徐慧, 等. 赣南某钨矿区土壤中 Cd、Pb 的形态特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2015, **34**(12): 2257-2262.
Chen M, Yang T, Xu H, *et al*. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals Cd and Pb in soils around a tungsten mine of Gannan [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(12): 2257-2262.

[46] 蔡奇英, 刘以珍, 管毕财, 等. 南方离子型稀土矿的环境问题及生态重建途径[J]. 国土与自然资源研究, 2013, (5): 52-54.
Cai Q Y, Liu Y Z, Guan B C, *et al*. Environmental issues and ecological restoration of ion-absorbed-type rare earth deposit in South China[J]. Territory & Natural Resources Study, 2013, (5): 52-54.

[47] 刘丹, 赵永红, 周丹, 等. 赣南某钨矿区土壤重金属污染生态风险评价[J]. 环境化学, 2017, **36**(7): 1556-1567.
Liu D, Zhao Y H, Zhou D, *et al*. Ecological risk assessment of heavy metals pollution in a tungsten mine soil in south of Jiangxi Province[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(7): 1556-1567.

[48] 刘足根, 杨国华, 杨帆, 等. 赣南钨矿区土壤重金属含量与植物富集特征[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(8): 1345-1350.
Liu Z G, Yang G H, Yang F, *et al*. Soil heavy metals concentrations and their enrichment characteristics by plants in tungsten mine areas of South Jiangxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, **27**(8): 1345-1350.

[49] 陈明, 李凤果, 陶美霞, 等. 赣南典型矿区河流上覆水与表层沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. 环境化学, 2019, **38**(7): 1461-1469.
Chen M, Li F G, Tao M X, *et al*. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in overlying water and surface sediments in rivers in typical mining areas of southern Jiangxi Province[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(7): 1461-1469.

[50] Xu J Y, Xu L G, Zheng L L, *et al*. Distribution, risk assessment, and source analysis of heavy metals in sediment of rivers located in the hilly area of southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(10): 3608-3619.

[51] Ji Y, Zhang J, Huang X P, *et al*. Investigation and assessment of heavy metals in surface sediments of Ganjiang River, China[J]. Journal of Environmental Biology, 2014, **35**(6): 1173-1179.

[52] Chen M, Li F G, Tao M X, *et al*. Distribution and ecological risks of heavy metals in river sediments and overlying water in typical mining areas of China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **146**: 893-899.

[53] 李凤果, 陈明, 师艳丽, 等. 赣江上游沉积物重金属空间分

布及污染特征[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(3): 920-927.
Li F G, Chen M, Shi Y L, *et al*. Spatial distribution and pollution characteristics of heavy metals in sediments of the upper reaches of Ganjiang River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(3): 920-927.

[54] 张宝军, 朱蒙曼, 王鹏, 等. 赣江流域水体中可溶态镉的时空分布特征及水质评价[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(4): 495-499.
Zhang B J, Zhu M M, Wang P, *et al*. Spatial and temporal distribution of dissolved cadmium in and water quality assessment of the water body of the Ganjiang River Catchment[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, **30**(4): 495-499.

[55] 文帮勇, 黄锦, 张涛亮, 等. 赣南大余地区农田土壤 As、Cd 元素化学形态含量分析[J]. 资源调查与环境, 2015, **36**(4): 298-305.
Wen B Y, Huang J, Zhang T L, *et al*. Geochemical speciation analysis of As and Cd in farmland soil in Dayu County, southern Jiangxi Province[J]. Resources Survey and Environment, 2015, **36**(4): 298-305.

[56] Zhang W L, Du Y, Zhai M M, *et al*. Cadmium exposure and its health effects: a 19-year follow-up study of a polluted area in China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 224-228.

[57] 郭钟群, 赵奎, 金解放, 等. 离子型稀土矿环境风险评估及污染治理研究进展[J]. 稀土, 2019, **40**(3): 115-126.
Guo Z Q, Zhao K, Jin J F, *et al*. Reviews on environmental assessment and pollution prevention of ion adsorption type rare earth ores[J]. Chinese Rare Earths, 2019, **40**(3): 115-126.

[58] Zheng T H, Yang J, Huang P F, *et al*. Comparison of trace element pollution, sequential extraction, and risk level in different depths of tailings with different accumulation age from a rare earth mine in Jiangxi Province, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, **18**(3): 992-1002.

[59] Hao X Z, Wang D J, Wang P R, *et al*. Evaluation of water quality in surface water and shallow groundwater: a case study of a rare earth mining area in southern Jiangxi Province, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, **188**(1), doi: 10.1007/s10661-015-5025-1.

[60] 高志强, 周启星. 稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(12): 2915-2922.
Gao Z Q, Zhou Q X. Contamination from rare earth ore strip mining and its impacts on resources and eco-environment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(12): 2915-2922.

[61] 《中国矿产地质志》项目办公室. 中国矿产地质志《江西卷上》[M]. 北京: 地质出版社, 2015.

[62] Perkins R B, Mason C E. The relative mobility of trace elements from short-term weathering of a black shale[J]. Applied Geochemistry, 2015, **56**: 67-79.

[63] Lavergren U, Åstr öm M E, Bergbäck B, *et al*. Mobility of trace elements in black shale assessed by leaching tests and sequential chemical extraction[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2009, **9**(1): 71-79.

[64] Liu Y Z, Xiao T F, Perkins R B, *et al*. Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, **176**: 42-49.

[65] 杨东, 李方林, 夏锦霞, 等. 清江流域水系中高 Cd 沉积物的物源浅析[J]. 地质科技情报, 2009, **28**(1): 99-104.
Yang D, Li F L, Xia J X, *et al*. Sources analysis of Cd in Qingjiang stream sediment, Hubei Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, **28**(1): 99-104.

[66] Qu S Y, Wu W H, Nel W, *et al*. The behavior of metals/metalloids during natural weathering: a systematic study of the mono-lithological watersheds in the upper Pearl River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134572.

[67] 李传琼, 王鹏, 陈波, 等. 鄱阳湖流域赣江水系溶解态金属元素空间分布特征及污染来源[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 139-149.
Li C Q, Wang P, Chen B, *et al*. Spatial distribution and pollution source of dissolved metals in the Ganjiang River of Lake Poyang Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(1): 139-149.

[68] Li J, Song L T, Chen H Y, *et al*. Source apportionment of potential ecological risk posed by trace metals in the sediment of the Le'an River, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, **20**(5): 2460-2470.

[69] Xu J Y, Zheng L L, Xu L G, *et al*. Identification of dissolved metal contamination of major rivers in the southeastern hilly area, China: distribution, source apportionment, and health risk assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(4): 3908-3922.

[70] Ji Y, Zhang J, Li R H, *et al*. Distribution and partitioning of heavy metals in sediments of the Xinjiang River in Poyang Lake Region, China[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2015, **34**(3): 713-723.

[71] He M C, Wang Z J, Tang H X. Spatial and temporal patterns of acidity and heavy metals in predicting the potential for ecological impact on the Le An river polluted by acid mine drainage[J]. Science of the Total Environment, 1997, **206**(1): 67-77.

[72] He M C, Wang Z J, Tang H X. The chemical, toxicological and ecological studies in assessing the heavy metal pollution in Le An River, China[J]. Water Research, 1998, **32**(2): 510-518.

[73] Xiao H Y, Zhou W B, Zeng F P, *et al*. Water chemistry and heavy metal distribution in an AMD highly contaminated river[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, **59**(5): 1023-1031.

[74] 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 等. 乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 691-701.
Yu Y, LüY N, Wang W J, *et al*. Spatio-temporal distribution and risk assessment of heavy metals in middle and lower reaches of Le'an River[J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 691-701.

[75] Liu W X, Coveney R M, Chen J L. Environmental quality assessment on a river system polluted by mining activities[J]. Applied Geochemistry, 2003, **18**(5): 749-764.

[76] Wen X H, Allen H E. Mobilization of heavy metals from Le An River sediment[J]. Science of the Total Environment, 1999, **227**(2-3): 101-108.

[77] Liu W X, Wang Z J, Wen X H, *et al*. The application of preliminary sediment quality criteria to metal contamination in the Le An River[J]. Environmental Pollution, 1999, **105**(3): 355-366.

[78] 曾凡萍, 肖化云, 周文斌. 乐安江河滩表层土中重金属的分布和残留分析[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(2): 96-101.
Zeng F P, Xiao H Y, Zhou W B. Distribution and retention of heavy metals in floodplain topsoils of Le'an River[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **32**(2): 96-101.

[79] Liang Y, Xiao H, Liu X, *et al*. The risk and phytotoxicity of metal(loid)s in the sediment, floodplain soil, and hygrophilous grasses along Le'an River[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, **17**(4): 1963-1974.

[80] Teng Y G, Ni S J, Wang J S, *et al*. Geochemical baseline of

trace elements in the sediment in Dexing area, South China[J]. Environmental Geology, 2009, **57**(7): 1649-1660.
[81] Shao X, Cheng H G, Li Q, *et al*. Anthropogenic atmospheric emissions of cadmium in China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **79**: 155-160.
[82] Zhu J X, Wang Q F, Yu H L, *et al*. Heavy metal deposition through rainfall in Chinese natural terrestrial ecosystems: evidences from national-scale network monitoring [J]. Chemosphere, 2016, **164**: 128-133.
[83] Martin C W. Trace metal concentrations along tributary streams of historically mined areas, Lower Lahn and Dill River basins, central Germany[J]. CATENA, 2019, **174**: 174-183.
[84] Hürkamp K, Raab T, Völkel J. Lead pollution of floodplain soils in a historic mining area-age, distribution and binding forms[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, **201**(1-4): 331-345.

欢迎订阅 2021 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊.

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等.

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI); 数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等.

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续.

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn;网址:www. hjkx. ac. cn

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 4

Apr. 15, 2021

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas ····· TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, *et al.* (1591)

Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China ····· YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, *et al.* (1600)

Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou: Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model ····· PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, *et al.* (1615)

Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter ····· ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, *et al.* (1626)

Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall ····· FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, *et al.* (1636)

Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust ····· LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, *et al.* (1642)

Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries ····· GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, *et al.* (1649)

Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants ····· NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, *et al.* (1660)

Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China ····· ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, *et al.* (1668)

Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern ····· LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, *et al.* (1679)

Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China ····· LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, *et al.* (1688)

Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes ····· JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, *et al.* (1696)

Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang ····· ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, *et al.* (1706)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin ····· HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, *et al.* (1714)

Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years ····· LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, *et al.* (1724)

Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance ····· LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)

Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China ····· LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, *et al.* (1750)

Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province ····· CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, *et al.* (1761)

Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas ····· DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, *et al.* (1772)

Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin ····· HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, *et al.* (1781)

PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area ····· WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, *et al.* (1791)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake ····· ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, *et al.* (1801)

Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake ····· DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, *et al.* (1811)

Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin ····· CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, *et al.* (1820)

Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River ····· ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, *et al.* (1830)

Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area ····· LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, *et al.* (1839)

Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk ····· XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)

Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria ····· LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, *et al.* (1861)

Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu ····· ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, *et al.* (1870)

Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau ····· WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, *et al.* (1879)

Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis ····· HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, *et al.* (1889)

Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging ····· FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, *et al.* (1901)

Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water ····· WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, *et al.* (1913)

Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System ····· YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, *et al.* (1923)

Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation ····· WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)

Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant ····· CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, *et al.* (1939)

Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge ····· LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, *et al.* (1946)

Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants ····· LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)

Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period ····· WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, *et al.* (1967)

Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas ····· WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, *et al.* (1979)

Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District ····· ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, *et al.* (1989)

Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District ····· ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, *et al.* (2003)

Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds ····· DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, *et al.* (2016)

Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil ····· LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, *et al.* (2024)

Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops ····· CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, *et al.* (2031)

Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress ····· ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, *et al.* (2040)

Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice ····· LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, *et al.* (2047)

Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas ····· CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, *et al.* (2056)

Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community ····· ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, *et al.* (2066)

Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables ····· ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, *et al.* (2080)

Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction ····· WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, *et al.* (2089)