

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

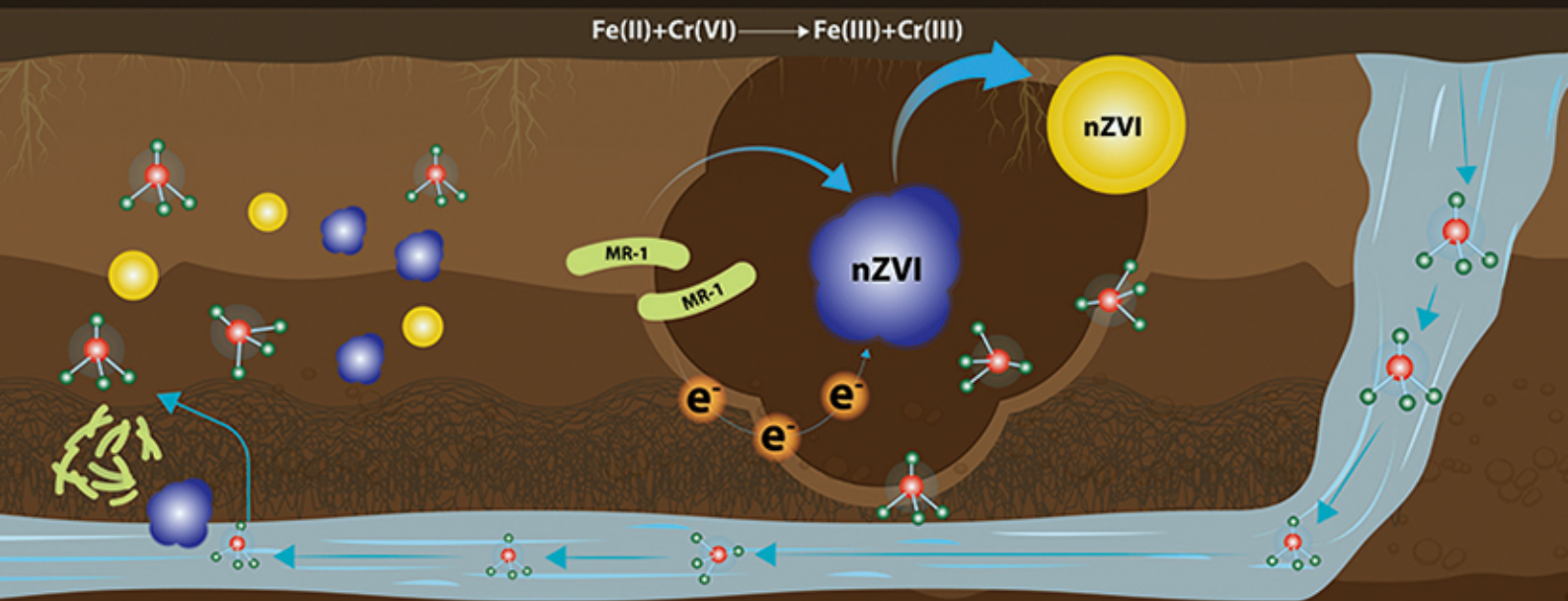
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (<i>Scenedesmus obliquus</i>) 生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N ₂ O 排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载 NH ₄ ⁺ -N 生物炭对土壤 N ₂ O-N 排放和 NH ₃ -N 挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019 年中国全氟辛烷磺酰基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)	

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价

张婉军^{1,2}, 辛存林^{1*}, 于爽^{2*}, 刘齐³, 曾鹏^{1,2}

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 柳州市环境保护监测站, 柳州 545001)

摘要: 在不同季节对露塘及洛维断面水体中可溶态重金属 Zn、Al、Co、As、Ni、Cr、Cu、Mn、Pb、Hg 和 Cd 进行高密度监测, 进而研究可溶态重金属的时空分布及其污染来源, 并利用内梅罗综合污染指数法对柳江水体环境质量进行评价。结果表明: ①露塘和洛维断面可溶态 Al、Co、As、Ni、Cr、Mn、Pb 和 Cd 均符合国家地表水质量Ⅲ类标准, Zn 和 Cu 重金属质量浓度远低于标准限值, Hg 含量略有超标。柳江流域水体各重金属质量浓度大体呈现出平水期最高, 丰水期最低的时间变化规律。在空间分布上洛维断面重金属质量浓度较高; ②柳江流域重金属元素 Hg、Cd 和 As 单因子污染指数较高, 内梅罗综合污染指数评估显示水体中重金属综合污染风险具有一定的季节变化特征表现(3月>11月>6月), 指示不同季节变化对研究区饮水安全可能会存在一定隐患。露塘和洛维两个断面水体重金属总体属于中度污染水平, 其中洛维断面污染程度相对较严重, 应当优先列为柳江流域水环境管理部门的控制断面; ③在探讨年际尺度与月降雨期重金属污染评价的区别中得出, 当利用河流中的 Cu 元素质量浓度进行河流重金属评价时, 降雨季与常规季节的选取对年际尺度河流重金属污染评价影响不显著, 然而当河流中存在 As、Mn、Pb、Al、Cr 和 Ni 元素时将会造成年际尺度的河流重金属污染评价差异性显著; ④多元统计分析结果显示, Cd、Cr、Ni、Co 和 Pb 主要来源于工业生产活动; As 和 Zn 主要来源于雨水淋溶生活污染废弃物; Mn、Al 和 Cu 主要来源于农药和化肥的施用。

关键词: 柳江流域; 河流重金属; 时空分布; 污染评价; 水质

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4234-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012056

Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin

ZHANG Wan-jun^{1,2}, XIN Cun-lin^{1*}, YU Shi^{2*}, LIU Qi³, ZENG Peng^{1,2}

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources/Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. Environmental Monitoring Station of Liuzhou City, Liuzhou 545001, China)

Abstract: In the Liujiang River, soluble heavy metals Zn, Al, Co, As, Ni, Cr, Cu, Mn, Pb, Hg, and Cd were monitored day and night to determine their temporal and spatial distribution as well as the sources of this pollution. The Nemerow comprehensive pollution index method was then used to evaluate the environmental quality of the Liujiang River water body. The results showed that: ① For each river section (Lutang and Luowei), the amounts of soluble Al, Co, As, Ni, Cr, Mn, Pb, and Cd all met the Class III water quality standard limit, as defined in the National Surface Water Quality Class III Standard. The concentration of Zn and Cu was far below the standard limit, while the Hg content slightly exceeded the standard; the concentration of heavy metals in Liujiang River basin was highest in the normal season and lowest in the wet season. In terms of spatial distribution, the Luowei section had a higher heavy metal concentration. ② The single factor pollution indexes for elemental Hg, Cd, and As were higher in the Liujiang River basin. The Nemerow comprehensive pollution index evaluation shows that the risk of heavy metal pollution in the water body exhibits certain seasonal variations (March > November > June), indicating that rainfall in different seasons may result in reduced drinking water safety in the study area. The water of the Lutang and Luowei sections generally exhibited a moderate level of heavy metal pollution. The comprehensive pollution index of the Luowei section was higher than that of the Lutang section, and the pollution level was relatively severe. Therefore, the Luowei section should be listed as a priority control section of the Liujiang River basin by the water environment management department; ③ After assessing the difference in heavy metal pollution between annual and monthly rainfall periods, it was found that the selection of rainy season or conventional season has no significant impact on the assessment of heavy metal pollution in rivers, when the mass concentration of Cu in the river is used. However, the presence of As, Mn, Pb, Al, Cr, and Ni elements in the river will cause significant differences in the evaluation of heavy metal pollution on an interannual scale; ④ Multivariate statistical analysis results show that Cd, Cr, Ni, Co, and Pb in the Liujiang River are mainly derived from industrial production activities; As and Zn are mainly derived from rainwater leaching of domestic pollution waste; Mn, Al, and Cu are mainly derived from the application of pesticides and fertilizers.

Key words: Liujiang River basin; river heavy metals; temporal and spatial distribution; pollution assessment; water quality

收稿日期: 2020-12-07; 修订日期: 2021-03-03

基金项目: 地质调查项目(DD20190452); 国家自然科学基金项目(41402324); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研费专项(2020004); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502302)

作者简介: 张婉军(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域和河流环境, E-mail: 1157570725@qq.com

* 通信作者, E-mail: xincunlin@163.com; yushihydrogeo@163.com

全球经济社会的飞速发展带来的水资源短缺和水污染等问题日益受到人们的关注^[1]。2012 年发生在广西龙江河的镉污染事件则是由于冶化厂通过岩溶水洞将镉浓度超标的废水直接排放到龙江河,致使沿岸及下游居民饮水安全遭到严重威胁,引起了人们对岩溶区水污染的广泛关注^[2]。由于重金属在水中非常稳定,不能被微生物分解,且可以通过饮用水或食物将其蓄积在植物、动物或人体内^[3~5],逐步浓缩富集成为持久性污染物^[6],从而导致潜在的人类健康风险和生态失衡^[7]。另外河流是一个开放的生态空间,相比其他水域生态系统更容易受到重金属的污染^[8]。因此监测柳江流域河流水环境基质中的重金属污染对保护沿岸人们的身体健康具有重要意义^[9]。

水环境中重金属的存在形态可分为溶解态(溶解于水相)和颗粒态(存在于悬浮物中和沉积物中)。其中水体中可溶态重金属易汇集于水体并可直接被生物吸收,从而污染地表和地下水,对人类健康产生潜在威胁^[10,11],另外,水体中可溶态重金属质量浓度是环境监测和管理中评价水质的重要指标^[12],因此,对水体中可溶态重金属的研究具有重要意义。在我国,最早对水体溶解态重金属的研究见于 1979 年^[13],重金属污染研究的关注点从起初的大江大湖^[14,15]转移到中小型河湖^[16~18]。目前国内外学者对河流中溶解态重金属元素开展了广泛研究,主要包括对水中可溶态重金属的分布特征及变化趋势^[19~21]、污染来源分析^[22~24]和污染综合评价^[25~31]等方面,在对水中可溶态重金属的分布特征及变化趋势的研究中发现不同降雨时期对重金属质量浓度造成的影响存在一定的差异,黄清辉等^[32]对长江河口的溶解态重金属分布进行研究,表明溶解态重金属质量浓度枯水期比丰水期高。目前在柳江流域水体可溶态重金属的相关研究方面,主要集中在重金属水化学特征及污染健康风险评价^[33~36],对柳江水体重金属污染评价虽也有报道,但都仅限于对整个河流且都是基于低频取样评估(年、季)。而对单一河段开展污染评价还较少,从整体分析局部重金属污染可能只能解释表面现象。此外在柳江流域鲜有对降雨期和非降雨期重金属质量浓度变化及其造成污染评估差异的研究,由于降雨过程中个别重金属变化迅速,因此对重金属进行高密度的昼夜监测,加强对水体重金属的监测水平,可及时捕捉重金属的质量浓度变化。

柳州市是广西的工业重镇,也是广西“三废”排放的重点城市,周玉春等^[37]的研究表明柳江水体致癌风险值最高在柳州市段,致使水体重金属污染成

为柳州市的热点环境问题。基于此,本文在利用柳江流域河流高分辨率重金属元素监测数据的基础上,结合国内外学者的研究思路和方法,研究了柳江水体中可溶态重金属时空分布特征,对各重金属之间的相关性进行了分析,并对其污染水平进行了评价,讨论降雨期河流重金属污染评价与常规评价是否存在显著差异,探讨柳江水体重金属来源和迁移规律,以为水资源的合理开发、利用及污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

柳江流域面积 57 173 km², 全长 734 km。年均温达 18~20℃, 地处亚热带, 四季较分明, 年均降水量近 1 450 mm, 4~8 月为雨季。柳江流域是珠江水系西江干流第二大支流。源头至三江县的老堡乡为上游, 老堡乡至柳州市为中游, 柳州市至象州县石龙镇三江口为下游。柳江为柳州市的母亲河, 柳江自市区西北的露塘进入城区, 其穿越城中的一段, 将柳州城北部半岛绕成壶形, 故柳州城另有“壶城”的别称。本文主要研究柳州市区柳江干流露塘和洛维两个断面, 由于露塘断面是柳江自市区西北进入城区的点位, 洛维断面是柳江穿越柳州市区后流出的点位, 即图 1 中的 R1 和 R2 两个监测点位。由于柳江穿流市区及气候、岩性和构造的影响, 形成了河流阶地地貌与岩溶地貌迭加的特点。露塘断面主要受到上游河段农业生活污染源及农业面源污染的影响, 另外位于柳江下游的采样点处于研究区域主要的工业区内, 分布有多个工业园, 当地工业污染物的排放对洛维断面河流水环境影响较大。

1.2 数据来源

本研究以柳江干流露塘和洛维两个断面为采样点, 采样时间为 2019 年的 3 月 6~10 日、6 月 10~17 日和 11 月 1~5 日, 每日以 00:00、04:00、08:00、12:00、16:00、20:00 或 02:00、06:00、10:00、14:00、18:00、22:00 的频率采集重金属小时浓度昼夜监测数据。6 月为丰水期, 经统计计算柳江 2019 年 1~12 月的降雨量分别为 80、83.5、103、118.5、74、194、111.5、76.5、103.5、38.5、10 和 10.5 mm。监测指标包括 pH、Zn、Al、Co、As、Ni、Cr、Cu、Mn、Pb、Hg 和 Cd 共 12 项。pH 通过德国产 pH/Cond340i 多参数水质仪进行现场测定(pH 精度达到 0.01 个 pH 单位)。每个采样点用清洗干净的直立式采样器采集表层水(距水面 0.5 m), 储存于用河水充分润洗过的聚乙烯瓶中, 同时记录河水的物理特性及周围环境状况。采集的水样送至中

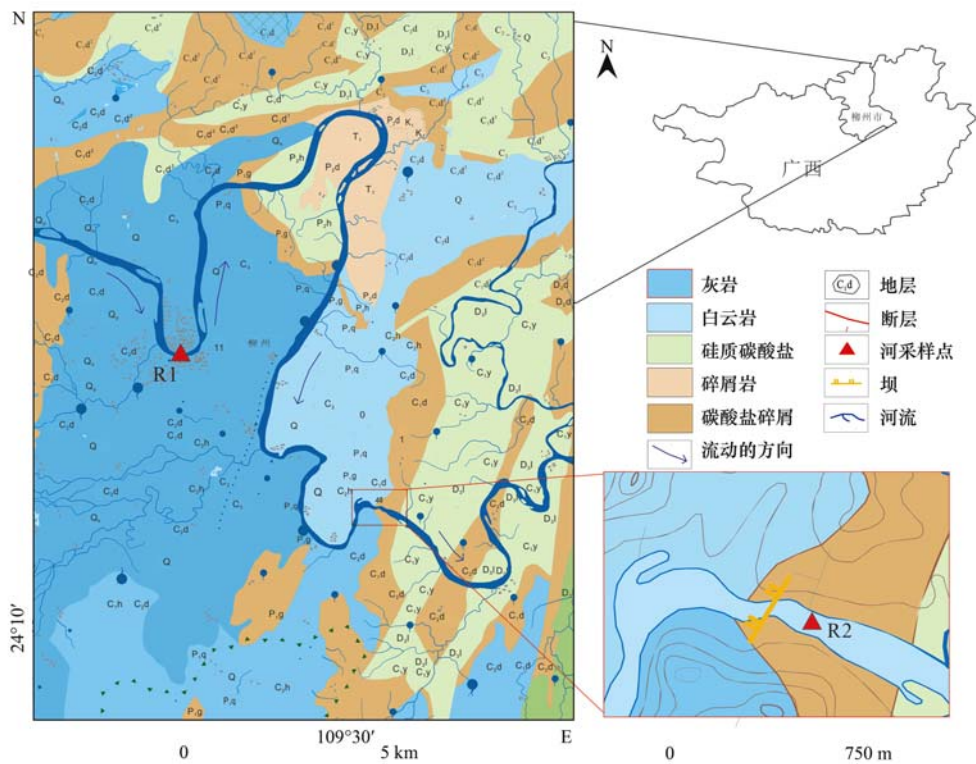


图 1 柳江流域研究区域示意
Fig. 1 Map of the study area in the Liujiang River basin

国地质科学院岩溶地质研究所测试中心进行分析测试. 在实验室中, 收集的水样品在真空下过滤(0.45 μm)后添加 HNO₃, 使 pH 值小于 2, 密封后将其在 4℃ 的冰箱中存放 24 h. 使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定重金属 Zn、Al、Co、As、Ni、Cr、Cu、Mn、Pb、Hg 和 Cd 的质量浓度. 质量控制使用国家标准中心提供的标准物质进行, 分析结果表明所有实验分析的重金属的相对标准偏差均小于 10%, 数据的精确度和准确度均符合要求. 将分析过程中使用的玻璃器皿和其他实验用品在制备的硝酸溶液(浓 HNO₃: H₂O = 3:1)中浸泡 1 d 以上, 用蒸馏水和超纯水洗涤, 然后在烤箱中干燥. 水样分析过程中设置空白对照, 分析过程中所使用的化学试剂均为分析纯, 实验用水为超纯水. 使用国家标准中心提供的标准材料进行质量控制.

1.3 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数是一种常见的多因子综合污染指数, 常被应用于水体重金属的污染评估. 计算式中同时包含了单项污染指数, 既能够反映单因子重金属的污染程度, 也能够反映多种重金属的综合污染情况, 同时也突出了污染指数最大的污染物对环境质量的影响和作用^[33].

单因子污染指数:

$$P_i = C_i/B_i$$

多因子综合污染指数:

$$P_n = \sqrt{\frac{\max(P_i)^2 + \text{ave}(P_i)^2}{2}}$$

式中, C_i 表示重金属 i 的实测浓度; 根据广西壮族自治区水功能区划方案, 柳州市地表水各监测断面水质执行地表水环境质量标准Ⅲ类水质标准, 则 B_i 表示重金属 i 相应的地表水环境质量标准Ⅲ类水质标准值; max(P_i) 表示重金属单因子污染指数的最大值, ave(P_i) 表示各重金属单因子污染指数的平均值. 单因子污染指数 P_i 和多因子综合污染指数 P_n 的评价标准如表 1 所示.

表 1 单因子污染指数和多因子综合污染指数的评价标准
Table 1 Evaluation criteria of single factor pollution index and multi-factor comprehensive pollution index

P _i	污染水平	P _n	污染评价
P _i ≤ 1	清洁	P _n ≤ 0.7	无污染
1 < P _i ≤ 2	轻度污染	0.7 < P _n ≤ 1	低污染
2 < P _i ≤ 3	中度污染	1 < P _n ≤ 2	中度污染
P _i > 3	中度污染	P _n > 2	强污染

1.4 统计分析方法

皮尔逊相关系数分析是指对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析, 从而衡量变量元素的相关密切程度. 相关性系数的取值范围为 (-1, +1). 当相关系数小于 0 时, 称为负相关; 大于 0 时, 称为正相关; 等于 0 时, 称为零相关.

主成分分析法是一种通过降维技术把多个变量化为少数几个主成分的多元统计分析方法,能够在最大限度地保留原始数据信息的基础上,对高维变量进行综合和简化,避免主观随意性,较其他方法有一定的优越性,是环境质量综合评价的一种简单有效的方法^[38].

2 结果与讨论

2.1 柳江流域重金属质量浓度时间分布特征

由表 2 露塘断面各元素全年质量浓度均值为: $Zn > Al > Co > As > Ni > Cr > Cu > Mn > Pb > Hg > Cd$,洛维断面为: $Al > Zn > As > Cr > Ni > Cu > Mn > Hg > Pb > Cd > Co$. 重金属元素不同季节变化特征见图 2,从中可知,露塘和洛维两个断面不同季节河流中 11 种重金属污染物(As、Cd、Cr、Hg、Al、Mn、Ni、Pb、Zn、Co 和 Cu)的质量浓度,不同时段各重金属元素在河流中的质量浓度相差较大,6 月露塘与洛维两个断面的 Cd、Zn、Co 和 Hg 元素的质量浓度未检出,仪器的检测限分别为 0.06、0.8、0.03 和 $0.07\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 从图 2 可以看出露塘与洛维两个断面不同季节重金属元素质量浓度变化有着相似的特征,在露塘与洛维两个断面 As、Cd、Cr 和 Hg 元素的质量浓度季节变化趋势均表现为:3 月 > 11 月 > 6 月,而 Al 和 Mn 元素的质量浓度为:6 月 > 11 月 > 3 月. Ni 和 Pb 元素的质量浓度变化与时间成反比即随着月份的增长而逐渐降低, Zn 和 Cu 元素均是 11 月质量浓度达到最大值,不同的是 Zn 元素的质量浓度在 6 月浓度最低,而 Cu 元素的质量浓度在 3 月出现最低值.

总体来说,在 3、6 和 11 月,除 Al 和 Mn 之外的其余 9 种元素均是平水期(3 月和 11 月)质量浓度最高,丰水期(6 月)最低. 张清华等^[34]的研究发现柳江流域水体各重金属质量浓度具有明显随时间变化的特征,大体呈现出夏季最低,冬季最高的变化规

律,与本研究的结果相似. 同时指出河水中重金属质量浓度出现这种季节上的不同主要是因为水循环条件不同而造成的,统计 2019 年 3、6 和 11 月的降雨量分别为 103、194 和 10 mm,柳江在 6 月为流域丰水期,河流流量大增,由于稀释作用使得河水中的重金属浓度降低,因此,丰水期河流中的重金属质量浓度相较于平水期的重金属质量浓度偏低.

不同重金属元素质量浓度的日变化特征相差较大(见图 3),露塘及洛维断面 As、Ni、Cd、Al 和 Co 元素的质量浓度日变化趋势相似,其中 As 元素的质量浓度在 3 月变化不大,6 月和 11 月呈上下波动型变化, Cd 元素的质量浓度在 11 月保持一个稳定性水平, Ni 和 Co 元素的质量浓度则一直处于不断变化波动状态. 不同断面 Mn 元素的质量浓度一直处于平稳状态没有很大的波动, Al 元素的质量浓度在 6 月存在大幅度的上升和下降现象, Al 元素变异系数较大. 在露塘断面, Zn 元素质量浓度在 3 月 10 日 02:00 出现异常高值, Zn 元素在出现异常值之前的一段连续降雨监测时间段内质量浓度在低值区保持平稳, Pb 元素质量浓度在 3 月 6 日 10:00 出现最大值之后迅速降低,在洛维断面, Cu 元素质量浓度在出现峰值前处于平稳状态,经 6 月 11 日 16:00 出现峰值后立即恢复至出现峰值前的状态, Al 元素的质量浓度在 6 月份存在大幅度的上升和下降现象, Zn、Al、Pb 和 Cu 元素变异系数较大(见表 2),均是在短时间内质量浓度发生剧烈变化后恢复至正常水平. 由于工业等人为排放产生的污染必然会有一定的变化过程且比较缓慢,同时 3 月 10 日 02:00 降雨量较大为 4 mm, 3 月 6 日 10:00 降雨量为 2 mm, 6 月 11 日 16:00 降雨量为 0.5 mm, 6 月为丰水期降雨量较大,可见 Zn、Pb、Cu 和 Al 元素质量浓度与瞬时降雨的大小相呼应,对降雨反应迅速. 推测 Zn、Pb、Cu 和 Al 元素质量浓度出现异常高值是由瞬时降雨的淋洗冲刷作用短时间内被释放出来所造成的.

表 2 柳江流域重金属年质量浓度均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Average annual mass concentration of heavy metals in the Liujiang River basin/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

重金属	露塘					洛维				
	平均数	最大值	最小值	标准差	变异数	平均数	最大值	最小值	标准差	变异数
As	1.10	1.94	0.65	0.73	0.53	1.18	2.08	0.61	0.79	0.62
Cd	0.17	0.27	<0.06	0.14	0.02	0.18	0.28	<0.06	0.15	0.02
Zn	11.62	13.15	<0.8	2.16	4.68	3.4	3.59	<0.8	0.28	0.08
Cr	0.83	1.18	0.61	0.31	0.09	0.95	1.15	0.74	0.21	0.04
Cu	0.72	0.9	0.52	0.19	0.04	0.64	0.78	0.4	0.21	0.04
Mn	0.45	0.55	<0.06	0.14	0.02	0.52	0.76	<0.06	0.34	0.12
Ni	0.87	1.17	0.65	0.27	0.07	0.7	1.12	0.1	0.53	0.28
Co	3.57	7	<0.03	4.85	23.51	0.12	0.15	<0.03	0.04	0
Al	4.31	5.02	3.60	1.01	1.01	33.44	79.35	9.94	39.76	1 581.09
Pb	0.24	0.39	<0.07	0.22	0.05	0.21	0.33	<0.07	0.17	0.03
Hg	0.23	0.26	<0.07	0.05	0	0.28	0.4	<0.07	0.17	0.03

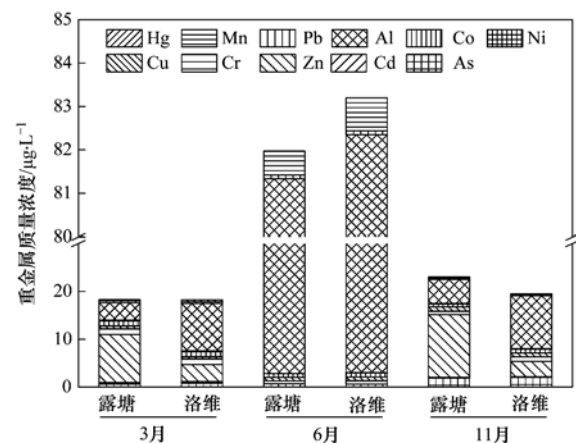


图2 重金属时间分布堆积柱状图

Fig. 2 Temporal distribution and accumulation histogram of heavy metals

2.2 柳江流域重金属质量浓度空间分布特征

表3 为露塘与洛维断面重金属各季节质量浓度

均值, Mn 在 3 月和 6 月均表现为洛维断面 > 露塘断面, 在 11 月为露塘断面 > 洛维断面. Ni 在各季节空间分布规律均为露塘断面 > 洛维断面. Al 在 3、6 和 11 月为洛维断面 > 露塘断面. Pb 在 3 月为露塘断面 > 洛维断面, 在 6 月为洛维断面 > 露塘断面. Zn 和 Cu 在 3 月和 11 月空间分布规律相似均是露塘断面较高. Cd 和 Hg 在 3 月为洛维断面 > 露塘断面, Hg 在 11 月则是露塘断面较高. Cr 在 6 月和 11 月均为洛维断面 > 露塘断面, 在 3 月为露塘断面 > 洛维断面. As 和 Co 在 3 月均为洛维断面 > 露塘断面, 在 6 月均为露塘断面 > 洛维断面, As 在 11 月为露塘断面 > 洛维断面, Co 在 11 月为洛维断面 > 露塘断面.

根据各重金属元素全年质量浓度均值, 洛维断面的 As、Cd、Cr、Mn、Al 和 Hg 元素质量浓度均大于露塘断面, Zn、Cu、Ni、Co 和 Pb 元素则为露塘

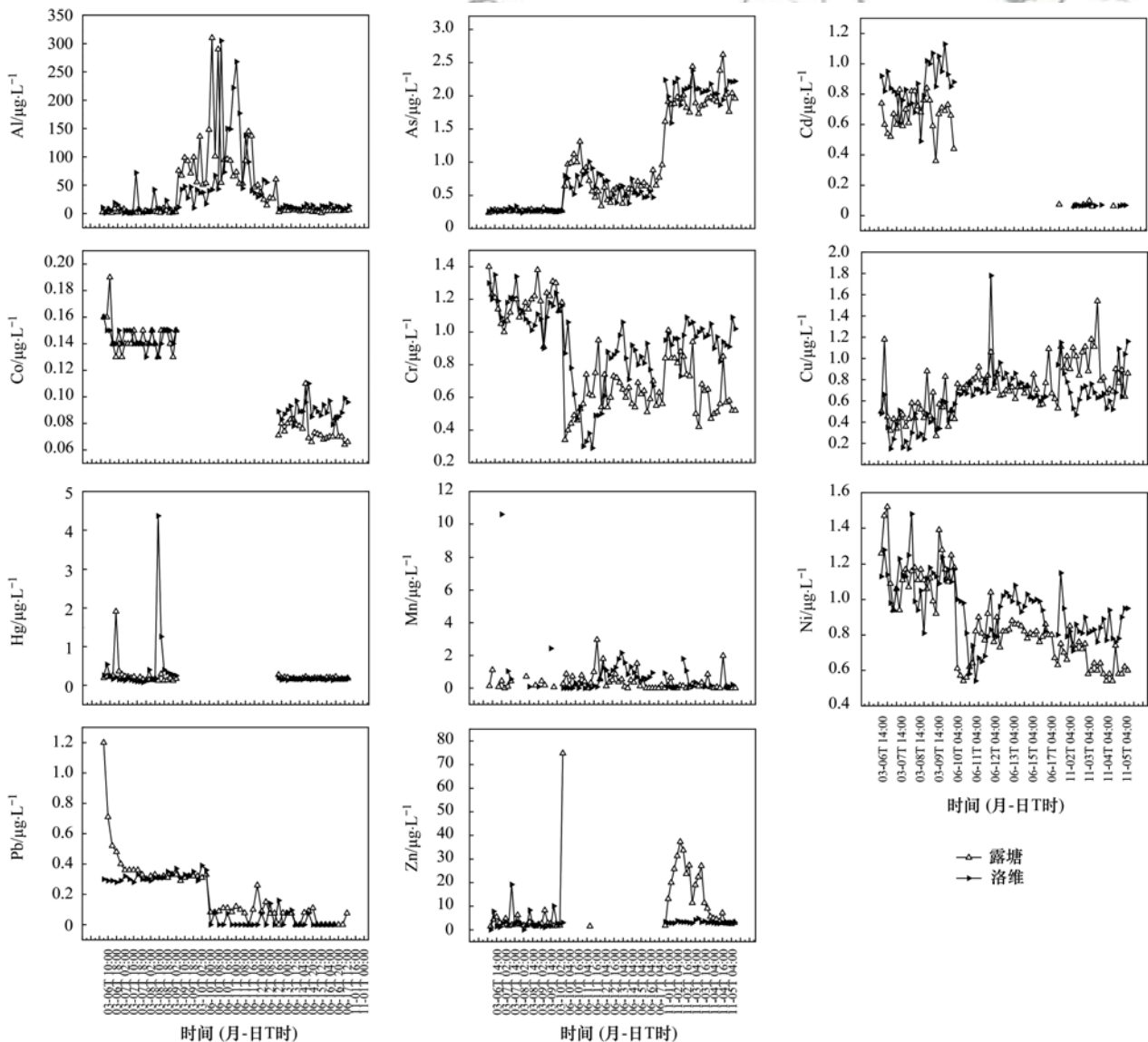


图3 不同季节重金属污染物质量浓度日变化

Fig. 3 Daily changes in the concentration of heavy metal pollutants in different seasons

断面较高,其中洛维断面 Al 元素质量浓度为露塘断面的 8 倍,露塘和洛维断面的 Zn 和 Al 元素的质量浓度虽都较高,但均未超过国家地表水质量Ⅲ类水质标准^[39]要求.除 Zn 和 Al 元素外,各重金属元素在河流中的浓度都较低,基本分布在 0~5 μg·L⁻¹之间.露塘和洛维断面所监测的重金属质量浓度均未超过生活饮用水卫生标准^[40]和 WHO 饮用水水质标准^[41]中重金属质量浓度的限值,除汞外其它重金属元素质量浓度均在地表水环境质量标准Ⅲ类水质标准范围内,露塘和洛维断面汞元素质量浓度均

超过Ⅲ类水质标准限值(0.1 μg·L⁻¹),说明柳江流域水体中存在一定程度的汞污染,柳江流域水体中的 Hg 质量浓度相对较高可能与柳州农业的发展有关.张清华等^[34]的研究认为,柳江流域饮用水源地中的 Hg 质量浓度相对较高可能与 20 世纪 80 年代农药的广泛使用有关,有研究表明土壤中农药、化肥和除草剂的使用以及污水灌溉等农业活动也会带来大量的汞^[42,43],因此柳江流域 Hg 质量浓度较高的原因主要是由于农药的使用使得区域背景值较高造成的.

表 3 断面各季节重金属质量浓度均值¹⁾/μg·L⁻¹

Table 3 Heavy metal content of the different river sections, in each season/μg·L ⁻¹												
时间	区域	As	Cd	Zn	Cr	Cu	Mn	Ni	Co	Al	Pb	Hg
3 月	露塘	0.65	0.27	10.09	1.18	0.52	0.32	1.17	0.14	3.60	0.39	0.26
	洛维	0.86	0.28	3.59	1.15	0.4	2.47	1.12	0.15	9.94	0.33	0.4
6 月	露塘	0.7	ND	ND	0.61	0.74	0.55	0.79	ND	78.49	0.08	ND
	洛维	0.61	ND	ND	0.74	0.74	0.76	0.91	ND	79.35	0.09	ND
11 月	露塘	1.94	0.07	13.15	0.69	0.9	0.35	0.65	0.07	5.02	0.07	0.19
	洛维	2.08	0.07	3.2	0.97	0.78	0.28	0.87	0.09	11.03	0.07	0.16
全年	露塘	1.10	0.17	11.62	0.83	0.72	0.45	0.87	3.57	4.31	0.24	0.23
	洛维	1.18	0.18	3.4	0.95	0.64	0.52	0.7	0.12	33.44	0.21	0.28
地表水环境质量Ⅲ类标准		50	5	1 000	50	1 000	—	—	—	—	50	0.1
生活饮用水卫生标准		10	5	1 000	5	1 000	100	20	—	200	10	1
WHO 饮用水水质准则		10	3	—	50	2 000	400	20	—	200	10	6

1) “ND”表示未检出,以“0”参与统计计算;“—”表示标准中未规定

2.3 水体重金属内梅罗综合污染指数

由于国家地表水环境质量Ⅲ类水质标准中未规定重金属元素 Mn、Ni、Co 和 Al 的标准限值,因此本研究不对这 4 种元素进行水质评价.以露塘和洛维两个断面 7 种重金属元素(As、Cr、Zn、Cu、Pb、Hg 和 Cd)的最低、最高和平均质量浓度为依据,计算单因子污染指数以确定主要的重金属污染物及其危害程度,结合多因子综合污染指数全面反映水体的污染状况,同时突出污染较重的重金属污染物的作用.

露塘和洛维两个断面河流重金属元素的单因子污染指数(P_i)的计算结果分别见图 4 和图 5,由图 4 可以看出露塘断面河流各重金属元素的污染程度为:Hg>Cd>As>Cr>Zn>Pb>Cu. Hg 的单因子污染指数大于 2,属于中度污染水平.除汞之外,其他重金属的单因子污染指数均小于 1,污染水平为“清洁”,水质较好.从图 5 可以看出,洛维断面河流各重金属元素的单因子污染指数大小顺序为:Hg>Cd>As>Cr>Zn>Pb>Cu.其中 Hg 的单因子污染指数达到强污染水平,除 Hg 之外的其他重金属质量浓度较低,均处于无污染水平.

根据图 6 综合污染指数(P_n)值的大小可知,露

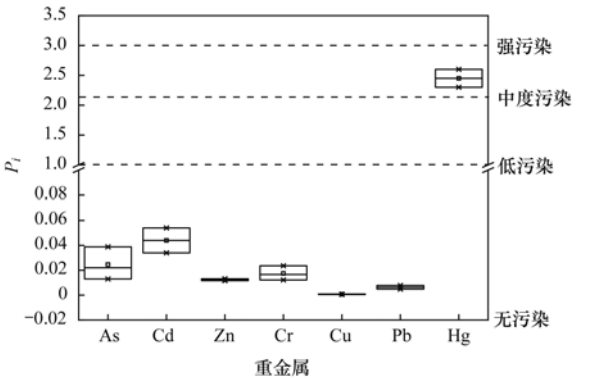


图 4 露塘断面重金属元素单因子污染指数
Fig. 4 Single-factor pollution index of heavy metal elements in Lutang section

塘断面的内梅罗综合污染评价为中度污染,其中 3 月的 P_n 值为 3.98,达到强污染水平,6 月的综合污染指数评价为无污染(P_n 为 0.15),11 月为低污染(P_n 为 1.58).洛维断面河流重金属的综合污染指数总体评价为中度污染,洛维断面 3 月综合污染指数为 8.08,处于强污染水平,6 月综合污染指数为 0.014,污染水平为“无污染”,11 月(P_n 为 1.22)为低污染.3 月洛维断面 P_n 值(8.08)是露塘断面 P_n 值(3.98)的两倍.分析柳江干流露塘和洛维两个断

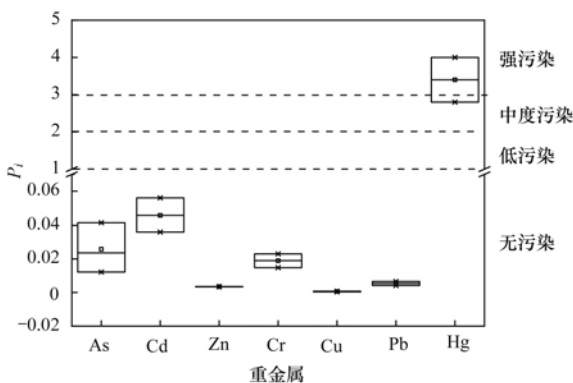


图5 洛维断面重金属元素单因子污染指数

Fig. 5 Single-factor pollution index of heavy metal elements in Luowei section

面内梅罗综合污染指数的时空变化特征,空间上,在6月和11月露塘断面>洛维断面,在3月洛维断面>露塘断面;时间上,露塘和洛维两个断面的综合污染指数具有一定的季节变化特征均表现为3月>11月>6月,即各区域元素综合污染指数均为平水期>丰水期,这可能与各水期降雨量有关,藤洪辉等^[44]对四平市城区河流水中重金属污染特性进行分析与研究,发现重金属质量浓度不仅与物理、化学、生物作用有关,且与水量的大小有关.因此将露塘与洛维断面河流内梅罗综合污染指数与降雨量的比较可知(图6),6月露塘与洛维断面的降雨量最大,而且内梅罗综合污染指数最小,这可能是由于6月处于丰水期使得河流中的水量增多,从而使得河流的稀释能力增强.由图7重金属元素平均小时浓度可以看出,在6月11日的20:00~24:00瞬时降雨量较大,河流中的7种重金属质量浓度均呈现一定的下降趋势,之后河流中Pb、Al和As元素质量浓度上下波动变化很不稳定,Ni、Mn、Cu和Cr元素质量浓度有平稳的小幅度上升.到6月12日20:00至6月13日04:00迎来第二个降雨

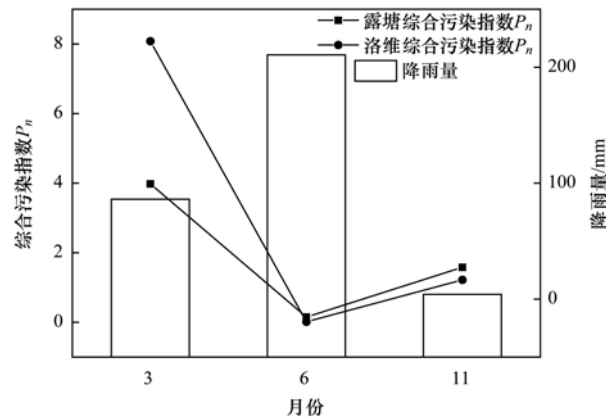


图6 各断面河流内梅罗综合污染指数与降雨量的比较

Fig. 6 Comparison of the comprehensive pollution index and rainfall in each section of the river

期,特别是6月13日04:00之后重金属质量浓度急剧下降至最低值,第三次降雨可能是由于重金属质量浓度都保持在一个较低的水平,于是各重金属质量浓度没有明显的变化.因此6月的降雨使得河流中的重金属元素质量浓度明显降低,河流保持较清洁的水平.

综合以上分析可知,内梅罗综合污染指数扩大了高浓度重金属的影响,在研究区域内内梅罗综合污染指数主要是受汞元素单因子污染指数的影响,重金属污染以Hg为主,洛维断面重金属污染比较突出,可能与露塘和洛维断面不同地理位置有关,由于露塘断面位于洛维断面的上游,柳江自露塘断面进入柳州市区后会经过一些工业集中区,这些工业生产排放中随着水流失的工业生产用料、中间产物、副产品和生产过程中产生的污染物,以及市区农业及生活排污产生的废水,如果直接排入或通过地表渗流进入柳江水体将会随着河流的流动进入洛维断面,因此洛维断面的污染程度高于露塘断面.

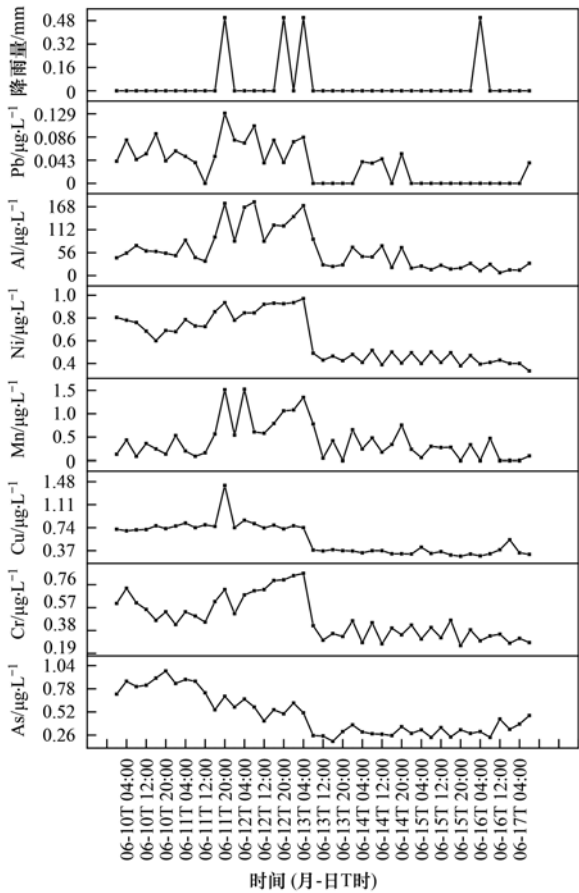


图7 6月重金属元素平均小时浓度

Fig. 7 Average hourly concentration of heavy metal elements in June

2.4 降雨季重金属污染评价与常规季河流重金属污染评价的比较

当进行年际尺度的河流重金属污染评价时,降

雨季与常规季节的选取将会使评价结果产生一定的差异. 由于降雨期(6月)Cd、Zn、Co和Hg均未检出, 因此只针对6月和11月As、Mn、Pb、Ni、Cr、Cu和Al元素进行降雨季与常规季节质量浓度的比较. 由图8所示, Cu元素降雨季与常规季节重金属质量浓度的线性拟合为正线性相关关系, As、Mn、Pb、Al、Cr和Ni元素则相反, 可能是由于降雨后As、Mn、Pb、Al、Cr和Ni元素质量浓度变化较大,

对降雨反映强烈(图7), 导致年际尺度重金属质量浓度由于监测频率或时间的不同而存在差异, 指示就本文而言当利用河流中的Cu元素质量浓度进行河流重金属评价时, 降雨季与常规季节的选取对年际尺度河流重金属污染评价影响不显著, 然而当河流中存在As、Mn、Pb、Al、Cr和Ni元素时降雨季与常规季节的选取将会造成年际尺度的河流重金属污染评价差异性显著.

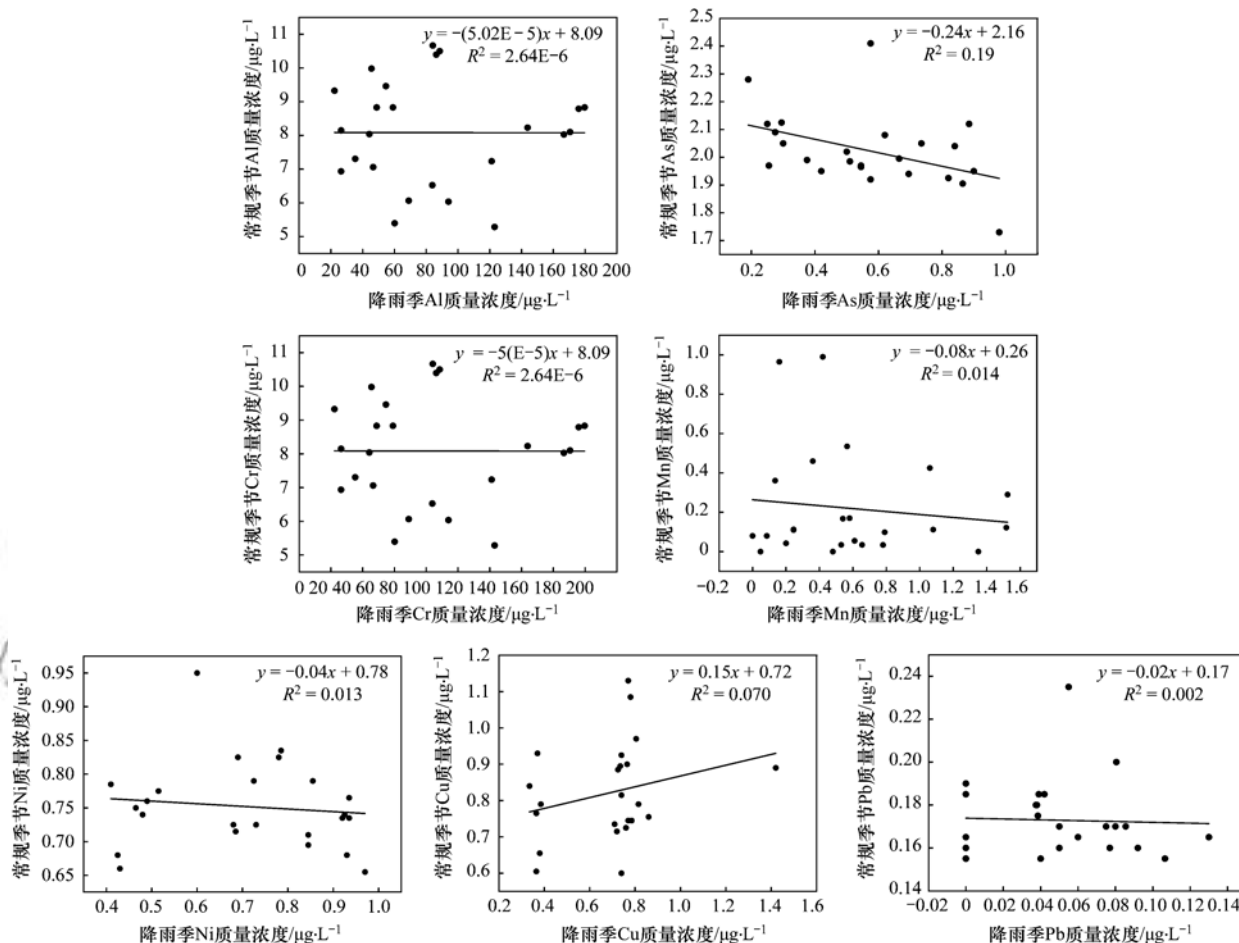


图8 各重金属月降雨期与常规季重金属浓度的线性拟合

Fig. 8 Linear fit between the monthly rainfall period of each heavy metal and the annual heavy metal concentration

3 柳江流域水体重金属来源分析

3.1 重金属相关性

根据检测结果对柳江流域重金属质量浓度进行相关性分析, 分析结果如表4所示. 结果显示, As与Cd、Ni、Al和Pb之间存在极显著负相关关系($P < 0.01$), Cd、Cr、Ni、Co、Pb、Hg与Cu、Al之间存在极显著负相关关系($P < 0.01$), 表明As、Cu和Al与Cd、Ni和Pb的来源不同或者相互抑制; As与Zn和Cu之间存在极显著正相关关系($P < 0.01$), Al与Cu和Mn之间存在极显著正相关关系($P < 0.01$), Cd、Cr、Ni、Co、Pb和Hg两两之间存在极显著正相关关系($P < 0.01$), 说明这些重金属

具有相似的污染源或迁移转化过程.

3.2 重金属污染源分析

通过对各主成分进行分析, 能够得到主要的污染源, 主成分分析使用最大方差法对因子进行旋转, 并通过KMO和Bartlett的球形度检验判断主成分分析结果的有效性, KMO测试是抽样充分性的一种度量, 其值在0~1之间. 较小的值接近0表示进行PCA是不合适的, 大于0.6的值被认为是令人满意的, 而接近1的值则提高了PCA的可靠性^[26]. 如果 $\text{KMO} > 0.5$ 或 $\text{Bartlett} < 0.001$ 则主成分分析的结果有效^[45]. KMO和Bartlett的检验值分别为0.701和0.000, 说明具有统计学意义. 因此为明晰柳江河流水中重金属的来源、构成及其贡献率, 对柳江11种

表 4 柳江流域水体重金属相关矩阵¹⁾

Table 4 Partial correlation matrix of heavy metals in the water of the Liujiang River basin

	As	Cd	Zn	Cr	Cu	Mn	Ni	Co	Al	Pb	Hg
As	1										
Cd	-0.276 **	1									
Zn	0.291 **	0.099	1								
Cr	-0.076	0.742 **	0.100	1							
Cu	0.339 **	-0.614 **	0.158 *	-0.436 **	1						
Mn	-0.124	-0.014	-0.064	0.023	-0.016	1					
Ni	-0.453 **	0.715 **	-0.061	0.845 **	-0.425 **	0.071	1				
Co	0.177 *	0.858 **	0.272 **	0.805 **	-0.453 **	-0.078	0.609 **	1			
Al	-0.352 **	-0.400 **	-0.259 **	-0.251 **	0.238 **	0.334 **	-0.086	-0.583 **	1		
Pb	-0.502 **	0.811 **	-0.059	0.602 **	-0.499 **	0.036	0.708 **	0.607 **	-0.140	1	
Hg	0.064	0.325 **	0.049	0.193 *	-0.207 **	-0.075	0.178 *	0.337 **	-0.211 **	0.226 **	1

1) **表示在 0.01 的水平上显著, *表示在 0.05 的水平上显著

重金属通过因子分析的主成分分析法提取主要因子。表 5 列出 3 个因子的累计贡献率为 70.815%,其中因子 1 的方差贡献率为 41.680%,因子 2 的方差贡献率为 19.329%,因子 3 的方差贡献率为 9.806%,因此,柳江河流水质受 3 个主要因素的影响。

其中因子 1 主要与 Cd、Cr、Ni、Co 和 Pb 具有较高正载荷(均 >0.8),Hg 的载荷为 0.371,则 Hg 可能具有独立来源。Hg 质量浓度主要由于农业活动造成的区域背景值较高^[34]。柳州市区柳江上下游段 Cr 和 Pb 等指标质量浓度较高,有研究表明 Cr 和 Pb 等污染主要来源于电镀、制革、印染和金属加工等行业^[46,47],在本次研究中,重金属的来源与柳州市地区工厂排污企业的分布有关,由于柳江上游是柳州地区重要的有色金属矿区,采矿废水排入柳江上游的露塘断面,因此位于柳江上游的露塘断面水体可能受矿山废水影响较大^[36]。柳江下游洛维断面分布的工业园带是柳州市经济较为发达的区域^[48],如钢铁生产、化工制造和汽车配件生产等对柳江的水质产生较大的影响,主要是由工业点源所造成的河水污染。由此推断 Cd、Cr、Ni、Co 和 Pb 的来源与工业生产活动有密切的关系。

因子 2 与 As 和 Zn 的相关性较大,As 和 Zn 的变异程度较大,则可能受到人类活动的影响,重金属 As 和 Zn 可能来源于人类生活中产生的废弃物^[49],生活用水形成的废水又大多数直接或间接地排入柳江^[50],研究区域内凤山镇和周边的长槽村、社冲村等乡村存在重金属生活废弃物堆放以及处理不当的问题,经过雨水淋溶对柳江水质造成影响,由此推断 As 和 Zn 的来源与雨水淋溶生活污染废弃物有密切关系。

因子 3 与 Mn、Al 和 Cu 的相关性较大。Mn 和 Cu 一般可作为使用农药和化肥等农业活动的标志元素^[51],Mn、Al 和 Cu 的较高质量浓度主要分布在

露塘断面,根据采样时对周边环境的调查发现,该区域主要来自凤山镇延伸到市区河段的农田带来的农业面源污染,由于 Mn、Al 和 Cu 在丰水期的质量浓度均较大,施用的农药和化肥中所含的 Mn、Al 和 Cu 等元素可能经雨水的淋滤作用经地表径流进入河流中,由此推断 Mn、Al 和 Cu 的来源与农药和化肥的施用有密切关系。

表 5 柳江流域水体重金属主成分分析

Table 5 Principle component analysis of heavy metals in the water of the Liujiang River basin

项目	因子 1	因子 2	因子 3
As	-0.254	0.819	0.194
Cd	0.958	0.016	0.003
Zn	0.073	0.575	0.478
Cr	0.860	0.052	0.253
Cu	-0.652	0.193	0.320
Mn	-0.012	-0.416	0.694
Ni	0.828	-0.310	0.144
Co	0.864	0.420	0.129
Al	-0.402	-0.706	0.257
Pb	0.837	-0.297	-0.031
Hg	0.371	0.229	-0.244
特征根	4.585	2.126	1.079
方差贡献率/%	41.680	19.329	9.806
累积贡献率/%	41.680	61.009	70.815

4 结 论

(1)露塘和洛维断面重金属 Al、Co、As、Ni、Cr、Mn、Pb 和 Cd 元素均符合国家地表水质量Ⅲ类标准,Zn 和 Cu 重金属质量浓度远低于标准限值,Hg 质量浓度存在超标。柳江流域重金属质量浓度时空分布特征,在时间上重金属质量浓度具有明显的季节性变化特征,除 Al 和 Mn 外呈现出平水期(3 月和 11 月)质量浓度最高,丰水期(6 月)最低的变化规律。在空间上下游洛维断面元素质量浓度较高。

(2)采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数对柳江流域水体的重金属污染水平进行评价,结

果表明柳江干流水体中存在一定程度的汞污染,因此要加强柳江流域 Hg 元素的污染防治,露塘和洛维两个断面的综合污染指数具有一定的季节变化特征即各区域元素综合污染指数均为平水期 > 丰水期,这可能与各水期降雨量有关,空间上洛维断面污染程度相对较严重,应当将洛维断面列为柳江流域水环境管理部门的优先控制断面。

(3)在探讨年际尺度与月降雨期重金属污染评价的区别中得出,当利用河流中的 Cr 和 Cu 元素质量浓度进行河流重金属评价时,降雨季与常规季节的选取对年际尺度河流重金属污染评价影响不显著,然而当河流中存在 As、Mn、Pb、Al 和 Ni 元素时降雨季与常规季节的选取将会造成年际尺度的河流重金属污染评价差异性显著。

(4)通过对柳江干流水中 Zn、Al、Co、As、Ni、Cr、Cu、Mn、Pb、Hg 和 Cd 进行相关性分析及主成分分析,结合当地自然环境与生产生活情况可判定:柳江干流水中 11 种重金属元素主要由 3 个主成分构成,第一主成分为 Cd、Cr、Ni、Co、Pb 和 Hg, Cd、Cr、Ni、Co 和 Pb 来源于工业生产活动, Hg 来源于农业活动;第二主成分为 As 和 Zn,来源于雨水淋溶生活污染废弃物;第三主成分为 Mn、Al 和 Cu,来源于农药和化肥的施用。

参考文献:

- [1] Ouyang Y. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis[J]. *Water Research*, 2005, **39**(12): 2621-2635.
- [2] 周泽建,覃源. 广西龙江镉污染产生原因与治理对策[J]. 防灾博览, 2012, (2): 58-61.
- [3] Chen Q Y, Wu Z H, Liu J L. Ecotoxicity of chloramphenicol and Hg acting on the root elongation of crops in North China[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2011, **5**(4): 909-916.
- [4] Hasan M A A, Ahmed M K, Akhand A A, *et al.* Toxicological effects and molecular changes due to mercury toxicity in freshwater snakehead (*Channa punctatus* Bloch, 1973) [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2010, **4**(1): 91-98.
- [5] Wu B, Zhao D Y, Jia H Y, *et al.* Preliminary risk assessment of trace metal pollution in surface water from Yangtze River in Nanjing Section, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **82**(4): 405-409.
- [6] 宋春霞,彭元成,苏金铃. 火焰原子吸收分光光度法测大沂河水体的重金属含量[J]. 广东微量元素科学, 2006, **13**(3): 46-49.
- Song C X, Peng Y C, Su J L. Determination of eight element in Dayihe River waters by flame atomic absorption spectrometry[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2006, **13**(3): 46-49.
- [7] Bhattacharya A K, Mandal S N, Das S K. Bioaccumulation of zinc, copper and lead in upper stretch of Gangetic West Bengal [J]. *Trends in Applied Sciences Research*, 2007, **2**(6): 492-499.
- [8] 陈豪,左其亨,窦明. 河流底泥重金属污染研究进展[J]. 人民黄河, 2014, **36**(5): 71-75.
- Chen H, Zuo Q T, Dou M. Research progress and prospects of heavy metal pollution in river sediment[J]. *Yellow River*, 2014, **36**(5): 71-75.
- [9] Mohan S V, Nithila P, Reddy S J. Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index [J]. *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 1996, **31**(2): 283-289.
- [10] 周巧巧,任勃,李有志,等. 中国河湖水体重金属污染趋势及来源解析[J]. 环境化学, 2020, **39**(8): 2044-2054.
- Zhou Q Q, Ren B, Li Y Z, *et al.* Trends and sources of dissolved heavy metal pollution in water of rivers and lakes in China[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(8): 2044-2054.
- [11] 徐连伟,曲婷婷,赵彦涛. 水产品中重金属污染的来源危害及防治措施[J]. 农业与技术, 2018, **38**(1): 30-32.
- [12] 吴蕾,刘桂建,周春财,等. 巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 738-747.
- Wu L, Liu G J, Zhou C C, *et al.* Temporal-spatial distribution and pollution assessment of dissolved heavy metals in Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 738-747.
- [13] Zhang S, Dong W J, Zhang L C, *et al.* Geochemical characteristics of heavy metals in the Xiangjiang River, China [J]. *Hydrobiologia*, 1989, **176**(1): 253-262.
- [14] 罗伟权. 珠江口海域重金属污染浅析[J]. 海洋通报, 1984, **3**(5): 64-69.
- Luo W Q. Preliminary analysis of heavy metals pollution in the Zhujiang River (Pearl River) estuarine area[J]. *Marine Science Bulletin*, 1984, **3**(5): 64-69.
- [15] 陈喜保,章申. 湘江水体中重金属的化学形态及分布特征的研究[J]. 环境科学学报, 1986, **6**(2): 131-140.
- Chen X B, Zhang S. A study on chemical speciation and distribution characteristics of heavy metals in Xiangjiang River water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1986, **6**(2): 131-140.
- [16] 马小玲. 黄河甘宁蒙段水体重金属含量水平及污染评价研究[D]. 北京:中央民族大学, 2016.
- [17] 赵振乾,刘阳,孙春意,等. 沂河山东段水体中重金属的分布与污染评价[J]. 安徽农业科学, 2014, **42**(8): 2429-2431.
- Zhao Z Q, Liu Y, Sun C Y, *et al.* Distribution and pollution assessment of heavy metals in the water of Yihe River in Shandong Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, **42**(8): 2429-2431.
- [18] 鲍广强. 基于 GIS 的黑河流域重金属分布特征及污染风险评估[D]. 银川:宁夏大学, 2018.
- Bao G Q. Distribution characteristics and pollution risk assessment of heavy metals in Heihe River basin based on GIS [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018.
- [19] 杨学福,关建玲,王蕾,等. 渭河陕西段水体中重金属的时空动态变化特征研究[J]. 安全与环境学报, 2013, **13**(6): 115-119.
- Yang X F, Guan J L, Wang L, *et al.* Spatial and temporal variation features of heavy metal pollutants in the Weihe River in Shaanxi[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, **13**(6): 115-119.
- [20] 张凤熔. 拉萨河流域水化学特征及水体重金属源解析[D]. 天津:天津大学, 2017.
- Zhang F R. Hydrochemical characteristics of Lhasa River basin and source apportionment of heavy metals in water[D]. Tianjin:

- Tianjin University, 2017.
- [21] 罗万次, 苏搏, 刘熊, 等. 广西北仑河口红树林保护区表层海水溶解态重金属时空分布及其影响因素[J]. 海洋通报, 2014, **33**(6): 668-675.
- Luo W C, Su B, Liu X, *et al.* Spatial and temporal distributions and influence factors of the dissolved heavy metals in surface water in the mangrove reserve at the Beilun River estuary in Guangxi[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, **33**(6): 668-675.
- [22] 张勇, 李月月. 沱河芦岭煤矿段水体重金属污染特征与来源解析[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2020, **36**(2): 9-14.
- Zhang Y, Li Y Y. Characteristics and sources of heavy metal pollution in water body of Tuohe Luling Coal Mine[J]. *Journal of Chifeng University (Natural Science Edition)*, 2020, **36**(2): 9-14.
- [23] 费志军, 王柱红, 唐杨. 阿哈湖水体丰枯水期重金属含量特征与来源解析[J]. 地球与环境, 2021, **49**(1): 42-50.
- Fei Z J, Wang Z H, Tang Y. Characteristics and source analysis of heavy metals in water of Aha Lake during the rain and dry seasons[J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(1): 42-50.
- [24] Dibofori-Orji AN, Ihunwo O C, Udo K S, *et al.* Spatial and temporal distribution and contamination assessment of heavy metal in Woji Creek[J]. *Environmental Research Communications*, 2019, **1**(11): 111003.
- [25] 左航, 马小玲, 陈艺贞, 等. 黄河上游水体中重金属分布特征及重金属污染指数研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(9): 3047-3052.
- Zuo H, Ma X L, Chen Y Z, *et al.* Studied on distribution and heavy metal pollution index of heavy metals in water from upper reaches of the Yellow River, China[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(9): 3047-3052.
- [26] Bhardwaj R, Gupta A, Garg J K. Evaluation of heavy metal contamination using environmetrics and indexing approach for River Yamuna, Delhi stretch, India[J]. *Water Science*, 2017, **31**(1): 52-66.
- [27] Montes-Botella C, Tenorio M D. Water characterization and seasonal heavy metal distribution in the Odiel River (Huelva, Spain) by means of principal component analysis[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, **45**(4): 436-444.
- [28] 杨志勇, 王现国. 豫西山前典型地段地表水环境重金属污染评价[J]. 人民黄河, 2019, **41**(11): 54-58, 92.
- Yang Z Y, Wang X G. Analysis and evaluation of heavy metal pollution in surface water environment in typical areas of western Henan Province[J]. *Yellow River*, 2019, **41**(11): 54-58, 92.
- [29] 黄毅, 苏立彬, 郝守宁. 尼洋河流域水体重金属健康风险评估[J]. 高原农业, 2020, **4**(2): 185-190, 198.
- Huang Y, Su L B, Hao S N. Health risk assessment of heavy metals in the Niyang River[J]. *Journal of Plateau Agriculture*, 2020, **4**(2): 185-190, 198.
- [30] Jafarzadeh S, Fard R F, Ghorbani E, *et al.* Potential risk assessment of heavy metals in the Aharchai River in northwestern Iran[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020, **115**, doi: 10.1016/j.pce.2019.102812.
- [31] Duncan A E, de Vries N, Nyarko K B. Assessment of heavy metal pollution in the main Pra River and its tributaries in the Pra Basin of Ghana[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2018, **10**: 264-271.
- [32] 黄清辉, 沈焕庭, 茅志昌. 长江河口溶解态重金属的分布和行为[J]. 上海环境科学, 2001, **20**(8): 372-374.
- Huang Q H, Shen H T, Mao Z C. Distribution and behavior of dissolved heavy metals in the River Yangtze estuary[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2001, **20**(8): 372-374.
- [33] 李世龙, 熊建华, 邓超冰, 等. 西江流域柳江水体重金属污染状况及健康风险评价[J]. 广西科学, 2018, **25**(4): 393-399.
- Li S L, Xiong J H, Deng C B, *et al.* The assessment of the heavy metal pollution and health risks in the Liujiang River, Xijiang Region[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, **25**(4): 393-399.
- [34] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1598-1607.
- Zhang Q H, Wei Y Z, Cao J H, *et al.* Heavy metal pollution of the drinking water sources in the Liujiang River basin, and related health risk assessments[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1598-1607.
- [35] 文泽伟. 龙江-柳江-西江流域的水化学特征和重金属污染研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- Wen Z W. Study on hydrochemistry characteristics and heavy metal pollution in the Longjiang-Liujiang-Xijiang watershed[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [36] 原雅琼, 何师意, 于爽, 等. 柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2437-2445.
- Yuan Y Q, He S Y, Yu S, *et al.* Hydrochemical characteristics and the dissolved inorganic carbon flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2437-2445.
- [37] 周玉春, 支崇远, 王路, 等. 柳江水体重金属污染健康风险评估[J]. 安徽农业科学, 2013, **41**(10): 4370-4372, 4375.
- Zhou Y C, Zhi C Y, Wang L, *et al.* Health risk assessment of heavy metals pollution in Liujiang River[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, **41**(10): 4370-4372, 4375.
- [38] 刘总堂, 李春海, 章钢娅. 运用主成分分析法研究云南湖库水体中重金属分布[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 459-466.
- Liu Z T, Li C H, Zhang G Y. Application of principal component analysis to the distributions of heavy metals in the water of lakes and reservoirs in Yunnan Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(4): 459-466.
- [39] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water[S].
- [40] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- GB 5749-2006, Standards for drinking water quality[S].
- [41] WHO. Guidelines for drinking-water quality (4th ed.)[M]. Geneva: WHO, 2011.
- [42] Marrugo-Negrete J, Pinedo-Hernández J, Díez S. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River basin, Colombia[J]. *Environmental Research*, 2017, **154**: 380-388.
- [43] Naveedullah, Hashmi M Z, Yu C N, *et al.* Risk assessment of heavy metals pollution in agricultural soils of siling reservoir watershed in Zhejiang Province, China[J]. *BioMed Research International*, 2013, **2013**, doi: 10.1155/2013/590306.
- [44] 藤洪辉, 李恒达, 杨晓妮, 等. 四平市城区河流重金属污染现状分析[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2009, **30**(2): 32-34.
- Teng H H, Li H D, Yang X N, *et al.* The status analysis of heavy metal pollution of the creeks in urban area of Siping City

- [J]. Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition), 2009, **30**(2): 32-34.
- [45] 王漫漫. 太湖流域典型河流重金属风险评估及来源解析 [D]. 南京: 南京大学, 2016.
Wang M M. Risk assessment and source apportionment of heavy metals in typical rivers of Taihu Basin [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [46] Islam S, Ahmed K, Raknuzzaman M, *et al.* Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country [J]. Ecological Indicators, 2015, **48**: 282-291.
- [47] 钟晓宇, 吴天生, 李杰, 等. 柳江流域沉积物重金属生态风险评价及来源分析 [J]. 物探与化探, 2020, **44**(1): 191-198.
Zhong X Y, Wu T S, Li J, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in sediments of Liujiang River catchment [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, **44**(1): 191-198.
- [48] 王媛婷, 涂艳. 山水城市工业园区规划模式探索——以柳州市洛维工业园区为例 [J]. 规划师, 2010, **26**(5): 50-54.
Wang Y T, Tu Y. Planning industrial parks for scenic cities: Luowei industrial park in Liuzhou [J]. Planners, 2010, **26**(5): 50-54.
- [49] 李娟英, 陈洁芸, 沈燕萍, 等. 污水污泥及其浸出液重金属污染的化学分析与评价 [J]. 安全与环境学报, 2013, **13**(3): 115-121.
Li J Y, Chen J Y, Shen Y P, *et al.* Chemical analysis and assessment of the heavy metal pollution in the sewage sludge and leaching solution [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, **13**(3): 115-121.
- [50] 周明耀. 柳江走廊开发初探 [J]. 改革与战略, 1992, (4): 17-20, 63.
- [51] Chen T, Liu X M, Zhu M Z, *et al.* Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **151**(1): 67-78.



CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)