

方知库
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

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 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

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_3)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, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (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, 刘永桥, 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, 胡鹏持, 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, 谈默, 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价	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, 石溪哲, 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, 李建伟, 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, 邹峰峰, 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	王晓瞳, 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, 黄嫒, 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)	

漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价

黄宏伟¹, 肖河^{1,2}, 王敦球¹, 席北斗^{1,3}, 孙晓杰¹, 李洁月^{1,2*}, 李向奎¹

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 桂林 541004; 3. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为了解漓江流域水体中重金属污染水平, 在 2019 年 5 月对漓江干流采集 62 个表层水样, 对水样中 As、Cd、Cr、Mn、Cu、Zn、Hg、Co 和 Sb 这 9 种重金属的浓度进行了分析检测, 运用美国环境保护署 (US EPA) 推荐的健康风险评价模型对其引起的健康风险进行了初步评价。结果表明, 水样中重金属平均浓度顺序为: Mn > Zn > As > Cr > Cu > Sb > Co > Cd > Hg, 其均值都未超过《生活饮用水卫生标准 (GB 5749-2006)》规定的标准限值, 且符合《地表水环境质量标准 (GB 3838-2002)》I 类水质标准。从空间分布来看, As、Cr、Zn 和 Sb 的高浓度区主要分布在漓江下游, 而 Cd、Cu、Hg、Co 和 Mn 高浓度区主要分布在漓江上游。多元统计分析结果显示, Cd、Mn、Cu 和 Co 主要来源于农业生产; Cr、Zn 和 Sb 主要来源于旅游交通运输; As 主要来源于岩石风化和土壤侵蚀; Hg 主要来源于生活垃圾处置不当和大气沉降。健康风险评价结果表明, 儿童比成人更易受到重金属污染的威胁, 化学致癌物重金属通过饮水途径对人体健康危害的平均个人年健康风险远远超过非致癌物的平均个人年健康风险, Cr 的平均个人年健康风险最大值大于国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐的最大可接受风险水平 ($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$); 非致癌物重金属平均个人年健康风险 ($10^{-14} \sim 10^{-9} \text{ a}^{-1}$) 呈现出 Co > Cu > Hg > Zn > Sb > Mn, 均远低于 ICRP 推荐的最大可接受水平。

关键词: 漓江流域; 重金属; 来源解析; 健康风险评价

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1714-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008068

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin

HUANG Hong-wei¹, XIAO He^{1,2}, WANG Dun-qiu¹, XI Bei-dou^{1,3}, SUN Xiao-jie¹, LI Jie-yue^{1,2*}, LI Xiang-kui¹

(1. College of Environment Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin 541004, China; 3. State Key Laboratory of Environment Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to clarify the pollution levels of heavy metals in the drinking water sources of the Lijiang River Basin, surface water samples were collected from 62 sites throughout the Lijiang River during May 2019. Heavy metals, including As, Cd, Cr, Mn, Cu, Zn, Hg, Co, and Sb, in the water samples were analysed. Health risk assessments associated with these nine heavy metals were conducted using the health risk assessment model from the US EPA. The results indicated that the order of the average concentrations of heavy metals in the water samples were Mn > Zn > As > Cr > Cu > Sb > Co > Cd > Hg. No heavy metals exceeded the limit values of the drinking water health standards in China (GB 5749-2006), and the concentrations were lower than the limitations of Grade I level in the environmental quality standards for surface water (GB 3838-2002). According to the spatial distribution, the high contents areas of As, Cr, Zn, and Sb were predominantly distributed downstream of the Lijiang River, while the high contents areas of Cd, Cu, Hg, Co, and Mn were mostly distributed in the upper reaches. Multivariate analysis indicated that Cd, Mn, Cu, and Co were primarily from agricultural production; Cr, Zn, and Sb were mainly from tourism transportation; As was predominantly from the weathering of rock parent material and soil erosion; Hg was mainly from the improper disposal of domestic garbage and atmospheric deposition. The results of the health risk assessment indicated that children were more susceptible to the threat of heavy metal pollution than adults, and the average annual risk of carcinogenic heavy metals to human health through drinking water ingestion were higher than those of non-carcinogenic metals. The maximum personal average annual health risk of Cr was higher than the maximum allowance levels recommended by the International Commission on Radiological Protection ($5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$). The average annual risk of non-carcinogenic heavy metals ($10^{-14} \sim 10^{-9} \text{ a}^{-1}$) decreased in the order of Co > Cu > Hg > Zn > Sb > Mn, which were far below the maximum allowance levels recommended by the ICRP.

Key words: Lijiang River basin; heavy metals; source analysis; health risk assessment

重金属广泛存在于各种环境介质中, 其具有持久性、致癌性、生物富集和放大作用等特点, 极易对周围环境造成不可逆转的损害^[1~3]。重金属还可通过食物链进入人体, 如超过人体健康所需的最大极限, 将对人体肝、肾、消化系统和神经系统造成严重威胁^[4], 危害人体健康, 因而受到全球环境健康研

究人员的广泛关注^[5,6]。魏思洁等^[7]的研究表明重

收稿日期: 2020-08-07; 修订日期: 2020-09-23

基金项目: 广西青年科学基金项目(2020GXNSFBA159040); 广西创新研究团队项目(2018GXNSFGA281001); 国家自然科学基金项目(51638006)

作者简介: 黄宏伟(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境重金属修复及风险评价, E-mail: hwhuang17@163.com

* 通信作者, E-mail: yueli90@glut.edu.cn

金属(Cr^{6+} 、 Pb^{2+} 和 Ni^{2+})均可降低莱茵藻细胞的光合活性,抑制抗氧化酶活性,进而破坏藻细胞的整体稳态,影响其正常生长。Rzymiski 等^[8]研究海洋双壳类软体动物对不同重金属富集情况表明,双壳类对重金属 Cu 和 Cd 的富集能力非常高。张小磊等^[9]的研究也发现鱼类肌肉中重金属的残留均有检出。当水环境的物理化学条件发生改变时,水体悬浮物累积的重金属有可能向水体重新释放形成二次污染^[10]。因此,研究水体重金属的污染情况及其污染来源对水环境的污染防治具有重要的意义。

漓江是闻名世界的喀斯特地貌风景游览区,同时也是桂林市经济活动、工农业用水和生活饮用水的主要水源地。但由于人口不断增加,近年来漓江流域随着城市化进程、农业现代化和旅游业的快速发展使得漓江的水环境问题越来越突出,已经严重影响了居民的饮用水安全和桂林市旅游业的可持续发展^[11]。漓江兼具供水、灌溉、渔业、调蓄和航运等多种功能,其生态环境质量与人民健康和社会经济发展息息相关,但是对于漓江的研究多集中于水体营养状态评价^[11]和水体有机物复合污染^[12]等方面研究,沉积物重金属问题研究也仅局限于漓江桂林市区段的流域^[13],但对整个漓江流域水环境重金属调查研究鲜见报道。

本文选取漓江为研究区域,分析该流域水体对人有潜在危害的 As、Cd、Cr、Mn、Cu、Zn、Hg、Co 和 Sb 的重金属浓度及空间分布特征,采用多元统计分析法(相关性分析法和主成分分析法)对各重金属之间的相关性和来源进行分析,全面探究漓江流域重金属污染状况,并利用水环境健康风险评价模型对该流域水体重金属健康风险进行评价,定量描述漓江重金属污染与人体健康的关系,以期为探析漓江水体重金属来源和迁移规律以及为未来漓江水资源保护与有效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

漓江发源于广西兴安县的猫儿山,自北向南依次流经兴安县、灵川县、桂林市和阳朔县,在平乐县汇入桂江,是珠江水系桂江的上游段。地理坐标: $\text{E}109^{\circ}45' \sim 111^{\circ}02'$, $\text{N}24^{\circ}16' \sim 26^{\circ}21'$ 。漓江流域属雨热同期的中亚热带湿润季风气候区,平均气温 $17.8 \sim 1.1^{\circ}\text{C}$,年降水量 $1\,814 \sim 1\,941\text{ mm}$,年蒸发量 $1\,377 \sim 1\,857\text{ mm}$,无霜期长达约 300 d。漓江属于雨源型山区河流,径流为降雨所形成,年径流量比较丰富,但年内和年际分布极不均匀,汛期 3~8 月,径流占年径流量的近 80%,其中 5~6 月占年径流量的 40%,枯水期

为 9 月至翌年 2 月,最枯月 1 月径流量仅占年径流量的 2%。研究区地形以山地、平原地貌为主,丘陵、盆地、岩溶地貌兼而有之,属中低山和丘陵地形,整个流域以漓江为轴线,呈南北向狭长带状分布。

1.2 样本采集与分析

于 2019 年 5 月在漓江 62 个采样点表层(距水面下 0.5 m 处),采用全球卫星定位系统(GPS)定位,采样点位置见图 1。水样采集后加入优级纯硝酸使其 $\text{pH} \leq 2$,放入低温箱中储存运输,带回实验室后立即用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤,置于 4°C 冰箱中避光保存。采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS 仪器,美国 PerkinElmer NexION 350 型)进行上机测定分析 Cd、Cr、Mn、Cu、Zn、Co 和 Sb,原子荧光形态分析仪(北京吉天 SA-20 型)测定 As 和 Hg。本试验采用国家标准中心提供的标准物质进行上机测定,从而保证数据的有效性和分析方法的准确性,所有元素测试结果的标准偏差(RSD)均在 15% 以内。分析过程中所使用的化学试剂均为优级纯,所用玻璃器皿均在配置的 10% 硝酸溶液中浸泡 24 h 以上。所有数据均基于 Excel 2013、SPSS 23.0 和 ArcGIS 10.5 等软件进行统计分析。

1.3 水环境健康评价模型

水环境中对人体有害的物质主要有基因毒物质和躯体毒物质,前者包括放射性物质和化学致癌物,后者则指非致癌物。人类接触有害物质可能通过 3

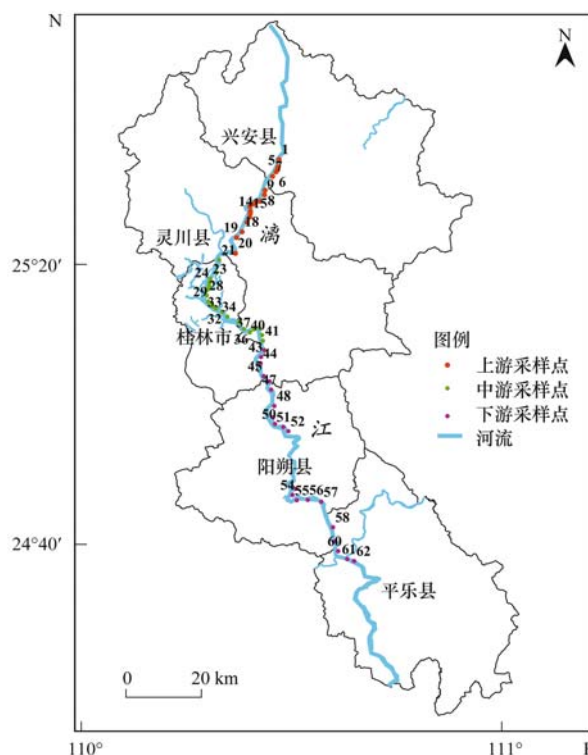


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Map of the locations of the sampling sites

种主要途径发生,包括直接摄入、通过口鼻吸入和皮肤接触,水中污染物的暴露主要是通过人体经饮水和皮肤暴露两种途径,其中饮水被认为是一个很重要的暴露途径^[14]. 因此,本研究采用美国环境保护署(US EPA)推荐的水环境健康风险评价模型,主要考虑饮水途径具有致癌效应和非致癌效应的重金属类物质分别进入成人和儿童体内所致的致癌和非致癌健康风险,致癌物健康风险评价模型和非致癌物健康风险评价模型分别如式(1)和式(2)所示^[15]:

$$R_c = \sum R_i^c = \sum [-\exp(-D_i \cdot Q_i)]/72 \quad (1)$$

$$R_n = \sum R_i^n = \sum (D_i/\text{RFD}_i) \times 10^{-6}/72 \quad (2)$$

式中, R_i^c 为化学致癌物*i*通过饮用水途径产生的平均个人年健康风险, a^{-1} ; R_i^n 为非化学致癌物*i*通过饮用水途径产生的平均个人年健康风险, a^{-1} ; D_i 为毒性物质*i*的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; Q_i 为化学致癌物*i*通过饮用水途径产生的致癌强度系数, $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$; RFD_i 为非化学致癌物*i*通过饮用水途径被人体摄入的参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 72为广西人均寿命^[16],a.

饮水途径的单位体重日均暴露剂量 D_i 可按式(3)和式(4)计算:

$$D_i = 2.2 \times c_i/64.3 \text{ (成人)} \quad (3)$$

$$D_i = 1.0 \times c_i/22.9 \text{ (儿童)} \quad (4)$$

式中,2.2和1.0为成人和儿童每天的平均饮水量^[17,18],L; c_i 为毒性物质的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 64.3和22.9分别为成人和7岁儿童平均体重^[17,18],kg.

有毒的化学物质对人体健康的危害作用复杂多样,有拮抗作用、协同作用和相加作用. 由于一般的水体中,各种有毒化学物质的浓度均较低,因此,假定各有毒有害物质对人体健康危害的毒性作用不存在拮抗或协同关系,每种毒物对人体健康的累积效应呈相加作用,即水环境的总体健康风险度可如式(5)表示:

$$R_T = R_c + R_n \quad (5)$$

根据世界卫生组织(WHO)和国际癌症研究机构(IARC)全面评价化学物质致癌性可靠程度而编制的分类系统,本研究测定的9种重金属中,化学致癌物有As、Cd和Cr,非致癌物有Mn、Cu、Zn、Hg、Co和Sb. 化学致癌物As、Cd和Cr致癌强度系数(Q_i)分别为15、6.1和41 $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ ^[19]; 非致癌物Mn、Cu、Zn、Hg、Co和Sb饮水暴露的参考剂量(RFD_i)依次为1.4、0.005、0.3、0.0003、0.0003和0.004 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[20].

水环境健康风险评价通过建立人体健康与环境

污染的关系,定量描述各种环境污染物对人体健康造成的危害及其发生概率,其结果与国际推荐的风险水平对比,使风险管理国际化^[21]. 参照美国环境保护署推荐的最大可接受风险水平为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ ^[22],国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平为 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ^[23],瑞典环境保护局、荷兰建设和环境保护部以及英国皇家协会推荐的最大可接受风险水平为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ ^[19],得出部分机构推荐的社会公众最大可接受风险水平为 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 之间. 据此,本研究将水环境健康风险分为5个等级:当 $R_T < 1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$,为低风险等级;当 $1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1} \leq R_T < 1.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$,为较低风险等级;当 $1.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1} \leq R_T < 5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$,为中等风险等级;当 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1} \leq R_T < 1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,为较高风险等级;当 $R_T \geq 1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,为高风险等级.

2 结果与讨论

2.1 漓江流域水体重金属浓度及空间分布特征

漓江流域水体9种重金属As、Cd、Cr、Mn、Cu、Zn、Hg、Co和Sb浓度统计结果见表1. 其中Mn的浓度范围跨度最大,为2.26 ~ 176.69 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,其最小值和最大值相差78倍. 9种重金属在水体的平均浓度($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)顺序为:Mn(28.52) > Zn(14.33) > As(2.767) > Cr(1.61) > Cu(0.78) > Sb(0.19) > Co(0.17) > Cd(0.03) > Hg(0.02). 对比《生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)》^[24]标准限值,As、Cd、Cr、Cu、Zn、Hg、Co和Sb的浓度均未超标,Mn的平均值虽未超标,但其最大值(176.69 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)规定的标准限值(100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$). 根据《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》^[25],As、Cd、Cr和Cu均达到Ⅰ类和Ⅱ类水质标准;Zn和Hg的平均值符合Ⅰ类和Ⅱ类水质标准,但Zn的最大值(51.47 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)略大于Ⅰ类标准限值(50 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$),Hg的最大值超过了Ⅱ类水质标准要求.

变异系数能反映各样点重金属浓度的平均变异程度,若变异系数大于0.5,说明重金属浓度空间分布不均匀,存在点源污染可能,有外源物质进入所致^[26]. 从变异系数来看,As、Cr和Sb的变异系数相对较小,分别为0.21、0.20和0.37;Zn、Cu和Mn的变异系数分别为0.49、0.66和0.77,可能人为因素对重金属积累有一定影响;Co、Hg和Cd的变异系数超过了0.9,特别是Hg和Cd的变异系数分别为1.07和1.20,表明这些重金属浓度存在显著的

空间差异性,受影响的敏感程度较大,受某些局部污染源的影响较明显.

与国内外其他流域重金属浓度(表2)对比发现,本研究区水体重金属浓度处于中等水平,且普遍低于国内其他河流和萨瓦河(克罗地亚),但 Mn 和 Zn 的浓度高于长江(南京段). 本研究区水体 As 的浓度与苏伯尔讷雷卡河(印度)、加泰罗尼亚河(西班牙)和底格里斯河(土耳其)相似,但略低于底格里斯河(土耳其). 表2的统计数据还表明 Mn 和 Zn 在不同流域的浓度分布波动较大,可能主要受到不同区域工农业污染排放的影响. 从流域重金属浓度

空间分布特征来看(图2),As、Cr、Zn 和 Sb 的浓度规律分布比较相似,其高浓度区主要分布在流域下游; Cd、Cu、Hg 和 Co 的浓度空间分布特征表现为: 高浓度区主要分布在流域上游,其次为流域下游; Mn 的高浓度主要集中在流域的上游,其次为流域中游. 漓江流域重金属高浓度多分布在上游和下游,这可能与上游和下游有着高度集约化的农业生产区有直接关系,且在下游水上交通繁忙,故重金属浓度在很大程度上受到城镇生活污水排放、农业生产和船只活动影响. 因此,流域重金属浓度空间差异性多与人类活动密切相关.

表1 漓江流域水体重金属浓度¹⁾ ($n=62$)/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentrations of heavy metals in the water of the Lijiang River basin ($n=62$)/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

重金属	检出范围	平均值	标准差	变异系数	生活饮用水 卫生标准	地表水环境质量标准	
						I 类	II 类
As	2.00 ~ 5.19	2.77	0.58	0.21	10	50	50
Cd	ND ~ 0.25	0.03	0.04	1.20	5	1	5
Cr	0.02 ~ 2.72	1.61	0.33	0.20	50	10	50
Mn	2.26 ~ 176.69	28.52	21.97	0.77	100	—	—
Cu	0.10 ~ 4.43	0.78	0.52	0.66	1 000	100	1 000
Zn	5.14 ~ 51.47	14.33	7.03	0.49	1 000	50	1 000
Hg	ND ~ 0.06	0.02	0.02	1.07	1	0.05	0.05
Co	0.02 ~ 1.34	0.17	0.17	0.99	1 000	—	—
Sb	ND ~ 0.32	0.19	0.07	0.37	5	—	—

1) ND 表示未检出,以“0”参与统计计算; “—”表示无数据

表2 国内外不同流域重金属浓度¹⁾ / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Concentrations of heavy metals in different basins at home and abroad/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

河流	As	Cd	Cr	Mn	Cu	Zn	Hg	Co	Sb
漓江流域(本研究)	2.77	0.03	1.61	28.52	0.78	14.33	0.02	0.17	0.19
长江(南京段) ^[27]	13.2	4.7	20.9	5.4	10.7	9.4	—	—	65.3
黄河(甘肃至内蒙古段) ^[28]	7.3	23.19	23.19	597	36.27	52.46	0.14	—	—
汉江(陕西段) ^[29]	10.74	3.21	5.89	42.2	7.76	—	—	0.7	77.11
九龙江(福建) ^[30]	12.39	0.08	5.41	—	17.85	154.89	—	—	—
珠江(广东) ^[31]	—	0.06	7.45	5.84	8.24	—	—	0.12	—
湘江(湖南) ^[32]	12.24	1.34	6.61	—	20.33	84.57	0.04	—	—
苏伯尔讷雷卡河(印度) ^[33]	2.13	—	0.47	1.48	3.35	—	—	0.24	—
加泰罗尼亚河(西班牙) ^[34]	2.9	1.2	2.4	—	1.3	1.9	0.8	3.455	—
底格里斯河(土耳其) ^[35]	2.354	0.103	<5	388	32	<1.6	—	15	—
哈拉兹河(伊朗) ^[36]	55.35	2.65	—	116	13.25	52.75	—	—	—
巫妖河(越南) ^[37]	39.1	—	2.9	216.2	4.5	51.1	—	—	—
萨瓦河(克罗地亚) ^[38]	—	0.011	0.32	3.44	0.54	2.27	—	0.064	—

1) “—”表示无数据

2.2 漓江流域水体重金属来源分析

2.2.1 重金属相关性分析

重金属相关性较好时,表明重金属之间可能具有某种同源关系或者经历相同的迁移转化过程^[39]. Spearman 相关系数是一种无参数(与分布无关)检验方法,用于度量变量之间联系的强弱,对于不服从正态分布的原始数据有较好的适用性^[40]. 对漓江流域重金属进行 Spearman 相关性分析,得到如表3的相关矩阵. 可以看出,As 和 Mn 之间存在显

著负相关关系($P<0.05$),表明 As 和 Mn 的来源不同或者两类间相互抑制; Cr 与 As、Zn 之间分别存在显著正相关关系($P<0.05$)和极显著正相关关系($P<0.01$),Sb 与 As、Cr 之间存在极显著正相关关系($P<0.01$),Cd、Mn、Cu 和 Co 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来源或迁移转化过程. Hg 与其他8种重金属之间不存在显著相关性,表明重金属污染具有多源性.

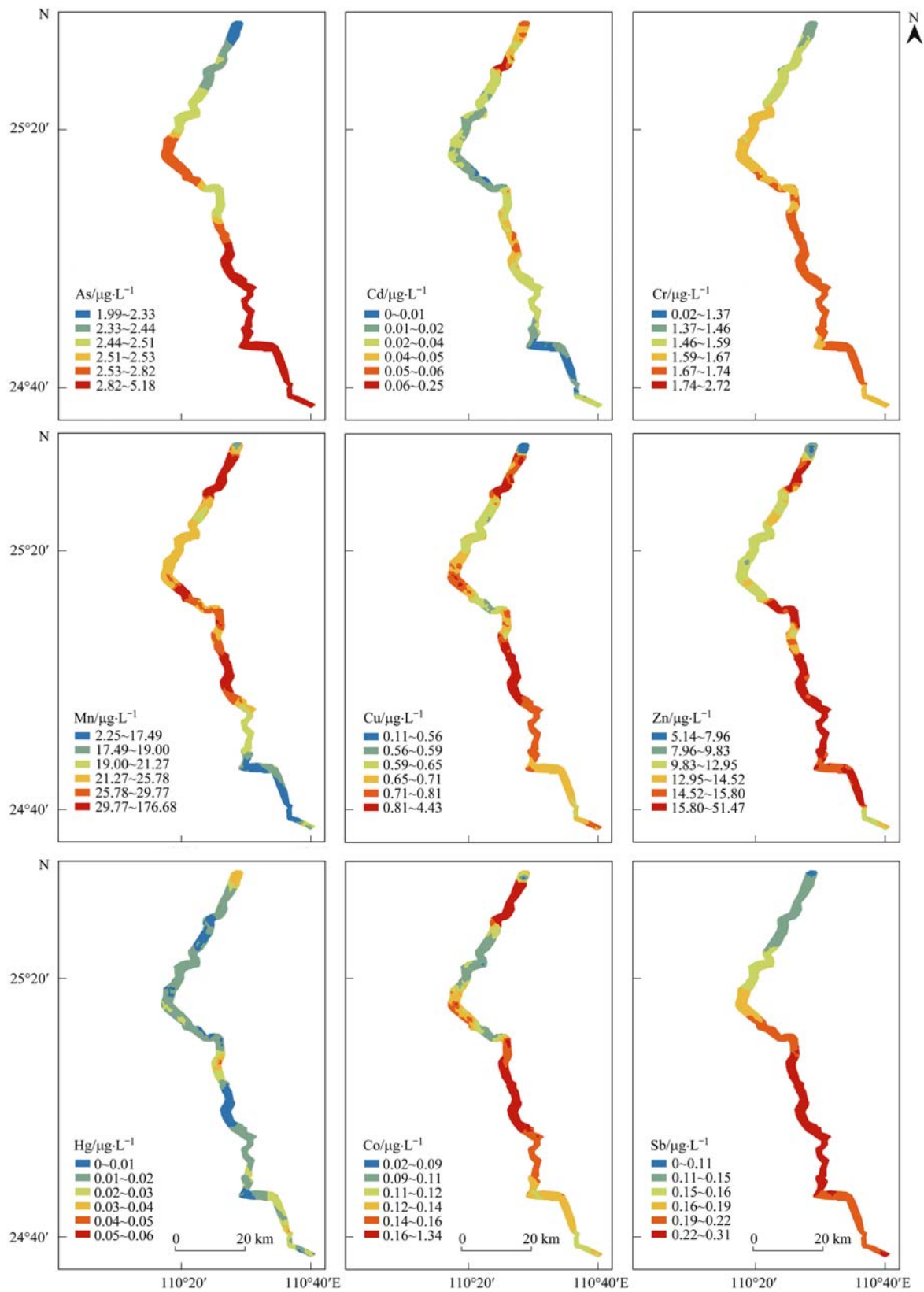


图2 漓江流域水体重金属浓度空间分布特征

Fig. 2 Spatial distributions of heavy metals in the water of the Lijiang River basin

2.2.2 重金属来源解析

水体重金属的来源包括自然来源和人为来源,常用主成分分析法判定来源,为验证因子分析的适用性,对重金属数据进行 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin)

和 Bartlett 检验,一般认为 $KMO > 0.7$ 时很适合因子分析^[20,41]. 运用 SPSS 23.0 进行重金属数据分析显示, KMO 检验值为 $0.750 > 0.7$, Bartlett 球形检验结果为 $0.000 < 0.05$,表明采用主成分分析是有效的.

以水体重金属为变量进行主成分分析,按照特征根大于 1 为主成分原则,研究区 9 种重金属共提取了 3 个主成分. 主成分累积方差贡献率为 78. 444%,可以反映原始数据的大部分信息(表 4).

表 3 漓江流域水体重金属相关矩阵¹⁾ (n=62)

Table 3 Partial correlation matrix of heavy metals in the water of the Lijiang River basin (n=62)									
	As	Cd	Cr	Mn	Cu	Zn	Hg	Co	Sb
As	1								
Cd	-0. 184	1							
Cr	0. 257 *	-0. 019	1						
Mn	-0. 300 *	0. 475 **	-0. 048	1					
Cu	0. 181	0. 618 **	0. 186	0. 516 **	1				
Zn	0. 143	0. 088	0. 600 **	0. 140	0. 212	1			
Hg	-0. 176	0. 108	-0. 048	-0. 063	-0. 073	0. 123	1		
Co	0. 052	0. 636 **	0. 084	0. 655 **	0. 662 **	0. 256 *	0. 055	1	
Sb	0. 413 **	-0. 102	0. 516 **	-0. 037	0. 224	0. 232	-0. 162	0. 085	1

1) **表示在 0. 01 的水平上显著; *表示在 0. 05 的水平上显著

主成分 1(PC1)在 Cd、Mn、Cu 和 Co 具有较高正载荷(均大于 0. 9),且这 4 种重金属的变异程度比较明显,表明这些重金属可能有相同的人为污染来源. Cd、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,而农药和化肥的连续使用会导致土壤中 Cd、Mn 和 Cu 等重金属的浓度升高,土壤中的重金属又经水土流失作用以地表径流的方式进入流域水体^[42]. 结合实地调查了解到,采样沿线区工业企业布局较少,普遍多为农业生产,当地农业种植均施用农药化肥等. 由此推断 Cd、Mn、Cu 和 Co 的来源与农药和化肥的施用有密切关系.

主成分 2(PC2)在 Cr、Zn 和 Sb 具有中等正载荷(均大于 0. 6),Zn 可作为交通污染源的标志性元素,因为 Zn 可能来源于机动车刹片、润滑油燃烧、尾气排放和轮胎磨损等产生的交通运输污染物^[43]. 近年来,随着游客数量不断增加,漓江流域周边的住宿和餐饮业迅速发展,而 Cr、Zn 和 Sb 的较高浓度主要分布在流域下游,这可能与采样点周围人口密集、车辆交通繁忙有关,还可能与旅游轮船所产生的各种废水、尾气、船体腐蚀和漏油有关,对水环境造成了严重的影响,而船舶等使用的涂漆、防污料等脱落也会造成重金属的污染. 推断 Cr、Zn 和 Sb 更多是源于旅游交通运输污染.

主成分 3(PC3)中 As 和 Hg 的载荷分别为 0. 700 和 0. 383. 但 As 和 Hg 的相关程度较低,表明 As 和 Hg 分别具有独立来源. 从表 1 可知,As 的浓度远低于相关水质标准,变异程度相对较小,基本上未受到人类活动的影响,说明 As 可能主要来源于岩石风化和土壤侵蚀等自然过程. 经调查,漓江流域农村地区的生活垃圾无序堆放的现象非常普遍,旁边的水域也存在发臭发黑的现象. 研究表明,很多生活垃圾都含有 Hg,其受到微生物和雨水淋溶作用,Hg

会伴随着垃圾渗滤液进入河流中^[44]. 且部分农村地区会通过焚烧的方式销毁垃圾,这是大气 Hg 的直接排放源^[45]. 因此 Hg 极有可能来源于生活垃圾处置不当和大气沉降.

表 4 漓江流域水体重金属主成分分析¹⁾

Table 4 Principle component analysis of heavy metals in the water of the Lijiang River basin

重金属	成分		
	PC1	PC2	PC3
As	0. 035	0. 526	0. 700
Cd	0. 923	-0. 185	0. 057
Cr	0. 096	0. 867	-0. 233
Mn	0. 948	-0. 15	-0. 011
Cu	0. 978	-0. 036	0. 083
Zn	0. 347	0. 634	-0. 475
Hg	-0. 142	-0. 313	0. 383
Co	0. 980	-0. 090	0. 061
Sb	0. 093	0. 760	0. 359
特征根	3. 828	2. 173	1. 059
方差贡献率/%	42. 536	24. 145	11. 763
累积贡献率/%	42. 536	66. 681	78. 444

1) 粗体字表示每一主成分主要影响成分

2. 3 漓江流域水体中重金属健康风险评价

根据流域水体重金属浓度数据,按照健康风险评价模型和参数选择可以计算出该研究区水体重金属污染物通过饮水途径所致的健康风险,计算结果见表 5 和表 6,儿童的重金属健康风险明显高于成人,儿童的致癌总风险和非致癌总风险分别是成人的 1. 28 倍和 1. 25 倍. 与成人相比,儿童是更加敏感的风险受体,受到重金属的危害更大,因此应对儿童的饮用水安全进行更加严格的控制和管理.

由表 5 可知,研究区化学致癌物重金属通过饮水途径引起的健康风险数量级为 10⁻⁷~10⁻⁵之间,其中以 Cr 的风险值最大,As 次之,Cd 最小. 致癌物重金属引起的成人和儿童平均个人年健康风险值分

别在 $4.26\text{E}-07 \sim 7.31\text{E}-05 \text{ a}^{-1}$ 和 $5.43\text{E}-07 \sim 9.32\text{E}-05 \text{ a}^{-1}$ 之间. As 引起的平均个人年健康风险最大值为 $2.48\text{E}-05 \text{ a}^{-1}$, 其值低于国际辐射防护委员会 (ICRP) 所推荐的最大可接受水平 ($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), 但高于瑞典环境保护局、荷兰建设和环境保护部以及英国皇家协会推荐的最大可接受风险水平 ($1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$); Cr 引起的平均个人年健康风险最大值为 $6.75\text{E}-05 \text{ a}^{-1}$, 但其值超过了 ICRP 所推荐的最大可接受水平, 为 ICRP 所推荐的最大可接受水平的 1.35 倍. 由此可见 Cr 是漓江流域水体的主要致癌污染因子, 应作为研究区水环境健康风险管理的重点. 非化学致癌物重金属产生的健康风险数量级为 $10^{-14} \sim 10^{-9}$ 之间, 即每年每 10 亿人口中因饮水中重金属污染物受到健康威胁或死亡的人数小于 1 人. 非致癌物重金属所致的平均个人年健康风险大小顺序为 $\text{Co} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{Sb} > \text{Mn}$, 成人和儿童的个人平均个人年健康风险分别在 $4.57\text{E}-11 \sim 2.82\text{E}-09 \text{ a}^{-1}$ 和 $5.75\text{E}-11 \sim 3.53\text{E}-09 \text{ a}^{-1}$ 之间, 远远小于 $1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 认为是可以接受的风险水平. 由表 6 可知, 成人和儿童的健康风险等级分别属于中等风险等级和较高风险等级. 成人相较于儿童, 儿童更加容易受到重金属的威胁, 这与文献[46~48]的研究结果相一致. 在本研究区致癌物重金属对人体健康危害的风险程度远远超过非化学致癌物.

从本研究的结果可知, 漓江水体重金属 Cr 和 As 的浓度相对较低, 均未超过相关水质标准规定的限值, 但经过健康风险评价之后, Cr 引起的致癌风

险最大值高于 ICRP 所推荐的最大可接受水平, As 引起的致癌风险最大值高于瑞典环境保护局、荷兰建设和环境保护部以及英国皇家协会推荐的最大可接受风险水平, 这可能与不同重金属的毒性大小不同有关^[3]. 因此, 有必要将常规的水质监测和评价引入健康风险评价, 有利于更全面地掌握饮用水源地水环境质量和安全情况, 有助于加强饮用水源地的风险管理, 制定和实施相应的污染物控制策略.

需要指出的是, 本研究采用 US EPA 推荐的健康风险评价模型对漓江饮用水源地水体重金属潜在健康风险水平进行了评估, 所引用的参数均为国际通用系数, 可能与研究区的具体情况并不完全一致. 此次风险评价主要针对重金属污染物, 未考虑到多氯联苯和六氯苯等其他持久性有机污染物的风险作用以及微生物和放射性水质指标的影响, 存在一定的局限性. 重金属污染物的暴露途径仅考虑了通过饮水途径, 而未涉及通过食物摄入、皮肤接触和空气吸入等其他途径^[16]. 另外, 通过饮水途径暴露的健康风险评价与人们的消费习惯和职业类型等因素密切相关^[21], 这需要用更加复杂的暴露评价方法来得到污染物的平均暴露剂量. 由于本研究主要采集漓江的干流水样, 但供居民实际饮用的是经过自来水厂处理后的水, 重金属浓度可能会低于漓江的水样, 实际上高估了重金属暴露的风险. 因此, 对于漓江流域饮用水源地重金属污染物的健康风险评价还只是处于初步阶段研究, 还需要在今后的工作中进一步探讨和完善.

表 5 漓江流域水体重金属污染物平均个人年健康风险/ a^{-1}

Table 5 Average personal annual health risks caused by heavy metal pollutants in the water of Lijiang River basin/ a^{-1}					
类型		成人		儿童	
		范围	平均值	范围	平均值
致癌物	As	$1.14\text{E}-07 \sim 1.94\text{E}-05$	$1.14\text{E}-05$	$1.46\text{E}-07 \sim 2.48\text{E}-05$	$1.46\text{E}-05$
	Cd	$0 \sim 7.22\text{E}-07$	$8.70\text{E}-08$	$0 \sim 9.21\text{E}-07$	$1.11\text{E}-07$
	Cr	$3.12\text{E}-07 \sim 5.30\text{E}-05$	$3.12\text{E}-05$	$3.98\text{E}-07 \sim 6.75\text{E}-05$	$3.98\text{E}-05$
	R_c	$4.26\text{E}-07 \sim 7.31\text{E}-05$	$4.27\text{E}-05$	$5.43\text{E}-07 \sim 9.32\text{E}-05$	$5.45\text{E}-05$
非致癌物	Mn	$7.67\text{E}-13 \sim 6.00\text{E}-11$	$9.68\text{E}-12$	$9.13\text{E}-14 \sim 7.14\text{E}-12$	$1.15\text{E}-12$
	Cu	$9.88\text{E}-12 \sim 4.21\text{E}-10$	$7.45\text{E}-11$	$1.26\text{E}-11 \sim 5.38\text{E}-10$	$9.51\text{E}-11$
	Zn	$8.14\text{E}-12 \sim 8.15\text{E}-11$	$2.27\text{E}-11$	$1.04\text{E}-11 \sim 1.04\text{E}-10$	$2.90\text{E}-11$
	Hg	$0 \sim 9.82\text{E}-11$	$2.38\text{E}-11$	$0 \sim 1.25\text{E}-10$	$3.03\text{E}-11$
	Co	$2.69\text{E}-11 \sim 2.12\text{E}-09$	$2.63\text{E}-10$	$3.44\text{E}-11 \sim 2.71\text{E}-09$	$3.36\text{E}-10$
	Sb	$0 \sim 3.77\text{E}-11$	$2.26\text{E}-11$	$0 \sim 4.81\text{E}-11$	$2.88\text{E}-11$
	R_n	$4.57\text{E}-11 \sim 2.82\text{E}-09$	$4.16\text{E}-10$	$5.75\text{E}-11 \sim 3.53\text{E}-09$	$5.20\text{E}-10$

表 6 漓江流域水体重金属污染物总个人年健康风险/ a^{-1}

Table 6 Total health risk caused by heavy metal pollutants in the water of the Lijiang River basin/ a^{-1}				
人群	R_c	R_n	R_T	风险等级
成人	$4.27\text{E}-05$	$4.16\text{E}-10$	$4.27\text{E}-05$	中等
儿童	$5.45\text{E}-05$	$5.20\text{E}-10$	$5.45\text{E}-05$	较高

4 结论

(1) 漓江流域水体重金属平均浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 顺序为: $\text{Mn} (28.52) > \text{Zn} (14.33) > \text{As} (2.77) > \text{Cr} (1.61) > \text{Cu} (0.78) > \text{Sb} (0.19) > \text{Co} (0.17) > \text{Cd} (0.03) > \text{Hg} (0.02)$, 依据《地表水环境质量标准》

(GB 3838-2002)规定的标准限值和地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》中 I 类水质标准, 9 种重金属平均浓度均未超标. 研究区重金属总体空间分布特征表明: As、Cr、Zn 和 Sb 的浓度规律分布比较相似, 其高浓度区主要分布在流域下游; 而 Cd、Cu、Hg、Co 和 Mn 的浓度空间分布特征表现为高浓度区主要分布在流域上游.

(2) 漓江流域水体重金属来源解析显示: Cd、Mn、Cu 和 Co 主要来源于农业活动; Cr、Zn 和 Sb 主要来源于旅游交通运输; As 来源于岩石风化和土壤侵蚀; Hg 极有可能来源于生活垃圾处置不当和大气沉降. 漓江流域水体重金属健康风险评价结果表明: 化学致癌物对人体健康危害的平均个人年健康风险远远超过非致癌物的平均个人年健康风险, Cr 是漓江流域水体的主要致癌因子, 应当作为风险决策管理的优先控制对象. 儿童是更加敏感的风险受体, 受到重金属的危害更大, 需加强对儿童饮用水安全的管理和监督.

致谢: 感谢唐海辉和吴勇在样品前处理与测试过程中提供的帮助, 感谢黎艳、李琴和肖乃川对本文提供的宝贵建议.

参考文献:

- [1] Farahat E, Linderholm H W. The effect of long-term wastewater irrigation on accumulation and transfer of heavy metals in *Cupressus sempervirens* leaves and adjacent soils[J]. Science of the Total Environment, 2015, **512-513**: 1-7.
- [2] Dević G, Sakan S, Đorđević D. Assessment of the environmental significance of nutrients and heavy metal pollution in the river network of Serbia[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(1): 282-297.
- [3] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 89-98.
- Yu C C, Zhao W T, Gao X F, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of metals in drinking water sources from the Luhun Reservoir[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 89-98.
- [4] Li H H, Chen L J, Yu L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 1076-1084.
- [5] Mitra A, Chowdhury R, Banerjee K. Concentrations of some heavy metals in commercially important finfish and shellfish of the River Ganga[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(4): 2219-2230.
- [6] Tang W Z, Shan B Q, Zhang H, et al. Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 945-951.
- [7] 魏思洁, 马馨月, 张超, 等. Cr^{6+} 、 Pb^{2+} 和 Ni^{2+} 对莱茵衣藻的毒性效应研究[J]. 安全与环境工程, 2020, **27**(3): 40-47.
- Wei S J, M X Y, Zhang C, et al. Toxic effects of different metals on *chlamydomonas reinhardtii* [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, **27**(3): 40-47.
- [8] Rzymiski P, Niedzielski P, Klimaszuk P, et al. Bioaccumulation of selected metals in bivalves (Unionidae) and *Phragmites australis* inhabiting a municipal water reservoir [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(5): 3199-3212.
- [9] 张小磊, 王晶晶, 赵永江, 等. 郑州黄河南岸养殖鱼类肌肉中重金属残留特征[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(6): 2363-2370.
- Zhang X L, Wang J J, Zhao Y J, et al. Residue characteristics of heavy metals in cultured fish muscles from the south bank of the Yellow River in Zhengzhou [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(6): 2363-2370.
- [10] 段星春, 王文锦, 党志, 等. 大宝山矿区水体中重金属的行为研究[J]. 地球与环境, 2007, **35**(3): 255-260.
- Duan X C, Wang W J, Dang Z, et al. Distribution of heavy metals in water around the Daobaoshan Mine [J]. Earth and Environment, 2007, **35**(3): 255-260.
- [11] 徐保利, 代俊峰, 俞陈文昊, 等. 漓江流域氮磷排放对水肥管理和下垫面属性变化的响应[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(2): 245-254.
- Xu B L, Dai J F, Yu C W J, et al. Responses of nitrogen and phosphorus emissions to water and fertilizer management and underlying surface property changes in Lijiang River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(2): 245-254.
- [12] Chen Q W, Yang Q R, Lin Y Q. Development and application of a hybrid model to analyze spatial distribution of macroinvertebrates under flow regulation in the Lijiang River [J]. Ecological Informatics, 2011, **6**(6): 407-413.
- [13] 李发文, 杨雄, 熊佐芳, 等. 漓江市市区段饮用水源地沉积物重金属污染风险评价[J]. 中国给水排水, 2017, **33**(9): 62-65.
- Li F W, Yang X, Xiong Z F, et al. Ecological risk assessment of heavy metals pollution in sediments in urban section of Li River at source water intake zone [J]. China Water & Wastewater, 2017, **33**(9): 62-65.
- [14] Kerger B D, Paustenbach D J, Corbett G E, et al. Absorption and elimination of trivalent and hexavalent chromium in humans following ingestion of a bolus dose in drinking water [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 1996, **141**(1): 145-158.
- [15] 胡英, 祁士华, 张俊鹏, 等. 我国桂林毛村地下河重金属健康风险评价[J]. 环境化学, 2010, **29**(3): 392-396.
- Hu Y, Qi S H, Zhang J P, et al. Health risk assessment of heavy metals in Maocun underground river of Guilin, China [J]. Environmental Chemistry, 2010, **29**(3): 392-396.
- [16] 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.
- [17] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population (adult volume) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2013.
- [18] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 0~5岁)

- [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population (0 ~ 5 years) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2016.
- [19] 孙超, 陈振楼, 张翠, 等. 上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(1): 60-65.
- Sun C, Chen Z L, Zhang C, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in Shanghai, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, **22**(1): 60-65.
- [20] Wang J, Liu G J, Liu H Q, *et al.* Multivariate statistical evaluation of dissolved trace elements and a water quality assessment in the middle reaches of Huaihe River, Anhui, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **583**: 421-431.
- [21] 倪彬, 王洪波, 李旭东, 等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(1): 74-79.
- Ni B, Wang H B, Li X D, *et al.* Water environmental health risk assessment in lake sources of drinking water[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, **23**(1): 74-79.
- [22] US Environment Protection Agency. Superfund public health evaluation manual[R]. Washington, DC: US EPA, 1986. 4-7.
- [23] US Environment Protection Agency. Available information on assessing exposure from pesticides in food: a User's Guide[R]. Washington, DC: US EPA, 2000. 14-16.
- [24] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- GB 5749-2006, Standards for drinking water quality[S].
- [25] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water [S].
- [26] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 49-53.
- Lei G J, Chen Z L, Liu Q J, *et al.* The assessments of polluted degree and potential ecological hazards of heavy metals in suburban soil of Guangzhou city [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(S1): 49-53.
- [27] 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.
- [28] Zuo H, Ma X L, Yang K, *et al.* Distribution and risk assessment of metals in surface water and sediment in the upper reaches of the Yellow River, China[J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2016, **25**(8): 917-940.
- [29] Li S Y, Zhang Q F. Risk assessment and seasonal variations of dissolved trace elements and heavy metals in the upper Han River, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **181**(1-3): 1051-1058.
- [30] 张莉, 祁士华, 程程凯, 等. 福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(8): 2133-2139.
- Zhang L, Qi S H, Qu C K, *et al.* Distribution, source and health risk assessment of heavy metals in the water of Jiulong River, Fujian[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(8): 2133-2139.
- [31] Zeng J, Han G L, Wu Q X, *et al.* Heavy metals in suspended particulate matter of the Zhujiang River, Southwest China: contents, sources, and health risks[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(10), doi: 10.3390/ijerph16101843.
- [32] Zeng X X, Liu Y G, You S H, *et al.* Spatial distribution, health risk assessment and statistical source identification of the trace elements in surface water from the Xiangjiang River, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(12): 9400-9412.
- [33] Giri S, Singh A K. Risk assessment, statistical source identification and seasonal fluctuation of dissolved metals in the Subarnarekha River, India[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **265**: 305-314.
- [34] Carafa R, Faggiano L, Real M, *et al.* Water toxicity assessment and spatial pollution patterns identification in a Mediterranean River Basin District. Tools for water management and risk analysis[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(20): 4269-4279.
- [35] Varol M, Şen B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. CATENA, 2012, **92**: 1-10.
- [36] Nasrabadi T. An index approach to metallic pollution in river waters[J]. International Journal of Environmental Research, 2015, **9**(1): 385-394.
- [37] Thuong N T, Yoneda M, Ikegami M, *et al.* Source discrimination of heavy metals in sediment and water of To Lich River in Hanoi City using multivariate statistical approaches[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(10): 8065-8075.
- [38] Dragun Z, Roje V, Mikac N, *et al.* Preliminary assessment of total dissolved trace metal concentrations in Sava River water[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **159**(1-4), doi: 10.1007/s10661-008-0615-9.
- [39] Zaharescu D G, Hooda P S, Soler A P, *et al.* Trace metals and their source in the catchment of the high altitude Lake Resposuso, Central Pyrenees [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(11): 3546-3553.
- [40] 王桢, 张建强, 渡边泉, 等. 铁路和道路沿线土壤重金属含量及来源解析[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(2): 364-372.
- Wang Z, Zhang J Q, Watanabe I, *et al.* Concentrations and sources of heavy metals in soil near railway and road[J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, **27**(2): 364-372.
- [41] 胡成, 苏丹, 张利红, 等. 基于主成分分析法的辽河水体中溶解性金属来源分析[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(4): 22-27.
- Hu C, Su D, Zhang L H, *et al.* Principal component analysis (PCA) for estimation the source of dissolvable metal in Liaohe River[J]. Environmental Pollution and Control, 2012, **34**(4): 22-27.
- [42] 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.
- [43] 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 等. 基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- Bai Y R, Zhang X, Zhao Y P, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil heavy metals in chinese wolfberry land based on GIS and the receptor model[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- [44] 李政, 滕柯延, 吴晗. 城市垃圾填埋场中汞污染的来源与归趋[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(S1): 311-317.
- Li Z, Teng K Y, Wu H, *et al.* Mercury pollution from municipal landfills: resources and fate [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(S1): 311-317.

- [45] 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 等. 生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3766-3773.
Duan Z Y, Su H T, Wang F Y, *et al.* Mercury emission characteristics and mercury concentrations of municipal solid waste in waste incineration plants[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3766-3773.
- [46] 焦伟, 牛勇, 李斌, 等. 基于化学形态分析的城市道路灰尘重金属健康风险评价与人为来源解析[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(12): 2269-2275.
Jiao W, Niu Y, Li B, *et al.* Health risk assessment and anthropogenic source identification of heavy metals in urban road dusts based on chemical fraction analysis [J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, **27**(12): 2269-2275.
- [47] 杨阳, 许策, 程高峰, 等. 保定市生活饮用水中重金属污染物健康风险初步评价[J]. 环境化学, 2014, **33**(2): 292-297.
Yang Y, Xu C, Cheng G F, *et al.* Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Baoding City [J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(2): 292-297.
- [48] 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2675-2685.
Zhou J M, Jiang Z C, Xu G L, *et al.* Water quality analysis and health risk assessment for groundwater at Xiangshui, Chongzuo [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2675-2685.

环境科学

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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2089)