

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

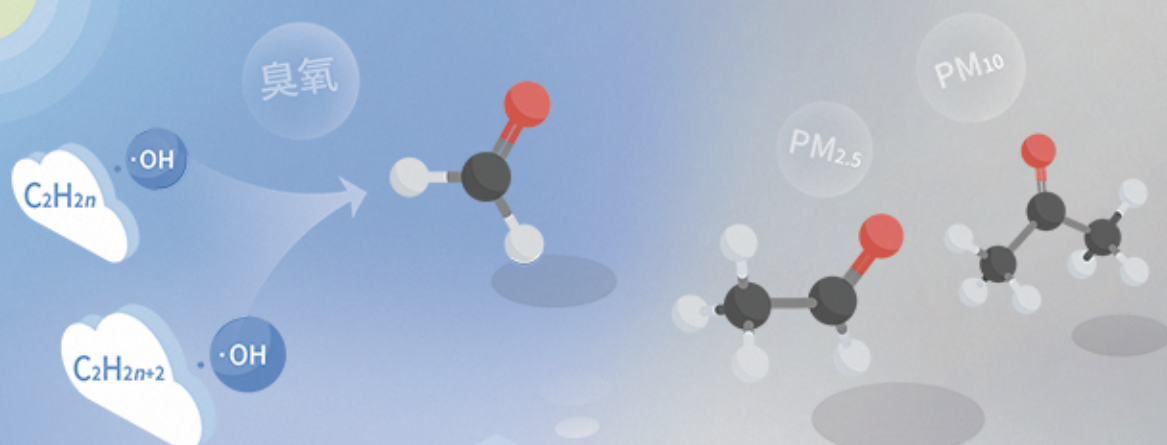
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期
Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测	顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆(1)
基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析	杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨(9)
中原城市群典型城市秋冬季大气 PM _{2.5} 污染特征及溯源	苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文(19)
沈阳市冬季大气 PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析	王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀(30)
保定地区 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐(38)
基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析:以南京市观测为例	胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东(45)
2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源	高璟赞, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐邈, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁(55)
柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析	刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽(65)
天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析	罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂(75)
2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林(88)
2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势	赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳(97)
大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析	李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城(106)
叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比	岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国(114)
东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟	张冰, 张芊芊, 应光国(127)
松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估	杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨(136)
东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估	李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮(147)
河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估	周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫(159)
无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估	王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波(166)
清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估	刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛(175)
会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险	李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼(184)
三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化	陈昭宇, 李思悦(195)
不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布	岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花(204)
基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险	张红娜, 崔娜, 申红妙(211)
分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制	闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜(221)
丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素	郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进(234)
太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应	郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆(242)
石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量	邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王莹燕, 王子芳(251)
前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响	陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪(263)
浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制	陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然(274)
填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响	刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励(283)
FeMnNi-LDHs 对水中 As(Ⅲ) 的吸附性能与机制	廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂(293)
硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制	张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌(305)
某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征	颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远(315)
不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替	李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送(323)
天然富硒土地划定的富硒阈值	王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃(333)
融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测	高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴伟杰, 刘楚藩(343)
南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟	戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平(353)
闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险	林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌(359)
干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响	杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵(368)
三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应	蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宁, 周航, 廖柏寒(378)
风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响	郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星(386)
不同施肥措施对水稻土壤微生物拮抗性的影响	郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷(394)
氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性	张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希(403)
黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征	钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(411)
生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制	冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺(422)
植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响	张瑞海, 宋振, 付卫东, 郭玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良(433)
黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应	史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太(443)
等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响	何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华(450)
秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响	孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔(459)
生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响	杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明(467)
氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响	俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红(477)
微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累	赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇(485)
无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟	阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞(492)
基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析	孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超(501)

清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评价

刘昭¹, 周宏^{1*}, 曹文佳¹, 刘伟^{1,2,3}, 兰圣涛¹

(1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 武汉 430074; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所自然资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 桂林 541004)

摘要:为明确清江流域地表水中重金属健康危害程度,本文以清江地表水为研究对象,选取清江主要一级支流入江口及主干流设置采样断面取样,对样品中 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Mn 这 7 种重金属进行测定分析,使用 USEPA 的水环境健康风险评估模型对研究区丰枯两季地表水中重金属对成人与儿童产生的健康危害进行对比评估。结果表明,研究区主要超标重金属为 Mn,集中于下游丹水、沿头溪和平洛溪附近,As 略有超标,集中于下游伍家河附近,枯水期各重金属浓度均略大于丰水期,但差异性不大;Cr、Cu、Zn 和 Cd 主要为自然来源,Pb 主要来源于道路交通,As 主要来源于农业活动,Mn 在下游主要来源于采矿业,上游至中游主要为自然来源;地表水中各重金属对成人和儿童所产生的健康危害枯水期 > 丰水期,主要健康风险危害区域为中游支流和干流,主要产生健康危害元素为 As,儿童为主要防控人群,饮用中游支流和干流附近地表水源的村镇居民需要引起格外重视。

关键词:清江流域;地表水;重金属;健康风险评估;季节性变化

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0175-09 DOI: 10. 13227/j. hjkx. 202006050

Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River

LIU Zhao¹, ZHOU Hong^{1*}, CAO Wen-jia¹, LIU Wei^{1,2,3}, LAN Sheng-tao¹

(1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, 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. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Ministry of Natural Resources, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to assess the health risks of heavy metals in surface water of Qingjiang River, surface water samples were taken at designed cross-sections of the river and analyzed for Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, As, and Mn. Health risks from these heavy metals for adults and children in wet and dry seasons were compared by water environmental health risk assessment model of the USEPA. It found that the main excessive element is Mn, concentrating in the Danshui, Yantouxi, and Pingluoxi, the slightly excessive element is As, the concentration of Mn was above national standard, and it mainly distributed in Danshui, Yantouxi, and Pingluoxi, As was slightly over the standard, and it concentrated in Wujiahe. The content of heavy metals during wet season were all higher than those during dry season. Cr, Cu, Zn, and Cd are mainly originated from the nature, Pb and As are separately mainly originated from traffic and agriculture, Mn originated from mining mainly in the downstream, while it has natural source from upper to middle. The health risks of heavy metals in surface water to adults and children in wet season are higher than those in dry season. The main health risk area was the midstream. As was the highest health risk element and children were the most preventive group. Specially, people in towns who drink the water from midstream should pay more attention.

Key words: Qingjiang River; surface water; heavy metals; health risk assessment; seasonal changes

清江流域作为湖北省境内长江的第二大一级支流,是我国集中式饮用水一级保护区,其水质优良,被誉为“天然矿泉水”,同时也是当地居民的主要饮用水源^[1]。但近几年来,随着当地城镇化进程的不断加快,工矿业污染物和生活污水向清江过量排放,给清江的水资源造成一定程度的污染^[2]。尤其是重金属污染,据相关报道,由于历史原因,清江丹水、沿头溪和平洛溪这 3 大支流的地表水由于采矿业使部分重金属元素大量富集,甚至出现了水体发臭和鱼虾死亡等现象^[3~5]。据调查,清江流域大量居民饮用水主要经江水简单处理或各大型水库处理供给,而

重金属作为一类毒性大、持久性强、富集性高且降解难的环境污染物,易通过饮水途径在人体内富集,并结合体内其他毒素形成毒性更大的物质,对人体健康危害极大^[6,7]。但目前针对清江流域地表水中重金属的潜在人体健康风险研究未见报道,因此,对清

收稿日期: 2020-06-05; 修订日期: 2020-07-09

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190824); 自然资源部岩溶动力学重点实验室开放基金项目(KDL201703); 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室开放基金项目(KDL201903); 中央高校基本科研业务费专项(CUGL180837)

作者简介: 刘昭(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: 3557741407@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhouhong@cug.edu.cn

江丰枯两季地表水中重金属的分布特征及潜在人体健康风险进行研究,具有重大意义。

目前,USEPA 健康风险评价模型对重金属的人体健康风险评估具有良好科学性和有效性,国内外大量专家对人体潜在健康风险评估均沿用此评价模型,Sah 等^[8]对印度恒河平原空气颗粒物 PM_{10} 中重金属、Xiao 等^[9]对陕西汉中水稻土壤中重金属、Egbueri 等^[10]对尼日利亚奥尼沙浅层地下水重金属、余葱葱等^[11]对宁波市电镀厂周边地表水中重金属和徐美娟等^[12]对宁波市城市不同功能区地表水中重金属的潜在人体健康风险均采用 USEPA 健康风险评价模型,并得出了科学的评价结果,其广泛应用于大气、土壤、地下水和地表水等重金属承载介质中,对于不同重金属承载介质中重金属的潜在人体健康风险评价具有良好科学意义。因此,本文以清江流域上中下游各段地表水重金属为研究对象,分别测试了研究区丰枯两季地表水样品中 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Mn 这 7 种重金属的总浓度,利用

USEPA 水环境健康风险评价模型对流域内丰枯两季地表水中重金属浓度特征及成人和儿童人体健康产生的危害进行评估,以期当地地表水中重金属的污染监测及当地居民健康风险控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

清江流域整体呈长条状几何形状沿东西向展布,干流全长 423 km,支流沿两岸均匀分布。地势西高东低,地貌以中高山溶蚀和侵蚀为主,上游至下游出露地层分别以二叠至三叠系、三叠系和寒武系为主。以恩施和资丘为清江流域上下游分界点,恩施以西为上游,恩施至资丘为中游,资丘以东为下游(见图 1),上下游坡降幅度逐渐减小,落差变化大,水力资源丰富。清江流域降水量具有较强季节性变化,主要分为丰枯两季,丰水期为 4~10 月,占全年总降雨量的 82.18%,枯水期为 1~3 月和 11~12 月,多年平均降水量高达 1 500 mm 左右。

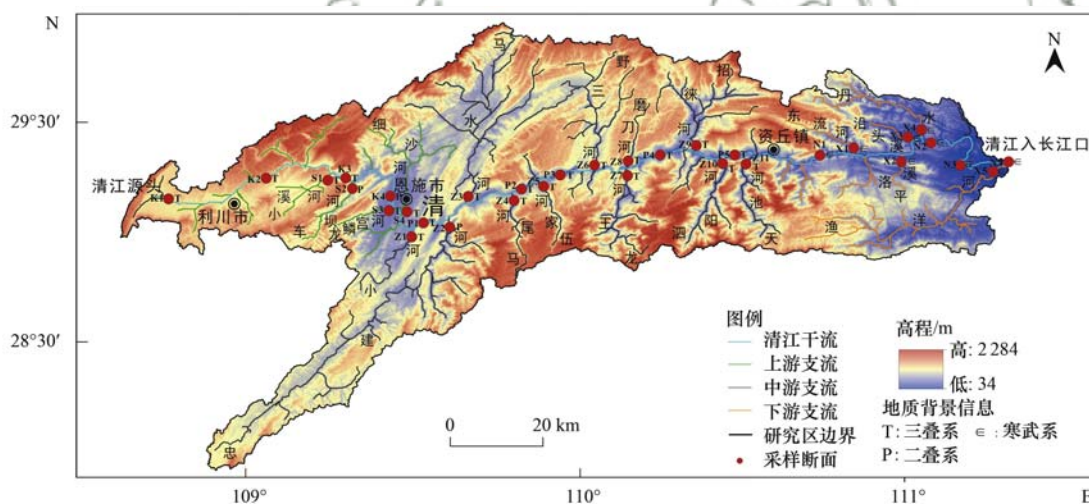


图 1 研究区概况及采样断面分布示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling cross-sections

1.2 样品的采集与测定

根据《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91-2002),充分考虑研究区水文地质条件和污染源分布状况,将研究区分为上游支流和干流,中游支流和干流,下游支流和干流,分丰枯两季对研究区各大大一级支流入江口与主干流地表水设置断面取月度样(见图 1),丰水期于 2019 年 4~10 月完成取样工作,分 4 次按月取月度样,枯水期于 1~3 月和 11~12 月完成取样工作,分 5 次按月取月度样,共取地表水样共 198 个,共 33 个采样断面,其中上游支流 4 个(S1~S4)、上游干流 4 个(K1~K4)、中游支流 11 个(Z1~Z11)、中游干流 5 个(P1~P5)、下游支流 5 个(X1~X5)和下游干流 4 个(N1~N4),丰枯

两季所取地表水样品可充分代表两季节地表水化学特性。所有样品经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后加优级纯硝酸酸化至 $\text{pH} < 2$,存储于聚乙烯塑料瓶中 4°C 下密封保存待测。

对地表水样品中 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Mn 这 7 种重金属使用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES ICAP7600)测定,检测限均为 $0.0001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,实验中样品、空白处理(加入与实测样品相同比例的 HNO_3 与超纯水)测定 6 次,取后 3 次的平均值作为分析结果,样品测定完毕后再测定标准样品,以确保数据的分析误差控制在 3% 以内。所有样品于中国地质大学(武汉)地质调查实验中心测定。

1.3 健康风险评价方法

本文将研究区人群分为成人与儿童,分别从丰水期与枯水期利用 USEPA 水环境健康风险评价对研究区地表水中重金属产生的危害进行评估. 研究区地表水中重金属对当地人群造成健康风险的途径有饮用途径、呼吸途径和接触途径,但呼吸途径与接触途径和饮用途径健康风险存在 2~3 级数量级的差距,可忽略不计^[13],因此本研究只考虑地表水中重金属通过饮用途径对当地不同人群造成健康风险程度. 模型主要包括致癌物 (Cr、As 和 Cd) 评价模型和非致癌物 (Pb、Cu、Zn 和 Mn) 评价模型.

致癌物评价模型 (R^c) 主要评价公式为^[14]:

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_{ig}^c = \sum_{i=1}^k \frac{1 - \exp(-D_{ig} Q_{ig})}{W} \quad (1)$$

$$D_{ig} = \frac{A \times C_i}{B} \quad (2)$$

式中, D_{ig} 表示第 i 种化学致癌物饮水途径的单位体重日均暴露剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; Q_{ig} 表示第 i 种化学致癌物评价模型参数 (见表 1)^[15]; R_{ig}^c 表示某点位第 i 种化学致癌物健康风险指数 (a^{-1}); C_i 表示第 i 种化学致癌物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); W 表示研究区居民平均寿命值,取 76.95 (a)^[16]; A 表示人均日饮水量 (L),成人为 2.2 L,儿童为 1.0 L^[17,18]; B 表示当地居民人均体重 (kg),成人为 56 kg,儿童为 22 kg^[17,18].

非化学致癌物评价模型 (R^n) 主要评价公式为^[19]:

$$R^n = \sum_{j=1}^m R_{jg}^n = \sum_{j=1}^m \frac{D_{jg} \times 10^{-6}}{\text{RfD}_{jg} \times W} \quad (3)$$

$$D_{jg} = \frac{A \times C_j}{B} \quad (4)$$

式中, D_{jg} 表示第 j 种非化学致癌物饮水途径的单位体重日均暴露剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; RfD_{jg} 表示第 j 种非化学致癌物模型参数 (见表 1)^[15]; R_{jg}^n 表示某点位第 j 种非化学致癌物健康风险指数 (a^{-1}); C_j 表示第 j 种非化学致癌物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

总健康风险评价公式为^[14,19]:

$$R_{\text{总}} = R^c + R^n \quad (5)$$

表 1 重金属毒理学参数/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

元素	化学致癌物 Q_{ig}	非化学致癌物 RfD_{jg}
Cr	41	
As	15	
Cd	6.1	
Pb		0.0014
Cu		0.005
Zn		0.3
Mn		0.14

式中, R^c 表示化学致癌物健康风险值 (a^{-1}); R^n 表示非化学致癌物健康风险值 (a^{-1}); $R_{\text{总}}$ 表示总健康风险值评估结果 (a^{-1}).

2 结果与讨论

2.1 重金属浓度空间分布与季节变化特征

分别以丰枯两季月度样均值代表两季节重金属浓度特征,并对研究区丰枯两季地表水中重金属的平均浓度及空间分布进行分析,结果见图 2. 以地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) III 类水为基准,研究区 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 这 6 种重金属在丰枯两季全程均值均不超标, Mn 在丰枯两季全程的均值分别是 III 类水质标准的 2.5 倍和 3.2 倍. 结合研究区各重金属浓度空间分布特征, Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 这 6 种重金属在各支流和干流均值均不超标, As 在枯水期中游伍家河附近超过 III 类水标准值, Mn 在研究区上-中游均不超标,但在下游干流和下游支流存在超标, Mn 在下游支流丰枯两季其平均值分别是 III 类水质标准的 15.26 倍和 22.14 倍,超标较为严重,主要超标贡献支流为丹水、沿头溪和平洛溪,下游干流的 Mn 在丰枯两季其平均值分别是 III 类水质标准的 1.28 倍和 2.4 倍,但仅在下游干流上段丹水入清江附近略超标,下游干流中下段均不超标,这主要与丹水、沿头溪和平洛溪 3 大支流污染贡献有关.

使用相关样本 T 检验方法分别对丰枯两季清江各段地表水中各重金属的浓度进行分析对比,结果见表 2. 通过分析,各重金属在枯水期的平均浓度均高于丰水期,但相差不大; 丰枯两季各重金属的差异显著性指数分析显示, Cr 的差异显著性指数为 0.001, Cu、Zn、Pb、Cd 和 Mn 的差异显著性指数均为 0, As 的差异显著性指数为 0.026, 这说明研究区丰枯两季 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 和 Mn 这 6 种重金属浓度差异性不大, As 的差异显著性指数相对略高,但也小于 0.05. 总体上,研究区地表水中各重金属在丰水期浓度略大于枯水期,但不存在显著差异性,虽研究区丰水期降雨量相对枯水期较大,地表径流相对较大,但这对研究区丰枯两季地表水中各重金属的浓度差异性影响较小,经分析, Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 这 6 种重金属在丰枯两季浓度差异性较小主要是由于其浓度本身较低, Mn 在研究区丰枯两季上-中游浓度差异性较小主要也是由于其浓度较低, Mn 在研究区丰枯两季下游支流丹水、沿头溪和平洛溪及干流部分断面浓度值较高,这是由于其附近采矿业发展时间较久,除采矿活动直接向地表水供给各重金属外,河道沉积物作

为各重金属的蓄积库也不断向地表水供给各种重金属,沉积物、地表水两重金属承载介质在丰枯两季各重金属浓度达到一个动态平衡的状态,这使得研究区丰枯两季地表水中 Mn 的浓度在丰枯两季均较高,但差异不大。

将研究区各段地表水重金属平均浓度与长江及

长江其它一级支流地表水重金属平均浓度相比(见表3),Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 这 6 种重金属均与其它河流无明显差别,满足Ⅲ类水质标准,仅 Mn 明显高于其它河流,结合其空间分布特征,研究区下游支流和干流 Mn 的浓度较高,是长江及长江其它一级支流的 1.5 ~ 553.5 倍,且超过Ⅲ类水质标准。

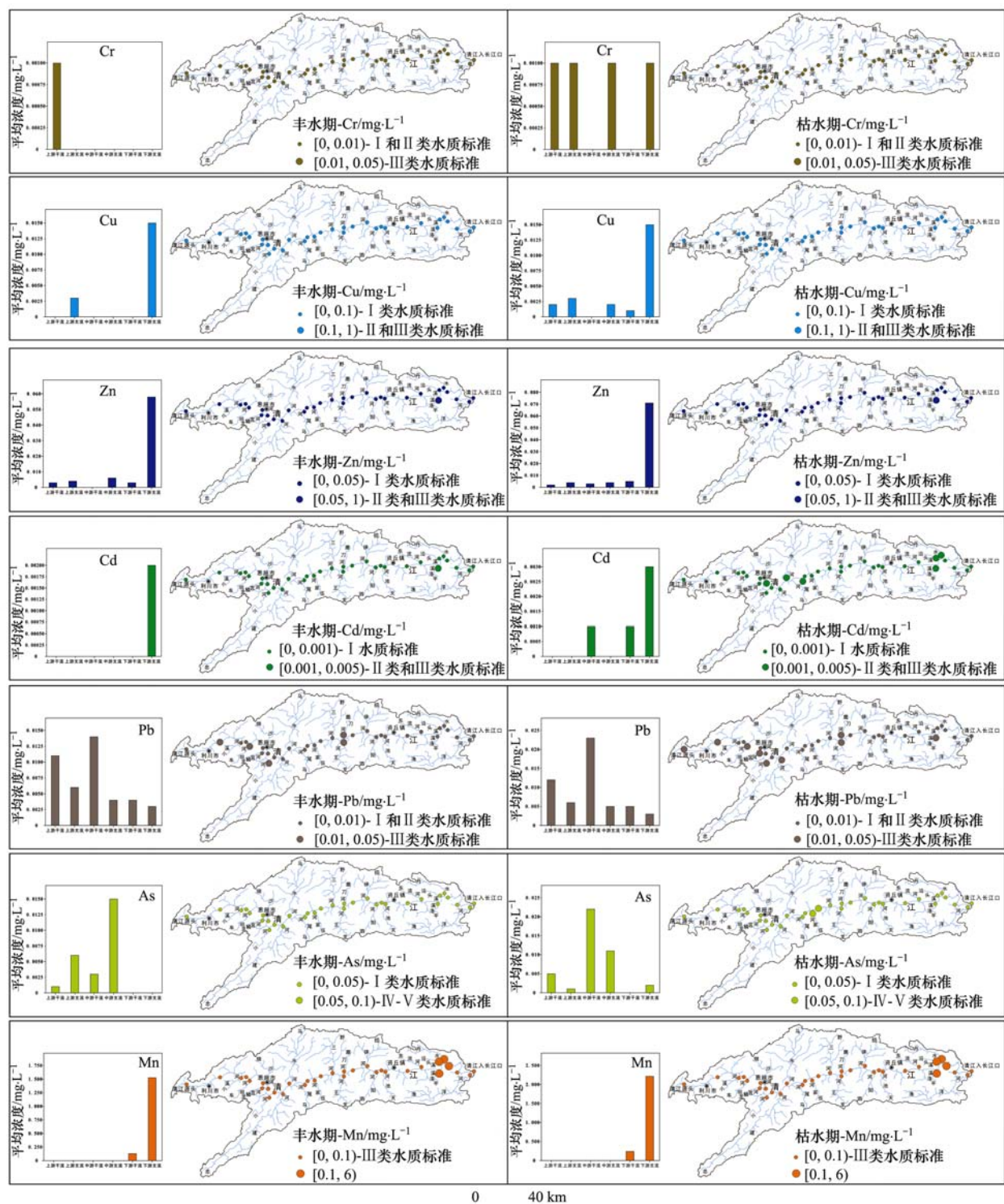


图2 丰枯两季各重金属平均浓度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the average content of heavy metals in two seasons

2.2 重金属来源分析

对研究区丰枯两季地表水中各重金属的来源进

行分析,结果如表4~7、图3和图4。Pearson 相关性分析结果显示,丰枯两季均仅 Cr、Cu、Zn 和 Cd 这 4

表 2 丰枯两季各河流段重金属统计学分析结果及地质背景值/mg·L⁻¹

Table 2 Geologic background values for the statistical analysis of the heavy metal content of each river in the two seasons/mg·L⁻¹

项目	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Mn
丰水期全程平均值	0	0.03	0.013	0	0.006	0.001	0.25
丰水期全程标准差	0.000 5	0.012 1	0.047 1	0.000 9	0.010 7	0.012 1	0.827 9
枯水期全程平均值	0	0.006	0.27	0	0.007	0.002	0.32
枯水期全程标准差	0.000 8	0.012 0	0.060 4	0.001 1	0.014 2	0.017 6	1.206 5
丰枯两季差异显著性	0.001	0	0	0	0	0.026	0
三叠系含水层背景值	0.012	0.121	0.056	0.006	0.002 7	0.015	0.037 7
二叠系含水层背景值	0.011	0.211	0.061	0.005	0.006	0.013	0.250
寒武系含水层背景值	0.012 3	0.110	0.053	0.006	0.003 2	0.013 5	0.134 8

表 3 长江及其支流地表水中各重金属参照值¹⁾/mg·L⁻¹

Table 3 Reference values of heavy metals in the surface water of the Yangtze River and its tributaries/mg·L⁻¹

河流	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Mn
长江 ^[20]	0.021	0.011	0.009	0.005	0.055	0.013	0.025
湘江 ^[21]	0.007	0.020	0.085	0.001	0.002	0.012	—
汉江 ^[22,23]	0.012	0.012	0.047	0.004	0.041	0.005	0.004
嘉陵江 ^[24,25]	0	0.100	0.180	0.004	0.003	0	0.038
赣江 ^[26]	0	0.002	0.012	0.001	0	0.002	0.083
岷江 ^[27]	0.002	0.005	0.028	0	0	0.001	—

1) 对于样品中所测低于检测限的重金属元素,其值取 0;“—”表示无数据

种重金属具有良好相关性(相关性>0.5);主成分分析结果显示,丰枯两季的累积方差分别为 76.796%和 77.640%,第一主成分均为 Cr、Cu、Zn 和 Cd,分别解释了总方差的 45.739%和 45.586%,第二主成分均为 Mn,分别解释了总方差的 15.976%和 16.761%,第三主成分均为 As,分别解释了总方差的 15.082%和 15.339%,Pb 在丰枯两季均单独为一类. Pearson 相关性分析与主成分分析分析对研究区丰枯两季地表水中重金属的分析基本一致,表明研究区丰枯两季地表水中具有相关性的重金属具有相似空间分布特征,可为地表水中各重金属来源分析提供重要依据.综合 Pearson 相关性分析与主成分分析结果,丰枯两季 Cr、Cu、Zn 和 Cd 这 4 种重金属均具有良好相关性且属于同一主成分,说明这 4 种重金属在研究区地表水中可能具有相似来源,结合研究区其浓度空间分布特征(见表 2 与图 2),研究区各采样点 4 种重金属浓度均低于其地质背景值,并且研究区丰枯两季 4 种重金属的标准差分别处于 0.000 5~0.827 7 和 0.000 8~1.206 5 之间,表明 4 种重金属分布相对均匀,无明显规律性,所以推断其主要来源为自然来源,受研究区地质背景控制;丰枯两季的 Pb、As 和 Mn 均属于不同主成分,且无相关性,说明 3 种重金属来源不同,结合采样断面周边实际情况与两种重金属的浓度空间分布特征(见表 2 与图 2),研究区各交通要道附近 Pb 累积现象比较明显,宜万铁路、暨沪高速、汉渝高速和各城镇等交通要道均途经清江上游车坝河、小河和

清江上游干流上段及中游磨刀河、龙王河和忠建河等 Pb 浓度较高采样断面附近.袁宏林等^[28]和邵莉^[29]对道路交通的重金属污染源研究表明 Pb 多与交通要道上汽车尾气、轮胎磨损密切等有关,浓度较高的 As 多集中于研究区伍家河附近.经实地调查伍家河附近为当地主要农业区,Huang 等^[30]和 Ren 等^[31]对农业区重金属污染源研究表明,As 多来源于农业区含磷化肥及农药,结合与研究区相关研究,王健康等^[32]对三峡库区香溪河水环境、刘昭等^[33]对清江流域地下水与况琴等^[34]对鄂西北部农田土壤中 Pb 和 As 的来源分析均显示其分别主要来源于道路交通和农业活动,这与本研究的结果一致,并且研究区各采样点中 Pb 和 As 的浓度多高于其地质背景值,因此推断研究区地表水中的 Pb 和 As 分别主要来源于研究区道路交通和农业活动;高浓度的 Mn 均集中于下游丹水、沿头溪和平洛溪附近,3 条支流上游分别分布锰矿与煤矿,为当地主要潜在污染源,刘昭等^[33,35]对鄂西锰矿区丹水和沿头溪沿程河流表层沉积物中重金属进行了较为深入地污染评价,结果显示其主要超标重金属也为 Mn,并主要来源于当地锰矿,对平洛溪附近地下水中 Mn 的研究表明其来源主要为当地煤矿,并且研究区各采样点中浓度较高的 Mn 多高于其地质背景值,因此推断研究区下游地表水中的 Mn 主要来源于当地采矿业,但研究区上-中游各支流和干流中的 Mn 分布相对均匀,且其浓度均低于其对应地质背景值,所以推断研究区上-中游各支流和干流中的 Mn 主要为自然来源.

表 4 丰水期重金属的相关关系矩阵¹⁾

Table 4 Correlation matrix of the heavy metals in the wet season							
	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	As
Cr	1	0.145	0.550 **	0.509 **	0.499 **	-0.088	-0.216
Mn		1	0.189	0.189	0.208	-0.141	-0.093
Cu			1	0.980 **	0.775 **	0.022	-0.105
Zn				1	0.784 **	0.007	-0.041
Cd					1	-0.064	-0.032
Pb						1	-0.032
As							1

1) **和* 分别代表在 0.01 和 0.05 水平(双侧)上显著相关

表 5 枯水期重金属的相关关系矩阵¹⁾

Table 5 Correlation matrix of the heavy metals in the dry season							
	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	As
Cr	1	0.183	0.562 **	0.504 *	0.534 **	-0.119	-0.270
Mn		1	0.162	0.172	0.311	-0.129	-0.057
Cu			1	0.994 **	0.728 **	0.027	-0.107
Zn				1	0.732 **	0.013	-0.054
Cd					1	-0.107	0.056
Pb						1	-0.056
As							1

1) **和* 分别代表在 0.01 和 0.05 水平(双侧)上显著相关

表 6 丰水期重金属的主成分因子载荷¹⁾

Table 6 Factors matrix of the heavy metals in the principal component analysis in the wet season				
元素	PC1	PC2	PC3	
Cr	0.635	0.135	-0.376	
Mn	0.238	0.660	-0.134	
Cu	0.963	-0.011	-0.047	
Zn	0.962	0.000	0.026	
Cd	0.876	0.223	0.016	
Pb	0.073	-0.826	-0.089	
As	-0.022	0.005	0.966	
特征值	3.202	1.118	1.056	
方差/%	45.739	15.976	15.082	
累积方差/%	45.739	61.715	76.796	

1) 黑字体表示每一主成分主要影响成分

表 7 枯水期重金属的主成分因子载荷¹⁾

Table 7 Factors matrix of the heavy metals in the principal component analysis in the dry season				
元素	PC1	PC2	PC3	
Cr	0.628	0.209	-0.448	
Mn	0.247	0.700	-0.044	
Cu	0.966	-0.048	-0.077	
Zn	0.961	-0.037	-0.010	
Cd	0.844	0.358	0.080	
Pb	0.090	-0.770	-0.028	
As	-0.004	0.036	0.963	
特征值	3.191	1.170	1.074	
方差/%	45.586	16.761	15.339	
累积方差/%	45.586	62.301	77.640	

1) 黑字体表示每一主成分主要影响成分

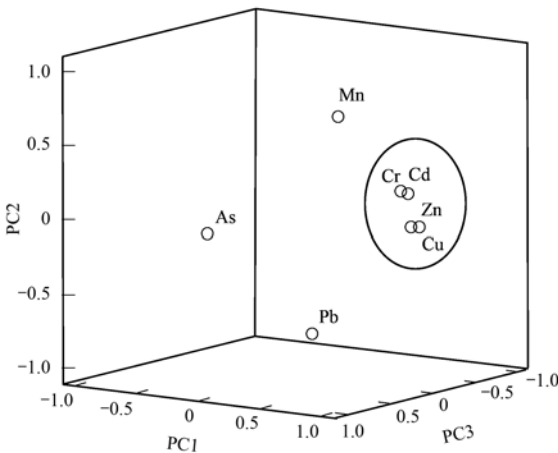


图 3 丰水期重金属载荷

Fig. 3 Loading diagram of heavy metals in the wet season

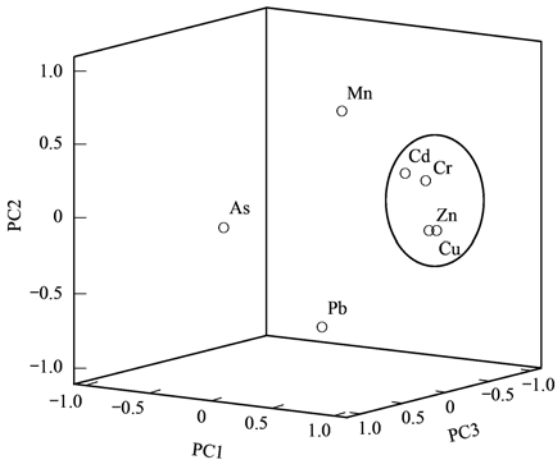


图 4 枯水期重金属载荷

Fig. 4 Loading diagram of heavy metals in the dry season

2.3 重金属健康风险评价

分别对研究区丰水期与枯水期不同人群(成人和儿童)由地表水重金属引起的个人年均健康风险结果进行对比分析,结果如表 8、图 5 和图 6. 通过分析,丰枯两季地表水中致癌物(Cr、Cd 和 As)对研究区成人和儿童的个人年均风险值均高于非致癌物个人年均风险值(Cu、Zn、Pb 和 Mn)4~6 个数量级,与文献[36~38]的研究结果一致,说明致癌物的风险高低与其致癌强度系数有关.以国际辐射防护委员会 ICRP 最大可接受风险值 $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ (取 lg 值为 -4.3)为基准,就致癌物而言,仅致癌物 As 在丰水期研究区中游支流段与枯水期研究区中游支、干流段对两人群的风险值高于最大可接受风险值,对研究区两人群造成了健康危害,非致癌物对研究区两人群的风险值均远低于最大可接受风险值 4~5 个数量级,对研究区两人群不产生健康危害,Mn 虽在下游支流和干流的浓度较高,但由于其为非致癌物,致癌强度系数较低,所以不产生危害.此外,枯水期地表水中各重金属对研究区两人群的个人年均

风险整体略大于丰水期,这与枯水期各重金属浓度整体高于丰水期有关;各重金属对儿童的致癌风险明显高于成人,这与文献[39~41]评价结果一致,这是由于儿童免疫力相对较低。

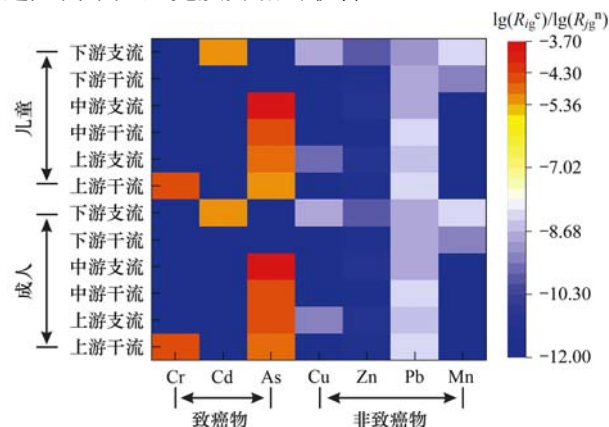


图5 丰水期各河流段各重金属年均健康风险

Fig. 5 Average annual health risks of heavy metals of each river section in the wet season

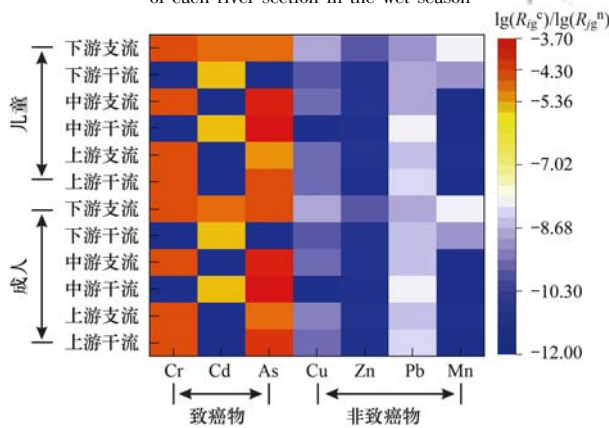


图6 枯水期各河流段各重金属年均健康风险

Fig. 6 Average annual health risks of heavy metals of each river section in the dry season

对研究区丰枯两季不同区域地表水中重金属对两人群的健康风险进行分析(见表9),整体上枯水期研究区各区域两人群受到的年均健康风险要高于丰水期,儿童高于成人,这与上述各重金属的年均健康风险结果分析相一致,丰枯两季研究区两人群受到重金属年均健康风险较高的区域主要集中在中游支流和干流,经分析主要与研究区中游支、干流丰枯两季的As健康风险较高有关,说明As是研究区中游支、干流丰枯两季的健康风险主要贡献元素。

综合各项分析结果,结合对研究区居民饮水途径实际调查,由于研究区属于典型岩溶流域,是我国集中式饮用水一级保护区,大量村镇居民饮用仅经简单处理的江水,城市居民主要饮用经水库处理的江水,这使得研究区大量村镇居民的日常饮用水与实际江水中各重金属离子浓度变化不大,而城市居民的日常饮用水相比实际江水中各重金属离子含量较低,此外,清江流域由于属于岩溶山区,城市化进程相对较慢,其居民主要以村镇居民为主。结合本文中对清江丰枯两季各支流和干流的人体潜在健康风险评价结果,清江上游和下游各支流和干流丰枯两季地表水中重金属均不产生健康风险,仅中游支流和干流在丰枯两季产生健康风险,主要健康风险贡献元素为As,枯水期健康风险危害大于丰水期,儿童受到的危害程度要大于成人,整体上研究区地表水中重金属所产生的健康风险程度较低,所以对于研究区中游支流和干流附近的村镇居民来言,这可能产生直接性的健康危害,应当引起重视,对于其它居民而言,虽产生健康风险程度较低,但也应当加强防范。

表8 丰枯两季各重金属年均健康风险值/a⁻¹

Table 8 Average personal annual health risks of the heavy metals in the two seasons/a⁻¹

时期	人群	Cr	Cd	As	Cu	Zn	Pb	Mn
丰水期	成人	3.49×10^{-6}	1.04×10^{-6}	3.18×10^{-5}	3.06×10^{-10}	2.10×10^{-11}	2.55×10^{-9}	1.00×10^{-9}
	儿童	4.03×10^{-6}	1.20×10^{-6}	3.68×10^{-5}	3.54×10^{-10}	2.43×10^{-11}	2.95×10^{-9}	1.16×10^{-9}
枯水期	成人	1.39×10^{-5}	2.59×10^{-6}	5.21×10^{-5}	3.91×10^{-10}	2.52×10^{-11}	3.28×10^{-9}	1.49×10^{-9}
	儿童	1.61×10^{-5}	3.00×10^{-6}	6.02×10^{-5}	4.53×10^{-10}	2.92×10^{-11}	3.80×10^{-9}	1.73×10^{-9}

表9 丰枯两季各河流段年均总健康风险值/a⁻¹

Table 9 Average total personal annual health risks of each river section in the two seasons/a⁻¹

时期	人群	上游干流	上游支流	中游干流	中游支流	下游干流	下游支流
丰水期	成人	2.86×10^{-5}	4.59×10^{-5}	6.30×10^{-5}	1.14×10^{-4}	1.93×10^{-9}	6.24×10^{-6}
	儿童	3.31×10^{-5}	5.31×10^{-5}	6.66×10^{-5}	1.32×10^{-4}	2.23×10^{-9}	7.21×10^{-6}
枯水期	成人	5.92×10^{-5}	2.86×10^{-5}	1.70×10^{-4}	1.05×10^{-4}	3.12×10^{-6}	4.56×10^{-5}
	儿童	6.84×10^{-5}	3.31×10^{-5}	1.97×10^{-4}	1.21×10^{-4}	3.61×10^{-6}	5.27×10^{-5}

3 结论

(1)以地表水环境质量标准(GB 3838-2002)Ⅲ

类水为基准,研究区主要超标重金属为Mn,集中在研究区下游支流丹水、沿头溪和平洛溪附近,As略有超标,主要于枯水期集中在研究区中游伍家河附

近,Cr、Cu、Zn、Pb 和 Cd 这 5 种重金属均不超标,对比丰枯两季各重金属浓度变化特征,研究区枯水期各重金属浓度略大于丰水期,但无显著差异性。

(2)研究区丰枯两季地表水中各种金属来源分析显示,Cr、Cu、Zn 和 Cd 均主要为自然来源,受研究区地质背景控制,Pb 主要来源于道路交通,As 主要来源于农业活动,Mn 在下游主要来源于采矿业,上、中游主要为自然来源。

(3)研究区丰枯两季地表水中重金属对研究区成人和儿童所产生的健康危害结果显示,研究区地表水中各重金属对研究区成人和儿童在枯水期所产生的健康危害大于丰水期,主要健康风险危害区域为研究区中游支流和干流,主要产生健康危害元素为 As,儿童更易受到危害,研究区中游支流和干流附近村镇居民需要引起格外重视。

参考文献:

- [1] 李广彦. 汉江清江水文化比较及发展建议[N]. 中国水利报, 2015-08-27(07).
- [2] 张英. 清江流域水污染治理中地方政府间合作的问题与对策研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- [3] 高正, 黄介生, 曾文治, 等. 基于 SWAT 模型的清江长阳段非点源污染及其控制方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2016, (9): 174-177.
- [4] Gao Z, Huang J S, Zeng W Z, *et al.* Study of the non-point source pollution and its control programs in Changyang reach of Qingjiang river basin using SWAT model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016, (9): 174-177.
- [5] 程凤. 清江高坝洲水库重金属污染及食物网结构研究[D]. 武汉: 中南民族大学, 2018.
- [6] 黄中朝. 长阳锰矿企业黑水污染清江[N]. 湖北日报, 2011-04-27(03).
- [7] Mohanakavitha T, Divahar R, Meenambal T, *et al.* Dataset on the assessment of water quality of surface water in Kalingarayan Canal for heavy metal pollution, Tamil Nadu[J]. Data in Brief, 2019, 22: 878-884.
- [8] Wu W, Wu P, Yang F, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility [J]. Science of the Total Environment, 2018, 630: 53-61.
- [9] Sah D, Verma P K, Kandikonda M K, *et al.* Pollution characteristics, human health risk through multiple exposure pathways, and source apportionment of heavy metals in PM₁₀ at Indo-Gangetic site[J]. Urban Climate, 2019, 27: 149-162.
- [10] Xiao R, Guo D, Ali A, *et al.* Accumulation, ecological-health risks assessment, and source apportionment of heavy metals in paddy soils: a case study in Hanzhong, Shaanxi, China [J]. Environmental Pollution, 2019, 248: 349-357.
- [11] Egbueri J C. Heavy metals pollution source identification and probabilistic health risk assessment of shallow groundwater in Onitsha, Nigeria[J]. Analytical Letters, 2020, 53(10): 1620-1638.
- [12] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 993-1001.
- [13] Yu C C, Zhao W T, Gao X F, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water around electroplating factories [J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 993-1001.
- [14] 徐美娟, 童桂华, 孙丹, 等. 城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3218-3224.
- [15] Xu M J, Tong G H, Su D, *et al.* Comparison of heavy metal contamination characteristics in surface water in different functional areas: a case study of Ningbo [J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3218-3224.
- [16] 李军, 邹胜章, 梁永平, 等. 会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4948-4957.
- [17] Li J, Zou S Z, Liang Y P, *et al.* Metal distributions and human health risk assessments on waters in Huixian Karst Wetland, China [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4948-4957.
- [18] Adimalla N. Groundwater quality for drinking and irrigation purposes and potential health risks assessment: a case study from semi-arid region of south India[J]. Exposure and Health, 2019, 11(2): 109-123.
- [19] 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.
- [20] 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 assessment [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1598-1607.
- [21] 马振华. 湖北人均 GDP 破 1 万美元, 平均预期寿命达 76.95 岁[N]. 武汉晚报, 2019-08-07(03).
- [22] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册-成人卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [23] Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population-adults[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013.
- [24] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册概要-儿童卷[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [25] Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population-Children [M]. Beijing: China Environmental Press, 2016.
- [26] Ahada C P S, Suthar S. Groundwater nitrate contamination and associated human health risk assessment in southern districts of Punjab, India [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(25): 25336-25347.
- [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] 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.
- [29] 高宝峰, 何力, 张征, 等. 铜锈环棱螺对汉江中下游重金属污染的指示作用[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(1): 128-131.
- [30] Gao B F, He L, Zhang Z, *et al.* Indicative function of bellamya aeruginosa in the middle and lower Stream of Hanjiang River [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(1): 128-131.
- [31] 卜红梅, 朱明勇, 张全发. 汉江上游水中溶解性重金属的空间分布及来源分析[J]. 中国给水排水, 2010, 26(9): 58-61, 64.
- [32] Piao H M, Zhu M Y, Zhang Q F. Spatial distribution and source

- apportionment of dissolved heavy metals in Jinshui River of upper Han River[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, **26**(9): 58-61, 64.
- [24] 刘跃晨, 王云, 吴树宝, 等. 重庆嘉陵江干流饮用水水源地水质分析与健康风险评价[J]. *水文*, 2013, **33**(3): 91-96, 46.
- Liu Y C, Wang Y, Wu S B, *et al.* Water quality analysis and health risk assessment for drinking water sources at Chongqing section on Jialingjiang River[J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(3): 91-96, 46.
- [25] 冯蒙蒙, 张倚铭, 黎云祥, 等. 广元市嘉陵江干流重金属特征研究[J]. *四川环境*, 2017, **36**(2): 40-45.
- Feng M M, Zhang Y M, Li Y X, *et al.* Characteristics of heavy metals in Jialing River main Stream in Guangyuan City [J]. *Sichuan Environment*, 2017, **36**(2): 40-45.
- [26] 许燕颖, 刘友存, 张军, 等. 赣江上游典型流域水体三氮及重金属空间分布特征与风险评价[J]. *地球与环境*, 2020, **48**(5): 574-583.
- Xu Y Y, Liu Y C, Zhang J, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of nitrogen and heavy metals in typical watershed of the upper reaches of Ganjiang River [J]. *Earth and Environment*, 2020, **48**(5): 574-583.
- [27] 乔飞, 时瑶, 秦延文, 等. 岷江干流重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境工程技术学报*, 2018, **8**(6): 602-609.
- Qiao F, Shi Y, Qin Y W, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in Minjiang River mainstream [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, **8**(6): 602-609.
- [28] 袁宏林, 李星宇, 王晓昌. 西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- Yuan H L, Li X Y, Wang X C. Heavy metals pollution and analysis of seasonal variation runoff in Xi'an[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- [29] 邵莉. 江西省高速公路沿线环境介质中重金属污染特征及其影响因素研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [30] Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **207**: 159-168.
- [31] Ren Z Q, Xiao R, Zhang Z H, *et al.* Risk assessment and source identification of heavy metals in agricultural soil: a case study in the coastal city of Zhejiang Province, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2019, **33**(11-12): 2109-2118.
- [32] 王健康, 周怀东, 陆瑾, 等. 三峡库区水环境中重金属污染研究进展[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2014, **12**(1): 49-53.
- Wang J K, Zhou H D, Lu J, *et al.* Reviews of heavy metals pollution in water environment of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, **12**(1): 49-53.
- [33] 刘昭, 周宏, 刘伟, 等. 清江流域地下水重金属含量特征及健康风险初步评价[J/OL]. *环境工程*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20200706.0956.004.html>, 2020-07-06.
- [34] 况琴, 黄庭, 向京, 等. 鄂西北某农田保护区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. *环境工程*, 2019, **37**(5): 45-49, 55.
- Kuang Q, Huang T, Xiang J, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the soil of a farmland protection area in Northwest Hubei [J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(5): 45-49, 55.
- [35] 刘昭, 周宏, 陈丽, 等. 鄂西典型锰矿区河流表层沉积物中重金属的空间分布特征与污染评价[J]. *安全与环境工程*, 2020, **27**(3): 110-117.
- Liu Z, Zhou H, Chen L, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in river surface sediments in a manganese mining area, Western Hubei [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, **27**(3): 110-117.
- [36] Zhang L, Shi Z, Zhang J P, *et al.* Spatial and seasonal characteristics of dissolved heavy metals in the east and west Guangdong coastal waters, South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **95**(1): 419-426.
- [37] Zhang L E, Mo Z Y, Qin J, *et al.* Change of water sources reduces health risks from heavy metals via ingestion of water, soil, and rice in a riverine area, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 163-170.
- [38] 杨慧妮. 贵州主要城市降水和降尘中重金属元素分布特征及其相关性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [39] 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 916-926.
- Yin Y M, Zhao W T, Hang T, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an e-waste dismantling area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 916-926.
- [40] Ji Y J, Wu J H, Wang Y H, *et al.* Seasonal variation of drinking water quality and human health risk assessment in Hancheng City of Guanzhong Plain, China [J]. *Exposure and Health*, 2020, **12**(3): 469-485.
- [41] 张勇, 郭纯青, 孙平安, 等. 基于空间分析荞麦地流域地下水健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(11): 4762-4768.
- Zhang Y, Guo C Q, Sun P A, *et al.* Groundwater health risk assessment based on spatial analysis in the Qiaomaidi watershed [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(11): 4762-4768.

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> (1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter ...	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> (19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> (30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> (55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> (65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> (75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> (88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> (97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> (106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> (114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo (127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> (136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> (147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> (159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> (166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> (175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> (184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> (204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao (211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> (242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> (263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> (274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> (283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> (315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> (323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> (333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors ...	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> (343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> (353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> (386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> (394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> (403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> (411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> (422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> (433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> (443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> (450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> (459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> (467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> (477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> (485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> (492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> (501)