

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6

第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思	(2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清	(2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹	(2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文	(2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰	(2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲	(2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾	(2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚	(2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民	(2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹	(2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄	(2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊	(2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮	(2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水	(2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富	(2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林	(2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民	(2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹	(2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮	(2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容	(2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江	(2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯	(2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽	(2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓	(2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛	(2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜	(2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静	(2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧	(2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡	(2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋	(2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏	(2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平	(2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷	(2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然	(2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国	(2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激	(2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun	(2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳	(2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔	(2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽	(2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚	(2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳	(2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉	(2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌	(2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕	(2877)
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	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞	(2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰	(2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁	(2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳	(2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇	(2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军	(2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌	(2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩	(2948)
污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳	(2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)	信息 (2646, 2656, 2857)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价

周巾枚^{1,2}, 蒋忠诚^{1*}, 徐光黎², 覃小群¹, 黄奇波¹, 张连凯¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要: 以崇左响水地区为研究区域, 对区域内 60 个地下水样品中的常规指标和金属元素进行测定和分析, 运用内梅罗综合指数法分析了不同类型地下水环境质量, 应用健康风险评价模型评价了不同类型地下水的健康风险。结果表明, 井水、泉水和地下河水的常规指标和金属元素均出现不同程度的超标现象, 水质级别均为较差级别, 地下河水的综合评价分值 ($F = 4.26$) 最低, 井水和泉水的综合评价分值 ($F = 7.10$) 相同。高硬度和高矿化度利于 Cr 的富集, 还原环境利于 As 的富集, Zn、Pb、Cd 和 Cu 经过的环境地球化学作用相似, Fe、Al 和 Mn 来源相似。健康风险评价表明, 3 种类型地下水的健康总风险偏高, 大小顺序为井水 > 地下河水 > 泉水, 主要来源于致癌性金属元素 Cr。致癌总风险比非致癌总风险高 4~6 个数量级, 致癌总风险均高于最大可接受风险水平 ($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), 非致癌总风险均小于可接受的健康风险水平 (10^{-6} a^{-1})。儿童健康总风险大于成人, 经饮水途径引起的健康风险比皮肤接触途径高 2~3 个数量级。从饮水安全考虑, 在饮用前需对井水、地下河水和泉水进行适当处理并实施对 Cr 污染物的控制。

关键词: 地下水; 水质分析; 内梅罗综合指数; 健康风险评价; 崇左响水地区

中图分类号: X523; X820.4; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2675-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201810234

Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo

ZHOU Jin-mei^{1,2}, JIANG Zhong-cheng^{1*}, XU Guang-li², QIN Xiao-qun¹, HUANG Qi-bo¹, ZHANG Lian-kai¹

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To investigate the environmental quality and human health risks of different types of groundwater at Xiangshui, Chongzuo, several regular water quality indexes and concentrations of metals in 60 groundwater samples were measured and analyzed. The environmental quality of groundwater was analyzed by means of the Nemerow index. The health risks were assessed by using a human health risk assessment model. The regular water quality indexes and concentrations of metals of the well water, spring water, and underground river water exceeded the standards to different degrees. The environmental quality of groundwater was at a poor grade. The comprehensive evaluation score of underground river water ($F = 4.26$) was the lowest. The well water had the same score as spring water ($F = 7.10$). The high hardness and salinity were conducive to enrichment of Cr, and the reducing environment was of great advantage for the enrichment of As. The environmental geochemistry of Zn, Pb, Cd, and Cu was similar. The sources of Fe, Al, and Mn were similar. The results of the health risk assessment indicated that the health risks of well water, spring water, and underground river water were relatively high. The health risks decreased in the order of well water > underground river water > spring water. The health risks mainly came from the carcinogenic metallic element Cr. Carcinogenic risks were 4-6 orders of magnitude higher than non-carcinogenic risks. Carcinogenic risks were higher than the maximum allowance levels ($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$). Non-carcinogenic risks were lower than the allowance levels (10^{-6} a^{-1}). Children had greater health risks than adults. The health risks of metals through the drinking pathway were 2-3 orders of magnitude higher than the values caused by the dermal contact pathway. For the sake of drinking water safety, the well water, underground river water, and spring water should be properly treated and the concentration of Cr in groundwater should be controlled before drinking.

Key words: groundwater; water quality analysis; Nemerow index; health risk assessment; area of Xiangshui, Chongzuo

崇左市位于广西壮族自治区西南部, 地貌以喀斯特岩溶地貌为主体, 多出露石炭系、二叠系和三叠系地层, 碳酸盐岩地层面积为 433.04 km², 占研究区面积的 91%, 岩性以灰白色-灰色中厚-厚层灰岩为主, 褶皱和断层发育, 地下河和岩溶泉发育, 防污性能极其脆弱。该市地处“南宁—新加坡经济走廊”的节点, 经济以农业为主, 甘蔗为主要的经济作物, 矿产资源丰富。随着工业化和城市化的快速发展, 甘蔗生长期间肥料使用、农药喷洒、蔗糖加工及矿山开采等人类活动增加, 造成大量有害物

质沉积地表并通过各种途径进入到含水层, 极易污染含水层中的地下水, 地下水资源正面临着严重的威胁^[1-3]。水质评价是研究人类水环境质量变化规律, 评价人类水环境质量水平, 并对水环境要素或区域水环境性质的优劣进行定量描述的科学^[4], 对

收稿日期: 2018-10-30; 修订日期: 2018-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571203); 中国地质科学院基本科研业务费项目(YYWF201725); 中国地质调查项目(DD20160301)

作者简介: 周巾枚(1993~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水文地质、岩溶生态学, E-mail: jinmzhou@163.com

* 通信作者, E-mail: zhjiang@karst.ac.cn

该地区经济的可持续发展有着重要意义. 金属元素具有稳定性、生物积累性和不可降解性等特点, 排放到环境后不断迁移、转化进入并累积于空气、土壤或水体中. 金属元素是地下水中常见的污染因子, 它在地下水中的迁移转化是一个复杂的过程, 以机械迁移、物理化学迁移和生物迁移等方式迁移, 其在地下水中通过吸附、沉降、释放和生物吸收等过程进行物理、化学及生物反应, 涉及溶解作用、沉淀作用、吸附作用和氧化还原作用等转化机制, 并能通过食物链在生物体内富集, 危害身体健康. 地下水一定剂量的金属元素经长时间暴露会对人体产生致癌和非致癌等健康风险^[5~8].

目前, 关于水质评价方法的研究集中在单因子指数法、内梅罗综合指数法、模糊综合法和水质生物综合评价法等方法的优缺点、改进和应用等方面^[9~15], 健康风险评价多见于电镀厂、水库、饮用水源、污灌区等的健康风险评价^[16~20]. 而将水质评价及健康风险评价相结合对地下水质量进行评价的研究较少. 将健康风险评价与水质评价相结合, 能更全面地掌握地下水环境质量, 了解地下水安全状况, 有助于加强地下水的风险管理, 制定和实施相应的污染物控制策略. 本文采用内梅罗综合指数法和健康风险评价相结合的方法, 以崇左响水地区井水、泉水和地下河水 3 种类型地下水中常规指标及金属元素的质量浓度测试结果为依据, 采用内梅罗综合指数法分析了 3 种不同类型地下水的的水质级别, 采用健康风险评价模型对地下水中金属元素通过饮水和皮肤接触途径产生的健康风险进行了评价, 以期为研究区地下水的环境质量提供更全面的参考资料, 并为地下水金属元素污染水质风险管

理, 水资源保护及人类健康保障提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取崇左响水地区 ($22^{\circ}10' \sim 22^{\circ}20'N$, $107^{\circ}00' \sim 107^{\circ}45'E$) 为研究区域. 研究区位于崇左市的中西部, 属亚热带季风气候区, 年平均气温 $20.8^{\circ}C \sim 22.4^{\circ}C$, 年无霜期 340 d, 年平均日照时数 1 600 h, 年平均降雨量 1 199 mm, 6~9 月为丰水期, 5、10、11 月为平水期, 12 月~次年 4 月为枯水期. 研究区河流属于左江流域, 地表河流主要为左江干流, 黑水河, 以及由岩溶水调节的季节性小河, 流长 81.6 km. 研究区地势南北部较高, 中东部较低, 由西北向东部倾斜, 海拔高度 150~500 m, 中部被左江及支流切割, 形成丘陵平原^[21~23]. 研究区地层多以石炭系、二叠系和三叠系为地质基层, 岩性以灰白色-灰色中厚-厚层灰岩为主, 页岩、砂岩次之, 第四系酸性赤红壤土层为地表盖层, 在研究区西北角分布少量白云岩, 二叠系上统合山组地层 (P_3h) 为紫红色薄层状铁质泥岩、豆状铁铝岩. 研究区岩溶发育强烈, 地下水水量丰富, 主要接受大气降水补给, 地下水径流条件好, 地下水以地下河出口和岩溶泉的形式分别由南、北、西往中部的左江排泄. 研究区矿产资源较为丰富, 分布有铁矿、铅锌矿、煤矿、锰矿、制糖和造纸等生产企业, 经济以农业为主, 甘蔗为主要的经济作物, 肥料使用、农药喷洒、蔗糖加工及矿山开采对地下水造成污染, 威胁生态环境, 危害人体健康^[24].

1.2 样品采集与测试

如图 1 所示, 本研究于 2016 年 7 月在研究区采

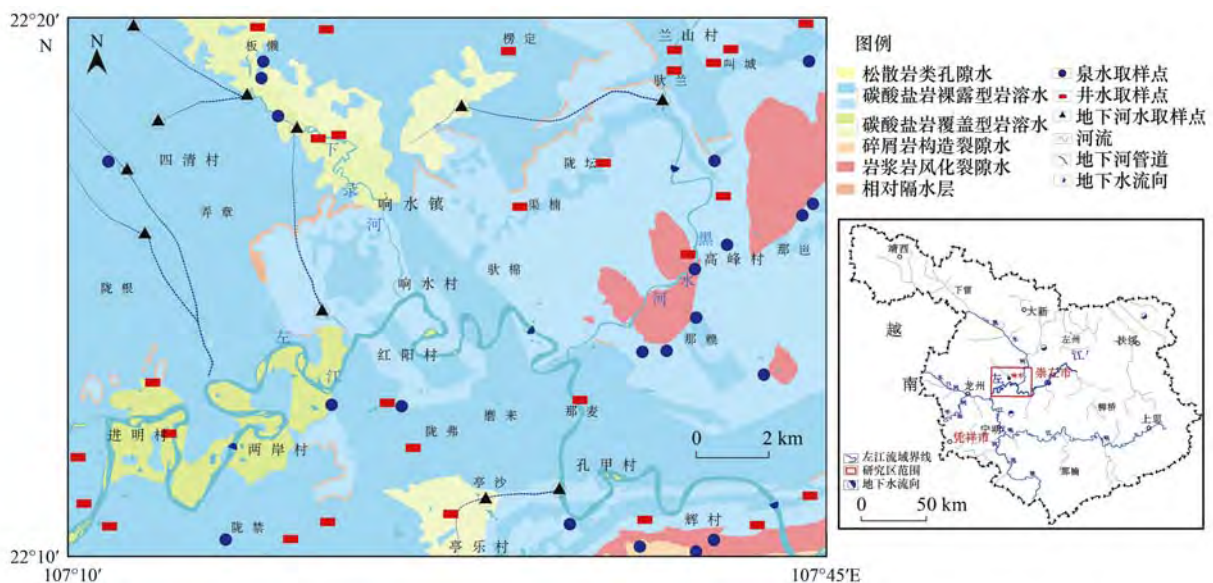


图 1 研究区地理位置和采样点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling sites

集 60 个样点的地下水样品, 其中, 井水样品 28 个, 泉水样品 21 个, 地下河水样品 11 个, 研究区地理位置和采样点分布见图 1. 2016 年 7 月为丰水期, 降雨量为 749.5 mm, 占全年降雨量的 63.5%. 另于枯水期 2016 年 3 月、平水期 5 和 11 月分别在研究区进行采样, 受人类活动影响, K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 平均质量浓度表现为丰水期 > 平水期 > 枯水期, 因平水期径流较小, 大部分金属元素在平水期较丰水期大, 其余指标无明显的季节性变化. 由于数据量过大, 同时考虑到研究区域的自然气候状况, 认为丰水期的水质状况更具有区域整体代表性, 因此采用丰水期 2016 年 7 月的数据进行水质分析及健康风险评价.

样品测试采用仪器现场测定和室内测试相结合的研究方法. 现场测定使用 Multi340i 便携式水质多参数分析仪 (WTW) 测定各水点 pH 值, 测试精度为 0.01 个 pH 单位. 用聚乙烯瓶采集 1.5L 地下水样品, 取样前先用去离子水清洗聚乙烯瓶 3 次, 再用所采水样润洗 3 次, 采集后立即用 0.45 μm 水系微孔滤膜过滤, 滤液装入聚乙烯瓶中. 用于测定的阳离子 (Na^+ 、 NH_4^+ 和 Fe) 水样立即加入超纯硝酸酸化使其 pH < 2, 带回实验室后放置于 4℃ 冰箱中密封保存; 用于测定阴离子 (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 和 NO_2^-) 的水样直接于 4℃ 冰箱中密封保存; 用于测定金属元素 (Zn、Fe、Al、Cr、Mn、Cu、Pb、Cd、Hg 和 As) 的水样加入 HNO_3 (1:1) 酸化, HNO_3 含量为 1%, 带回实验室置于 4℃ 冰箱中避光保存. 采用滴定管测定高锰酸盐指数, 检测依据为 DZ/T 0064. 88-93. 0; 采用全谱直读等离子体光谱仪 (IRIS Intrepid II XSP, Thermo Electron) 测定水样中阳离子的质量浓度, 检测依据为 GB/T 5750. 6-2006; 采用离子色谱仪 (ICS-1100, Dionex) 测定水样阴离子

的质量浓度, 检测依据为 DZ/T 0064. 51-93; 采用电感耦合等离子体质谱仪 (iCAP Q, Thermo Fisher) 测定水样中金属元素质量浓度, 检测依据为 GB/T 5750. 6-2006. 经检测, 地下水样品中各指标测定值的相对标准偏差 (RSD) 均小于 5.0%, 加标回收率为 80% ~ 120%.

1.3 内梅罗综合指数法

内梅罗综合指数法是一种采用加附注, 兼顾极值或突出最大值的计权型多因子环境质量评价的方法. 要求选择参评项目不少于标准规定的监测项目, 不包括细菌学指标, 能反映本地区主要水质问题. 首先, 进行各单项组分评价, 参与评分的因子标准依据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) 规定的Ⅲ类标准限值, 划分单项组分所属的质量级别, 根据地下水单项组分评分 (表 1) 确定单项组分的平均分 F_i ; 其次, 根据式 (1) 和式 (2), 选用内梅罗综合指数计算综合评价分值 F ; 最后, 根据综合评价分值 F 和地下水质量分级 (表 2) 确定地下水质量级别^[25-27].

表 1 地下水单项组分评分

Table 1 Grades of single components in groundwater					
水质类别	I	II	III	IV	V
F_i	0	1	3	6	10

$$F = \sqrt{\frac{F_{\max}^2 + \bar{F}^2}{2}} \tag{1}$$

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \tag{2}$$

式中, F 为综合评价分值; $\bar{F}$ 为各单项组分评分值 F_i 的平均值; F_i 为各单项组分评分值; $F_{\max}$ 为单项组分评分值 F_i 中的最大值; n 为项数.

表 2 地下水质量分级

Table 2 Grades of groundwater quality					
级别	优良	良好	较好	较差	极差
F	< 0. 80	0. 80 ~ 2. 50	2. 50 ~ 4. 25	4. 25 ~ 7. 20	> 7. 20

1.4 健康风险评价

健康风险评价是通过估算有害因子对人体不良影响发生的概率来评价暴露于该因子的个体健康受到影响的危险. 水体中金属元素通过饮水和皮肤接触 2 种途径暴露^[28]. 地下水中金属元素对人体健康产生危害的风险类型分为化学致癌性金属所致健康危害的风险和非致癌性金属所致健康危害的风险. 根据世界卫生组织 WHO 和国际癌症研究机构 IARC 对所检测项目化学物质致癌性的可靠性程度全面分析评价, 将研究测定的 10 种金属元素分为

化学致癌性金属元素 As、Cd、Cr 和化学非致癌性金属元素 Al、Cu、Fe、Hg、Mn、Pb、Zn. 化学致癌性与非致癌性金属元素的健康风险评价模型不同, 模型及参数 PC、SF 和 RfD 值参照文献[29 ~ 33].

2 结果与讨论

2.1 水质分析

首先, 对地下水各水质指标数值的分布类型进行正态性检验, 少部分指标 pH 值、TDS、总硬度 ($CaCO_3$) 和 Cr 质量浓度符合正态分布, 多数指标符

合对数正态分布. 不同类型地下水水质常规指标统计见表 3. 依据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)规定的Ⅲ类标准限值, 井水、泉水和地下河水中 NO_3^- 部分水点质量浓度超过Ⅲ类标准限值, 超标率为 60.71%、52.38% 和 36.36%, 最大值分别是标准限值的 4.84、4.21 和 2.01 倍; 泉水中 F^- 、 NH_4^+ 和高锰酸盐指数在部分水点出现超标现象, 超标率为 9.52%、4.76% 和 4.76%, 最大值分别是标准限

值的 1.5、4.68 和 1.17 倍; 地下河水 NO_2^- 部分水点质量浓度超过Ⅲ类标准限值, 超标率为 18.18%, 最大值分别是标准限值的 4.5 倍. 井水、泉水和地下河水中 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 F^- 和高锰酸盐指数变异系数均超过 100%, 泉水中 SO_4^{2-} 、 Na^+ 变异系数超过 100%, 江河水中 NO_3^- 变异系数超过 100%, 说明 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 F^- 和高锰酸盐指数在井水、泉水和地下河水各采样点均表现出较大幅度的变化.

表 3 不同类型地下水水质常规指标统计/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Regular water quality indexes in different types of groundwater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

地下水类型	统计量	pH 值	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	Na^+	高锰酸盐指数	总硬度 (CaCO_3)	TDS
井水	平均值	7.20	12.22	15.34	0.04	35.85	0.06	0.01	3.78	0.46	311.74	345.43
	最大值	7.63	39.42	53.84	0.19	96.88	0.71	0.08	13.44	2.98	440.85	530.26
	最小值	6.77	1.45	2.27	nd ¹⁾	7.46	nd	nd	0.34	nd	197.53	208.33
	中值	7.18	10.43	9.57	nd	28.05	nd	nd	2.22	nd	311.94	337.04
	标准差	0.22	9.26	13.45	0.06	25.58	0.18	0.02	3.72	0.68	68.11	86.63
	变异系数/%	3.00	75.79	87.68	166.80	71.34	274.09	176.99	98.47	148.43	21.85	25.08
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	0.00	60.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	标准限值 ²⁾	6.5~8.5	250.00	250.00	1.00	20.00	1.00	0.50	200.00	3.00	450.00	1 000.00
泉水	平均值	7.14	16.19	15.81	0.20	33.67	0.01	0.13	3.71	0.65	302.10	335.18
	最大值	7.91	82.84	49.52	1.50	84.13	0.07	2.34	18.11	3.51	422.23	471.22
	最小值	9.74	4.44	1.51	nd	nd	nd	nd	0.41	nd	8.26	154.90
	标准差	0.27	16.44	14.33	0.42	27.81	0.02	0.51	4.38	0.95	87.67	102.25
	中值	7.07	13.57	11.55	0.07	26.50	nd	nd	1.79	nd	299.57	353.83
	变异系数/%	3.83	101.57	90.61	208.97	82.59	238.32	397.65	118.25	147.27	29.02	30.50
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	9.52	52.38	0.00	4.76	0.00	4.76	0.00	0.00
	标准限值 ²⁾	6.5~8.5	250.00	250.00	1.00	20.00	1.00	0.50	200.00	3.00	450.00	1 000.00
地下河水	平均值	7.19	7.44	8.15	0.05	17.24	0.51	0.01	1.49	0.56	254.27	265.66
	最大值	7.52	12.00	13.06	0.14	40.22	4.50	0.04	3.73	1.63	306.08	310.98
	最小值	6.76	3.95	2.55	nd	4.30	nd	nd	0.72	nd	153.19	169.97
	中值	7.21	7.73	8.39	0.03	11.66	nd	nd	1.22	nd	259.93	280.15
	标准差	0.23	2.47	3.68	0.05	11.94	1.36	0.01	0.82	0.74	46.79	44.97
	变异系数/%	3.17	33.22	45.10	112.56	69.22	267.52	185.40	54.85	132.79	18.40	16.93
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	0.00	36.36	18.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	标准限值 ²⁾	6.5~8.5	250.00	250.00	1.00	20.00	1.00	0.50	200.00	3.00	450.00	1 000.00

1) nd:未检出; 2) 地下水质量标准Ⅲ类标准(GB/T 14848-2017),下同

不同类型地下水金属元素质量浓度统计见表 4. 依据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017), 井水中 Zn 和 Hg 部分水点质量浓度超过Ⅲ类标准限值, 超标率为 7.14% 和 3.57%, 最大值分别是标准限值的 1.58 倍和 1.52 倍, 泉水中 Fe、Mn 和 Al 部分水点质量浓度超过Ⅲ类标准限值, 超标率为 9.52%、4.76% 和 4.76%, 最大值分别是标准限值的 5.90、9.28 和 1.25 倍, 地下河水中 Hg 部分水点质量浓度超过Ⅲ类标准限值, 超标率为 4.76%, 最大值是标准限值的 21.10 倍. 井水、泉水和地下河水中 Fe、Mn、Al、Cu、Zn、Hg 和 As 变异系数超过 100%, 地下河水中 Cd 变异系数超过 100%, 金属测定方法本身的变异系数在 10% 以内, 说明 Fe、Mn、

Al、Cu、Zn、Hg 和 As 质量浓度在井水、泉水和地下河水各采样点均表现出较大幅度的变化. Fe、Mn 和 Al 质量浓度较高的水点主要分布在研究区红阳村附近, 该地出露二叠系上统合山组(P_3h)紫红色薄层状铁质泥岩, 含较多的铁矿物, 铁矿多为露天开采, 造成该处水点中 Fe 及其伴生矿物元素 Mn、Al 质量浓度较高; Cu、Zn、Hg 和 As 质量浓度较高的水点主要分布在研究区进明村、红阳村、高峰村、孔甲村、辉村等村庄和农田密集区, 畜禽饲料及粪便中含 Cu、Zn、Hg 和 As 等金属元素且农药、化肥的连续施用会增加地下水中 Cu、Zn、Hg 和 As 的质量浓度, 导致 Fe、Mn、Al、Cu、Zn、Hg 和 As 在各采样点表现出较大幅度的变化, 变异系数超过 100%.

表 4 不同类型地下水金属元素质量浓度统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Metal concentrations in different types of groundwater/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

地下水类型	统计量	Fe	Mn	Al	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg
井水	平均值	5.47	1.97	4.76	1.29	175.84	0.67	4.34	0.23	0.10	0.11
	最大值	51.00	10.00	25.30	6.03	1583.00	2.74	7.88	0.51	0.58	1.52
	最小值	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.24	nd	nd	nd
	中值	nd	0.89	2.58	0.61	13.85	0.64	4.11	0.24	nd	nd
	标准差	10.70	2.72	6.65	1.75	393.17	0.59	1.30	0.15	0.17	0.34
	变异系数/%	195.75	137.98	139.82	135.57	223.60	88.59	30.03	64.37	163.48	320.80
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	0.00	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00	3.57
	标准限值	300.00	100.00	200.00	1 000.00	1 000.00	10.00	50.00	5.00	10.00	1.00
泉水	平均值	105.45	49.14	29.47	0.41	45.46	0.70	3.35	0.20	0.77	0.06
	最大值	1770.00	928.00	250.00	3.76	919.00	2.26	5.12	0.37	7.92	0.67
	最小值	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	中值	0.00	0.40	1.79	0.11	0.00	0.51	3.58	0.18	0.39	0.00
	标准差	391.22	201.70	64.56	0.84	200.20	0.50	1.21	0.11	1.69	0.17
	变异系数/%	371.01	410.44	219.05	204.96	440.36	71.23	35.95	57.00	219.44	271.97
	超标率/%	9.52	4.76	4.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	标准限值	300.00	100.00	200.00	1 000.00	1 000.00	10.00	50.00	5.00	10.00	1.00
地下河水	平均值	2.63	6.97	15.76	0.17	37.43	0.43	3.65	0.14	0.37	1.95
	最大值	15.00	29.20	79.80	0.66	328.00	1.19	6.86	0.38	1.67	21.10
	最小值	nd	nd	1.00	nd	nd	nd	1.97	nd	nd	nd
	中值	nd	1.50	7.21	nd	nd	0.50	2.92	nd	nd	nd
	标准差	5.03	12.08	23.26	0.26	97.47	0.41	1.66	0.17	0.56	6.35
	变异系数/%	191.27	173.28	147.61	153.75	260.38	97.02	45.38	118.22	151.60	325.42
	超标率/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76
	标准限值	300.00	100.00	200.00	1 000.00	1 000.00	10.00	50.00	5.00	10.00	1.00

从地下水水质常规指标平均质量浓度的分布特征(图2)和金属元素平均质量浓度的空间分布特征(图3)可知,井水中pH值、TDS、总硬度(CaCO_3)、 NO_3^- 、 Na^+ 、Zn、Cu、Cr和Cd平均质量浓度最高,泉水中高锰酸盐指数、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 、 NH_4^+ 、Fe和Mn平均质量浓度最高,地下河水中 NO_2^- 和Hg平均质量浓度最高。在井水、泉水和地下河水中Zn、Fe、Al、Cr和Mn平均质量浓度均高于Cu、Pb、Cd、Hg和As。按井水、泉水和地下河水中金属元素平均质量浓度堆积总浓度大小顺序依次为泉水

($235.02\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)>井水($194.7\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)>地下河水($69.50\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。对不同类型地下水中水质参数进行Kruskal-Wallis检验,TDS和 SO_4^{2-} 质量浓度均为差异性显著,Cu、Zn和As质量浓度均为差异性极显著,其他指标差异不显著。

研究区地下水水质指标具有较明显的空间变化规律。研究区地下水分别由南、北、西这3个方向往中部的左江排泄,位于研究区西部的两岸村等地因其上游分布的糖厂和造纸厂,在造纸过程中产生的大量Hg使得该处Hg质量浓度高于其他区域;位于研究区中部的红阳村Fe、Mn和Al质量浓度最

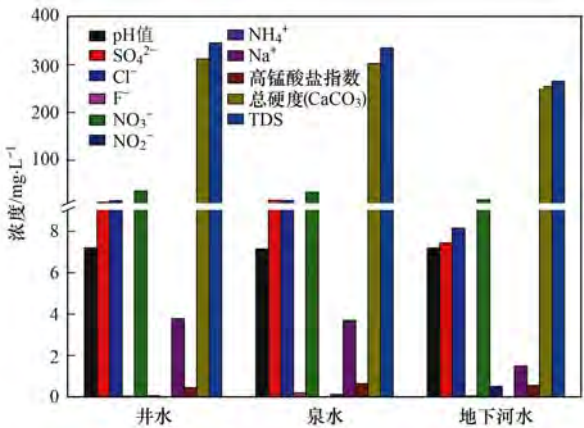


图2 水质常规指标在不同类型地下水的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of regular water quality indexes in different types of groundwater

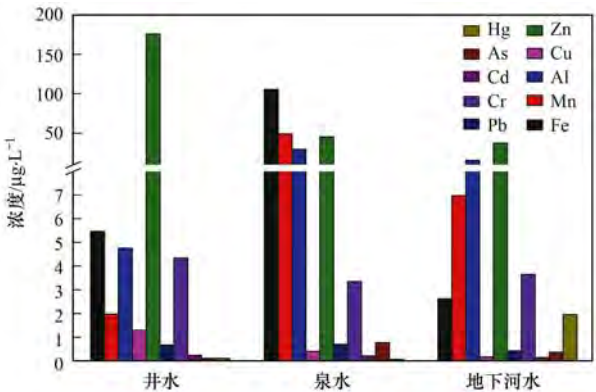


图3 金属元素平均质量浓度在不同类型地下水的分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of average concentrations of metals in different types of groundwater

高,因为红阳村距离铁矿最近,其与当地的自然地质条件和矿产开采有密切关系;位于红阳村下游的亭乐村 Fe、Mn 和 Al 质量浓度较高与接受上游红阳村地下水补给有关;位于研究区东北部的兰山村 Zn 质量浓度偏高,与接受北部铅锌矿在开采过程中排放的含 Zn 废水补给有关;位于研究区进明村、红阳村、高峰村、孔甲村、辉村等村庄和农田密集区 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 和高锰酸盐指数质量浓度偏高,与种植农作物期间化肥的连续施、大量喷洒农药和畜禽饲料使用及粪便排放有关。

地下水单项组分评分结果见表 5,表 5 中仅列出了水质类别超过Ⅲ类(Ⅳ和Ⅴ)的组分,井水中各水点水质类别超过Ⅲ类组分有 NO_3^- 、Zn 和 Hg,泉水中水质类别超过Ⅲ类组分有 NO_3^- 、 F^- 、 NH_4^+ 、高锰酸盐指数、Fe、Mn 和 Al,地下河水中水质类别超过Ⅲ类组分有 NO_3^- 、 NO_2^- 和 Hg. 研究区大量种植甘蔗,农业施肥、大面积甘蔗秸秆燃烧、人畜排泄

物、土壤有机氮和 NH_4^+ 硝化作用造成 NO_3^- 大面积面源污染;区内磷肥厂、化工厂、冶炼厂使用含氟矿石等工业活动和生产生活过程中煤炭燃烧排出大量含氟粉尘、废气造成 F^- 质量浓度较高; NH_4^+ 与枯树等植物腐烂有关;高锰酸盐指数与甘蔗生长期间大量喷洒农药产生的有机污染物及还原性物质有关;结合研究区地质条件,二叠系上统合山组(P_3h)紫红色薄层状铁质泥岩含较多的铁矿物,如:赤铁矿(Fe_2O_3)、褐铁矿($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)和针铁矿等,铁矿多为露天开采,造成 Fe 及其伴生矿物元素 Mn、Al 质量浓度较高;研究区北部分布有铅锌矿,铅锌矿开采过程中含 Zn 废水排放及矿渣堆存增加了地下水中 Zn 的质量浓度;研究区两岸村上游分布的糖厂和造纸厂,造纸过程中对造纸白泥进行资源化处理的同时产生了大量 Hg, Hg 源源不断进入地下水,造成地下水中 Hg 质量浓度较高。

表 5 地下水单项组分评分结果

Table 5 Evaluation results for single components in groundwater											
地下水类型	项目	NO_3^-	F^-	NO_2^-	NH_4^+	TFe	高锰酸盐指数	Mn	Al	Zn	Hg
井水	样品数	17	0	0	0	0	0	0	0	2	1
	超标率/%	60.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.14	3.57
泉水	样品数	11	2	0	1	2	1	1	1	0	0
	超标率/%	52.38	9.52	0.00	4.76	9.52	4.76	4.76	4.76	0.00	0.00
地下河水	样品数	4	0	2	0	0	0	0	0	0	1
	超标率/%	36.36	0.00	18.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76

根据地下水质量级别评价结果可知(表 6),井水、泉水和地下河水的综合评价分值分别为 7.10、7.10 和 4.26,水质级别均为较差级别.井水和地下河水各采样点的水质级别有较好和较差 2 种,泉水有较好、较差和极差 3 种.地下河水各采样点水质级别为良好的样品数百分比最大(36.36%),井水(35.71%)次之,泉水(33.33%)最小,水质级别为较差的样品数均占到了 60% 以上.内梅罗综合指数法根据相应的分级标准确定水质类型,在各组分水水质分级明显、超标组分较多或者没有超标组分的情况下可以较合理地反映水质状况.它能够极突出最大污染因素,即使参评项目中只有一项组分值偏高,而其它组分值较低也会使综合评分值偏高.地

下水中大多数组分超标率较低,但存在超标率较高的组分,如 NO_3^- 在井水、泉水和地下河水中的超标率分别为 60.71%、52.38% 和 36.36%,并且各超标组分分布在不同的水点中,所以综合评价分值较高的水点数较多,水质级别为较差的样品数均占到了 60% 以上.根据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)要求,地下水质量为良好级别的井水、泉水和地下河水的水点地下水化学组分含量为天然背景含量,适用于各种用途;为较差级别的井水、泉水和地下河水的水点地下水化学组分含量较高,以农业和工业用水质量要求以及一定水平的人体健康风险为依据适用于农业和部分工业用水,适当处理后可作为生活饮用水。

表 6 地下水质量级别评价结果

Table 6 Evaluation results for groundwater quality grades								
地下水类型	F	项目	优良	良好	较好	较差	极差	总数
井水	7.10	样品数	0	10	0	18	0	28
		样品数百分比/%	0.00	35.71	0.00	64.29	0.00	100.00
泉水	7.10	样品数	0	7	0	13	1	21
		样品数百分比/%	0.00	33.33	0.00	61.90	4.76	100.00
地下河水	4.26	样品数	0	4	0	7	0	11
		样品数百分比/%	0.00	36.36	0.00	63.64	0.00	100.00

村庄和农田密集区, 畜禽饲料及粪便中含 Cu、Zn、Hg 和 As 等金属元素且农药、化肥的连续施用会增加地下水中 Hg 和 As 的质量浓度; Zn 与 As 之间呈极显著负相关, Cr 与其它金属元素间无显著性相关关系, 显示 Zn 与 As、Cr 与其它金属无相似的空间变化规律。

2.3 健康风险评价

依据健康风险评价模型、模型参数和金属元素质量浓度数据, 计算出地下水金属元素经饮水途径(表 9)和皮肤接触途径(表 10)所引起的个人平均年健康风险。

由地下水金属元素经饮水和皮肤接触途径引起的个人平均年健康风险结果可知, 研究区地下水金属元素致癌风险偏高, 总致癌风险数量级为 $10^{-9} \sim 10^{-5}$, 总致癌风险大小顺序为井水 > 地下河水 > 泉水。成人和儿童的总致癌风险分别在 $7.40 \times 10^{-5} \sim 9.50 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 和 $8.05 \times 10^{-5} \sim 1.03 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 之间, 儿童总致癌风险均高于成人。井水、泉水和地下河水的个人平均年致癌风险均高于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 致癌风险均来源于 Cr, Cr 个人平均年致癌总风险值高于 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 而 As 和 Cd 低于 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 。As、Cd 和 Cr 质量浓度均满足Ⅲ类水质标准, 但具有较高的致癌风险, 是因为致癌风险不仅与 As、Cd 和 Cr 质量浓度有关, 还与致癌强度系数、人体日平均饮水量、暴露频率、暴露持续时间、人均体重、平均暴露时间和人类平均寿命有关。经饮水和皮肤接触途径引起的个人平均年致癌风险分别在 $8.00 \times 10^{-8} \sim 1.02 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.28 \times 10^{-9} \sim 9.66 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$ 之间。井水、泉水和地下河水的总致癌风险来源物质顺序为 Cr > Cd > As, 其中, 经饮水途径引起的个人平均年致癌风险的来源物质顺序均为 Cr > Cd > As, 井水经皮肤接触途径引起的致癌风险来源物质顺序为 Cr > Cd > As, 泉水和

地下河水为 Cr > As > Cd。

研究区 3 种类型地下水的总非致癌风险数量级为 $10^{-15} \sim 10^{-9}$, 总非致癌风险大小顺序为地下河水 > 泉水 > 井水。成人和儿童的总非致癌风险在 $8.39 \times 10^{-10} \sim 3.82 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ 和 $9.03 \times 10^{-10} \sim 4.15 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ 之间, 均小于可以接受的健康风险水平 10^{-6} a^{-1} , 儿童的总非致癌风险均大于成人。经饮水途径和皮肤接触途径引起的个人平均年非致癌风险分别在 $2.24 \times 10^{-12} \sim 3.72 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ 和 $7.72 \times 10^{-15} \sim 3.18 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 之间。井水的总非致癌风险来源物质顺序为 Zn > Pb > Hg > Mn > Al > Cu > Fe, 泉水为 Mn > Pb > Fe > Al > Hg > Zn > Cu, 地下河水为 Hg > Pb > Mn > Zn > Al > Fe > Cu, 7 种非致癌性金属元素对人体健康产生危害的个人平均年健康风险水平集中在 $10^{-15} \sim 10^{-9} \text{ a}^{-1}$, 所引起的健康风险较小, 不会对暴露人群构成明显危害。

研究区地下水金属元素所引起的健康总风险偏高, 总风险大小顺序为井水 > 地下河水 > 泉水, 与 3 种类型地下水中 Cr 质量浓度的大小顺序一致。从金属元素的暴露途径来说, 经饮水途径引起的健康风险比和皮肤接触途径高 2 ~ 3 个数量级, 与余葱葱等^[16]对电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价研究结果一致, 表明饮水途径是金属元素的主要暴露途径。成人和儿童的总风险分别在 $7.40 \times 10^{-5} \sim 9.50 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 和 $8.05 \times 10^{-5} \sim 1.03 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 之间, 均高于 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 3 种类型地下水儿童总风险均大于成人, 说明较成人而言, 儿童是更加敏感的风险受体, 受到金属的危害更严重, 其中, 儿童经饮水途径引起的健康总风险大于成人, 而经皮肤接触途径引起的健康总风险小于成人, 这与研究选取的模型参数皮肤接触面积 SA, 人均体重 BW, 暴露频率 ET 有关, 此结果与张清华等^[36]对柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价研究结果相近, 因此应对儿童的饮水安全进

表 9 不同类型地下水金属元素经饮水途径引起的个人平均年健康风险/ a^{-1}

Table 9 Per capita annual health risks caused by metals in different types of groundwater by the drinking pathway/ a^{-1}

元素	井水		泉水		地下河水	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	8.00E-08	8.72E-08	6.05E-07	6.60E-07	2.89E-07	3.15E-07
Cd	7.38E-07	8.05E-07	6.42E-07	7.00E-07	4.50E-07	4.91E-07
Cr	9.32E-05	1.02E-04	7.20E-05	7.86E-05	7.83E-05	8.55E-05
Cu	1.69E-11	1.84E-11	5.34E-12	5.83E-12	2.24E-12	2.44E-12
Hg	1.85E-10	2.01E-10	1.08E-10	1.18E-10	3.41E-09	3.72E-09
Pb	2.49E-10	2.72E-10	2.62E-10	2.86E-10	1.59E-10	1.74E-10
Zn	3.07E-10	3.35E-10	7.94E-11	8.66E-11	6.54E-11	7.13E-11
Fe	9.55E-12	1.04E-11	1.84E-10	2.01E-10	4.59E-12	5.00E-12
Al	1.78E-11	1.94E-11	1.16E-10	1.26E-10	5.90E-11	6.43E-11
Mn	2.24E-11	2.45E-11	5.60E-10	6.10E-10	7.94E-11	8.66E-11
总风险	9.40E-05	1.03E-04	7.33E-05	7.99E-05	7.91E-05	8.63E-05

表 10 不同类型地下水金属元素经皮肤接触途径引起的个人平均年健康风险/a⁻¹

Table 10 Per capita annual health risks caused by metals in different types of groundwater by the dermal contact pathway/a⁻¹

元素	井水		泉水		地下河水	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	1.82E-09	1.28E-09	1.38E-08	9.66E-09	6.57E-09	4.61E-09
Cd	3.83E-09	2.69E-09	3.33E-09	2.34E-09	2.33E-09	1.64E-09
Cr	9.66E-07	6.78E-07	7.46E-07	5.24E-07	8.12E-07	5.70E-07
Cu	1.75E-13	1.23E-13	5.54E-14	3.89E-14	2.32E-14	1.63E-14
Hg	1.72E-12	1.21E-12	1.01E-12	7.08E-13	3.18E-11	2.23E-11
Pb	1.72E-14	1.21E-14	1.81E-14	1.27E-14	1.10E-14	7.72E-15
Zn	2.86E-11	2.01E-11	7.40E-12	5.20E-12	6.10E-12	4.28E-12
Fe	3.30E-14	2.31E-14	6.36E-13	4.46E-13	1.58E-14	1.11E-14
Al	9.22E-13	6.47E-13	6.00E-12	4.21E-12	3.05E-12	2.14E-12
Mn	2.97E-13	2.09E-13	7.41E-12	5.20E-12	1.05E-12	7.38E-13
总风险	9.71E-07	6.82E-07	7.64E-07	5.36E-07	8.21E-07	5.76E-07

行更严格的控制。从金属元素来说,井水金属元素引起的健康风险大小顺序为:Cr>Cd>As>Zn>Pb>Hg>Mn>Al>Cu>Fe,泉水为:Cr>Cd>As>Mn>Pb>Fe>Al>Hg>Zn>Cu,地下河为:Cr>Cd>As>Hg>Pb>Mn>Zn>Al>Fe>Cu。从致癌风险水平来说,致癌总风险比非致癌总风险高4~6个数量级,表明研究区地下水的健康总风险主要来源于致癌性金属元素,特别是Cr,致癌风险的分布代表了研究区的健康风险格局,此结果与王若师等^[37]对东江流域典型村饮用水源地重金属污染健康风险评价一致,因此应将Cr作为风险决策管理重点。

3 结论

(1)研究区井水的pH值、TDS、总硬度(CaCO₃)、NO₃⁻和Na⁺平均质量浓度最高,泉水的高锰酸盐指数、SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻和NH₄⁺最高,地下河水的NO₂⁻最高。按金属元素平均质量浓度堆积总浓度大小顺序为泉水>井水>地下河水。井水中NO₃⁻、Zn和Hg超过Ⅲ类水质标准限值,泉水中NO₃⁻、F⁻、NH₄⁺、高锰酸盐指数、Fe、Mn和Al超标,地下河水NO₃⁻、NO₂⁻和Hg超标。井水、泉水和地下河水的综合评价分值分别为7.10、7.10和4.26,水质级别均为较差级别,按水质级别为良好的样品数百分比大小顺序为地下河水(36.36%)>井水(35.71%)>泉水(33.33%)。

(2)研究区地下水的pH值影响着Cu和As质量浓度的分布,高硬度和高矿化度利于Cr富集,不利于Fe、Mn和Al富集,还原环境(高锰酸盐指数、NH₄⁺和F⁻)利于As富集。地下水Zn、Pb、Cd和Cu经过的环境地球化学作用相似,Fe、Al和Mn来源相似,As和Hg可能具有相似的空间变化规律,Cr与其它金属元素来源不同或环境地球化学性质

不同。

(3)研究区3种类型地下水金属元素引起的健康总风险均高于最大可接受风险水平(5.0×10⁻⁵a⁻¹),总风险大小顺序为井水>地下河水>泉水。致癌总风险(高于5.0×10⁻⁵a⁻¹)比非致癌总风险(小于10⁻⁶a⁻¹)高4~6个数量级,健康总风险主要来源于致癌性金属元素Cr,Cr致癌风险值高于5.0×10⁻⁵a⁻¹,应将Cr作为风险决策管理重点。儿童总风险均大于成人,经饮水途径引起的健康风险比皮肤接触途径高2~3个数量级,饮水途径是金属元素的主要暴露途径,应在饮水安全方面对儿童进行更严格控制。井水、泉水和地下河水的致癌总风险来源物质顺序均为Cr>Cd>As,非致癌总风险来源物质大小顺序分别为Zn>Pb>Hg>Mn>Al>Cu>Fe、Mn>Pb>Fe>Al>Hg>Zn>Cu和Hg>Pb>Mn>Zn>Al>Fe>Cu。

(4)结合内梅罗综合指数法和健康风险评价,地下河水的综合评价分值最低,健康风险高于泉水,泉水的健康风险最低,水质指标超过率最高,Cr元素致癌风险最高。从饮水安全考虑,需特别注意在饮用前对井水、地下河水和泉水进行Cr污染物控制,适当处理后可作为生活饮用水。

参考文献:

[1] 赵雪琼,黄茜蕊,邹鲤岭. 矿山开发对地下水的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(7): 38-41.
Zhao X Q, Huang Q R, Zou L L. Influences of mine development on groundwater resources [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(7): 38-41.
[2] 周跃飞,谢越,周立祥. 酸性矿山废水天然中和形成的富铁沉淀及其环境属性[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1581-1588.
Zhou Y F, Xie Y, Zhou L X. Formation and environmental implications of iron-enriched precipitates derived from natural neutralization of acid mine drainage[J]. Environmental Science, 2010, 31(6): 1581-1588.
[3] 王滢,刘光武. 铁矿开采对地下水环境影响评价实证研究[J]. 地下水, 2015, 37(2): 80-82.

- Wang Y, Liu G W. Empirical study on groundwater environmental impact assessment of iron ore mining[J]. Ground Water, 2015, **37**(2): 80-82.
- [4] 王华东, 张义生. 环境质量评价[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1986. 1-2.
- [5] Sun Z G, Mou X J, Tong C, *et al.* Spatial variations and bioaccumulation of heavy metals in intertidal zone of the Yellow River estuary, China[J]. CATENA, 2015, **126**: 43-52.
- [6] 张家泉, 李秀, 张全发, 等. 大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 194-201.
- Zhang J Q, Li X, Zhang Q F, *et al.* Transportation and risk assessment of heavy metal pollution in water-soil from the riparian zone of Daye Lake, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 194-201.
- [7] Muhammad S, Shah M T, Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan[J]. Microchemical Journal, 2011, **98**(2): 334-343.
- [8] Wang X L, Li Y. Distribution and fractionation of heavy metals in long-term and short-term contaminated sediments [J]. Environmental Engineering Science, 2012, **29**(7): 617-622.
- [9] 仇茂龙, 刘玲花, 邹晓雯, 等. 国内外水源地水质评价标准与评价方法的比较[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, **11**(3): 176-182.
- Qiu M L, Liu L H, Zou X W, *et al.* Comparison of source water quality standards and evaluation methods between China and some developed countries[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013, **11**(3): 176-182.
- [10] 程继雄, 程胜高, 张炜. 地下水质量评价常用方法的对比分析[J]. 安全与环境工程, 2008, **15**(2): 23-25.
- Cheng J X, Cheng S G, Zhang W. Comparison and analysis on common methods of groundwater quality assessment[J]. Safety and Environmental Engineering, 2008, **15**(2): 23-25.
- [11] 尚佰晓, 吕子楠, 李杰年, 等. 基于模糊综合评价法与单因子指数评价法的水质评价[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2013, **23**(5): 1-4.
- Shang B X, Lv Z N, Li J N, *et al.* Application of fuzzy mathematics and single factor index in water quality evaluation [J]. Journal of EMCC, 2013, **23**(5): 1-4.
- [12] 李春萍, 李国学, 罗一鸣, 等. 北京市6座垃圾填埋场地下水环境质量的模糊评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2729-2735.
- Li C P, Li G X, Luo Y M, *et al.* Fuzzy mathematics-based groundwater quality evaluation of six MSW landfills in Beijing [J]. Environmental Science, 2008, **29**(10): 2729-2735.
- [13] 黄尤优, 曾燭, 刘守江, 等. 大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 132-140.
- Huang Y Y, Zeng Y, Liu S J, *et al.* Community structure of aquatic community and evaluation of water quality in Laoyingyan section of Dadu River[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 132-140.
- [14] 闫佰忠, 肖长来, 刘泓志, 等. 吉林市城区土地利用对地下水污染空间分布的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(3): 934-942.
- Yan B Z, Xiao C L, Liu H Z, *et al.* Effect of urban land use on the spatial distribution of groundwater pollution in the Jilin City [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(3): 934-942.
- [15] 张晓叶, 张永祥, 任仲宇, 等. 不同地下水水质评价方法的比较及实例应用[J]. 水资源与水工程学报, 2014, **25**(2): 98-101.
- Zhang X Y, Zhang Y X, Ren Z Y, *et al.* Comparison and practical example of assessment method in different groundwater qualities [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, **25**(2): 98-101.
- [16] 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.
- 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.
- [17] 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.
- [18] 张妍, 李发东, 欧阳竹, 等. 黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 121-128.
- Zhang Y, Li F D, Ou Y Z, *et al.* Distribution and health risk assessment of heavy metals of groundwaters in the irrigation district of the Lower Reaches of Yellow River[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 121-128.
- [19] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- Zhang J Q, Tian Q, Xu D M, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye Lake[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- [20] 张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 等. 我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1835-1841.
- Zhang Q Q, Pan S L, Liu W, *et al.* Accumulated health risk assessment of arsenic in drinking water of major cities of China [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1835-1841.
- [21] 李川琳, 黄琳. 左江流域水文特性分析[J]. 广西水利水电, 2015, (4): 52-55.
- Li C L, Huang L. Analysis of hydrological characteristics of Zuojiang River Basin [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2015, (4): 52-55.
- [22] 吴浩东, 胡衡生. 左江流域花山旅游景区段水环境质量趋势分析[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(12): 6365-6366, 6378.
- Wu H D, Hu H S. Analysis on the water environmental quality trend in Huashan tour district of Zuo River Basin[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, **38**(12): 6365-6366, 6378.
- [23] 王艳. 左江流域土地利用/覆被变化与生态安全评价[D]. 南宁: 广西师范学院, 2010.
- [24] 黄杰彦, 牟永红. 广西左江流域生态经济环境特征及其开发策略[J]. 沿海企业与科技, 2007, (3): 124-126.
- [25] 韩智勇, 许模, 刘国, 等. 生活垃圾填埋场地下水污染物识别与质量评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(9): 2843-2852.
- Han Z Y, Xu M, Liu G, *et al.* Pollutant identification and quality assessment of groundwater near municipal solid waste landfills in China[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(9): 2843-2852.
- [26] 王春懿, 梁川, 景楠, 等. 岩溶区地下水质量评价方法的对比分析[J]. 黑龙江大学工程学报, 2016, **7**(1): 1-6.
- Wang C Y, Liang C, Jing N, *et al.* Comparative analysis on

- evaluation method for karst groundwater quality[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2016, 7(1): 1-6.
- [27] 关云鹏. 利用内梅罗指数法模型评价地下水水质的探讨[J]. 山西水利科技, 2012, (1): 81-84.
- Guan Y P. A discussion on evaluating groundwater quality by Nemerow index method[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2012, (1): 81-84.
- [28] 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.
- [29] 徐美娟, 鲍波, 陈春燕, 等. 宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 729-737.
- Xu M J, Bao B, Chen C Y, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and human health risk of surface waters in the City of Ningbo, China[J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 729-737.
- [30] US EPA. Guidance for performing aggregate exposure and risk assessments[S]. Washington, DC: U. S. EPA, 1999.
- [31] US EPA. EPA/600/R-06/096F, Child-specific exposure factors handbook[R]. Washington DC: U S EPA, 2008.
- [32] 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. 90-780.
- Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population (adult volume) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013. 90-780.
- [33] 段小丽, 王宗爽, 李琴, 等. 基于参数实测的水中重金属暴露的健康风险研究[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1329-1339.
- Duan X L, Wang Z S, Li Q, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water based on field measurement of exposure factors of Chinese people[J]. Environmental Science, 2011, 32(5): 1329-1339.
- [34] 曾昭华. 长江中下游地区地下水中 Cd 元素的背景特征及形成[J]. 江苏地质, 2004, 28(2): 96-99.
- Zeng Z H. Background properties and formation of Cd element in groundwater in middle and lower Yangtze River Reaches[J]. Jiangsu Geology, 2004, 28(2): 96-99.
- [35] 曾昭华. 长江中下游地区地下水中化学元素的背景特征及形成[J]. 地质学报, 1996, 70(3): 262-269.
- Zeng Z H. The background features and formation of chemical elements of groundwater in the area of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70(3): 262-269.
- [36] 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.
- [37] 王若师, 许秋瑾, 张娴, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3083-3088.
- Wang R S, Xu Q J, Zhang X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in typical township water sources in Dongjiang River Basin [J]. Environmental Science, 2012, 33(9): 3083-3088.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)