

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期

Vol.42 No.5

目 次

北京冬季 PM_{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析 徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)

北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析 尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)

北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析 廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)

青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比 孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)

太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)

西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价 范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)

超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征 胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)

合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析 姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)

郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响 董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳侯, 张瑞芹 (2179)

2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析 钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)

天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)

太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化 李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)

松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析 丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)

会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)

京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素 程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)

次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响 罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)

碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)

冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异 李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)

城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析:以京津冀北运河为例 邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰若, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)

太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素 赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)

三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)

铁硫改性生物炭去除水中的磷 桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)

钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析 罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)

BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附 王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)

Ag₃PO₄/g-C₃N₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能 高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)

可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A 张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)

铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物 张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)

硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制 屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)

电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制 曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)

缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制 李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)

反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响 吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)

基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺 薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)

活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响 马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)

6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制 凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)

中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素 李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)

不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征 刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)

青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析:以祁连山和藏东南地区为例 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)

基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价 胡梦瑶, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)

长期施用化肥和有有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)

川南山区土壤与农作物重金属特征及成因 韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)

宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)

重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性 鹿发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾亮, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)

典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱挥华, 朱奇宏 (2512)

油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响 蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)

土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响 徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)

渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落 程森, 路平, 冯启言 (2541)

3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响 李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)

污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨 陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)

《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)

会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价

朱丹尼¹, 邹胜章¹, 李军^{1,2*}, 樊连杰^{3*}, 赵一¹, 谢浩¹, 朱天龙², 潘民强⁴, 徐利²

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 2. 河北建筑工程学院, 河北省水质工程与水资源综合利用重点实验室, 张家口 075000; 3. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541006; 4. 河北省张家口生态环境监测中心, 张家口 075000)

摘要: 以我国典型的亚热带低海拔岩溶湿地为研究区, 对该区丰水期、平水期和枯水期共采集的 27 组地表水样品进行 12 种常规离子和 10 种金属元素检测, 在分析地表水主要离子化学特征基础上, 分别运用内梅罗污染指数法以及钠吸附比法 (SAR)、钠含量法 (SC)、渗透指数法 (PI) 和残余碳酸钠法 (RSC) 这 4 种评价体系对不同时地表水进行污染评价和灌溉适用性评价。结果表明, 研究区内地表水主要为弱碱性水, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为优势离子。常规指标中仅 NH_4^+ 超过生活饮用水卫生标准限值, 超标率为 25.93%, 金属元素中超标组分为 Al (11.11%)、Mn (44.44%) 和 Hg (37.04%)。常规指标浓度受时空尺度影响程度整体低于金属元素, 两者均具有丰水期 > 平水期 > 枯水期的时期分布特征。据污染评价结果, 区内地表水总体水质尚可, 内梅罗综合污染指数介于 0.75 ~ 2.69, 主要污染指标为 NH_4^+ 、Mn、Al 和 Hg, 部分样点存在季节性污染, 污染级别为轻度 ~ 中度, 丰水期污染程度最高, 污染点多分布于湿地核心区。综合农田灌溉水质标准和地表水环境质量标准限值以及 SAR、SC、PI 和 RSC 灌溉适用性评价结果, 会仙岩溶湿地地表水总体适合灌溉, 枯水期灌溉适用性优于丰水期和平水期, 平水期 PH1 (Hg 浓度 $1.91 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和丰水期 FH8 (NH_4^+ 浓度 $13.70 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 地表水已不适用于农业灌溉。

关键词: 会仙岩溶湿地; 地表水; 常规指标; 金属元素; 污染; 灌溉适用性

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2240-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202010087

Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China

ZHU Dan-ni¹, ZOU Sheng-zhang¹, LI Jun^{1,2*}, FAN Lian-jie^{3*}, ZHAO Yi¹, XIE Hao¹, ZHU Tian-long², PAN Min-qiang⁴, XU Li²

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources/Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Hebei Key Laboratory of Water Quality Engineering and Comprehensive Utilization of Water Resources, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China; 3. School of Environmental Science & Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 4. Zhangjiakou Ecological Environment Monitoring Center of Hebei Province, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: To reveal the hydrochemical characteristics of karst wetland located in a subtropical area and at lower elevations in China, 27 surface water samples were collected during three periods (wet, normal, and dry) in the Huixian karst wetland to investigate the distributions, pollution, and irrigation application of 12 inorganic ions and 10 heavy metals. Based on their concentrations, the Nemerow index and the four evaluation systems of the sodium adsorption ratio (SAR), sodium concentration (SC), permeability index (PI), and residual sodium carbonate (RSC) were applied to evaluate the pollution characteristics and irrigation application. It was found that the water type in this area was Ca^{2+} - HCO_3^- and weakly alkaline. Regarding the 12 inorganic ions and 10 heavy metals, NH_4^+ exceeded the Chinese standards for drinking water with an exceedance rate of 25.93%, and the exceedance rates of Al, Mn, and Hg were 11.11%, 44.44%, and 37.04%, respectively. The spatiotemporal scaling effect on inorganic ions was lower than that of heavy metals, and the distributions of the inorganic ions and heavy metals were in the order of wet period > normal period > dry period. However, the surface water quality in the Huixian karst wetland was generally well-protected based on the pollution assessment. The Nemerow index ranged from 0.75 to 2.69, which recognized the main pollution contributors as NH_4^+ , Mn, Al, and Hg with the contamination grade from slight pollution to moderate pollution, especially in the core area during the wet period. According to the limits of standards for irrigation water quality and environmental quality for surface water, as well as the evaluation results of the SAR, SC, PI, and RSC, the surface water in the Huixian karst wetland was generally suitable for irrigation, and the water quality in the dry period was better than that in the wet and normal periods. The surface water from site PH1 during the normal period with $19.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of Hg and site FH8 during the wet period with $13.7 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of NH_4^+ were not suitable for agricultural irrigation.

Key words: Huixian karst wetland; surface water; conventional indicators; heavy metals; pollution; irrigation applicability

收稿日期: 2020-10-16; 修订日期: 2020-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0406104); 国家自然科学基金项目(41701017); 张家口市市级科技计划项目(1711027C); 中国地质调查项目(DD20190825)

作者简介: 朱丹尼(1991 ~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为岩溶水环境污染, E-mail: zhudanni@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者, E-mail: 532443515@qq.com; flianjie@mail.cgs.gov.cn

岩溶湿地作为一种特殊的岩溶水文系统,具有涵养水源、净化水质、调节气候和保护生物多样性等重要生态功能^[1],对维持岩溶区生态系统的稳定性和可持续发展起着重要作用^[2].近年来,强烈的工农业活动不仅使得湿地生态环境不断恶化^[3],而且导致湿地地表和地下水体遭受不同程度的污染^[4,5].地表水体作为湿地系统的重要组成部分,既是湿地景观用水的主要来源,又是农业灌溉的重要水源.然而,湿地地表水环境并不乐观,在人口密集区地表水通常是工农业生产活动的纳污主体.进入地表水中的污染物沿径流方向迁移并发生复杂的生物地球化学作用,极可能造成水文系统污染,从而加剧水资源危机^[6,7].此外,使用污染的地表水进行灌溉,可能导致污染物向土壤和农作物迁移,从而影响土壤质量和作物产量,进一步危害人体健康^[8].岩溶湿地生态系统的特殊性和脆弱性,决定了其更易受到人类活动干扰^[9].因此,为了更好地利用和管理水资源,降低粮食安全隐患,应加强对岩溶湿地地表水的关注.

桂林会仙湿地是我国最大的低海拔岩溶湿地,具有独特的生态价值和景观价值,2012年4月被国家林业局正式列入国家湿地试点公园.会仙湿地是由沼泽、河流、湖泊和水田等组成的综合性自然湿地,位于漓江和洛清江的分水岭地带,起到连接漓江流域和洛清江流域的重要生态作用.湿地内农业密集种植和畜禽水产养殖造成的面源污染正在加剧湿地水环境的恶化^[10].目前,会仙岩溶湿地系统的研究主要集中在地下水环境污染^[5,11]、土壤沉积物重金属污染以及湿地水文效应^[12~14]等方面.就湿地地表水环境而言,现有研究多关注于硝酸盐^[11]、水体营养盐^[15]、有机氯农药^[4]和磺胺类抗生素^[10]的浓度分布及污染研究,而对于小流域地表水综合水质评价和灌溉适用性评价研究相对有限.基于此,本文分析了2018~2019年会仙岩溶湿地地表水中主要

离子水化学特征及时空尺度变化规律,利用单项污染指数和内梅罗综合污染指数法对主要离子进行污染评价,利用多元统计法识别地表水主要离子的相关关系,并采用钠吸附比法(SAR)、钠含量法(SC)、渗透指数法(PI)和残余碳酸钠法(RSC)这4种评价体系进行灌溉适用性评价,以期为该区域地表水质污染防控与治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

会仙岩溶湿地位于我国广西桂林市西南南部约21 km,北纬25°01'30"~25°11'15",东经110°08'15"~110°18'00",海拔介于150~160 m之间^[16].该湿地属于中亚热带季风气候,是我国亚热带峰林地貌中心^[17].研究区选取会仙湿地南部睦洞河、独龙湖和狮子岩等部分水系,地表河水主要涉及当地居民灌溉和生活用水.该区多年平均气温19.5℃,年均降水量为1835.8 mm,全年降水主要集中在4~8月,降水量占全年总量的70%,其他时间段为旱季,年蒸发量为1569.7 mm^[5,18].据桂林市多年水文观测资料,6~8月为丰水期,9~11月为平水期,3~5月和12~次年2月为枯水期^[5].由于岩溶湿地多发育溶孔和管道等岩溶水文地质构造,地表河水水位受季节性降水影响较大.

1.2 样品采集与测试

于2018年5月3日(平水期)、2018年8月2日(丰水期)和2019年1月21日(枯水期)分别在河流同一位点采集地表水样共3批次,每批次样品标号为H1~H9,其中,FH1~FH9为丰水期样品编号,PH1~PH9为平水期样品编号,KH1~KH9为枯水期样品编号,3批样品总计27组,采样点布置如图1.使用聚乙烯瓶采集地表河水,500 mL样品2瓶,取样前先用原样水冲洗采样瓶3次,水样采用

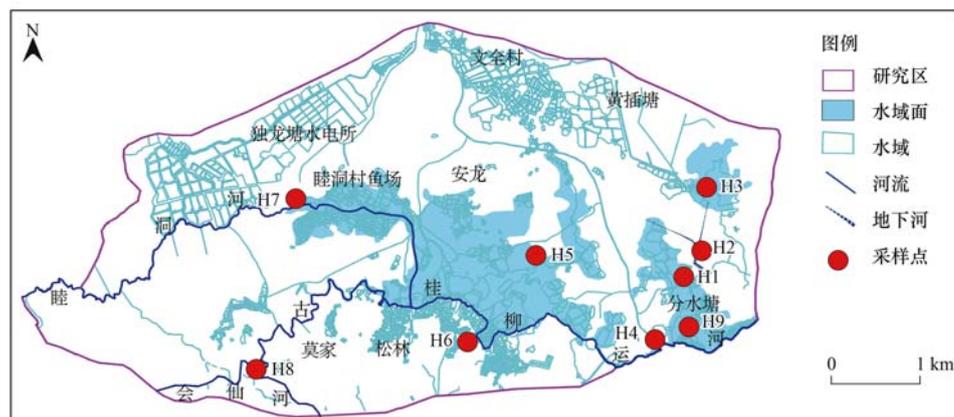


图1 研究区位置与采样点分布示意

Fig. 1 Sketch of the study area and the sampling positions

0.45 μm 的微孔过滤膜过滤水样,其中一瓶加入 2 mL 硝酸(1:1)用于稳定水样中的金属元素,另一瓶用于常规指标测试.所有样品均采用密封膜封口,运输和保存均处于 4 $^{\circ}\text{C}$ 避光条件.样品测试由自然资源部岩溶地质与资源环境测试中心完成.

Al、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、Mn、As 和 Hg 浓度采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,赛默飞世尔)测定, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 利用戴安 ICS11500 离子色谱仪测定, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 F^- 采用万通 MIC 离子色谱仪测定, HCO_3^- 采用滴定法测定, NO_3^- 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 采用分光光度法测定.测试过程使用的化学试剂均为分析纯,水样测试均设有空白对照样,同时通过使用国家一级标准物实现质量保证和控制.地表水样品各项指标测定结果的标准偏差均低于 5%,加标回收率在 90%~110%,测试结果满足分析要求.

1.3 评价方法

1.3.1 污染评价

地表水污染评价采用单项污染指数法和内梅罗

表 1 内梅罗综合污染指数评价分级^[20]
Table 1 Nemerow comprehensive pollution index grade

项目	P				
	<1	$\geq 1 \sim 2$	$\geq 2 \sim 3$	$\geq 3 \sim 5$	≥ 5
污染等级	I	II	III	IV	V
污染类别	未污染	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染

1.3.2 灌溉适用性评价

灌溉适用性评价选用钠吸附比法(SAR)、钠含量法(SC)、渗透指数法(PI)和残余碳酸钠法(RSC)这 4 种评价体系对地表水进行评价^[23,24].4 种评价体系的评价等级划分标准见表 2. SAR、SC、PI 和 RSC 的计算公式如公式(3)~(6),公式中涉及的离

表 2 灌溉水适用性评分等级¹⁾

评价参数	分类参考值	适用等级
SAR/($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) ^{1/2}	<10	非常适用
	10~18	较适用
	18~26	适用
	>26	不适用
PI/%	>75	I类(非常适用)
	25~75	II类(适用)
	<25	III类(不适用)
SC/%	<20	非常适用
	20~40	较适用
	40~60	适用
	60~80	不确定
	>80	不适用
RSC/meq·L ⁻¹	<1.25	非常适用
	1.25~2.50	适用
	>2.50	不适用

综合污染指数法,对 5 项无机常规指标(NH_4^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 F^-)和 10 项金属元素(Al、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、Mn、As 和 Hg)进行污染评价,计算公式为^[19,20]:

$$P_i = c_i/c_{oi} \quad (1)$$

$$P = \sqrt{\frac{(P_{iave})^2 + (P_{max})^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_i 表示评价指标 i 的单项污染指数; c_i 表示评价指标 i 的实测浓度,常规指标单位 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,金属元素单位 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; c_{oi} 表示评价指标 i 的标准值,根据地表水水域环境功能和保护目标,参照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)^[21,22],选取适用于农业用水区的 V 类水质标准和生活饮用水限定值作为地表水污染评价标准值; P 为内梅罗综合污染指数; P_{iave} 为评价指标单项污染指数平均值; P_{max} 为评价指标最大单项污染指数.根据内梅罗综合污染指数分级,可将地表水污染程度划分为未污染、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染这 5 个等级(表 1).

子浓度单位均为 $\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$.

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / \sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2} \quad (3)$$

$$\text{SC} = \frac{100 \times (\text{K}^+ + \text{Na}^+)}{(\text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})} \quad (4)$$

$$\text{PI} = \frac{100 \times (\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-})}{(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})} \quad (5)$$

$$\text{RSC} = \text{HCO}_3^- - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \quad (6)$$

1.4 数理统计方法

利用 Excel 2013 对地表水化学数据进行整理统计和计算.利用 SPSS 22 对常规指标和金属元素进行 Pearson 相关性分析和采样点聚类分析,以揭示地表河水离子间及采样点间的相互影响关系.采样点分布采用 MapGis 6.7 绘制,离子浓度分布图采用 Origin 9.1 绘制.

2 结果与讨论

2.1 水化学分析

会仙岩溶湿地地表水中常规指标统计结果见表 3.地表水中 pH 值总体介于 7.14~7.60,属弱碱性水.水质常规指标阳离子平均浓度顺序为: $\text{Ca}^{2+} >$

$Mg^{2+} > K^+ > Na^+ > NH_4^+$, 阴离子平均浓度顺序为: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > NO_2^- > F^-$, 其中, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度均高于其它同类离子浓度总和, 据主导离子划分原则^[25], 会仙岩溶湿地地表水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为主导离子. 依据我国《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)^[21,22], 仅 NH_4^+ 出现超过我国地表水环境质量标准限值和生活饮用水卫生标准限值的样点, 超标率为 25.93%, 其中, 丰水期 NH_4^+ 的超标率最高为 55.56%, 平水期和枯水期无超标样点. NH_4^+ 最大浓度 (FH8) $13.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 是地表水环境质量标

准 V 类水限值的 5.33 倍, 是生活饮用水卫生标准限值 $0.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 21.41 倍, 已不适合饮用和灌溉. 由变异系数知, pH、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 F^- 的变异系数均低于 0.5, 说明这些离子受时空尺度影响小, 在地表水中分布较稳定. NO_3^- 的总变异系数介于 0.5~1.0, 其中 NO_3^- 平水期 (0.71) 和枯水期 (0.46) 的变异系数均高于丰水期 (0.19) 2 倍以上, 说明 NO_3^- 受时空尺度影响较强. NO_2^- 和 NH_4^+ 的总变异系数均高于 2.0, 且不同时期的变异系数均介于 0.79~2.08 之间, 说明这两种离子受时空尺度影响大, 分布最不稳定.

表 3 丰平枯水期地表水水质常规指标统计¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Statistics of the conventional indicators during the wet, normal, and dry periods in surface water/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

时期	统计量	pH	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	F^-
丰水期	最大值	7.57	7.59	4.08	65.15	9.56	10.16	12.99	229.92	2.18	0.40	13.70	0.28
	最小值	7.15	2.31	1.58	42.50	4.56	2.96	6.78	153.28	nd	nd	0.04	0.08
	平均值	7.39	4.11	2.28	52.91	6.51	5.98	8.96	183.96	1.70	0.20	1.99	0.13
	标准差	0.132	1.640	0.718	6.813	1.724	2.242	1.994	23.865	0.320	0.155	4.149	0.061
	变异系数	0.02	0.40	0.32	0.13	0.26	0.38	0.22	0.13	0.19	0.79	2.08	0.49
平水期	最大值	7.38	4.54	3.96	75.78	9.27	9.19	16.47	220.79	10.39	0.10	1.11	0.18
	最小值	7.14	2.49	2.80	50.30	5.18	3.91	7.71	187.57	nd	nd	nd	0.06
	平均值	7.27	3.53	3.22	64.53	6.38	5.83	12.60	207.76	4.99	0.03	0.41	0.09
	标准差	0.080	0.626	0.381	7.522	1.509	1.664	3.327	12.319	3.537	0.045	0.392	0.040
	变异系数	0.01	0.19	0.12	0.12	0.24	0.29	0.26	0.06	0.71	1.58	0.95	0.43
枯水期	最大值	7.60	5.25	3.58	80.68	10.48	10.18	20.82	227.71	29.94	2.60	0.37	0.06
	最小值	7.28	2.70	1.66	48.80	4.96	4.47	13.00	171.32	8.16	nd	0.08	nd
	平均值	7.45	4.00	2.36	66.15	7.37	6.67	16.05	203.49	14.98	0.96	0.12	0.05
	标准差	0.129	0.875	0.664	10.235	1.864	1.696	2.371	19.934	6.963	1.423	0.095	0.012
	变异系数	0.02	0.23	0.28	0.15	0.25	0.25	0.15	0.10	0.46	1.49	0.79	0.27
三期综合	最大值	7.60	7.59	4.08	80.68	10.48	10.18	20.82	229.92	29.94	2.60	13.70	0.28
	最小值	7.14	2.31	1.58	42.50	4.56	2.96	6.78	153.28	nd	nd	nd	nd
	平均值	7.37	3.82	2.62	61.19	6.75	6.16	12.54	198.40	8.67	0.36	0.87	0.09
	标准差	0.136	1.185	0.739	10.091	1.732	1.901	3.899	21.854	7.724	0.797	2.69	0.054
	变异系数	0.02	0.31	0.28	0.16	0.26	0.31	0.31	0.11	0.89	2.23	3.08	0.61
地表水环境质量标准限值	III	6~9	—	—	—	—	250	250	—	44.29	—	1.29	1.0
生活饮用水卫生标准限值	V	6~9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.57	1.5
生活饮用水卫生标准限值	6.5~8.5	—	200	—	—	—	300	250	—	44.29	—	0.64	1.0

1) nd 表示未检出, “—” 为无相应参考标准值, 黑体字表示此浓度超标

由表 4 可知, 地表水中 10 种金属元素平均浓度顺序为: $Mn > Al > Zn > Cr > As > Ni > Pb > Cu > Hg > Cd$, 仅 Mn 和 Al 浓度超过 $100 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其余金属元素浓度均低于 $100 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 据我国《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)^[21,22], Al、Mn 和 Hg 浓度出现不同程度超标, 超标率分别为 11.11%、44.44% 和 37.04%. 其中, Al 仅在丰水期 (FH1、FH3 和 FH7) 出现超标, 最大浓度 (PH1) $437.00 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 是生活饮用水卫生标准限值的 2.19 倍. Mn 在丰水期和平水期均出现超标样点, 超标率分别为 100.00% 和 33.33%, 说明 Mn 在丰水期污染较普遍, 平水期呈局部污染. 参考地表水环境质量标准 III 类水限值, Hg

在丰水期和平水期超标率为 33.33% 和 77.78%, 枯水期未检出; 相对地表水环境质量标准 V 类水限值和生活饮用水卫生标准限值, 仅平水期 PH1 中 Hg 出现超标, 超标倍数为 1.91 倍, 说明会仙岩溶湿地中多数地表水适合灌溉. 从变异系数看, 低于 0.5 的金属元素有 Cr、Cd 和 Ni, 说明这 3 种金属元素较稳定; 介于 0.5~1.0 的金属元素包括 Cu 和 As, 其余金属元素的变异系数均超过 1.0, 说明会仙岩溶湿地地表水中金属元素分布不稳定程度整体高于常规指标. Cd 在平水期 (0.95) 的变异系数明显高于丰水期 (0.33) 和枯水期 (0.10), 说明 Cd 在平水期受空间尺度影响较大. Cu 和 As 在平水期的变异系数相对其它时期较高, 说明 Cu 和 As 在平水期分布相对

不稳定. Al、Pb、Zn、Mn 和 Hg 受时空尺度影响较大,且平水期的变异系数明显高于丰水期和枯水期,特别是 Pb(1.93)、Zn(1.32)和 Mn(1.03)在平水期最不稳定. 金属元素变异系数相对较高可能与流域上游硫铁矿填埋场相关,来自于矿渣填埋场的金属元素进入地表水,增加了金属元素时空分布的不均匀性. 就不同时期而言,平水期会仙湿地地表水中金属元素分布最不稳定,说明平水期硫铁矿填埋场物质输入对地表水金属元素比例组成影响最大.

会仙岩溶湿地地表水中各水化学组分具有明显季节分布特征. 常规指标时期分布特征见图 2,仅出

现超标的 NH_4^+ 具有显著时期特征,即丰水期 > 平水期 > 枯水期,因此,地表水中 NH_4^+ 应在雨季需重点关注. 同时, NO_2^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 总体表现的时期规律与 NH_4^+ 相反,这些离子在枯水期需关注. Cl^- 是常规离子中最为稳定的离子,其浓度远低于我国标准限定值. 金属元素的时期分布特征见图 3,多数金属离子表现出的时期变化规律为丰水期 > 平水期 > 枯水期,出现超标的金属元素 Al 和 Mn 也表现为此规律,因此在丰水期应特别关注,而出现超标的 Hg 具有平水期 > 丰水期 > 枯水期的时期分布规律,在平水期应格外关注.

表 4 丰平枯水期地表水金属元素浓度统计¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Statistics of the metal concentrations during the wet, normal, and dry periods in surface water/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

时期	统计量	Al	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni	Mn	As	Hg
丰水期	最大值	437.00	0.83	1.31	4.10	3.07	0.10	1.50	396.00	5.64	0.23
	最小值	17.50	nd	nd	nd	1.88	nd	0.84	100.00	2.56	nd
	平均值	132.39	0.59	0.87	2.28	2.48	0.07	1.18	182.44	4.02	0.12
	标准差	130.211	0.166	0.440	1.190	0.334	0.033	0.251	86.58	0.849	0.056
	变异系数	0.98	0.28	0.51	0.52	0.13	0.33	0.21	0.47	0.21	0.45
平水期	最大值	138.00	1.38	8.04	47.30	3.71	0.37	2.12	500.00	4.59	1.91
	最小值	nd	nd	nd	nd	2.26	nd	1.19	23.50	1.54	nd
	平均值	60.17	0.78	1.63	14.29	2.96	0.18	1.60	161.10	2.38	0.62
	标准差	42.762	0.572	3.146	18.906	0.553	0.168	0.295	166.729	0.933	0.616
	变异系数	0.71	0.73	1.93	1.32	0.19	0.95	0.18	1.03	0.39	0.99
枯水期	最大值	123.00	0.19	1.29	nd	3.49	0.48	2.38	37.90	1.16	nd
	最小值	3.52	nd	0.49	nd	2.06	0.36	1.06	9.81	0.74	nd
	平均值	66.25	0.19	0.73	nd	2.89	0.38	1.57	19.67	0.90	nd
	标准差	34.81	/	0.226	/	0.468	0.039	0.382	9.285	0.139	/
	变异系数	0.53	/	0.31	/	0.16	0.10	0.24	0.47	0.15	/
三期综合	最大值	437.00	1.38	8.04	47.30	3.71	0.48	2.38	500.00	5.64	1.91
	最小值	nd	nd	nd	nd	1.88	nd	0.84	9.81	0.74	nd
	平均值	88.36	0.61	1.06	8.29	2.78	0.30	1.45	121.07	2.43	0.43
	标准差	91.441	0.384	1.825	14.132	0.497	0.140	0.362	128.81	1.485	0.534
	变异系数	1.03	0.63	1.72	1.71	0.18	0.47	0.25	1.06	0.61	1.25
地表水环境 质量标准限值	III V	—	1 000	50	1 000	50	5	—	100	50	0.1
生活饮用水卫生标准限值		200	1 000	10	1 000	50	5	20	100	10	1

1) nd 表示未检测出,“—”为无相应参考标准值,“/”为无计算结果,黑体字表示此浓度超标

2.2 水污染分析

会仙岩溶湿地地表水污染评价结果见表 5. 根据单项污染指数,水质常规指标污染指数表现为 $\text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{F}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$,各指标污染指数均值均小于 1.0,仅丰水期 NH_4^+ 污染指数的最大值(5.33)高于 1.0,表明会仙湿地地表水整体无 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 离子污染,但是丰水期个别点(FH8)存在 NH_4^+ 劣 V 类水,受 NH_4^+ 污染显著. FH8 为会仙岩溶湿地古桂柳运河的西出口,采样点附近人类活动频繁且分布大量农田,丰水期降雨将生活污水和农药化肥等冲淋至地表沟渠,导致水体出现 NH_4^+ 污染. 地表水中 10 种金属元素单项

污染指数顺序为 $\text{Mn} > \text{Al} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu}$,其中 Mn、Al 和 Hg 污染指数明显高于其他 7 种金属元素,仅 Mn 污染指数均值(1.21)高于 1.0. Mn 在丰水期的污染指数范围为 1.0 ~ 3.96,采样点均呈劣 V 类水,表明会仙岩溶湿地地表水丰水期 Mn 污染普遍;平水期 Mn 污染指数在 0.24 ~ 5.0 之间,部分点(PH4、PH5 和 PH6)存在明显 Mn 污染;枯水期 Mn 污染指数均小于 1.0,无污染样点. Al 仅在丰水期存在污染指数大于 1.0 的样点(FH1、FH3 和 FH7),其中 FH1 点的污染程度最高(2.19)、FH3 次之(1.13)、FH7 污染最小(1.06). Hg 仅在平水期出现一处污染样点(PH1),相应 Hg

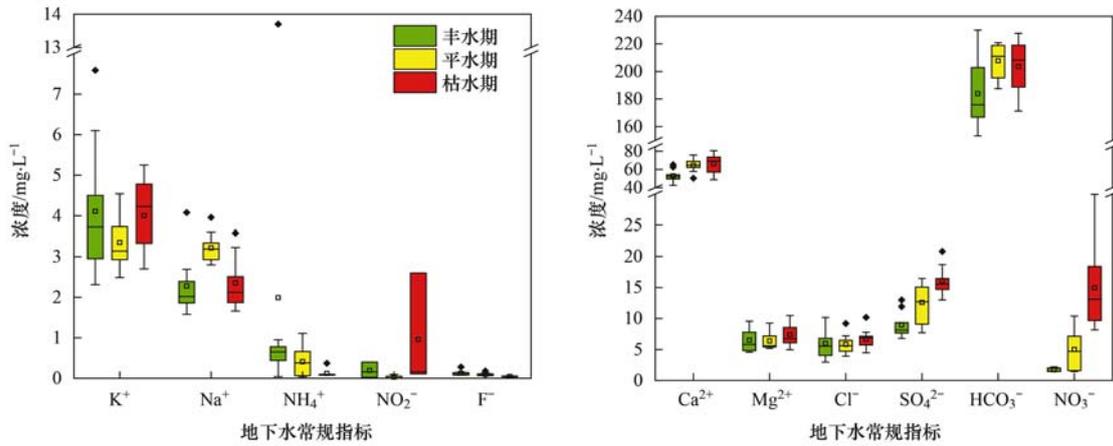


图2 丰平枯水期地表水水质常规指标分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of the conventional indicators surface water quality indexes during the wet, normal, and dry periods

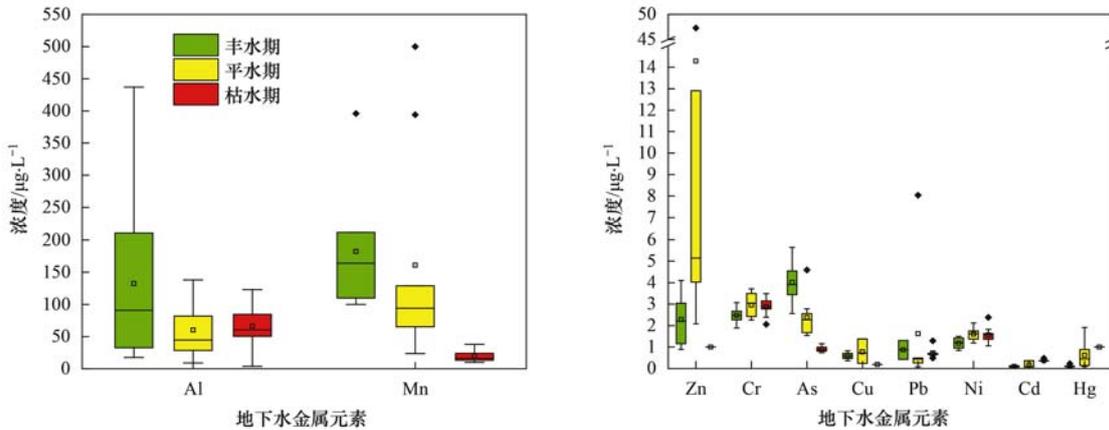


图3 丰平枯水期地表水金属浓度分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of the metal concentrations during the wet, normal, and dry periods in surface water

表5 地表水污染评价结果¹⁾

Table 5 Evaluation results for surface water pollution

时期	统计量	单项污染指数														内梅罗综合污染指数	
		NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Al	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	Mn	As		Hg
丰水期	最大值	5.33	0.04	0.05	0.05	0.19	2.19	0.000 8	0.01	0.002	0.03	0.08	0.01	3.96	0.06	0.23	2.69
	最小值	0.02	0.01	0.03	0.03	0.05	0.09	0.000 4	0.004	0.000 4	0.02	0.04	0.007	1.00	0.03	0.07	0.51
	平均值	0.77	0.02	0.04	0.04	0.08	0.66	0.000 6	0.009	0.001	0.02	0.06	0.010	1.82	0.04	0.12	1.14
平水期	最大值	0.43	0.04	0.07	0.23	0.12	0.69	0.001	0.08	0.02	0.04	0.11	0.04	5.00	0.05	1.91	2.51
	最小值	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.000 2	0.000 8	0.001	0.02	0.06	0.007	0.24	0.02	0.09	0.13
	平均值	0.16	0.02	0.05	0.11	0.06	0.30	0.000 8	0.02	0.007	0.03	0.08	0.02	1.61	0.02	0.62	0.89
枯水期	最大值	0.14	0.04	0.08	0.68	0.04	0.62	0.000 2	0.01	nd	0.03	0.12	0.05	0.38	0.01	nd	0.35
	最小值	0.03	0.02	0.05	0.18	0.02	0.02	0.000 2	0.005	nd	0.02	0.05	0.04	0.10	0.007	nd	0.14
	平均值	0.05	0.03	0.06	0.34	0.03	0.33	0.000 2	0.007	nd	0.03	0.08	0.04	0.20	0.009	nd	0.21
三期综合	最大值	5.33	0.04	0.08	0.68	0.19	2.19	0.001	0.08	0.02	0.04	0.12	0.05	5.00	0.06	1.91	2.69
	最小值	0.02	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.000 2	0.000 8	nd	0.02	0.04	0.007	0.10	0.007	nd	0.13
	平均值	0.33	0.02	0.05	0.16	0.06	0.43	0.000 5	0.01	0.004	0.03	0.07	0.02	1.21	0.02	0.37	0.75

1) nd 表示未检测出, 黑体字表示污染

浓度是我国地表水环境质量标准 V 类水限值的 1.91 倍, 该点 Hg 污染不容忽视. Ni、Cr、As、Cd、Pb、Zn 和 Cu 等金属浓度均达地表水 V 类水质标准和生活饮用水卫生标准限值, 无污染样点.

根据内梅罗综合污染指数评价结果, 地表水丰平枯三期综合污染指数均值为 0.75、最大值为

2.69, 说明会仙岩溶湿地水质条件尚可, 总体污染程度较低, 但部分样点存在季节性污染, 污染程度呈轻度~中度. 就不同时期而言, 三期污染程度为丰水期 > 平水期 > 枯水期. 丰水期, 33.33% 的样点受到轻度污染, 11.11% 样点受到中度污染, 未见重度和严重污染点; 平水期, 轻度污染和中度污染点占比均

为 11.11%,无重度和严重污染点;枯水期,各采样点均未受污染.丰水期是区内种养殖业排污高峰期,大量降水携带各类废弃物进入地表水体,从而导致湿地地表水受到 NH_4^+ 、Mn 和 Al 污染^[26].从污染采样点来看,H1 点污染指标最多(Mn、Al 和 Hg),H6 (2.51)和 H8 (2.69)点污染程度最高.H1、H6 和 H8 均位于地表水流系统的下游湿地核心区,地表水汇集且水流滞缓,是地表水纳污排泄的最终受体,因而遭受的污染物种类较多,受污程度较高.

2.3 多元统计分析

2.3.1 组分间相关性

地表水组分间的相关性可反映出不同组分的起源和迁移转化途径特征,即相关性显著的组分具有一定的同源性和相似的迁移转化途径^[27,28].常规指标与金属元素间 Pearson 相关性见表 6. pH 与金属元素间相关性不显著,这与地表水中 pH (7.14 ~ 7.60)较稳定有关. Ca^{2+} 和 HCO_3^- 与 Cr 和 Ni 之间具有显著正相关关系 ($P < 0.01$),会仙岩溶湿地主要为碳酸盐岩区, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是灰岩的主要组成离子,已有研究表明碳酸盐岩从原岩风化到覆盖在其上的共生土壤 Cr 等多种金属元素会表现出富集趋势^[29],因此研究区地表水中 Cr 和 Ni 极可能来源于碳酸盐岩及表层风化土壤.水体中常见的酸性污染组分 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 与 Cr、Cd 和 Ni 呈显著正相关关

系(SO_4^{2-} 和 NO_3^- 与 Cr 的 $P < 0.05$,其它 $P < 0.01$),岩溶区水体中 SO_4^{2-} 通常有石膏溶解、硫化物氧化、大气和城市排污输入 4 种来源^[30],会仙岩溶湿地上游存在以硫铁矿填埋场,金属硫化物氧化的酸性物质对地表碳酸盐岩进行侵蚀,同时,桂林存在酸雨现象,特别是冬季酸雨污染程度最严重 ($\text{pH} = 5.16$)^[31],会强化地表水对表层碳酸盐岩的溶蚀作用,进而水体中碳酸盐岩伴生金属元素增加.有研究表明会仙湿地水体中硝酸盐主要来源于动物粪便、化肥和土壤氮^[11],表明 Cr、Cd 和 Ni 金属的部分来源与农业活动相关.部分常规指标与金属元素呈显著负相关关系 ($P < 0.01$),说明这些组分间的来源和迁移转化途径具有一定差异.

金属元素间的 Pearson 相关性结果见表 7, Cu、Pb、Zn、Ni 和 Hg 相互呈显著正相关关系 (Ni 与 Cu、Pb、Zn 和 Hg 的 $P < 0.05$),说明这些金属元素关系密切,受彼此浓度影响较大^[32],Ni 对 Cu、Pb、Zn 和 Hg 浓度影响相对弱. Mn、As 和 Cd 相互呈显著正相关关系 ($P < 0.01$),说明这些金属元素两两之间具有部分同源性和相同的迁移转化途径^[17,32]. Al 和 Cu 之间 ($P < 0.05$)、Pd 与 Cd 之间 ($P < 0.05$) 以及 Cr 与 Ni 之间 ($P < 0.01$) 呈显著正相关,说明这些金属之间具有一定同源性,且 Cr 与 Ni 之间的同源性较强.

表 6 地表水中常规指标与金属元素相关性¹⁾

Table 6 Pearson correlation matrix between conventional indicators and metals in surface water

	Al	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni	Mn	As	Hg
pH	0.294	0.017	-0.035	-0.205	0.091	0.320	0.010	-0.336	-0.072	-0.184
K ⁺	0.107	0.084	-0.005	-0.038	0.223	0.061	0.068	0.040	0.129	-0.084
Na ⁺	-0.302	0.038	0.115	0.219	0.186	-0.223	0.287	0.087	-0.133	0.358
Ca ²⁺	-0.210	0.104	0.218	0.218	0.560**	0.377	0.843**	-0.333	-0.444*	0.227
Mg ²⁺	-0.165	-0.189	-0.127	-0.203	-0.178	0.241	-0.154	-0.161	-0.192	-0.162
Cl ⁻	-0.030	0.019	0.038	0.002	0.213	0.160	0.176	-0.176	-0.071	0.045
SO ₄ ²⁻	-0.206	0.045	0.264	0.178	0.411*	0.700**	0.658**	-0.657**	-0.747**	0.160
HCO ₃ ⁻	-0.239	0.133	0.112	0.131	0.513**	0.166	0.758**	-0.117	-0.175	0.186
NO ₃ ⁻	-0.128	-0.151	0.117	-0.017	0.402*	0.755**	0.568**	-0.555**	-0.670**	-0.153
NO ₂ ⁻	-0.198	-0.118	-0.045	-0.078	-0.318	0.336	-0.105	-0.134	-0.211	-0.104
NH ₄ ⁺	0.103	0.265	-0.055	-0.022	0.016	-0.198	-0.029	0.196	0.496**	-0.042
F ⁻	0.057	0.119	-0.195	-0.084	-0.242	-0.600**	-0.298	0.420*	0.655**	0.003

1) **表示置信度(双测)0.01时,相关性是显著的;*表示置信度(双测)0.05时,相关性是显著的;n=27

2.3.2 采样点聚类分析

不同时期采样点聚类结果见图 4.由末端分支外节点可知,FH2、FH9、PH2、PH3、PH7、PH4 和 PH8 聚在一起,表现为平水期地表水化学组分特征;KH5、KH6、KH1、KH2、KH7、KH4、KH9 和 KH3 聚在一起,表现为枯水期地表水化学特征;FH4、FH6 和 FH5 聚在一起,表现为丰水期水化学特征.

由此总体可知,较多的采样点以相同时期聚类在一起,而同一采样点在不同时期聚类较少,会仙岩溶湿地地表水化学特征表现出的时间尺度分布特征较空间尺度更为明显.地表水化学分布特征在不同时期表现出的时期规律具有一定差异,其中枯水期 8 个采样点聚在一起,说明枯水期地表水化学组分最为稳定,该时段会仙岩溶湿地农业耕作、渔业养殖、旅

表 7 地表水中金属元素间相关性¹⁾

Table 7 Pearson correlation matrix of metals in surface water

	Al	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni	Mn	As	Hg
Al	1.000	0.478 *	0.236	0.108	0.037	-0.066	0.017	0.137	0.320	0.002
Cu		1.000	0.726 **	0.802 **	0.189	-0.013	0.382 *	0.003	0.290	0.574 **
Pb			1.000	0.927 **	0.233	0.381 *	0.466 *	-0.132	-0.081	0.773 **
Zn				1.000	0.275	0.157	0.440 *	-0.013	0.068	0.837 **
Cr					1.000	0.180	0.626 **	-0.104	-0.116	0.194
Cd						1.000	0.359	-0.581 **	-0.713 **	0.012
Ni							1.000	-0.242	-0.331	0.408 *
Mn								1.000	0.704 **	0.063
As									1.000	0.050
Hg										1.000

1) **表示置信度(双测)0.01时,相关性是显著的; *表示置信度(双测)0.05时,相关性是显著的; n = 27

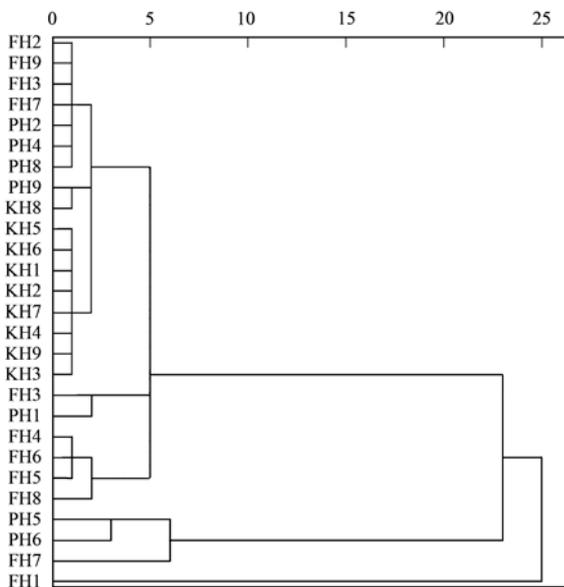


图 4 采样点聚类

Fig. 4 Clustering result of the sampling points

游和居民活动相对其它时期弱^[17],地表河流受外界环境影响最小.平水期 5 个采样点与 2 个丰水期采样点聚在一起,说明此时期地下水受一定程度外界影响,部分地表水特征与丰水期表现相似.丰水期地表水化学特征最不明显,仅 3 个样点聚类在一起,同时丰水期是农业耕作、渔业养殖、旅游和居民活动最强时期,同时也是降水最多的时期,该时期地表水受人类活动和天然降雨影响较大,地表水水化学组分分布特征相对复杂.

2.4 灌溉适用性分析

依据我国农田灌溉水质标准(GB 5084-2005)^[33],农田灌溉水质划分为I类(水作)、II类(旱作)和III类(蔬菜).丰平枯水期会仙岩溶湿地地表水灌溉适用性分布情况见表 8,本次检测的部分指标中,仅 Hg 浓度(PH1)在平水期出现不适合灌溉样点,PH1 点 Hg 浓度为 1.91 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,是我国农田灌溉水质标准I类、II类和III类限值的1.91倍,已不

表 8 丰平枯水期地表水农田灌溉适用性分布¹⁾

Table 8 Distribution of the irrigation applicability of surface water the during wet, normal, and dry periods

时期	统计量	常规指标/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			金属元素/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$						
		pH	Cl^-	F^-	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg
丰水期	最大值	7.57	10.16	0.28	0.83	1.31	4.10	3.07	0.10	5.64	0.23
	最小值	7.15	2.96	0.08	nd	nd	nd	1.88	nd	2.56	nd
	平均值	7.39	5.98	0.13	0.59	0.87	2.28	2.48	0.07	4.02	0.12
平水期	最大值	7.38	9.19	0.18	1.38	8.04	47.30	3.71	0.37	4.59	1.91
	最小值	7.14	3.91	0.06	nd	nd	nd	2.26	nd	1.54	nd
	平均值	7.27	5.83	0.09	0.78	1.63	14.29	2.96	0.18	2.38	0.62
枯水期	最大值	7.60	10.18	0.06	0.19	1.29	nd	3.49	0.48	1.16	nd
	最小值	7.28	4.47	nd	nd	0.49	nd	2.06	0.36	0.74	nd
	平均值	7.45	6.67	0.05	0.19	0.73	nd	2.89	0.38	0.90	nd
三期综合	最大值	7.60	10.18	0.28	1.38	8.04	47.30	3.71	0.48	5.64	1.91
	最小值	7.14	2.96	nd	nd	nd	nd	1.88	nd	0.74	nd
	平均值	7.37	6.16	0.09	0.61	1.06	8.29	2.78	0.30	2.43	0.43
农田灌溉水质标准	I	5.5~8.5	250	3.0	1000	100	2000	100	5	50	1
	II	5.5~8.5	250	3.0	1000	100	2000	100	5	100	1
	III	5.5~8.5	250	3.0	1000	100	2000	100	5	50	1

1)nd 表示未检测出;黑体字表示此浓度不适合灌溉;pH 无量纲

适合水作、旱作和蔬菜灌溉; PH3 点 Hg 浓度为 $0.94 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 接近我国农田灌溉水质标准Ⅲ类标准限值, 应引起重视. 其它指标均未出现不适合灌溉样点.

基于 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的 SAR、SC、PI 和 RSC 的 4 种灌溉适用性评价体系对会仙岩溶湿地地表水进行评价, 结果见表 9. SAR、SC、PI 和 RSC 的灌溉适用性评价结果整体较好, 其中 SAR、SC 和 RSC 在丰水期、平水期和枯水期地表水灌溉适用性评价结果均为非常合适, 仅 PI 的评价结果为Ⅱ类(适合), 就 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 离子浓度表明, 会仙岩溶湿地地表水适合当地农作物灌溉用水.

表 9 地表水灌溉适用性评价结果

Table 9 Assessment results of the irrigation applicability of surface water

指标		SAR	SC	PI	RCS	综合
丰水期	平均级别	非常适用	非常适用	Ⅱ类(适合)	非常适用	适合灌溉
	最大级别	非常适用	非常适用	Ⅱ类(适合)	非常适用	适合灌溉
平水期	平均级别	非常适用	非常适用	Ⅱ类(适合)	非常适用	适合灌溉
	最大级别	非常适用	非常适用	Ⅱ类(适合)	非常适用	适合灌溉
枯水期	平均级别	非常适用	非常适用	Ⅱ类(适合)	非常适用	适合灌溉
	最大级别	非常适用	非常适用	Ⅱ类(适合)	非常适用	适合灌溉

3 结论

(1) 会仙岩溶湿地地表水属弱碱性水, 阳离子平均浓度顺序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+$, 阴离子平均浓度顺序为: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_2^- > \text{F}^-$, 常规指标中仅 NH_4^+ 出现超标, 超标率为 25.93%. 10 种金属元素平均浓度顺序为: $\text{Mn} > \text{Al} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Cd}$, 超标组分为 Al(11.11%)、Mn(44.44%) 和 Hg(37.04%). 常规指标浓度受时空尺度影响程度整体低于金属元素, 各水化学组分浓度具有明显的时期分布特征, NH_4^+ 浓度表现为丰水期 $>$ 平水期 $>$ 枯水期, NO_2^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 总体时期规律与 NH_4^+ 相反, Cl^- 的时期变化规律不明显, 多数金属离子表现出丰水期 $>$ 平水期 $>$ 枯水期的时期变化特征.

(2) 区内地表水水质常规指标单项污染指数表现为: $\text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{F}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, 仅 NH_4^+ 在丰水期出现一处污染, 相应污染指数为 5.33; 金属元素单项污染指数顺序为: $\text{Mn} > \text{Al} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu}$, Mn、Al 和 Hg 在丰水期和平水期出现多处污染样点, 其余金属元素未见污染. 地表水丰平枯水期内梅罗综合污染指数均值为 0.75、最大值为 2.69, 表明会仙湿地地表水总体水质较好, 但部分样点存在季节性污染, 污染级别为轻

综合我国地表水环境质量 V 类水标准限值、农田灌溉水质标准限值和 SAR、SC、PI 和 RSC 的 4 种灌溉适用性评价体系结果, NH_4^+ 最大浓度为 $13.70 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在丰水期(FH8), 是地表水环境质量标准 V 类水限值的 5.33 倍(表 3), 已不适合灌溉; Hg 最大浓度为 $1.91 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在平水期(PH1), 是我国农田灌溉水质标准Ⅲ类限值的 1.91 倍, 不可用于水作、旱作和蔬菜的灌溉用水. 同时 PH3 点地表水用于灌溉时应对 Hg 提高警惕. 综上可知, 会仙岩溶湿地地表水灌溉适用性总体表现为枯水期优于丰水期和平水期, 而丰水期和枯水期恰为当地居民灌溉用水的高峰期, 应尽量避免使用 PH1、PH3 和 FH8 点附近地表水灌溉.

度~中度, 其中丰水期地表水污染程度最高.

(3) 会仙岩溶湿地地表水灌溉适用性总体较好, 且枯水期地表水灌溉适用性总体优于丰水期和平水期. 丰水期仅 NH_4^+ (FH8) 出现超过我国地表水质量标准 V 类水限值而不适用于农灌, 平水期仅 Hg (PH1) 出现超过农田灌溉水质标准限值而不适用于农灌.

致谢: 中国地质科学院岩溶地质研究所李强研究员在论文修改过程中提供帮助, 林永生、周长松和卢海平等在野外调查和样品采集过程中提供帮助, 在此一并感谢.

参考文献:

- [1] 蔡德所, 马祖陆. 会仙岩溶湿地生态系统研究[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
Cai D S, Ma Z L. Study on karst wetland ecosystem in Huixian [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [2] 张军以, 王腊春, 苏维词, 等. 岩溶地区人类活动的水文效应研究现状及展望[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1125-1135.
Zhang J Y, Wang L C, Su W C, et al. Status and prospect of the hydrological effects of human activities in the Karst area [J]. Progress in Geography, 2014, 33(8): 1125-1135.
- [3] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 等. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1491-1503.
Xu G P, Li Y Q, Shen Y Y, et al. Soil organic carbon distribution and components in different plant communities along a water table gradient in the Huixian karst wetland in Guilin [J].

- Environmental Science, 2019, **40**(3): 1491-1503.
- [4] 符鑫, 梁延鹏, 覃礼堂, 等. 桂林会仙岩溶湿地水体中有机关氯农药分布特征及混合物环境风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(5): 974-983.
Fu X, Liang Y P, Qin L T, *et al.* Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in the water body of Huixian karst wetland of Guilin and environmental risk assessment of OCP mixtures[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(5): 974-983.
- [5] 李军, 赵一, 邹胜章, 等. 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[J]. 环境科学, 2020, doi: 10.13227/j. hjkx. 202005338.
Li J, Zhao Y, Zou S Z, *et al.* Metal pollutions and human health risks on groundwater from wet, normal, and dry periods in Huixian karst wetland, China [J]. Environmental Science, 2020, doi: 10.13227/j. hjkx. 202005338.
- [6] 谢晓君, 王方园, 王光军, 等. 中国地表水重金属污染的进展研究[J]. 环境科学与管理, 2017, **42**(2): 31-34.
Xie X J, Wang F Y, Wang G J, *et al.* Study on heavy metal pollution in surface water in China [J]. Environmental Science and Management, 2017, **42**(2): 31-34.
- [7] 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 等. 贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3798-3805.
He X L, Wu Y H, Zhou J, *et al.* Hydro-chemical characteristics and quality assessment of surface water in Gongga Mountain Region [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3798-3805.
- [8] He X D, Li P Y. Surface water pollution in the Middle Chinese Loess Plateau with special focus on hexavalent chromium (Cr^{6+}): occurrence, sources and health risks [J]. Exposure and Health, 2020, **12**(3): 385-401.
- [9] Sullivan P L, Price R M, Schedlbauer J L, *et al.* The influence of hydrologic restoration on groundwater-surface water Interactions in a karst wetland, the everglades (FL, USA) [J]. Wetlands, 2014, **34**(S1): 23-35.
- [10] Qin L T, Pang X R, Zeng H H, *et al.* Ecological and human health risk of sulfonamides in surface water and groundwater of Huixian karst wetland in Guilin, China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **708**, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2019.134552.
- [11] 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 等. 多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5410-5417.
Peng C, Pan X D, Jiao Y J, *et al.* Identification of nitrate pollution sources through various isotopic methods: a case study of the Huixian wetland [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5410-5417.
- [12] Xiao H, Shahab A, Li J Y, *et al.* Distribution, ecological risk assessment and source identification of heavy metals in surface sediments of Huixian karst wetland, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **185**, doi: 10.1016/j. ecoenv. 2019.109700.
- [13] Huang L L, Rad S, Xu L, *et al.* Heavy metals distribution, sources, and ecological risk assessment in Huixian wetland, South China [J]. Water, 2020, **12**(2), doi: 10.3390/w12020431.
- [14] 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 等. 桂林会仙岩溶湿地水位动态特征及水文生态效应[J/OL]. 中国岩溶, 2020, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20200908.1031.002.html>, 2020-09-09.
Zhu D N, Zou S Z, Zhou C S, *et al.* Dynamic characteristics of water level and hydro-ecological effects in Huixian karst wetland in Guilin [J/OL]. Carsologica Sinica, 2020, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20200908.1031.002.html>, 2020-09-09.
- [15] 文云峰. 会仙岩溶湿地水体富营养化现状及对策研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
Wen Y F. Rairy karst wetland eutrophication situation and countermeasure research [D]. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [16] Liang S C, Lan Y H, Jiang S F, *et al.* The activities of microbial communities in Huixian Wetland sediments under the interactive toxicity of Cu (II) and pentachloronitrobenzene [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(6): 379-391.
- [17] 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.
Li J, Zou S Z, Liang Y P, *et al.* Metal distributions and human health risk assessments on waters in the Huixian karst wetland, China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4948-4957.
- [18] 邓艳, 蒋忠诚, 徐焯, 等. 典型表层岩溶泉域植被对降雨的再分配研究[J]. 中国岩溶, 2018, **37**(5): 714-721.
Deng Y, Jiang Z C, Xu Y, *et al.* Redistribution of precipitation by vegetation and its ecohydrological effects in a typical epikarst spring catchment [J]. Carsologica Sinica, 2018, **37**(5): 714-721.
- [19] 伍鹏, 舒倩, 罗小芳, 等. 湘西古丈烂泥田锰矿区地表水污染特征及风险评价[J]. 水土保持通报, 2019, **39**(3): 70-74, 79.
Wu P, Shu Q, Luo X F, *et al.* Surface water pollution and risk assessment at a manganese mining area located in mud field in Guzhang county of western Hunan province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, **39**(3): 70-74, 79.
- [20] 陈尚洪, 张晴雯, 陈红琳, 等. 四川丘陵农区地表水水质时空变化与污染现状评价[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(S2): 52-59.
Chen S H, Zhang Q W, Chen H L, *et al.* Variation of surface water quality based on crop-livestock structure change and its pollution assessment in Sichuan Hilly Area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(S2): 52-59.
- [21] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [22] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [23] 毛萌, 朱雪芹. 宣化盆地地下水化学特性及灌溉适用性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(7): 142-149.
Mao M, Zhu X Q. Chemical characteristics of groundwater in Xuanhua basin and assessment of irrigation applicability [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, **34**(7): 142-149.
- [24] Şen Z. Practical and applied hydrogeology [M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [25] 张恒星, 张翼龙, 李政红, 等. 基于主导离子分类的呼和浩特盆地浅层地下水化学特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, **33**(4): 189-195.
Zhang H X, Zhang Y L, Li Z H, *et al.* Chemical characteristics of shallow groundwater in Hohhot basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, **33**(4): 189-195.
- [26] 张晟, 郑坚, 刘婷婷, 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 58-63.
Zhang S, Zheng J, Liu T T, *et al.* Seasonal variation and output of nutrient in tributaries of three gorges reservoir [J]. Environmental Science, 2009, **30**(1): 58-63.

- [27] 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.
- [28] Li J, Miao X Y, Hao Y P, *et al.* Health risk assessment of metals (Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, As, Hg, Se) in angling fish with different lengths collected from Liuzhou, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(7), doi: 10.3390/ijerph17072192.
- [29] 倪善芹, 琚宜文, 侯泉林, 等. 铁氧化物在重金属元素迁移风化过程中的作用对比及碳酸盐岩中重金属元素的富集[J]. 自然科学进展, 2009, **19**(1): 61-68.
- [30] 郎赞超, 刘丛强, Satake H, 等. 贵阳地表水—地下水的硫和氯同位素组成特征及其污染物示踪意义[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(2): 151-159.
Lang Y C, Liu C Q, Satake H, *et al.* $\delta^{37}\text{Cl}$ and $\delta^{34}\text{S}$ Variations of Cl^- and SO_4^{2-} in groundwater and surface water of Guiyang area, China[J]. Advances in Earth Science, 2008, **23**(2): 151-159.
- [31] 张清华, 黎永珊, 于爽, 等. 桂林市大气降水的化学组成特征及来源分析[J]. 环境化学, 2020, **39**(1): 229-239.
Zhang Q H, Li Y S, Yu S, *et al.* Characteristics and source analysis of chemical composition of atmospheric precipitation in Guilin City, Southwest China [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(1): 229-239.
- [32] 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 铁矿周边地下水金属元素分布及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 1934-1944.
Zhou J M, Jiang Z C, Xu G L, *et al.* Distribution and health risk assessment of metals in groundwater around iron mine[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 1934-1944.
- [33] GB 5084-2005, 农田灌溉水质标准[S].



CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PNEG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)