

湘江流域岳麓山周边地区地表水体 水化学特征及灌溉适宜性

钟桥¹, 肖雄¹, 张赐成¹, 章新平¹, 李嘉洁¹, 王迪宙¹, 于正良², 刘娜³

(1.湖南师范大学地理科学学院, 湖南长沙410081; 2.中国科学院
青藏高原研究所, 北京100101; 3.衡阳师范学院地理与旅游学院, 湖南衡阳421002)

摘要: [目的] 对湘江流域岳麓山地区地表水体进行水化学特征分析及灌溉适宜性评价, 为该地区的生态环境保护及水资源综合管理的科学决策提供理论支持。[方法] 以岳麓山周边地区为研究区, 从2020年12月至2021年11月采集降水、山涧溪水和湘江河水水样, 利用Piper图、Gibbs图、端元图等方法, 分析各水体水化学特征以及影响因素。[结果] 降水主要阴阳离子为 Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} 和 NO_3^- , 无明显水化学类型; 山涧溪水主要阴阳离子为 Ca^{2+} 和 NO_3^- , 主要水化学类型为Cl-Ca·Mg型和Cl-Ca型; 湘江河水主要阴阳离子为 Ca^{2+} 和 HCO_3^- , 主要水化学类型为 HCO_3^- -Ca型。山涧溪水主要受大气降水输入和碳酸盐岩风化控制; 湘江河水受碳酸盐岩风化作用影响较大。[结论] Na^+ 离子含量, SAR和RSC指标以及其绘制USSL图和Wilcox图分析结果较好, 山涧溪水和湘江河水适合用于灌, 不易引起盐害或碱害。

关键词: 岳麓山周边地区; 湘江河水; 降水; 山涧溪水; 水化学特征; 水质评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0128-09

中图分类号: P641.3

文献参数: 钟桥, 肖雄, 张赐成, 等. 湘江流域岳麓山周边地区地表水体水化学特征及灌溉适宜性[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 128-136. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230508.008; Zhong Qiao, Xiao Xiong, Zhang Cicheng, et al. Water chemical characteristics and irrigation suitability of surface water in areas around Yuelu Mountain in Xiangjiang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 128-136.

Water Chemical Characteristics and Irrigation Suitability of Surface Water in Areas Around Yuelu Mountain in Xiangjiang River Basin

Zhong Qiao¹, Xiao Xiong¹, Zhang Cicheng¹,

Zhang Xinping¹, Li Jiajie¹, Wang Dizhou¹, Yu Zhengliang², Liu Na³

(1.College of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China; 2.Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3.College of Geography and Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang, Hunan 421002, China)

Abstract: [Objective] The water chemical characteristics and irrigation suitability evaluation of surface water body in areas around Yuelu Mountain in Xiangjiang River basin were analyzed in order to provide theoretical support for ecological environment protection and scientific decision-making of integrated water resources management in this area. [Methods] The study was conducted in the area around Yuelu Mountain. Water samples of precipitation, mountainous creek water, and Xiangjiang River water were collected from December 2020 to November 2021. The water chemical characteristics and factors influencing each water body were analyzed by using Piper diagram, Gibbs diagram, end-member diagram, etc. [Results] The main anions and cations of precipitation were Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , and NO_3^- , with no obvious water chemical type. The main anions and cations of mountainous creek water were Ca^{2+} and NO_3^- , and the water chemical types were Cl-Ca

收稿日期: 2022-10-14

修回日期: 2023-01-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于多元示踪技术的祁连山典型多年冻土流域河水水源解析研究”(42101130); 国家自然科学基金项目“基于热指数多时空尺度的蒸散发模型构建及其应用研究”(42101053)

第一作者: 钟桥(1998—), 女(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为流域水资源与水环境研究。Email: zhongqiaoya@163.com。

通讯作者: 肖雄(1990—), 男(汉族), 湖南省益阳市人, 讲师, 博士, 主要从事水文与水环境方面研究。Email: xiaoxiong@hunnu.edu.cn。

• Mg and Cl-Ca. The main anions and cations of Xiangjiang River water were Ca^{2+} and HCO_3^- , and the water chemical type was $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Mountainous creek water was primarily influenced by atmospheric precipitation and carbonate rock weathering, whereas Xiangjiang River water was more influenced by carbonate rock weathering. [Conclusion] Na^+ %, SAR, and RSC indexes, and the USSL diagram and Wilcox diagram results were good. The mountainous creek water and Xiangjiang River water in the areas around Yuelu Mountain are suitable for irrigation and are not prone to salt or alkali damage.

Keywords: the area around Yuelu Mountain; Xiangjiang River water; precipitation; mountainous creek water; water chemistry characteristics; water quality evaluation

地表水是水循环的重要组成部分,其水化学受到各种自然和人为因素的影响,包括地质、植被覆盖、岩石风化、大气输入、生活和工农业废水等人为干扰^[1]。地表水质量在维持生活生产和维护生态平衡方面发挥着重要作用,水体中的水化学组分不仅可能导致严重的环境问题如富营养化,还可能威胁当地居民的日常生活,不适当的高盐度、高碱度的水用于灌溉会破坏土壤团聚体结构,从而降低粮食产量^[2]。因此,全面了解地表水的水化学特征和影响因素有助于揭示水体来源和其可利用情况。近年来,学者们在世界各地广泛开展了水化学研究。如长江^[3]、雅鲁藏布江^[4]、黄河^[5]、印度河^[6]和湄公河^[7]等。这些研究展现了主要河流的水化学特征,结果表明蒸发结晶、岩石风化和人类活动在决定水化学方面发挥了关键作用。然而这些研究主要聚焦在大型区域单一水体水化学,对于局地区域多种水体水化学的研究仍然缺乏。

湘江作为长江的主要支流之一,其所处流域是湖南省的人口最密集、城镇化水平最高、社会经济最繁荣、农业分布最广泛的区域,也是提供当地居民饮用、灌溉、工业、娱乐等活动用水的重要水源区^[8]。因此,流域内地表水体水质的水环境安全和水生态的可持续性,直接影响到居民生活用水、农业灌溉水的安全以及社会经济的发展。岳麓山周边地区作为湘江流域内重要的水源区,湘江河水和山涧溪水是当地居民的两大重要水源。目前集中于湘江流域的研究,结果表明湘江主要离子主要受碳酸盐岩风化作用控制^[9],并一定程度上受到了人为干扰^[10],但对其局地区域岳麓山周边地区地表水体的水化学特征和影响因素尚需深入研究,用于灌溉的适宜性不清楚。

本文选取湘江流域内岳麓山周边地区为研究区,以大气降水作为流域输入来源,对该研究区内山涧溪水和湘江河水进行样品采集和主要阴阳离子(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 和 HCO_3^-)含量测定。本研究旨在:①分析研究区内大气降水、山涧溪水和湘江河水水化学特征,揭示山涧溪水和湘江河水溶质的主要来源和控制因素;②评估山涧溪水和湘江河水用于灌溉的适宜性。本文探讨了山涧溪水和

湘江河水的水化学特征以及影响因素,以期对岳麓山周边地区的生态环境保护及水资源综合管理的科学决策提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

湘江流域(110°30'—114°01'E, 24°31'—29°01'N)属于长江流域洞庭湖水系,流域面积为 $9.46 \times 10^4 \text{ km}^2$,干流长 948 km^[11]。气候上属于亚热带季风气候区,夏季炎热潮湿,冬季寒冷湿润,年平均气温 17~18 °C,年平均降水量 1 000~1 700 mm,降雨主要集中在 4—9 月^[12]。流域内地质情况复杂,多时期岩层出露^[13],其地层岩性特征主要以“碎屑沉积岩—碳酸盐岩—硅酸盐岩”岩石组合为主,岩石矿物主要以白云石、方解石、钠长石、钾长石和石膏等为主,其中碳酸盐岩出露面积约占 60%^[14]。本研究地表水体的监测样点位于湘江流域岳麓山周边地区,各样点的详细信息如下:湘江河水的采样点(S_3)位于橘子洲中段,其中上游为以采矿业为主的工业集中区,下游分布有湖南省重点城市群,沿岸农业以湘江河水用于灌溉,工业废水、生活污水和农业用水的排给使得湘江河水面面临着较大的水生态环境压力和可持续性威胁^[15]。山涧溪水的采样点(S_2)位于岳麓山山坡上断裂构造处,主要以土壤水和岩石裂隙水补给为主^[16],远离人类活动区域。降水的采样点(S_1)设置在岳麓山下,即湖南师范大学气象园内。采样点位置如图 1 所示。

1.2 样品采集与分析

在 2020 年 12 月至 2021 年 11 月期间进行降水、山涧溪水和湘江河水的采集工作,其中湘江河水和山涧溪水采样时间在每月 1, 6, 11, 16, 21, 26 日,所有水样均密封保存在 30 ml 的塑料瓶中,并于采样后 2 h 内 0 °C 冷藏运至实验室待测,总共采集水样 303 个。具体的采样工作如下:①大气降水(170 个)的取样按照气象观测规范的要求,在降水日 08:00 和 20:00 对降水量 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 的降水使用虹吸式雨量计改造的集雨器进行采集,液体降水样品采集后直接注入塑料

瓶,随即密封^[17]。对于降雪样品,装入水样袋并静置于室内待其融化,再将融化后水样注入塑料瓶中密封。②湘江河水(64个,其中8个水样缺失)的采样工作在橘子洲中段展开,采集位置在水面以下10cm处,以避免河水受到人类活动影响。采集时首先用待采水体将聚乙烯瓶进行润洗,然后用0.45 μm的滤膜进行过滤后分装两瓶^[18],一瓶直接密封,用于测试阴离子(NO_3^- , SO_4^{2-} 和 Cl^-),另一瓶滴入浓硝酸酸化至 $\text{pH} < 2$,用于测试阳离子(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 和 Na^+)。山涧溪水(69个,其中3个水样缺失)的采样工作主要在岳麓山山坡上进行(图1, S_2),采集方法与湘江河水保持一致。③因降水、山涧溪水和湘江河水样品中总溶解固体(TDS)浓度不高,全部水样均直接测定而未稀释。主要阳离子(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 和 Na^+)和 Si 送往南京湖泊研究所,采用电感耦合原子发射光谱仪(ICP-OES)测定^[19],检出限为0.001 mg/L;主要阴离子(NO_3^- , SO_4^{2-} 和 Cl^-)在湖南师范大学气象园用离子色谱仪(ICS1100)测定,检出限为0.01 mg/L。 HCO_3^- 通过阴阳离子的电荷平衡计算浓度^[20]。TDS为主要阳离子和阴离子的浓度之和($\text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Si} + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$)^[21]。电导率(EC)使用意大利哈纳水质参数测定仪笔进行现场测定,测试精度为0.01 μS/cm。



注: S_1 , S_2 , S_3 分别表示大气降水、山涧溪水和湘江河水的采样点。

图1 研究区不同地表水体采样点的位置

Fig.1 Location of different water sampling sites

1.3 研究方法

1.3.1 水化学影响因素分析 采用三角图(Piper图)、Gibbs图和端元图来阐明岳麓山周边地区地表水体水化学特征和控制因素,并运用OriginPro2020绘图。采用相关分析图来判断山涧溪水和湘江河水中离子主要来源^[22],并通过R语言进行数据分析和

可视化。采用MapGIS 10.2和CoreIDRAW X7绘制采样点分布图。

1.3.2 灌溉水适宜性评价 灌溉用水的适宜性取决于溶解盐的种类和浓度,而 Na^+ 在这一过程中起关键作用^[23]。若在农业上使用高 Na^+ 的水,黏土颗粒对高饱和度水中的 Na^+ 有吸附作用,并替代 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等物质,使 Na^+ 趋于饱和,盐度升高,最终降低植物的渗透活性,干扰其水分和养分的吸收。此外, Na^+ 与 CO_3^{2-} 或 HCO_3^- 组合通常会形成较多碳酸盐岩以及盐渍化土壤,而不适用于农田。因此,可通过估算钠离子含量(%),钠吸附比(SAR)和残余碳酸钠(RSC)等水质指数对水体灌溉适宜性进行评估,计算方法为^[24]:

$$\text{Na}^+ \text{ 离子含量} = \frac{[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)] \times 100}{1} \quad (1)$$

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

$$\text{RSC} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \quad (3)$$

式中:浓度单位为 meq/L。

根据 Na^+ 离子含量值,灌溉水可分为5类(优: < 20 ,好: $20 \sim 40$,允许: $40 \sim 60$,可疑: $60 \sim 80$ 和不适宜: > 80)。根据 SAR 值,将灌溉水分为4组(低: < 10 ,中等: $10 \sim 18$,高: $18 \sim 26$ 和极高: > 26)。当 Na^+ %和 SAR 越大,说明土壤渗透性越差,植物根系吸水越困难,最终不利于植物生长^[25]。根据 RSC 值,将灌溉水分为3组(非常适合灌溉: < 1.25 ;基本适合灌溉: $1.25 \sim 2.5$ 和不适合灌溉: > 2.5)。当 RSC 越大可能会引起碱害,反之,RSC 值越小,没有多余的碳酸盐与 Na^+ 发生反应,不会加剧碱害^[26]。以水质指数法为基础,依据美国农业部 USSL 图和 Wilcox 图绘制灌溉水分类图,并进一步对水体应用于灌溉的可行性进行评价^[27]。USSL 图将灌溉水体共分为16类,首先依据水体电导率(EC)分成4大类: C_1 (低盐渍化: $< 250 \mu\text{S}/\text{cm}$), C_2 (中等盐渍化: $250 \sim 750 \mu\text{S}/\text{cm}$), C_3 (高盐渍化: $750 \sim 2250 \mu\text{S}/\text{cm}$), C_4 (很高盐渍化: $> 2250 \mu\text{S}/\text{cm}$);然后根据钠(碱)对水体危害程度的不同,依据 SAR 将水体分为4大类: S_1 (低程度碱害: < 10), S_2 (中程度碱害: $10 \sim 18$), S_3 (高程度碱害: $18 \sim 26$), S_4 (很高程度碱害: > 26)。Wilcox 图对 Na^+ 离子含量和 EC 进行表征,共划分出5个判定区间,即:水质优秀区、水质良好区、允许怀疑区、怀疑保留区、不可用区。

2 结果与讨论

2.1 降水、山涧溪水和湘江河水的水化学特征

2.1.1 降水、山涧溪水和湘江河水的主要离子分析 降水、山涧溪水及湘江河水中离子组成如表1所

示。就 TDS 而言,山涧溪水 TDS 变化范围为 8.2~56.9 mg/L,均值为 28.2 mg/L,其含量略高于降水,远低于河水。湘江河水 TDS 变化范围为 53.1~181.6 mg/L,均值为 130.2 mg/L,其含量高于赣江^[28]、雅鲁藏布江上游^[29],低于汉江^[30]、长江干流^[31]、黄河干流^[32]。就变异系数而言,河水和山涧溪水变异系数值低于 100%,而降水变异系数值除了 Si 外其他离子超过 100%,说明降水含量差异大,可能与降水来源并非单一有关^[33]。降水中阳离子含量均值顺序为:Ca²⁺>K⁺>Na⁺>Mg²⁺,其中阳离子以 Ca²⁺ 和 K⁺ 为主,占阳离子总量 83%。阴离子含量均值顺序为:SO₄²⁻>NO₃⁻>HCO₃⁻>Cl⁻,以 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 为主,占阴离子总量 78%。

山涧溪水中阳离子含量均值顺序为:Ca²⁺>Mg²⁺>Na⁺>K⁺,以 Ca²⁺ 为主,约占阳离子总量的 62%;阴离子均值顺序为:NO₃⁻>SO₄²⁻>HCO₃⁻>Cl⁻,NO₃⁻ 占主导地位,约占阴离子总量 51%。山涧

溪水总体离子组成与降水非常相似,降水中 K⁺ 略高于山涧溪水,其他离子表现为山涧溪水略高于降水。其中,阴离子以 NO₃⁻ 为主是受到混合型酸性降水的影响,此外,山涧溪水滞留时间长,与土壤氮等物质发生相互作用时间相应增加,使得水中 NO₃⁻ 浓度增加^[34]。

湘江河水阳离子均值顺序为:Ca²⁺>Na⁺>Mg²⁺>K⁺,其中,Ca²⁺ 单独占总阳离子浓度的 57%,Ca²⁺ 和 Na⁺ 共占 81%,Mg²⁺ 和 K⁺ 分别占 11%和 8%;阴离子均值顺序为:HCO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>NO₃⁻,河水中主要阴离子为 HCO₃⁻,占总阴离子浓度的 65%,其次为 SO₄²⁻,Cl⁻ 和 NO₃⁻,各占 16%,10%和 8%。河水优势离子为 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻,这体现碳酸盐岩风化作用占主导。湘江河水溶解硅平均浓度为 2.81 mg/L,小于全球平均浓度 7.63 mg/L^[35],说明流域内硅酸盐岩的风化程度不高,这些发现与其他地区的河流如汉江^[30]类似。结果表明,与碳酸盐岩风化相比,该地区硅酸盐岩风化较不明显。

表 1 岳麓山周边地区降水、山涧溪水和湘江河水的水化学组成

Table 1 Hydrochemical composition of precipitation, mountainous creek water and Xiangjiang River water in areas Yuelu Mountain

项目	水化学组成/(mg·L ⁻¹)										
	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Si	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
降水	平均值	17.6	2.3	0.2	1.7	0.6	0.4	0.7	4.6	5.4	2.1
	最小值	1.7	0.3	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.8	0.0
	最大值	103.6	16.0	1.8	20.5	4.5	2.9	7.8	44.2	48.7	26.2
山涧溪水	平均值	28.2	4.0	1.1	0.5	0.8	2.6	1.2	11.2	8.1	2.2
	最小值	8.2	1.5	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3	1.0	1.6	0.0
	最大值	56.9	10.2	1.9	3.2	1.7	4.0	1.9	26.5	21.5	8.5
湘江河水	平均值	130.2	23.3	3.1	2.2	5.7	2.8	6.6	5.9	16.2	67.2
	最小值	53.1	11.7	0.7	0.4	0.9	0.4	0.9	0.7	5.7	27.6
	最大值	181.6	34.1	5.0	3.9	10.3	3.9	14.1	11.0	28.2	99.0
赣江	平均值	71.4	13.8	2.3	3.1	9.4	—	11.0	—	11.1	40.7
雅鲁藏布江上游	平均值	116.4	22.9	4.8	1.2	18.5	—	4.0	0.1	22.6	84.7
汉江	平均值	227.0	41.4	7.3	1.7	4.3	5.1	4.5	6.2	23.0	123.0
长江	平均值	206.9	42.9	10.4	3.2	20.9	—	19.6	8.0	38.4	72.2
黄河	平均值	486.0	44.9	22.4	3.5	60.0	8.4	46.9	7.4	83.2	200.1

2.1.2 降水、山涧溪水和湘江河水的水化学类型 三角图(Piper 图)可通过离子相对含量来了解天然水体的主要离子组成和水化学类型^[36]。本文将降水、山涧溪水和湘江河水主要阳离子和阴离子毫克当量百分比绘制 Piper 图,以此对各水体的水化学特征进一步分析(图 2)。降水中阳离子在三角图中多位于 Ca²⁺ 端和 Na⁺+K⁺ 端,阴离子位于 HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 端,降水水化学类型无明显类型,各区域都有分布,表明

降水主离子受到复杂的相互作用,使得离子组成波动较大。山涧溪水阳离子在三角图中接近 Ca²⁺ 端,阴离子多位于 SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 端,山涧溪水水化学类型主要为 Cl-Ca·Mg 型(23.2%)和 Cl-Ca 型(68.1%)。在菱形图和阴离子三角图中溪水样品与降水重合度高,在阳离子三角图中山涧溪水位于河水上方,说明山涧溪水受到大气降水和含钙镁矿物共同影响。湘江河水阳离子在三角图中靠近 Ca²⁺ 端,Ca²⁺ 含量>

50%，占据阳离子优势地位；阴离子接近 HCO_3^- 端，远离 Cl^- 和 SO_4^{2-} 端，阴离子以 HCO_3^- 为主。湘江河

水水化学类型主要为 HCO_3^- -Ca 型(98.4%)，表明碳酸盐岩的风化对河水溶质影响较大。

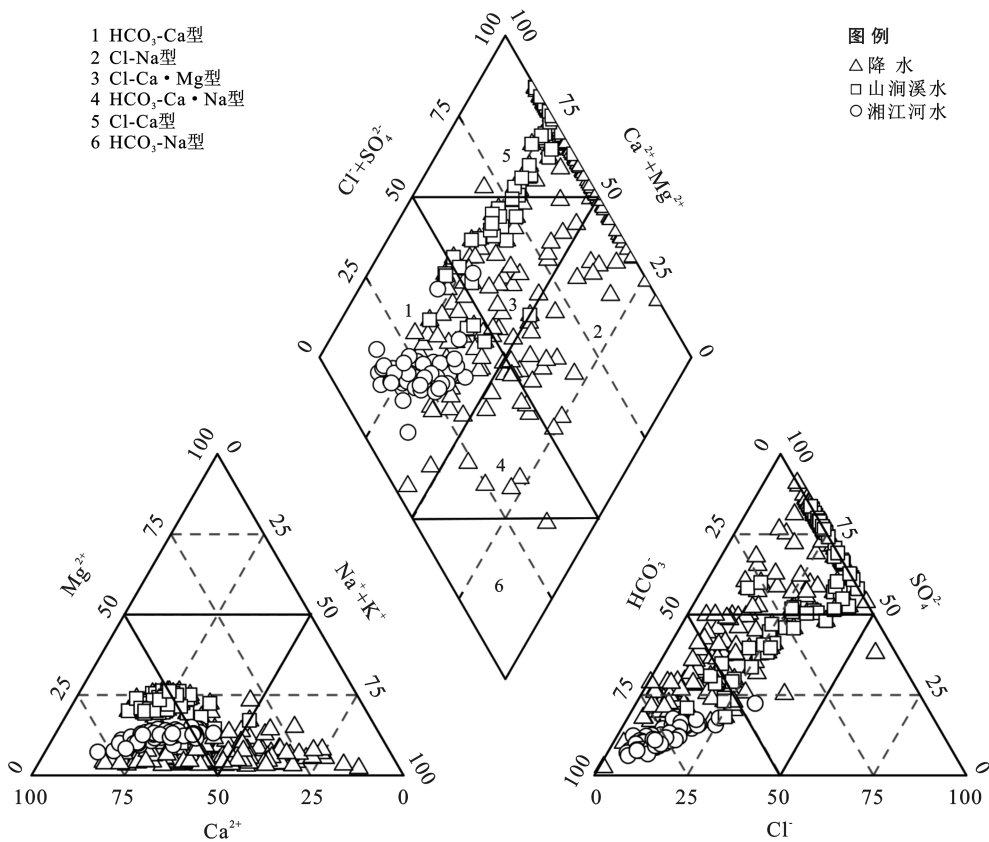


图 2 岳麓山周边地区降水、山涧溪水和湘江河水的 Piper 图

Fig.2 Piper diagram of precipitation, mountainous creek water and Xiangjiang River water in areas around Yuelu Mountain

2.2 山涧溪水和湘江河水的主要离子来源

2.2.1 Gibbs 图和端元图 Gibbs 图是一种半对数坐标图，可直观判定天然水体水化学组分的控制因素^[37]。地表水的控制因素由 Gibbs 图的 3 端元推测：①端元 1 具有低 TDS 浓度($<10 \text{ mg/L}$)，较高 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 浓度比值(0.5~1)的特点，位于 Gibbs 图的右下角，反映降水是水化学组成的主要影响因素；②端元 2 具有 TDS 浓度适中(70~300 mg/L)， $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 浓度比值较低(<0.5)的特点，在 Gibbs 图幅中心偏左，说明岩石风化占优势；③端元 3 具有较高的 TDS 浓度($>300 \text{ mg/L}$)和较高的 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 浓度比值(0.5~1)，位于 Gibbs 图的右上角，指示蒸发结晶占主导地位。如图 3 所示，降水样点主要分布在 Gibbs 图下方， $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 浓度比值为 0.01~0.64， $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 浓度比值为 0.01~1.00，这不同于 Gibbs 采集到的海洋源降水在图幅右下方

的位置，说明研究区降水同时受到局地 and 远距离水汽输送作用，这与黄一民等研究结果一致^[33,38]。山涧溪水样点大部分位于 TDS 与 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值图内中下部，小部分落在图外，更靠近研究区降水样点，同时山涧溪水 $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ 平均值为 1.27，接近当地降水平均值($\text{Cl}^- / \text{Na}^+ = 1.01$)，说明山涧溪水主要受岩石风化和大气降水作用影响。湘江河水大部分样点落在中等 TDS，较低 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值图中，少数几个河水样点落在虚线外。有相关研究表明^[39]，全球地表水样点基本上会落在 Gibbs 图虚线内，但人类活动的影响会导致样点落在虚线外，说明河水化学主要受到岩石风化的支配，一定程度上也受到人类活动的影响。结合研究区环境可以发现湘江河水因受到城市点源污染和农业面源污染的影响，打破了原有的水化学组分， $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值偏向虚线外，这一特征与新疆伊犁喀什河流域地表水特征相似^[1]。

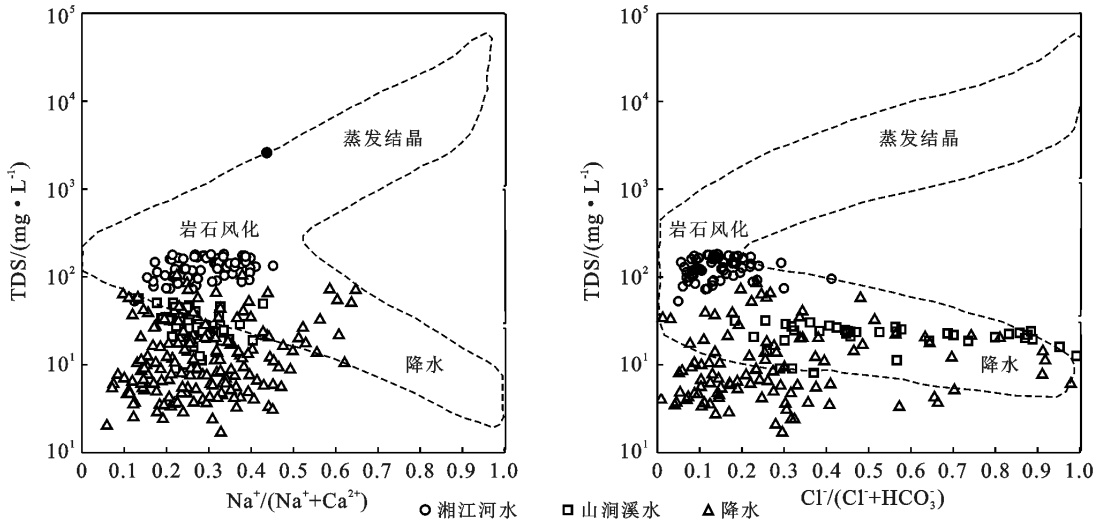


图 3 岳麓山周边地区降水、山涧溪水和湘江河水的 Gibbs 图

Fig.3 Gibbs plots of precipitation, mountainous creek water and Xiangjiang River water in areas around Yuelu Mountain

端元图常用 Ca^{2+}/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 的比值进一步评价碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发岩风化对水体中溶质的相对贡献^[40]。地表水体元素比例继承了矿物质元素比例。Gaillardet 等通过对全球 60 条河流水化学数据的统计分析,假设硅酸盐岩端元为 $Ca^{2+}/Na^+ = 0.35 \pm 0.15$, $Mg^{2+}/Na^+ = 0.24 \pm 0.15$;碳酸盐岩端元为 $Ca^{2+}/Na^+ \approx 50$, Mg^{2+}/Na^+ 比值接近 $10^{[41]}$ 。蒸发岩端元范围较宽, Ca^{2+}/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 值最小。如图 4 所示,山涧溪水大部分样点位于硅酸盐岩端元和碳酸盐岩风化端元之间,说明山涧溪水受到硅酸盐岩和碳酸盐岩风化作用,这与岳麓山缺乏蒸发岩且岩性以灰岩、泥灰岩、石英砂岩为主的地质背景相符。湘江河水大部分水样点位于三个端元之间,靠近碳酸盐岩和硅酸盐岩,因此湘江河水岩石风化受碳酸盐岩和硅酸盐岩影响较大,受蒸发岩影响较小。

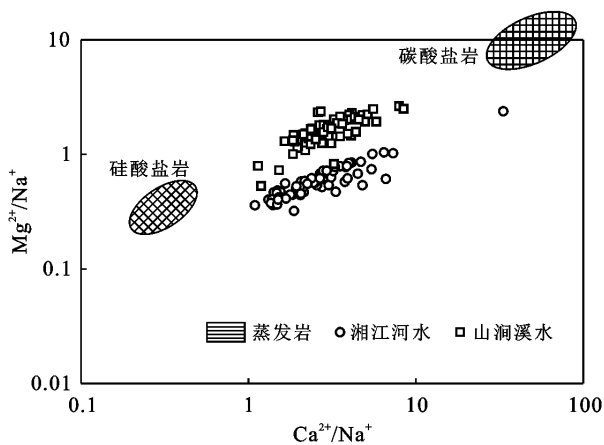


图 4 岳麓山周边地区山涧溪水和湘江河水的端元图: $Ca^{2+}/Na^+ - Mg^{2+}/Na^+$

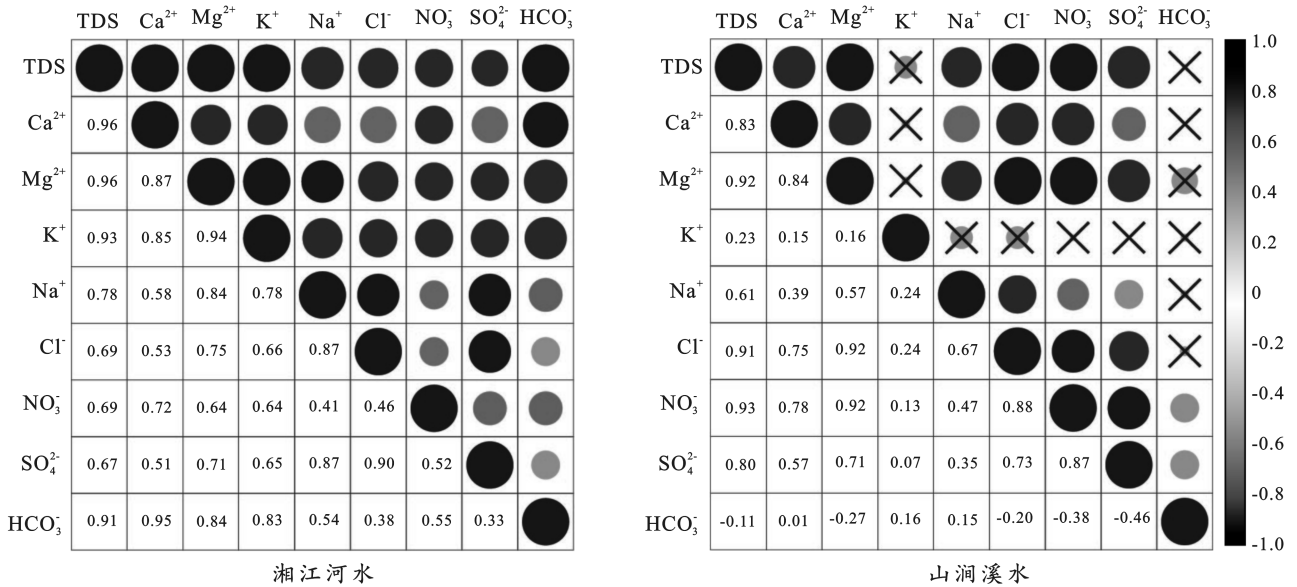
Fig.4 Endmember map of mountainous creek water and Xiangjiang River water in areas around Yuelu Mountain: $Ca^{2+}/Na^+ - Mg^{2+}/Na^+$

2.2.2 相关分析 为进一步探讨湘江河水和山涧溪水中离子主要来源,对其水体中 9 个水化学指标进行相关分析。本研究的相关矩阵如图 5 所示。湘江河水 TDS 与阳离子 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 和阴离子 HCO_3^- 呈现显著的正相关(相关系数分别为 0.96, 0.96, 0.93 和 0.91, 且 $p < 0.01$)。由表 1 可知, K^+ 的含量较少, 表明 HCO_3^- , Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 是决定湘江河水 TDS 的主要来源。 HCO_3^- 和 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 呈显著正相关, 表明这些离子的来源具有一致性。结合此前的研究表明, 以碳酸盐岩风化为为主的河流 $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / (Na^+ + K^+)$ 比值为 2~25, 在本研究中湘江河水 $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / (Na^+ + K^+)$ 平均值比为 2.12, 说明 HCO_3^- , Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 主要来自碳酸盐岩的风化作用, 这与湘江流域地层岩性以碳酸盐岩为主有关(图 2)。 Na^+ 和 Cl^- 以及 Na^+ 和 SO_4^{2-} 呈显著正相关, 指示了这些离子的本地岩源, 来自于盐岩和芒硝的风化。 NO_3^- 与其他离子相关性较弱, 表明 NO_3^- 来源不同。由于人为的污染有利于氨的产生, NO_3^- 主要与人类农业活动使用的氮肥、城镇污水和工业活动产生的氮氧化物排放有关^[39], 而湘江河水所处流域是湖南省社会经济文化中心, 因此河水中的 NO_3^- 主要来源于人类活动输入。 HCO_3^- 与 K^+ 和 Na^+ 存在较强的相关性, 但 Si 的含量较少, 研究区地层存在以花岗岩、板岩和砂岩等为主的硅酸盐岩, 表明 HCO_3^- 与 K^+ 和 Na^+ 来自于长石类矿物(例如钠长石和钾长石)的风化。

山涧溪水 TDS 与阳离子 Ca^{2+} , Mg^{2+} 和阴离子 NO_3^- , Cl^- 和 SO_4^{2-} 的相关性最显著(相关系数分别为 0.83, 0.92, 0.93, 0.91 和 0.80, 且 $p < 0.01$), 说明这些离子是共同来源, 主导了山涧溪水的化学特征。 NO_3^- , Cl^- 和 SO_4^{2-} 三种离子之间存在显著的正相关

关系,山涧溪水远离人类活动区域,离子值接近大气降水值,说明这些离子是来自大气降水输入。 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 显著正相关,山涧溪水 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 平均值为 3.71,说明 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 主要是源于碳

酸盐岩溶解。山涧溪水中 Si 未参与相关性分析,但由于水体中存在少量的 Si(表 1),岳麓山存在成分为砂层的岩层,表明 HCO_3^- , K^+ , Na^+ 和 Si 主要来自长石类硅酸盐岩的风化作用。



注:×表示在 0.01 级别(双尾),相关性不显著

图 5 岳麓山周边地区湘江河水和山涧溪水选定水化学指标的相关矩阵

Fig.5 Correlation matrix of selected water chemistry indicators for Xiangjiang River water and mountainous creek water in areas around Yuelu Mountain

2.3 湘江河水和山涧溪水灌溉水的适宜性评价

考虑到地表水资源对维护人类生活及生态平衡方面的重要性,水化学指标是直接关系人类和生态系统健康的重要参数。因此,灌溉用水的适宜性对岳麓山周边地区内人类生活和农作物健康有重大的影响。山涧溪水和湘江河水中 Na^+ 离子含量,SAR和RSC的计算值详见表2。山涧溪水中 Na^+ 离子含量均值15.2,表明山涧溪水灌溉用水质量较优。湘江河水平均值为17.22,灌溉水质为优,但其值高于山涧溪水。高SAR值指示作物危险升高,在本研究中,所有山涧溪水和湘江河水样本在全监测时段SAR值均为 <1 ,均值分别为0.1和0.29,与 Na^+ 离子含量的一致性较好。山涧溪水的RSC值介于 $-0.78 \sim -0.05$ 之间,平均值为 -0.34 ;河水中的RSC值介于 $-0.67 \sim 0.07$ 之间,平均值为 -0.31 。灌溉水的RSC值宜低于1.25,山涧溪水和湘江河水样品RSC值均在推荐值范围内。值得注意的是,两种水体SAR值和RSC值远小于第一判断阈值10和1.25,表明两种水体灌溉适宜性为优,这一结果与李泽岩等^[42]研究结果类似。因此,从灌溉适宜性角度考虑,在各监测时段内山涧溪水和湘江河水水样总体灌溉水质均为安全类。

表 2 岳麓山周边地区山涧溪水和湘江河水灌溉适宜性水质指标

Table 2 Water quality indicators for suitability of mountainous creek water and Xiangjiang River water for irrigation in areas around Yuelu Mountain

水样	指标	SAR	Na ⁺ 离子含量/%	RSC
山涧溪水	平均值	0.10	15.20	-0.34
	最小值	0.05	8.73	-0.78
	最大值	0.19	33.43	-0.05
湘江河水	平均值	0.29	17.22	-0.31
	最小值	0.07	7.63	-0.67
	最大值	0.52	26.81	0.07

使用EC, Na^+ 离子含量和SAR数据绘制USSL图和Wilcox图(图6)。由图6可知,山涧溪水水样均位于USSL图的 C_1-S_1 区,以及Wilcox图的“水质优秀区”;湘江河水水样均位于USSL图的 C_1-S_1 , C_2-S_1 区,以及Wilcox图的“水质优秀区”,这两种水体在USSL图和Wilcox图分布特征与Liu等研究结果非常相似^[2],表明两种水体符合灌溉用水标准。虽然两种水体都处在水质优秀区,但山涧溪水灌溉水质相对较好。这可能与山涧溪水离子含量低,受到降水影响较大且处于相对较短的径流路径有关,使得水

体与地层岩石相互作用的时间相对较短;然而湘江河水所在流域农田广布,城市密集,湘江河水受到人类活动产生的生活污水以及工农业废水排放的影响。从整

体上看,山涧溪水和湘江河水应用于灌溉过程中不易引起盐害或碱害,且对土壤和植物风险较低,这与水质指数法所得的结果有较好的一致性,与实际情况相符。

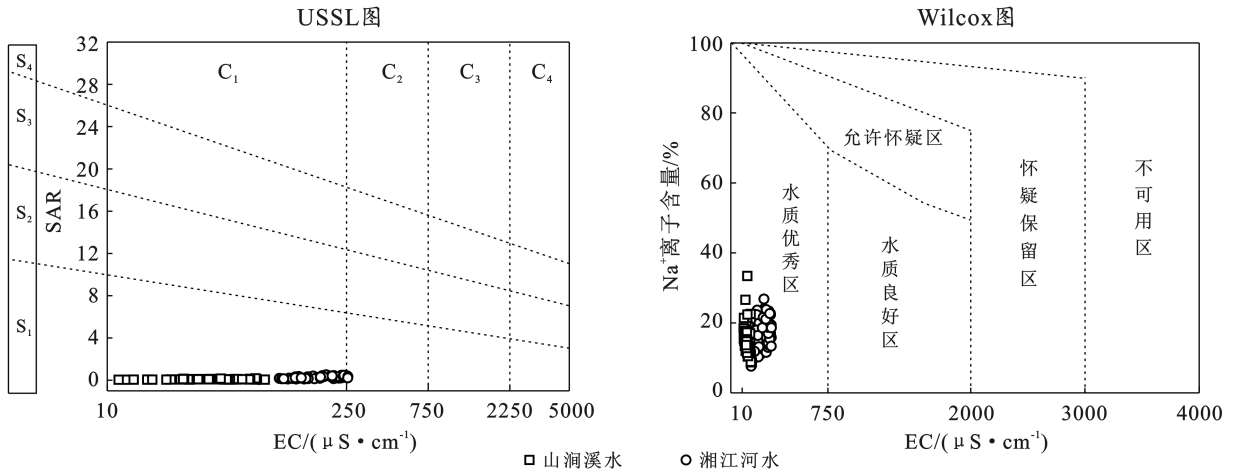


图6 山涧溪水和湘江河水的 USSSL 图和 Wilcox 图

Fig.6 USSSL and Wilcox Plots of mountainous creek water and Xiangjiang River water

3 结论

本研究以岳麓山周边地区为研究区,降水作为流域内各地表水体的输入源为前提条件,分析了山涧溪水和湘江河水化学特征,研究了大气降水输入和岩石风化对两种水体水化学特征的影响。

(1) 流域内不同地表水体之间的主要离子组成不同,各水体 TDS 均值表现为:湘江河水 > 山涧溪水 > 降水。山涧溪水主要阴阳离子为 Ca^{2+} 和 NO_3^- , 水化学类型以 $\text{Cl-Ca} \cdot \text{Mg}$ 和 Cl-Ca 型为主;湘江河水主要阴阳离子为 Ca^{2+} 和 HCO_3^- , 水化学类型以 HCO_3-Ca 型为主。

(2) 两种地表水体主要影响因素与离子来源差异显著:山涧溪水主要控制因素是岩石风化和大气降水输入,主要离子来源于碳酸盐岩风化和大气降水, NO_3^- , Cl^- 和 SO_4^{2-} 主要来自大气降水输入, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 主要来自碳酸盐岩风化。湘江河水主要控制因素是岩石风化,主要离子来源于碳酸盐岩风化。

(3) 钠离子含量, SAR 和 RSC 水质指数法以及 USSSL 图和 Wilcox 图结果显示,在地表水体主要离子的角度上,岳麓山周边地区山涧溪水和湘江河水适合用于灌溉,不易引起盐害或碱害。

[参 考 文 献]

[1] 杨景燕, 杨余辉, 胡义成, 等. 新疆伊犁喀什河流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境化学, 2021, 40(12): 3815-3827.
 [2] Liu Jinke, Han Guilin, Liu Man, et al. Distribution,

sources and water quality evaluation of the riverine solutes: a case study in the Lancangjiang river basin, Tibetan Plateau [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4670.

[3] Chen Jingsheng, Wang Feiyuan, Xia Xinghui, et al. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River) [J]. Chemical Geology, 2002, 187(3/4): 231-255.
 [4] Huang X, Sillanpää M, Gjessing E T, et al. Water quality in the Tibetan Plateau: major ions and trace elements in the headwaters of four major Asian rivers [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(24): 6242-6254.
 [5] Wang Liang, Zhang Longjun, Cai Weijun, et al. Consumption of atmospheric CO_2 via chemical weathering in the Yellow River basin: the Qinghai-Tibet Plateau is the main contributor to the high dissolved inorganic carbon in the Yellow River [J]. Chemical Geology, 2016, 430: 34-44.
 [6] Rehman Qaisar F U, Zhang F, Pant R R, et al. Spatial variation, source identification, and quality assessment of surface water geochemical composition in the Indus River Basin, Pakistan [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(13): 12749-12763.
 [7] Wu Weihua. Hydrochemistry of inland rivers in the North Tibetan Plateau: constraints and weathering rate estimation [J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 468-482.
 [8] 熊吕婷. 湘江流域洪涝灾害档案管理研究[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学, 2021.
 [9] 张立成, 赵桂久, 董文江, 等. 湘江水系河水的地球化学特征[J]. 地理学报, 1987, 42(3): 243-251.

- [10] 刘文珺. 湘江流域水量水质特征研究[D]. 湖南长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [11] 秦治恒, 师华定, 王明浩, 等. 湘江流域主要支流土壤 Cd 污染空间分布与相关性[J]. 环境科学研究, 2018, 31(8): 1399-1406.
- [12] 桂雨婷, 王健, 余建波, 等. 洞庭湖流域湘江铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*) 的重金属富集特征及其膳食风险评估[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3): 724-733.
- [13] 王勤, 彭渤, 方小红, 等. 湘江下游河床沉积物重金属污染的矿物学分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(3): 558-575.
- [14] 赵亚方, 彭渤, 方小红, 等. 湘江下游河床沉积物元素地球化学背景值估算[J]. 地质论评, 2021, 67(2): 504-522.
- [15] 刘潭秋, 王巧玲. 基于 ARIMA 模型的湘江流域 DO 和 NH_4^+-N 含量贝叶斯预测[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 575-580.
- [16] 姚天次, 章新平, 李广, 等. 湘江流域岳麓山周边地区不同水体中氢氧稳定同位素特征及相互关系[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1198-1210.
- [17] 常昕, 章新平, 刘仲黎, 等. 长沙降水中稳定同位素的昼夜差别[J]. 热带地理, 2021, 41(3): 635-644.
- [18] 刘元晴, 周乐, 吕琳, 等. 牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2023, 44(03): 1429-1439.
- [19] 廖晴, 王博, 胡文瑄. 新西兰陶波火山区水化学特征及其成因初探[J]. 高校地质学报, 2017, 23(2): 252-258.
- [20] Li Xiangying, Ding Yongjian, Han Tianding, et al. Seasonal and interannual changes of river chemistry in the source region of Yellow River, Tibetan Plateau[J]. Applied Geochemistry, 2020, 119: 104638.
- [21] Yu Zhengliang, Wu Guangjian, Keys L, et al. Seasonal variation of chemical weathering and its controlling factors in two alpine catchments, Nam Co basin, Central Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2019, 576: 381-395.
- [22] 曾妍妍, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆祁漫塔格地区地表水水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 64-70.
- [23] Subramani T, Elango L, Damodarasamy S R. Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River basin, Tamil Nadu, India [J]. Environmental Geology, 2005, 47(8): 1099-1110.
- [24] 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.
- [25] 庞国涛, 閻琨, 李伟. 钦州钦南区水化学特征及健康风险评估[J]. 环境化学, 2022, 41(11): 3558-3568.
- [26] Almeida C, Quintar S, Gonz. Distribution, sources and water quality evaluation of the river of a quality profile [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 142(1): 149-152.
- [27] 丁启振, 雷米, 周金龙, 等. 博尔塔拉河上游河谷地区水化学特征及水质评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 829-840.
- [28] 李传琼, 王鹏, 李燕, 等. 赣江水系水化学时空特征及影响因素[J]. 环境化学, 2017, 36(9): 1949-1957.
- [29] 严宇鹏, 牛风霞, 刘佳, 等. 雅鲁藏布江上游夏季水化学特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(2): 815-825.
- [30] 蒋保刚, 闫正, 宋献方, 等. 汉江上游金水河流域河水的化学特征[J]. 环境化学, 2013, 32(6): 980-986.
- [31] 付凯, 张秋英, 李兆, 等. 城市化进程中长江经济带长江干流水化学演变特征及影响因素[J]. 环境科学学报, 2022, 42(11): 160-171.
- [32] Zhang J, Huang W W, Letolle R, et al. Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China-weathering processes and chemical fluxes [J]. Journal of Hydrology, 1995, 168(1/4): 173-203.
- [33] 黄一民, 赵日梅, 宋献方, 等. 台风“海马”对洞庭湖流域降水同位素的影响研究[J]. 地理科学, 2019, 39(7): 1184-1190.
- [34] Dai Junjie, Zhang Xinping, Wang Li, et al. Seasonal isotopic cycles used to identify transit times and the young water fraction within the critical zone in a subtropical catchment in China [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128138.
- [35] Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers [J]. Treatise on Geochemistry, 2003(5): 605.
- [36] 刘基, 高敏, 靳德武, 等. 榆神矿区地表水水化学特征及其影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 354-361.
- [37] 陈洋, 白景文, 杨靖, 等. 贡嘎山东北坡地表水地球化学特征及影响因素[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37(4): 497-503.
- [38] Zhang Fan, Xiao Xiong, Wang Lijie, et al. Chemical weathering and CO_2 consumption in the glaciated Karuxung River catchment, Tibetan Plateau [J]. Hydrological Processes, 2021, 35(8): e14330.
- [39] 涂春霖, 杨润柏, 马一奇, 等. 黔西拖长江流域水化学演化特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 740-751.
- [40] Li Xiangying, He Xiaobo, Kang Shichang, et al. Diurnal dynamics of minor and trace elements in stream water draining Dongkemadi Glacier on the Tibetan Plateau and its environmental implications [J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 1104-1118.
- [41] 余冲, 徐志方, 刘文景, 等. 韩江流域河水地球化学特征与硅酸盐岩风化: 风化过程硫酸作用[J]. 地球与环境, 2017, 45(4): 390-398.
- [42] 李泽岩, 曹文庚, 王卓然, 等. 内蒙古河套灌区浅层地下水化学特征和灌溉适宜性分析[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 418-426.