

重庆市地表水主要离子的时间变化及影响因素^{*}

王 烽, 陈 鹏, 席宁哲, 张 陶

(重庆师范大学 地理与旅游学院 山区生态系统碳循环与碳调控重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要:本研究通过收集 2023 年 4、7 和 12 月重庆市的地表水样品进行理化分析,并结合 Piper 三线图、Gibbs 半对数图、离子比例分析等一系列方法,旨在揭示当地地表水的水文地球化学特征和时空变化规律,以及自然因素与人类活动对地表水水化学组成的影响。结果显示:3 个月份的水样 pH 总体成弱碱性,重庆市地表水主要阳离子是 Ca^{2+} ,主要阴离子是 HCO_3^- ,绝大部分区域地表水的水化学类型为 Ca-HCO_3 型或 Ca(Mg)-HCO_3 型。研究区地表水的水化学特征整体上主要受蒸发结晶和岩石风化的影响,地表水中离子主要来源于岩石风化。从季节变化上看,水体中阴阳离子质量浓度、溶解性总固体质量浓度以及电导率变化明显,在数值上总体表现为雨季小于旱季,并主要受到雨季降雨量增大的影响。从空间变化上看:渝东南地区和渝东北地区地表水中 NO_3^- 质量浓度较高,与农业活动密切相关;渝西地区和渝中地区地表水中 SO_4^{2-} 质量浓度较高,则主要与工业活动有关。整体上看,重庆市地表水中优势离子 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的质量浓度变化主要受到岩石风化影响; SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 等离子则受到不同类型人类活动的影响,表现出明显的时空变化。本研究结果可为重庆市水资源保护及水污染治理提供参考,从而助力重庆市水环境质量提升和城市可持续发展。

关键词:地表水;时空变化;重庆市;水化学

中图分类号:X832

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2026)03-0072-14

水是地球表面最常见的物质之一,是维持陆地生态系统结构和功能的关键要素。河流作为陆地与海洋系统之间物质和能量传输的纽带,它的水化学特性受到流域地质组成、大气输入、气候变化、人类活动等因素在不同尺度上的影响^[1-2]。河流的水化学组成记录了水形成和运输的历史,反映了流域内水体的化学特征^[3]。流域内水体的化学特征是研究水资源形成、水化学组成及水循环过程的重要指标,可用于揭示水体中主要离子的来源、演化规律以及水体与下垫面地质体之间的相互作用^[4-5]。水中离子化学组成是水化学研究的核心内容之一。通过系统分析如 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等主要离子的比例,可以有效识别和量化大气降水、岩石风化、人为输入等不同来源离子对某一地区水化学特征的贡献^[6]。

鉴于水化学成分对社会发展和人类生存具有重要影响,目前已有许多研究人员对不同流域的水化学特征及决定因素进行了系统研究。有关流域水化学特征的研究在中国起步较晚。1963 年,乐嘉祥等人^[7]发表于《地理学报》上的论文《中国河流水的化学特征》标志着中国流域水化学研究的开端。刘敏等人^[8]对长江流域河流水化学特征及离子来源的研究表明,研究区内水体的化学组成主要受岩石风化和蒸发结晶过程的影响。张旺等人^[9]对黄河中下游汛期水化学特征的研究表明,小浪底水库水化学特征主要受蒸发岩盐溶解和碳酸盐岩风化过程主导。Gaillardet 等人^[10]研究了全球 30 条主要河流的侵蚀特征,认为全球主要河流的侵蚀类型可分为 3 类:硅酸盐岩风化、碳酸盐岩风化和蒸发岩风化。Hu 等人^[11]在系统研究长江和黄河的水化学特征与流域自然地理要素关系的基础上,提出中国河流离子组成主要受碳酸盐岩和蒸发岩风化作用的控制。张丽等人^[12]采用空间插值法、Piper 三线图(以下简称 Piper 图)、Gibbs 半对数图(以下简称 Gibbs 图)以及相关性分析研究了山东省东平湖水体的化学特征,结果表明大气降水输入对该湖水化学组成的季节性影响相对有限。黄皓东等人^[13]利用水温地球化学模拟软件 Phreeqc 计算了四川省黄龙沟地表水系统各种矿物离子的空间变化。总之,河流中主要离子的组成和含量会随着季节和空间尺度的变化而呈现明显的动态变化,且这些动态变化是流域内岩石风化、降

^{*} 收稿日期:2025-09-11 修回日期:2025-12-12 网络出版时间:2026-06-04T14:46

资助项目:重庆市巴渝学者青年学者项目(No. YS2024034);重庆师范大学博望学者青年拔尖人才项目(No. BWQB2023016);重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目(KJQN202300502)

第一作者简介:王烽,男,研究方向为水土保持与面源污染,E-mail:w1298552470@163.com;通信作者简介:张陶,男,副研究员,博士,E-mail:tao21mi@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20260604.1026.002

水蒸发、水循环等复杂自然过程与农业灌溉、工业排放、城市化等人类活动相互作用的结果。

作为长江上游典型山地河流系统,重庆市地表河流水化学特征的时空分异不仅反映了重庆市境内喀斯特地貌与人为干扰的耦合效应,也为当地的流域水质管理、生态安全评估及跨境污染物通量研究提供了关键科学依据。与平原地区河流不同的是,重庆市复杂的地质构造导致了境内流域岩性异质性明显,同时季节性降水的相对集中与陡峭地形加剧了侵蚀-溶蚀过程的时空分异。此外,高强度的人类活动使得重庆市河流水体中离子组分呈现明显的空间与季节性动态变化,表现为碳酸盐岩风化主导的溶质来源与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等人为输入离子的复合叠加效应。重庆市地表河流系统具有明显的形态动力学复杂性,表现为受构造-岩性控制的河网分形特征与强烈的人类活动干扰叠加,同时河流的水化学特征呈现明显的空间分异性,且主要受碳酸盐岩风化主导的离子组成与氮磷营养盐等人为污染输入的耦合影响。这种水文地貌过程与水化学响应的非线性相互作用使得重庆市河流系统对周围环境的敏感性及它们面临的生态风险呈现出高度空间异质性和动态演化特征。

基于上述研究背景,本研究在 2023 年对采集自重庆市境内的多个地表水样品进行了理化分析,并结合 Piper 图、Gibbs 图、离子比例分析等方法,旨在揭示该区域地表水的水文地球化学特征和时空变化规律,以及自然因素与人类活动对地表水水化学组成的影响,期望为重庆市水资源保护及水污染治理工作提供参考,从而助力重庆市水环境质量提升和城市可持续发展。

1 研究区概况

重庆市位于中国西南部、长江上游,地理坐标跨东经 $105.28^\circ \sim 110.18^\circ$ 、北纬 $28.10^\circ \sim 32.13^\circ$,境内最高峰阴条岭海拔为 2 796.8 m,全市总面积为 $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。重庆市气候为亚热带湿润季风气候,年平均气温在 $16 \sim 18^\circ\text{C}$,年平均降雨量在 $1\,000 \sim 1\,350 \text{ mm}$,但 1 年中降雨的时间分布差异较大。重庆市汛期主要集中在当年 5—9 月,非汛期为当年 10 月—次年 1 月,加上重庆市多暴雨天气,从而在上述 2 个时间段中地表水的水化学特征的形成与演化过程极为错综复杂,与气候、岩性、人类外源输入等诸多因素有关。

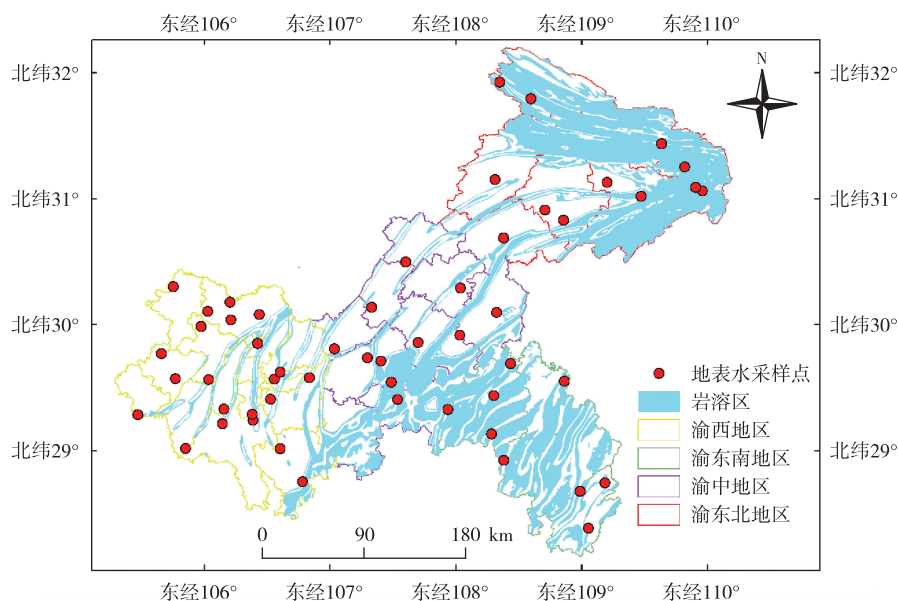
重庆市境内包括碳酸盐岩与碎屑岩互层区在内的岩溶区分布面积达 $3.0 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全市总面积的 1/3 以上。这些岩溶区主要集中分布于 2 个典型区域即渝东北大巴山构造带和渝东南巫山—大娄山褶皱带,此外重庆市中西部平行岭谷区的背斜核部亦有岩溶区分布。上述区域主要显露寒武系、奥陶系、二叠系和三叠系碳酸盐岩地层,这些古老地层具有岩性致密的典型特征^[14]。紫色土是在三叠系地层因长期的风化作用和侵蚀作用而形成的岩性土。在中国,紫色土的分布面积达 $2.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,并主要分布在长江流域及该流域以南地域。四川省和重庆市的紫色土分布面积约为 $1 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占中国紫色土总分布面积的 45% 以上。在重庆市,紫色土是分布最广的土壤类型,约占全市农业用地面积的 33%^[15]。由于酸性紫色土中的 CaCO_3 大量被淋失或母岩呈酸性,因而其中的 CaCO_3 质量分数较低,为 $0.61\% \sim 9.8\%$ (平均值为 4.32%)^[16]。土壤 pH 呈酸性是导致土壤中 CaCO_3 溶解并引起 Ca^{2+} 淋失进入水体的主要原因,而在像重庆市这样历史上酸雨问题较为严重的地区,酸雨的出现则加剧了这一过程^[17-18]。研究显示,当酸雨的 pH 不高于 3 时,会强烈促进酸性和中性紫色土的酸化^[17]。在此过程中,作为重要土壤缓冲物质的 CaCO_3 会与酸反应,释放出的 Ca^{2+} 随着降雨或灌溉水下渗,最终可能进入地表河流^[19]。重庆市水文系统发育完善,全境河流均属长江水系。长江干流呈西南—东北向贯穿市境,且北岸有嘉陵江汇入,南岸接纳乌江来水,它们共同构成了典型的向心式不对称网状水系格局。据统计,境内流域面积超过 100 km^2 的河流共计 274 条,其中流域面积大于 $1\,000 \text{ km}^2$ 的重要支流达 42 条。这种特殊的水系结构对区域水化学特征的形成与演化具有重要控制作用。本研究在研究区内共设有 54 个地表水采样点,其中 24 个在渝西地区、10 个在渝中地区、8 个在渝东南地区、12 个在渝东北地区(图 1)。

2 材料与方法

2.1 样品采样与分析方法

分别于 2023 年春季(4 月)、夏季(7 月)和冬季(12 月)在研究区内 54 个采样点通过标准化野外采样方法收集地表水样品,并结合实验室分析方法进行水化学参数测定。在采样现场,使用 YSI ProDSS 多参数水质分析仪进行水质监测,测定指标包括水温(精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)、pH(精度为 ± 0.01)、电导率(精度为 $\pm 0.1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)、溶解氧质量浓度(以百分饱和度计的精度为 $\pm 0.1\%$)和浊度(精度为 $\pm 0.3 \text{ NTU}$)。水样采集过程严格遵循质量控制程序。首先采用真空泵系统配合 50 mm 直径、 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径的醋酸纤维滤膜进行现场过滤。然后采用以下方

案处理水样:1) 碱度测定,即现场采用 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液滴定样品,以 pH 为 4.5 时作为滴定终点;2) 阴离子样品的采集方法为将 600 mL 过滤水样储存于经三重润洗的高密度聚乙烯瓶中;3) 阳离子样品的采集方法为将 50 mL 过滤水样酸化至 pH 小于 2,且使用优级纯硝酸预处理容器储存;4) 同位素样品的采集方法为分别收集 30 和 100 mL 水样,其中添加 HgCl_2 固定剂。所有样品采集后立即置于便携式冷藏系统以 4°C 条件保存,并在 12 h 内转运至实验室。在实验室中通过 Dionex ICS-900 型离子色谱系统对 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子和 NH_4^+ 的质量浓度进行测定,仪器的分析误差小于 5%;通过 Thermo Scientific IRIS Intrepid II XSP 型电感耦合等离子体发射光谱仪对 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子的质量浓度进行测定,检出限为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;采用 Multi N/C 3100TOC 分析仪测定有机碳的浓度;通过 MAT253 同位素比值质谱仪联用 Gas Bench 系统,采用磷酸法测定溶解无机碳同位素即 $\delta^{13}\text{C}\text{-DIC}$ 的浓度(V-PDB 标准),分析精度为 $\pm 0.015\%$ 。所有分析测试均在中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成,实验过程严格遵循 ISO/IEC 17025 质量管理体系的要求。



注:底图来源于标准地图服务系统(<https://yuditu.com/bzdt/>),审图号:S(2025)130号,图中县级行政区划为 2023 年采样时的状态。

图 1 研究区和地表水采样点分布

Fig. 1 The study area and the distribution of surface water sampling sites

2.2 研究方法

本研究采用 Piper 图和 Gibbs 图分析了重庆市地表水的水文地质化学行为,并结合离子比例分析等方法对重庆市地表水的水化学类型进行研究。

Piper 图是一种由 2 个三角形和 1 个菱形构成的水化学图示方法,通常被用来研究水化学的主要离子组成以及并分析它们的演化特征^[12]。在该图中通过将水中主要离子的毫克当量百分比分别投影在三角形的 3 个顶点和菱形的 4 个象限上,能够直观地反映各离子的相对含量比例。

Gibbs 图采用半对数坐标系,其中纵坐标(对数尺度)表示溶解性总固体(TDS)质量浓度(单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)数值取 10 为底数时所得对数值(后文记为 $\lg(\rho(\text{TDS}))$),横坐标(线性尺度)表示阳离子质量浓度比(例如 $\rho(\text{Na}^+)$ 与 $\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 之比,即 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$),通过该图可以清晰地揭示地表水化学组成的主要自然控制因素,包括岩石风化、大气降水输入、蒸发浓缩等端元过程^[20-21]。在 Gibbs 图中,水的不同化学特性呈现出明显的空间分布:低矿化度且 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的值接近 1 的水样点位位于图中右下端,反映出其中离子组成主要受海洋来源的大气降水控制;中等矿化度且 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值约为 0.5 或更低的水样点位位于图中左侧,表明其中溶质主要来自流域岩石的风化作用;高矿化度且 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值接近 1 的水样点位位于图右上端,表明干旱地区或人类活动的强蒸发浓缩作用对水体化学组成有着明显的影响。

3 结果与分析

3.1 水化学特征的时空变化

3.1.1 水化学成分的时间变化

表 1 显示:1) 4 月、7 月和 12 月地表水的 pH 的范围较为一致,整体上为中性偏弱碱性。2) 电导率平均值存在季节性波动,呈先下降后上升趋势,这与研究区雨季期间出现的水体稀释效应有关,特别是 7 月降雨量增大明显降低了水体中溶解性离子的质量浓度,此时电导率平均值较其他月份的平均值更低。3) Na^+ 和 Ca^{2+} 为优势阳离子, HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为优势阴离子;按照水体中溶解性离子质量浓度平均值由高到低对水体中的阳离子和阴离子分别进行排序,依次为 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 。

由表 1 还可以看出:1) 4 月水体中 Na^+ 和 SO_4^{2-} 的质量浓度最大值分别比其他阳离子和阴离子的质量浓度最大值更大, K^+ 和 Cl^- 的质量浓度最小值分别比其他阳离子和阴离子的质量浓度最小值更小,表明 4 月水体中离子质量浓度受较强的水文条件和地质过程控制。2) 在 7 月,因受到降雨量增大的影响,水体中阳离子(尤其是 Na^+ 和 K^+)及阴离子(如 SO_4^{2-} 和 Cl^-)的质量浓度均有不同程度的下降。3) 到了 12 月,随着降雨量减小,水体蒸发浓缩作用增强,水体中阳离子和阴离子质量浓度均较 7 月时有所上升,其中 Na^+ 和 Cl^- 的质量浓度上升程度尤为明显。

表 1 研究区地表水物理化学指标统计信息
Tab. 1 Summary statistics of surface water physicochemical parameters in the study area

采样 时间	描述性 统计量	pH	电导率/ ($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\rho(\text{K}^+)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Na}^+)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Ca}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Mg}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{HCO}_3^-)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Cl}^-)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{NO}_3^-)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
	平均值	8.43	485.4	5.91	36.87	45.97	12.34	129.70	68.68	30.19	5.47
4 月	最大值	9.16	1 310.0	27.01	176.40	90.13	24.77	189.10	282.92	141.83	23.71
	最小值	7.82	179.3	0.62	2.00	17.61	4.67	54.90	6.22	0.62	0.87
	平均值	8.12	364.8	3.65	17.57	45.03	8.79	122.34	37.44	16.44	2.12
7 月	最大值	9.34	776.1	20.39	112.00	68.51	14.22	183.00	102.30	93.22	7.20
	最小值	7.69	185.6	0.60	1.67	28.08	3.64	61.00	9.42	1.79	0.05
	平均值	8.26	449.3	3.43	11.43	38.80	23.57	152.60	52.24	20.26	8.07
12 月	最大值	8.92	920.8	14.22	20.93	73.20	73.50	237.90	165.30	76.55	20.19
	最小值	7.96	135.6	0.65	4.48	19.15	2.34	103.70	8.71	2.02	3.19

3.1.2 水化学类型的时空变化

从不同月份的水样点位分布来看,研究区水样中的 Ca^{2+} 占优,其次是 Mg^{2+} ,而 Na^+ 和 K^+ 的毫克当量百分比比较低。这表明研究区水样的阳离子来源以碳酸盐岩(如石灰岩和白云岩)溶解为主,反映出典型的硬水特征(图 2)。

图 2 还显示,4 月、7 月和 12 月研究区水样点位主要集中分布在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 区域,表明研究区绝大部分区域的地表水化学类型为 Ca-HCO_3 型或 Ca(Mg)-HCO_3 型。值得注意的是,图 2 中研究区水样点位分布的季节变化并不明显,说明降水补给对水化学特征的影响较为稳定;同时也暗示了人类活动对整个研究区的总体干扰较小,而降水补给或地质条件对水化学特征可能有较大影响。然而,在局部区域,人类活动的影响可能通过改变 SO_4^{2-} 或 Cl^- 的相对含量表现出来,例如工业废水排放可能向地表水中输入更多的 Cl^- ,而农业活动则可能通过肥料和农药的使用向地表水中输入更多的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 。在人类活动的密集的渝中地区和渝西地区还有部分的水化学类型为 Na+Ca-HCO_3 型、 Na+Ca-SO_4 型、 Na+Ca-Cl 型等复合型水化学类型,它们的特征表明可能受到人类活动以及特殊的地质条件(二叠系、三叠系地层)的影响。

从图 2 中的阳离子三角可知:渝东南地区和渝东北地区地表水中 Ca^{2+} 的毫克当量百分比普遍较高,反映出

在碳酸盐岩(如石灰岩)分布区,岩石风化会释放大量 Ca^{2+} ;渝西地区地表水中 Na^+ 和 K^+ 的毫克当量百分比相对较高,可能与该区域碎屑岩等岩性及农业、工业活动导致的 Na^+ 、 K^+ 等离子输入有关;渝中地区地表水中阳离子分布具有过渡性,即受到城市水文循环与地质条件共同影响,虽然其中仍以 Ca^{2+} 为主,但 Ca^{2+} 的毫克当量百分比低于渝东南地区和渝东北地区的地表水。而从图 2 中的阴离子三角可知: CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 为研究区地表水的主要阴离子,体现了碳酸盐岩风化对水化学的控制作用。渝东北地区因碳酸盐岩广泛出露,地表水中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的毫克当量百分比很高;渝西地区地表水中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的毫克当量百分比相对偏高,且与该区域工业排放、农业施肥等人类活动相关,夏季降水冲刷使这些离子迁移,加剧了空间差异。渝东南地区和渝中地区地表水阴离子分布相对集中于 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 区间,但渝中地区因城市生活污水输入,地表水中 Cl^- 的毫克当量百分比有局部上升。此外,图 2 中的菱形区还显示,渝东南地区和渝东北地区水样点位集中分布于碳酸盐岩风化主导区域,离子组成稳定;渝西地区水样点位因人类活动与岩性差异而分布更加分散,体现了其中离子来源的复杂性;渝中地区受市政管网和面源污染影响,水样点位有向 Cl^- 等人为源离子区间偏移趋势。从空间上看,研究区地表水的水化学类型在渝东南地区和渝东南地区主要受碳酸盐岩风化控制,在渝中地区为城市复合型,在渝西地区则受人为活动的影响较大。

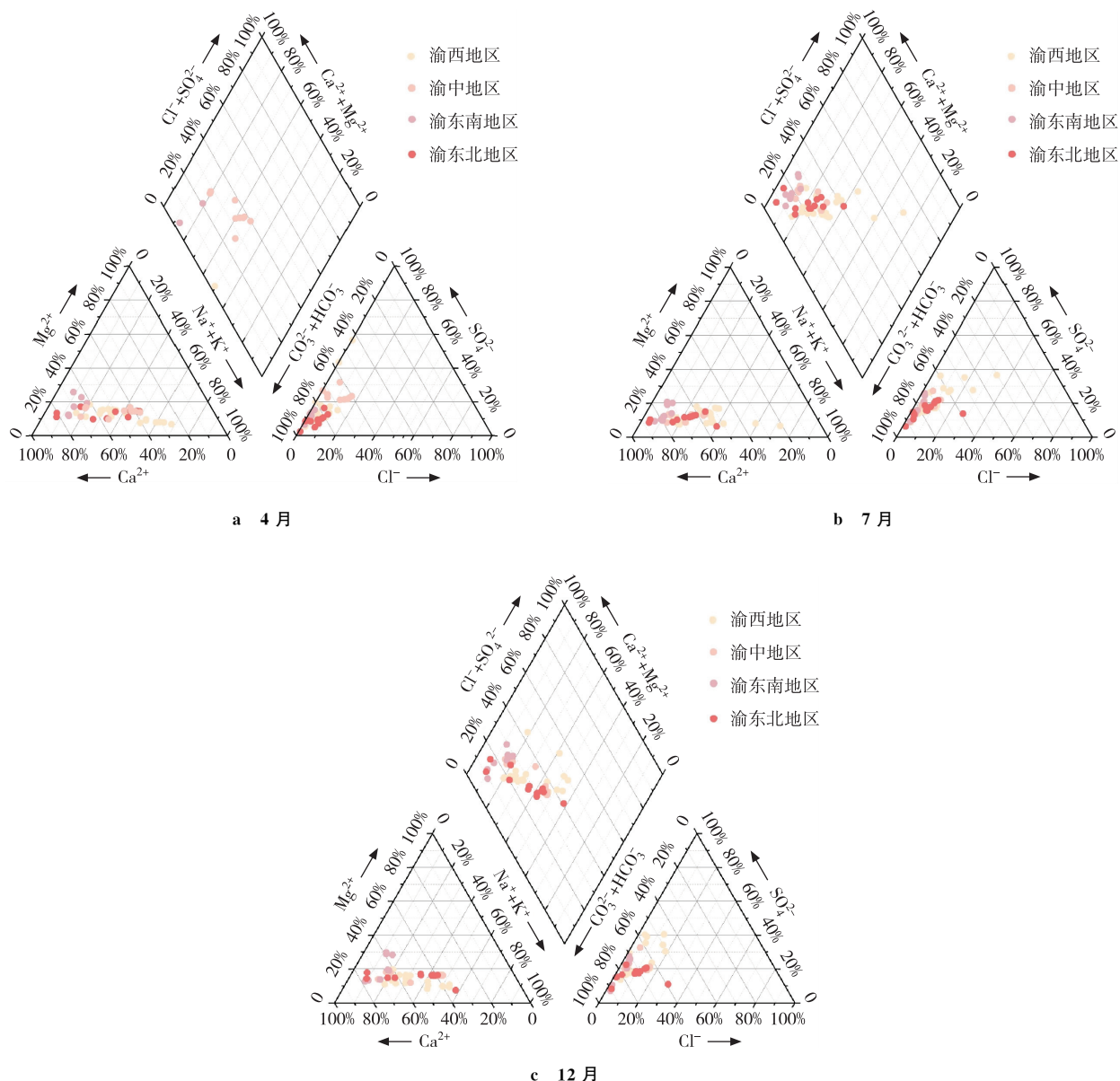


图 2 研究区不同月份地表水主要离子的 Piper 图

Fig. 2 Piper diagrams showing major ion composition of surface water in the study area for different months

另外,根据图3可以看出,渝东南地区和渝东北地区的地表水中方解石和白云石处于饱和状态,这表明水体经历了充分的水岩相互作用。这种状态的形成需要较长的水流停留时间或较强的岩石溶解能力,而这也可能与地下河流系统的结构、补给条件以及区域内水动力条件相关。

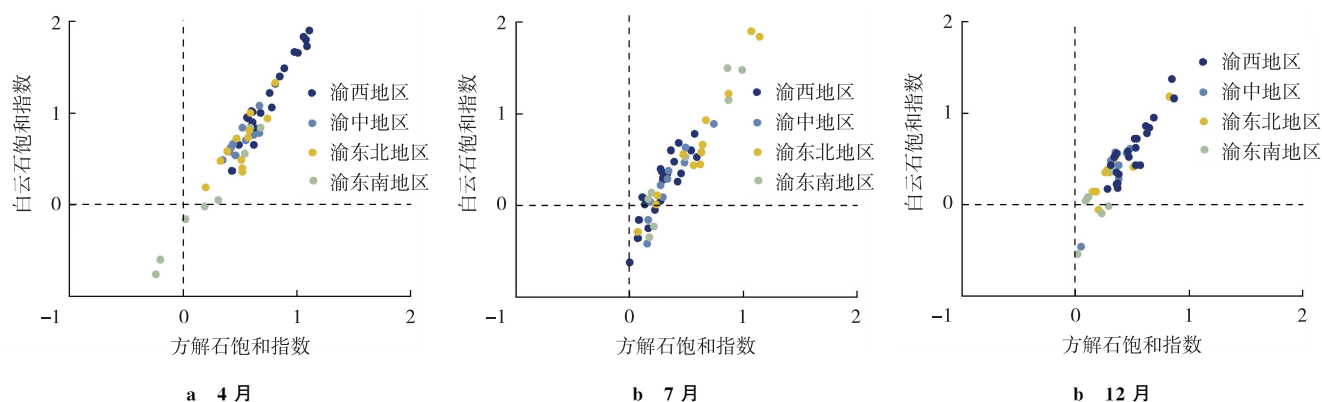


图3 方解石饱和指数与白云石饱和指数的相关性

Fig. 3 The correlation between saturation index of calcite and saturation index of dolomite

3.2 水化学特征控制因素

影响自然水体中溶质组成的因素主要包括物质来源和化学反应过程^[22],其中物质来源受流域地质、土壤特性、大气降水等自然因素与工业排放、农业污染、城市化过程等人类活动的综合影响^[23-24]。

从空间变化来看(图4),渝西地区水样点位在Gibbs图中的位置相对更高(即向人类活动影响区域偏移)。部分渝西地区水样的溶质组成已展现出它们受到人类活动明显干扰的趋势:受夏季人类活动(如农业灌溉排水、生活污水排放等)增强及雨季初期地表物质冲刷的叠加影响,这些水样点位在Gibbs图中的位置向人类活动影响区域偏移更为明显, $\lg(\rho(\text{TDS}))$ 的变化幅度也相应增大;冬季人类活动强度虽然降低,上述偏移趋势减弱,但与其他地区的水样点位在Gibbs图中的位置相比,仍可看出该区域水样的溶质组成受人类活动的影响依然较为明显。上述结果反映出渝西地区人类活动对当地地表水化学的扰动相对频繁且较为明显,因而是这一区域水化学特征的重要影响因子。渝中地区水样点位在Gibbs图中的分布相对分散,但始终以岩石风化控制为主导;在不同月份,降雨作用控制区域均无该地区水样点位分布,说明渝中地区地表水的水受降雨作用影响较弱。渝东南地区和渝东北地区的水样点位在各月份Gibbs图中稳定集中于岩石风化控制区域,受人类活动与降雨作用的额外干扰相对微弱,例如在7月,尽管整个研究区均处于雨季,但渝东南地区和渝东北地区因人类活动强度相对较低,水化学特征主导控制因素为岩石风化,降雨作用控制区域无这2个地区的水样点位分布;在冬季,这2个地区的人类活动进一步减少,水化学组成更加与岩石风化密切相关。因此,渝东南地区和渝东北地区地表水的水化学特征对地质背景具有较强的依附性。

从季节变化上来看,无论在旱季还是雨季,研究区地表水的水化学特征主要受到水岩相互作用的控制,大气降水的溶质输入影响较弱;且不同月份研究区水样点位在Gibbs图中向右上角偏移,但未进入人类活动影响区域,且绝大多数点位对应的 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 值或 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值不高于0.5,所以研究区地表水中绝大部分的溶质还是来自岩石风化(图5)。

通过分析 $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{Na}^+)$ 与 $\rho(\text{HCO}_3^-)/\rho(\text{Na}^+)$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{Na}^+)$ 与 $\rho(\text{Mg}^{2+})/\rho(\text{Na}^+)$ 的关系可知,研究区各月份水样点位的 $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{Na}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})/\rho(\text{Na}^+)$ 和 $\rho(\text{HCO}_3^-)/\rho(\text{Na}^+)$ 数据点主要集中分布于图6的右上象限。这一分布格局明确指示了研究区地表水体中溶质离子组成主要受碳酸盐岩风化作用控制,而硅酸盐岩风化的贡献相对有限。此外,翁昊璐等人^[25]研究发现研究区紫色土中具有丰富的次生 CaCO_3 结晶,这与土壤中的细菌活动密切相关:细菌可分泌脲酶,将土壤中的尿素水解为 NH_4^+ 和 CO_3^{2-} ,导致周围微环境pH升高;同时,细菌细胞壁通常带负电荷,能吸附溶液中的 Ca^{2+} 作为成核位点;当 CO_3^{2-} 离子与 Ca^{2+} 在细菌细胞周围结合并超过溶度积时,便以细菌细胞为晶核析出方解石晶体^[26]。因此,当研究区处于雨季时,由强降雨带来的大量水分进入富含 CaCO_3 的紫色土层,不断溶解其中的 CaCO_3 ,并将 Ca^{2+} 以溶解态形式带走。由此可见,研究区地表河流中含有丰富的 Ca^{2+} 也可能来自紫色土中的次生 CaCO_3 结晶。

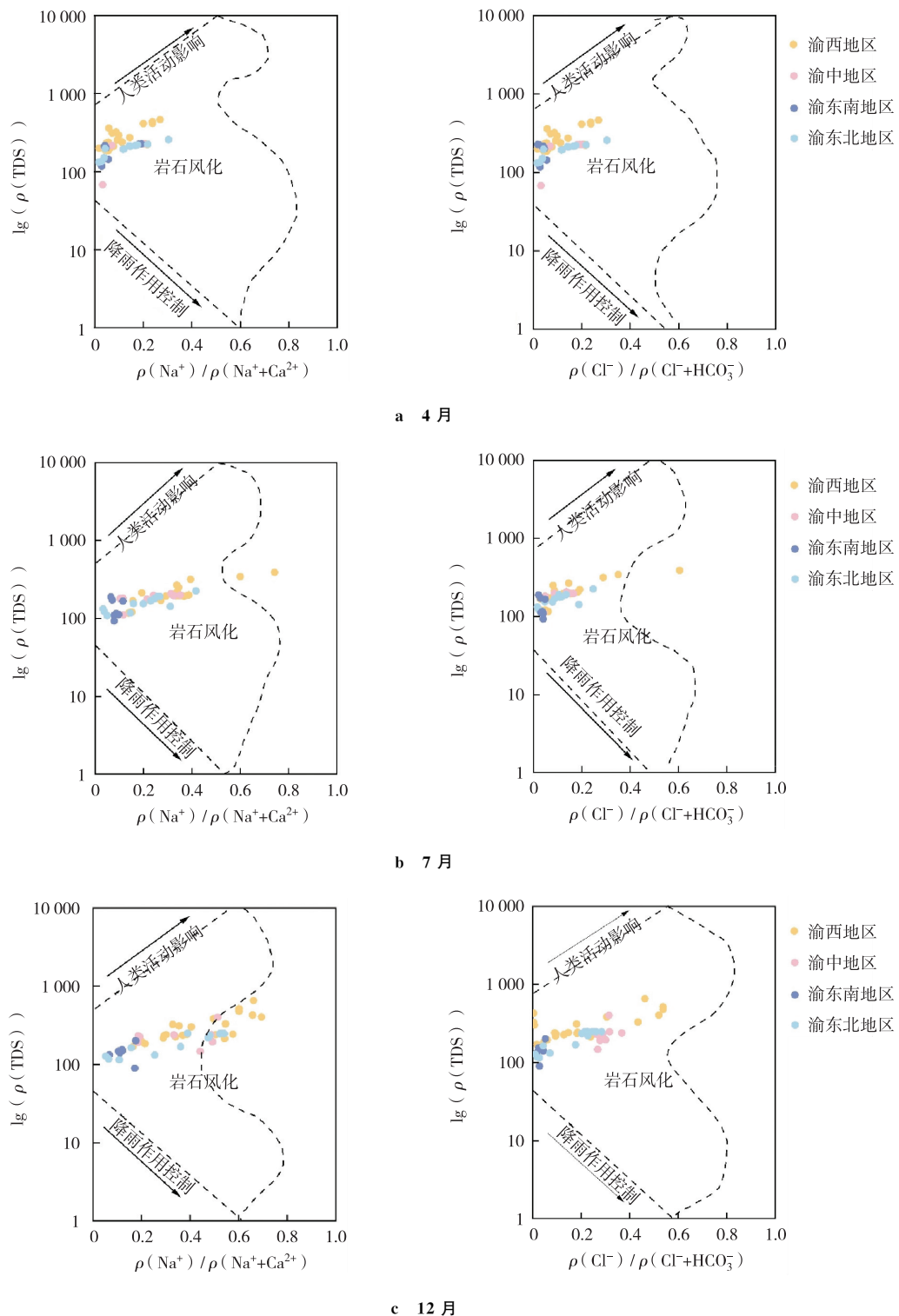


图 4 研究区内各地区地表水主要离子的 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram showing major ion composition of surface water in each subdivision of the study area

在碳酸盐岩地层区发育的地表河流中,溶质成分主要来源于碳酸盐矿物的溶解。根据矿物溶解平衡理论,当水体中的纯方解石或纯白云石达到溶解平衡时, $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Ca}^{2+})$ 的值为 0 或 1;而当水体中的方解石和白云石同时达到溶解平衡时, $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Ca}^{2+})$ 比值则为 0.5^[27],因此,水体中 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Ca}^{2+})$ 的数值变化特征可有效反映流域地层中方解石与白云石的相对含量比及溶解贡献。图 7 显示,在 3 个月份中研究区地表水 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Ca}^{2+})$ 的值均接近 0;这一特征表明研究区地表水溶质成分主要来源于方解石的溶解。结合水化学特征分析可知,方解石的溶解-沉淀过程是控制研究区地表河水化学组成的关键地球化学过程。

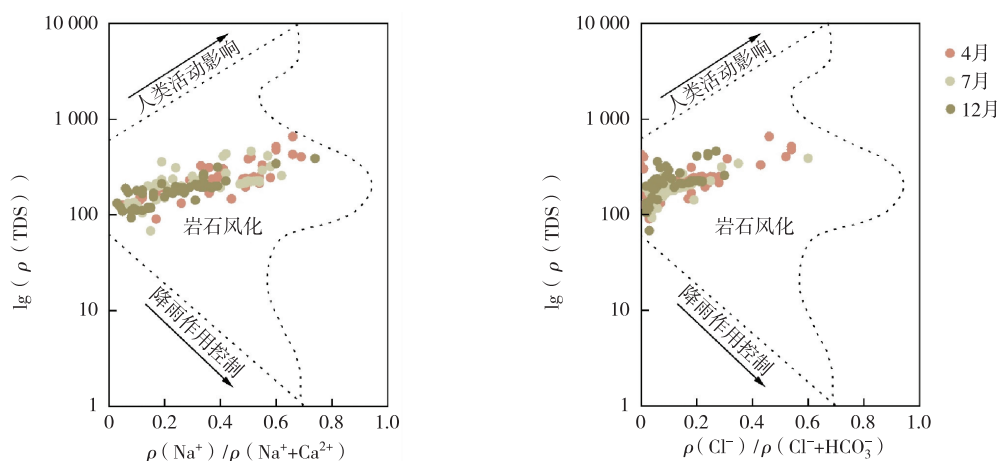
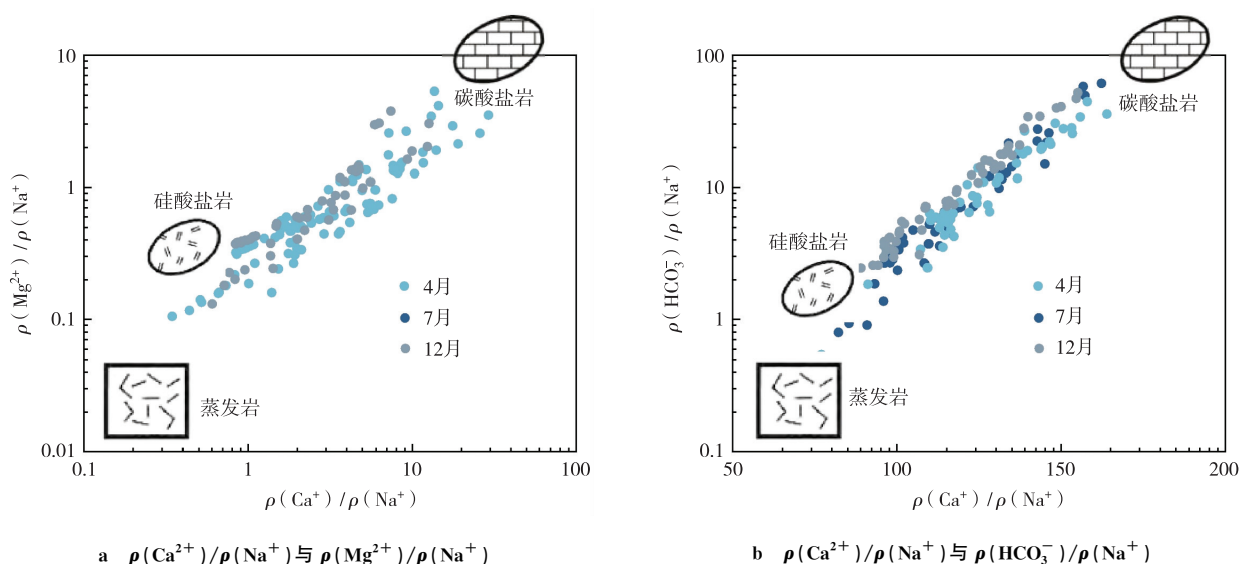
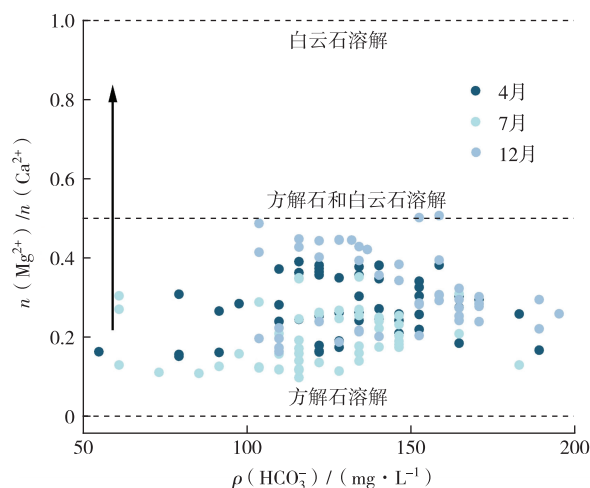


图5 研究区不同月份地表水主要离子的 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs diagram showing major ion composition of total surface water in the study area for different months

a $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{Na}^{+})$ 与 $\rho(\text{Mg}^{2+})/\rho(\text{Na}^{+})$ b $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{Na}^{+})$ 与 $\rho(\text{HCO}_3^{-})/\rho(\text{Na}^{+})$ 图6 研究区 $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{Na}^{+})$ 与 $\rho(\text{Mg}^{2+})/\rho(\text{Na}^{+})$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{Na}^{+})$ 与 $\rho(\text{HCO}_3^{-})/\rho(\text{Na}^{+})$ 的关系Fig. 6 The relationship between $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{Na}^{+})$ and $\rho(\text{Mg}^{2+})/\rho(\text{Na}^{+})$, and between $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{Na}^{+})$ and $\rho(\text{HCO}_3^{-})/\rho(\text{Na}^{+})$ in the study area图7 研究区 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Ca}^{2+})$ 和 $\rho(\text{HCO}_3^{-})$ 的关系Fig. 7 Plot of $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Ca}^{2+})$ and $\rho(\text{HCO}_3^{-})$ relationship in the study area

3.3 人类活动影响下的水化学特征时空变化

由图 8 可知,研究区地表水的化学组成具有明显的地质特征:渝东南地区和渝东北地区地层主要由寒武纪和奥陶纪的碳酸盐岩地层组成;而渝中地区和渝西地区地层主要由二叠纪和三叠纪的地层组成,分布于丘陵和低山区域^[14]。地表水的化学演变过程也受到人类活动的影响,这体现在因工业废水、生活污水和固体废物的排放导致的水化学成分变化。通过 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 和 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 的数值可有效确定不同类型人类活动对水化学特征的影响: $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 值较高表明采矿活动是主要污染源; $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 值较高表明农业活动是主要影响因素^[28-29]。结合图 9 中 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 值普遍比 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 值高的结果可知,在研究区,工矿业活动比农业活动或城市污水排放对地表水溶质组成的影响程度更深,而且这也与野外调查的实际情况相吻合。研究区河流阴离子主要来源也存在一定差异: NO_3^- 主要来自土壤有机氮的矿化、农业施肥、污水排放和大气降水^[30], SO_4^{2-} 主要来自采矿活动, Cl^- 则受到农业活动、生活污水排放等人类活动的影响^[28,31]。此外,在人类活动频繁的地区,地表水中 NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子的浓度明显高于研究区不同地质背景下的水化学平均值^[14],因此在本研究中同样的地质背景条件下,水体中 SO_4^{2-} 浓度偏高可能与人类活动有关。

从不同时间来看,由图 9 可知:1) 4 月研究区 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 高值水样点位较多,表明春季燃煤、金属冶炼等工矿业活动释放的 SO_4^{2-} 随地表水进入与 Ca^{2+} 结合,体现出工矿业活动对研究区地表水水化学特征的明显影响;研究区水样点位的 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 值普遍较低,反映出在农业施肥初期, NO_3^- 输入效果尚未体现,因此水体中的离子比例变化主要受工矿业活动主导。2) 7 月研究区水样中 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 值整体上有所下降,这与夏季强降水稀释了工矿业活动带来的 SO_4^{2-} 以及雨水冲刷土壤使水体中 Ca^{2+} 增加密切相关;同时,水样中 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 值升高,这是由于夏季农业活动频繁, NO_3^- 大量输入河流,农业活动对水体中离子比例的影响增强,故水样点位向农业活动方向偏移。3) 12 月研究区 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 值整体上回升,这与冬季降水较少从而对工矿业排放的 SO_4^{2-} 稀释作用减弱有关;这一时期水样中 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 值下降,这是由于冬季农业活动停滞,因而 NO_3^- 输入量锐减,水体中离子比例更多受工矿业主导。

由于 NO_3^- 和 Cl^- 是人类活动典型指示离子,因此 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 和 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ 的数值被广泛用于量化人类活动对地表水中硝酸盐含量的影响,为区分相关离子来源于自然风化过程还是人为输入提供了有效指标^[32]。此外,在适宜的条件下,土壤和地表水中微生物活动较为旺盛,硝化作用增强,从而加速了土壤中氮元素的转化和迁移。同时,受降水影响,雨季期间地表水中的 NO_3^- 浓度也往往更高^[33]。由图 8 可知,渝东北地区地表水中 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 值较高,表明在对水化学特征存在影响的人类活动中农业活动占据了主导地位。此外, Cl^- 和 SO_4^{2-} 也可能来自石膏和岩盐的溶解或硫化物的氧化。一般来说,当地表水受到人类活动影响时, $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 和 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ 的数值会明显上升^[34];然而渝中地区和渝西地区的地表水具有较高的 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 值,表明工矿业活动在对水化学特征存在影响的人类活动中占据了主导地位。从图 9 则可以看出,研究区水样点位的分布随着时间的变化呈现出一定的趋势:从 4 月到 12 月,图中的水样点位似乎逐渐向人类活动区域(农业活动)靠拢。这表明在采样期间,研究区地表水的水化学特征受人类活动影响的程度逐渐增加。而图 8 也显示,研究区地表水 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 值较大而 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ 值则稍微偏小,所有水样点位均落在盐岩以及碳酸盐岩附近,远离人类活动区域。

4 结束语

本研究在系统分析了于 2023 年 4 月、7 月和 12 月采集自重庆市多地的 54 个地表水样品理化性质的基础上,研究了重庆市地表水的水文地球化学特征和时空变化规律,以及自然因素与人类活动对重庆市地表水的水化学组成的影响,得到以下主要结果。

1) 重庆市地表水体离子组分特征整体上受岩石风化作用主导。Gibbs 图分析结果显示,4 月、7 月和 12 月重庆市各区域水样点位均集中于岩石风化控制区, $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 值或 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值不高于 0.5, TDS 的质量浓度处于中等水平,表明其中的离子主要来源于岩石风化释放。

2) 监测数据显示,重庆市地表水的电导率, Ca^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等主要离子及 TDS 的质量浓度均表现

为雨季(7月)明显低于旱季(4月和12月),这与雨季降水量增大带来的稀释效应直接相关。同时,水体的 pH 整体维持在弱碱性范围(7.69~9.34),水化学类型以 Ca-HCO_3 型或 Ca(Mg)-HCO_3 型为主,季节间类型变化不明显,表明降水补给对水化学类型的总体影响较为稳定。

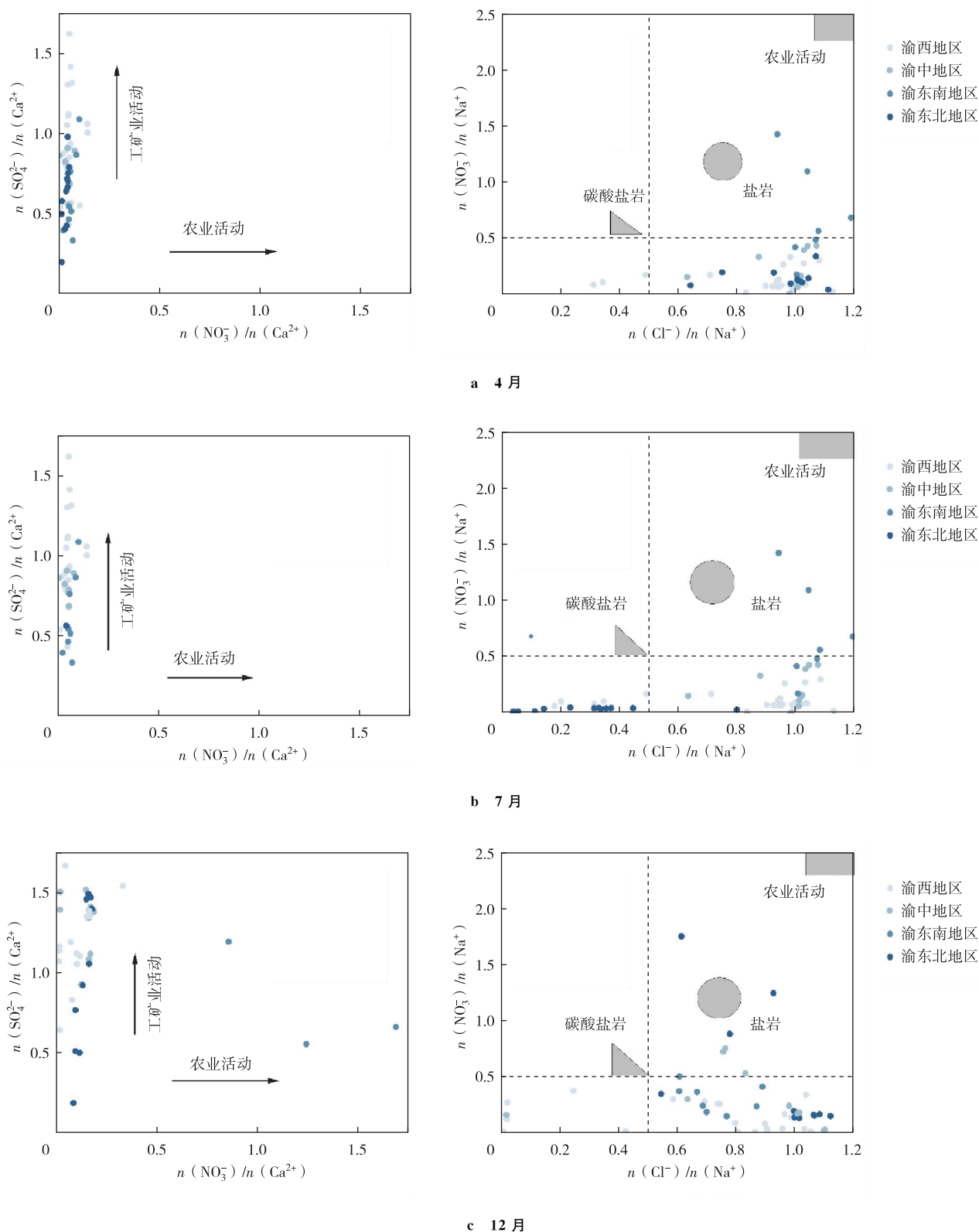


图8 研究区内各地区 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 与 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 和 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 与 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ 的关系

Fig. 8 Relationships of $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ versus $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ and $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ versus $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ in each subdivision of the study area

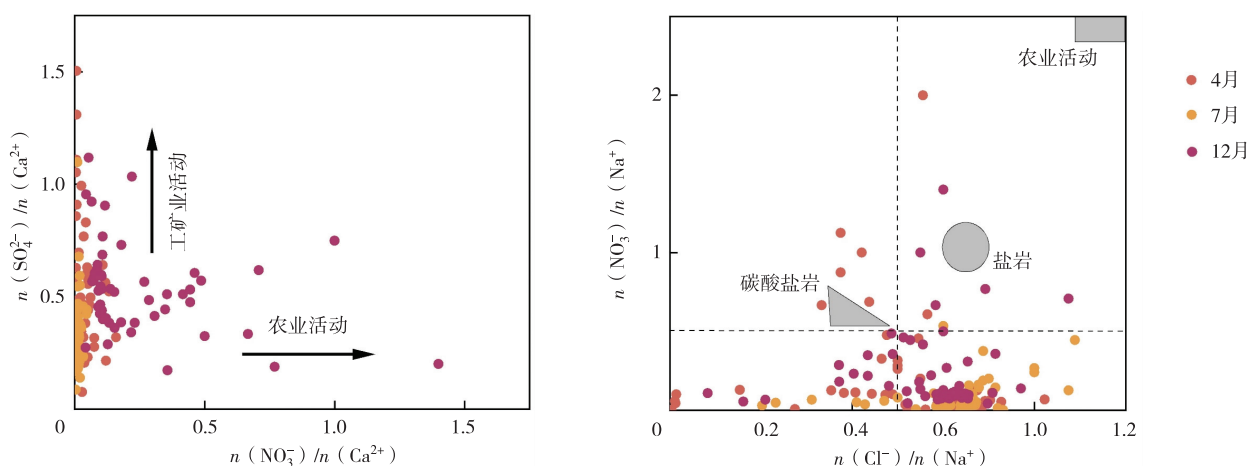


图 9 研究区不同月份 $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 与 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 和 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 与 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ 的关系

Fig. 9 Relationships of $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ versus $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ and $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ versus $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ in the study area for different months

3) 从空间角度来看,渝东南地区和渝东北地区因碳酸盐岩广泛出露从而地表水阳离子中 Ca^{2+} 占比较高, HCO_3^- 作为主导阴离子的这一特征尤为突出,方解石的溶解-沉淀过程对水化学组成的控制作用强烈,方解石饱和指数与白云石饱和指数的相关性分析显示区域内水体中的方解石和白云石多处于饱和状态,指示其中存在充分的水岩相互作用;渝西地区及渝中地区的地表水的水化学组成由于受到人类活动干扰因而其中 Ca^{2+} 占比相对降低,离子组成更加复杂。从时间角度来看,7月受雨季降水稀释效应影响,研究区地表水中 TDS 及 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 等离子的质量浓度较4月和12月时有所下降;12月因蒸发浓缩效应,研究区地表水中离子质量浓度回升,碳酸盐岩风化对水化学特征的主导性更加明显。 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Ca}^{2+})$ 与 $n(\text{HCO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 的关系表明,3个月份中研究区地表水的溶质离子组分均以碳酸盐岩溶解为主要来源,且碳酸盐岩风化过程的季节动态变化受水文条件(降水和蒸发)调控。

4) 人类活动对研究区地表水水化学特征的影响呈现明显的空间与时间差异。从空间角度来看,渝西地区及渝中地区地表水 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 较高, $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 值明显偏高,体现了当地工矿业活动在对水化学特征存在影响的人类活动中发挥了主导作用;渝东南地区和渝东北地区地表水 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 值较高,与当地农业施肥导致的硝酸盐输入有关;渝中地区地表水受城市生活污水影响,其中的 Cl^- 占比局部上升,呈现复合型人类活动干扰特征。从时间角度来看,4月研究区工矿业活动释放的 SO_4^{2-} 随地表径流迁移, $n(\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Ca}^{2+})$ 值在区内普遍较高;7月降水冲刷加剧了研究区农业面源污染, NO_3^- 输入量增加,地表水中 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Ca}^{2+})$ 值上升;12月因农业活动停滞及工矿业排放相对稳定,地表水中 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 回升, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 下降,人类活动对水化学特征的影响以工矿业活动为主导。此外,作为人类活动的特征离子, Cl^- 和 NO_3^- 在研究区内的空间分布与城镇、工矿及农业区的分布高度吻合,进一步证实了人类活动对研究区地表水水化学特征的影响。

参考文献:

- [1] Tang C G, Liu C Q. Characteristics and driving factors of surface water chemistry of Wujiang Watershed[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64 (5): 1445-1453.
- [2] 黄奇波,覃小群,刘朋雨,等. 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2016, 37 (5): 1779-1787.
Huang Qibo, Qin Xiaoqun, Liu Pengyu, et al. Major ionic features and their controlling factors in the upper-middle reaches of Wujiang River[J]. Environmental Science, 2016, 37 (5): 1779-1787.
- [3] Pant R R, Zhang F, Rehman F U, et al. Spatiotemporal variations of hydrogeochemistry and its controlling factors in the Gandaki River Basin, Central Himalaya Nepal[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622: 770-782.

- [4] Jiang L G, Yao Z J, Liu Z F, et al. Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 155: 76-83.
- [5] 赵阳, 赵衡, 王富强, 等. 怒江源区那曲河水化学特征的多元统计分析[J]. *华北水利水电大学学报 (自然科学版)*, 2020, 41 (2): 63-71.
- Zhao Yang, Zhao Heng, Wang Fuqiang, et al. Multivariate statistical analysis of the hydrochemical characteristics of the Naqu River in the source region of the Nujiang River[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2020, 41 (2): 63-71.
- [6] 刘健, 廉勇, 苏绘梦, 等. 沙颍河流域丰水期地表水水化学特征及主要离子来源分析[J]. *安全与环境工程*, 2025, 32 (4): 224-234.
- Liu Jian, Lian Yong, Su Huimeng, et al. Hydrochemical characteristics and main ion sources of surface water in Shaying River Basin during the abundant season[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2025, 32 (4): 224-234.
- [7] 乐嘉祥, 王德春. 中国河流化学特征[J]. *地理学报*, 1963, 18 (1): 1-13.
- Le Jiaxiang, Wang Decun. Hydrochemical characteristics of rivers in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1963, 18 (1): 1-13.
- [8] 刘敏, 赵良元, 李青云, 等. 长江源区主要河流水化学特征、主要离子来源[J]. *中国环境科学*, 2021, 41 (3): 1243-1254.
- Liu Min, Zhao Liangyuan, Li Qinyun, et al. Hydrochemical characteristics, main ion sources of main rivers in the source region of Yangtze River[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41 (3): 1243-1254.
- [9] 张旺, 王殿武, 雷坤, 等. 黄河中下游丰水期水化学特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, 27 (1): 380-386.
- Zhang Wang, Wang Dianwu, Lei Kun, et al. Hydrochemical characteristics and impact factors in the middle and lower reaches of the Yellow River in the wet season[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27 (1): 380-386.
- [10] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159 (1/2/3/4): 3-30.
- [11] Hu M H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers[J]. *Nature*, 1982, 298 (5874): 550-553.
- [12] 张丽, 陈永金, 刘加珍, 等. 东平湖水化学特征及成因分析[J]. *环境化学*, 2021, 40 (5): 1490-1502.
- Zhang Li, Chen Yongjin, Liu Jiazhen, et al. Analysis on hydrochemical characteristics and causes of Dongping Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40 (5): 1490-1502.
- [13] 黄皓东, 宋韬, 严笑芸, 等. 四川黄龙沟地表水系统水化学空间变化特征研究[J]. *化工矿物与加工*, 2020, 49 (8): 43-47.
- Huang Haodong, Song Tao, Yan Xiaoyun, et al. Study on the spatial variation characteristics of hydrochemistry in the surface water system of Huanglong Ravine, Sichuan Province[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2020, 49 (8): 43-47.
- [14] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下河水文地球化学特征及环境意义[J]. *水科学进展*, 2010, 21 (5): 628-636.
- Pu Junbin, Yuan Daoxian, Jiang Yongjun, et al. Hydrogeochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21 (5): 628-636.
- [15] 慈恩, 唐江, 连茂山, 等. 重庆市紫色土系统分类高级单元划分研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (3): 569-584.
- Ci En, Tang Jiang, Lian Maoshan, et al. Higher category partition for purple soils in Chongqing in Chinese soil taxonomy [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (3): 569-584.
- [16] 沈泰宇. 微生物诱导碳酸钙沉积固化砂质黏性紫色土试验研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- Shen Taiyu. Experimental study on solidification of sandy clayey purple soil by microbial induced calcium carbonate deposition[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [17] 甘燕. 从淋滤液性质看土壤的酸雨危害问题[J]. *西南农业大学学报*, 1988, 10 (1): 47-54.
- Gan Yan. Investigation on the endangers of acid rain to soils from the solution of leaching columns[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1988, 10 (1): 47-54.
- [18] 李士杏. 重庆市紫色土酸化现状及机理研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2003.
- Li Shixin. Acidification status of purple soil and its mechanism in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2003.

- [19] 谭孟溪, 刘莉, 王朋顺, 等. 微地形作用下紫色母岩发育土壤的酸化特征[J]. 土壤学报, 2018, 55 (6): 1441-1449.
Tan Mengxi, Liu Li, Wang Pengshun, et al. Effect of microtopography on the acidification characteristics of soils developed from purple parent rock[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (6): 1441-1449.
- [20] 张杰, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2021, 42 (4): 1706-1713.
Zhang Jie, Zhou Jinlong, Zeng Yanyan, et al. Hydrochemical characteristic and their controlling factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang[J]. Environmental Science, 2021, 42 (4): 1706-1713.
- [21] 赵增锋, 王楚尤, 邱小琮, 等. 宁夏清水河流域地表水水化学特征及高氟水成因机制[J]. 地学前缘, 2024, 31 (6): 462-473.
Zhao Zengfeng, Wang Chuyou, Qiu Xiaocong, et al. Hydrochemical characteristics of surface water and genetic mechanism of high fluorine water in Qingshui River Basin in Ningxia[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31 (6): 462-473.
- [22] 郎赞超, 刘丛强, 赵志琦, 等. 贵阳市地表水地下水化学组成: 喀斯特水文系统水-岩反应及污染特征[J]. 水科学进展, 2005, 16 (6): 826-832.
Lang Yunchao, Liu Congqiang, Zhao Zhiqi, et al. Chemical compositions of surface and ground waters of Guiyang City: discussion of water-rock interaction and contamination in karstic hydrological system[J]. Advances in Water Science, 2005, 16 (6): 826-832.
- [23] Singh K P, Malik A, Singh V K, et al. Chemometric analysis of groundwater quality data of alluvial aquifer of Gangetic plain, North India[J]. Analytica Chimica Acta, 2005, 550 (1/2): 82-91.
- [24] Helena B, Pardo R, Vega M, et al. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis[J]. Water Research, 2000, 34 (3): 807-816.
- [25] 翁昊璐, 慈恩, 连茂山, 等. 重庆市酸性紫色土成因及其对发生分类的意义[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41 (9): 32-39.
Weng Haolu, Ci En, Lian Maoshan, et al. The origin of acidic purple soil in Chongqing and its significance for soil genetic classification[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 41 (9): 32-39.
- [26] Gimingham C T. The formation of calcium carbonate in the soil by bacteria[J]. The Journal of Agricultural Science, 1911, 4 (2): 145-149.
- [27] Smart P L. Geomorphology and hydrology of karst terrains. W. B. WHITE Publisher Oxford University Press 1988
£35.00 (464pp) ISBN 0195044444[J]. Journal of Quaternary Science, 1989, 4 (2): 186-187.
- [28] Sanders L L. Natural groundwater quality[J]. Groundwater, 2008, 46 (6): 793.
- [29] 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 (3): 1429-1439.
Liu Yuanqing, Zhou Le, Lü Lin, et al. Hydrochemical characteristics and control factors of pore-water in the middle and upper reaches of Muwen River[J]. Environmental Science, 2023, 44 (3): 1429-1439.
- [30] 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 等. 无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2022, 43 (1): 220-229.
Li Shujian, Han Xiao, Wang Wenhui, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water and groundwater in Wuding River Basin[J]. Environmental Science, 2022, 43 (1): 220-229.
- [31] 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 等. 鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2019, 40 (3): 1236-1244.
He Jin, Zhang Youkuan, Zhao Yuqing, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of groundwater in the xialatuo basin section of the Xianshui River[J]. Environmental Science, 2019, 40 (3): 1236-1244.
- [32] Guo Y L, Zhang C, Xiao Q, et al. Hydrogeochemical characteristics of a closed karst groundwater basin in North China [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020, 325 (2): 365-379.
- [33] Vitòria L, Soler A, Canals À, et al. Environmental isotopes (N, S, C, O, D) to determine natural attenuation processes in nitrate contaminated waters; example of Osona (NE Spain) [J]. Applied Geochemistry, 2008, 23 (12): 3597-3611.
- [34] 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 等. 汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2022, 43 (10): 4440-4448.
Zhao Chunhong, Shen Haoyong, Wang Zhiheng, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics in the surface water of the Fenhe River Basin and influence factors[J]. Environmental Science, 2022, 43 (10): 4440-4448.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area**Temporal Variation and Influencing Factors of Major Ions in Surface Water of Chongqing**

WANG Feng, CHEN Peng, XI Ningzhe, ZHANG Tao

(Chongqing Key Laboratory of Mountain Ecosystem Carbon Cycle and Carbon Regulation,

College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: This study collected surface water samples from Chongqing in April, July, and December 2023 for physicochemical analysis. By integrating methods such as Piper trilinear diagrams, Gibbs semi-logarithmic plots, and ion ratio analysis, it aims to reveal the hydrogeochemical characteristics and spatiotemporal variation patterns of surface water in Chongqing, as well as the impacts of natural factors and human activities on its chemical composition. Results show that the pH of water samples across the three months is generally weakly alkaline. The dominant cation in Chongqing's surface water is Ca^{2+} , while the primary anion is HCO_3^- . The majority of regions exhibit a Ca-HCO_3 or Ca (Mg)-HCO_3 hydrochemical type. Overall, the hydrochemical characteristics of surface water in the study area are primarily influenced by evaporation-crystallization and rock weathering, and the ions are mainly derived from rock weathering. Seasonal variations reveal significant changes in the mass concentrations of cations and anions, total dissolved solids, and electrical conductivity, generally showing lower values during the rainy season compared to the dry season, mainly due to the increased rainfall during the rainy season. Spatially, higher NO_3^- concentrations are observed in southeastern and northeastern Chongqing, closely associated with agricultural activities; whereas elevated SO_4^{2-} levels in western and central Chongqing are primarily linked to industrial activities. Overall, the concentrations of dominant ions Ca^{2+} and HCO_3^- are mainly controlled by rock weathering, while SO_4^{2-} , NO_3^- , and Cl^- are significantly affected by various human activities, exhibiting distinct spatiotemporal patterns. These findings provide valuable insights for water resource protection and pollution control in Chongqing, contributing to improved water quality and sustainable urban development.

Keywords: surface water; spatiotemporal variation; Chongqing; hydrochemistry

(责任编辑 方 兴)