



引文格式: 朱娅娣, 王瑞媛, 李东泽, 等. 汾河流域汛期地表水水化学组成特征及其成因[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 254-261. DOI: 10.12401/j.nwg.2023161

Citation: ZHU Yadi, WANG Ruiyuan, LI Dongze, et al. Hydrochemical Characteristics of Surface Water in Flood Season, Chan River Basin[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 254-261. DOI: 10.12401/j.nwg.2023161

汾河流域汛期地表水水化学组成特征及其成因

朱娅娣, 王瑞媛*, 李东泽, 许志平, 孙康

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 为研究汾河流域汛期地表水水化学特征及离子来源, 完善区域水资源管理合理化的建议, 共采集汾河流域地表水样 10 份, 结合空间分布图、Piper 三角图、Gibbs 图、离子相关分析等方法, 分析了汾河流域水化学特征、空间差异特征、主要离子来源及控制因素。结果表明: ①汾河流域汛期水体整体呈弱碱性, TDS 均值低于同流域枯水期均值但高于全球河流均值。②优势阳离子为 Ca^{2+} 和 Na^+ , 优势阴离子为 HCO_3^- , 水化学类型以 Na-HCO_3 为主, 整体上主要离子含量呈现 ES 低 WN 高的趋势。③汾河流域主要受硅酸盐岩风化的控制作用, 且存在受蒸发岩溶解影响的情况。同时, 本研究也为开采和保护源头水、发展用于工业的中游水, 警惕下游水发生污染事件, 合理利用水资源, 解决西安缺水问题等方面提供参考。

关键词: 汾河流域; 汛期; 水化学特征; 控制因素; 离子来源

中图分类号: P322.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0254-08

Hydrochemical Characteristics of Surface Water in Flood Season, Chan River Basin

ZHU Yadi, WANG Ruiyuan*, LI Dongze, XU Zhiping, SUN Kang

(School of Geography and tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the water chemistry characteristics and ion sources of surface water in the Chan River basin during the flood season and to add suggestions to rationalize local water resources management, a total of 10 surface water samples were collected from the Chan River basin and combined with spatial distribution maps, Piper triangles, Gibbs plots and ion correlation analysis to analyze the water chemistry characteristics, spatial variation characteristics, major ion sources and controlling factors in the Chan River basin. The results show that the Chan River basin is weakly alkaline during the flood season, with mean TDS values lower than the mean values during the dry season in the same basin but higher than the global river mean values. The dominant cations are Ca^{2+} and Na^+ , the dominant anion is HCO_3^- , and the water chemistry type is dominated by Na-HCO_3 , with an overall trend of low southeast to high northwest content of the major ions. The Chan River basin is mainly controlled by the weathering of silicate rocks and is subject to the influence of evaporite dissolution. In

收稿日期: 2022-10-01; 修回日期: 2023-08-15; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 陕西省博士后科学基金“汾河流域黄土次生碳酸盐的溶蚀过程与碳汇效应”(2016BSHEDZZ27)、西安市科技局软科学项目“绿色发展理念下秦岭北麓矿山生态环境破坏的精细化识别与创新修复模式研究”(22RKYJ0039)联合资助。

作者简介: 朱娅娣(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境评价与治理。E-mail: zhuyadi@snnu.edu.cn。

* 通讯作者: 王瑞媛(1981-), 实验师, 主要研究方向环境污染研究。E-mail: wangry@snnu.edu.cn。

order to address the water shortage issue in Xi'an, we must simultaneously exploit and safeguard source water, develop midstream water for industrial use, prevent pollution events in downstream water, and utilize water resources intelligently.

Keywords: Chan River Basin; flood season; hydrochemical characteristic; control factors; ion source

水化学特征分析作为水文地球化学过程的基础研究,表征了流域在其演化过程中与环境相互作用的结果(胡甜等, 2022),对研究流域内主要离子的控制因素及水质评价(王彦国, 2021)有指示意义。不少学者(张杰等, 2021; 李果等, 2022; 张嘉欣等, 2022; 赵春红等, 2022; 赵倩等, 2022)将 Gibbs 图和水化学特征分析结合起来,用以分析自然因素(岩石风化、大气沉降、蒸发结晶)和人类活动对流域的作用强弱,不可否认的是,人类活动对流域内主要离子组成的影响越来越重,进而影响人类生存和发展。可见,探究水化学特征,对当地的水资源管理合理化具有重要意义(白福等, 2007)。

泾河地处陕西西安,是西安市内为数不多的连接城区和县城的河流,为当地的经济和农业发展提供了不可替代的水源保障。但由于城市化建设、美丽乡村建设以及对水资源的不合理开发,使其流域在人类活动和自然因素的多重影响下产生一系列生态环境问题(高榕等, 2008)。截止目前,学者对该流域的关注多集中在水质情况(蒋亦媛等, 2014; 杨媛媛等, 2022)、氮污染(邢萌等, 2010)等方面,且研究范围集中在局部区域,对与居民生活息息相关的整个流域内水化学特征变化关注颇少。因此,本研究选取对泾河流域汛期地表水水化学开展研究,探讨泾河水化学特征、主要离子来源及控制因素,旨在为泾河流域生态综合整治与水资源利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泾河是灞河最大的一级支流,发源于蓝田县秦岭高山地带,流向从南向北,最终在灞桥区注入灞河,全长 64 km,流域面积 760 km²,共有 3 条支流,呈树状分布。属于暖温带大陆性季风气候(王博等, 2018),年均降雨量约为 600 mm,多集中在 6~9 月。泾河在雁塔区年均流量 1.75 亿 m³,最大洪峰流量 632.5 m³/s,丰枯悬殊,但年利用量较低,仅占流量的 1%;在灞桥区年均流量 1.75 亿 m³,年均输沙量 250 万 t。

1.2 样品采集与处理

考虑季节效应,以 2021 年 1 月和 2021 年 7 月两个月份,代表泾河流域枯水期和汛期,并选取 10 个采样点(编号为 X1-X10, 图 1)进行两次采样。水样采集瓶使用 500 mL 聚乙烯瓶,采样前保证清洁干燥,采样时用水样多次润洗,采样后立即封口,送回实验室,避光、放入冰箱保存,并在样品收集的后一天进行测定(使用前用 0.45 μm 的滤膜进行过滤)。采集水样时,选择在有明显水流处的河流中间,且在河面下 0.1 m 左右采样。现场使用便携式多参数仪和水质检测笔测定水温、pH 和 TDS 值,利用滴定法现场测定 HCO₃⁻。阳离子(Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)采用德国 Spectro 全谱等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定;阴离子(Cl⁻、SO₄²⁻和 NO₃⁻)采用美国戴安离子色谱仪(ICS-1500)测定,阴阳离子的测定误差低于 0.1%。以上实验均在陕西师范大学地理科学与旅游学院实验中心完成。

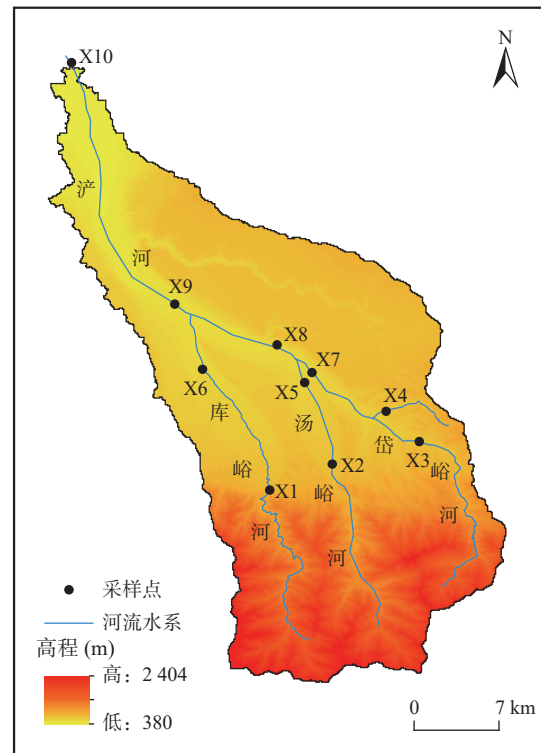


图1 泾河流域采样点位置示意图

Fig. 1 Chan River Basin sampling site location diagram

根据汾河流域地表水水化学参数的测定数据,利用 Spss、Origin、Excel、Arcgis 等数据分析方法及作图软件,探析研究区域水体水化学特征及其成因。

2 结果与讨论

2.1 主要离子特征

汾河流域汛期地表水的 pH 平均值在 8 以上

(表 1),整体呈弱碱性。汾河流域汛期各离子的浓度变化范围(图 2),结合表 1,研究区地表水中 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 离子浓度的均值依次为 66.04、90.66、12.81、14.90、7.22、15.29、33.53、133.84 mg/L,其中阳离子是以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主,阳离子浓度均值大小呈: $Na^+ > Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+}$; 阴离子以 HCO_3^- 为主,离子浓度均值大小呈: $HCO_3^- > NO_3^- > Cl^-$ 的关系。

表 1 汾河流域地表水水化学参数统计

Tab. 1 Statistics on surface water chemistry parameters in the Chan River basin

河流	pH	ρ (TDS)	ρ (Ca^{2+})	ρ (Na^+)	ρ (Mg^{2+})	ρ (K^+)	ρ (Cl^-)	ρ (SO_4^{2-})	ρ (NO_3^-)	ρ (HCO_3^-)
汾河 汛期	8.74	145.50	66.04	90.66	12.81	14.90	7.22	15.29	33.53	133.84
汾河 枯水期 (朱娅娣等, 2022)	8.90	236.50	86.63	21.78	15.37	18.29	19.90	26.84	63.77	137.75
全球河流均值 (Gaillardet j DBLP, 1999)	-	100	8	4.7	2.4	0.1	3.9	4.9	1	30.5

注:水化学参数中除 pH,其余参数单位均为 mg/L。

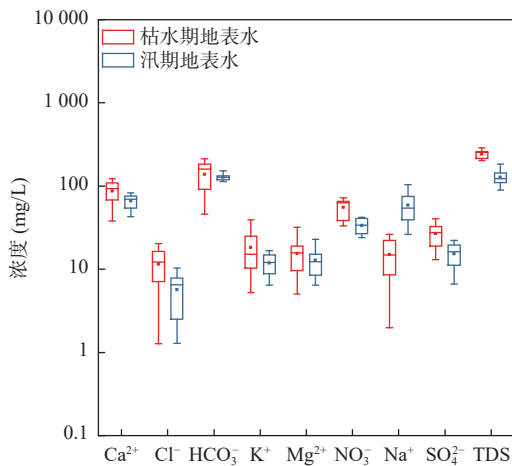


图 2 汾河流域地表水浓度变化箱形图

Fig. 2 Box plot of surface water concentration changes in the Chan River Basin

将汾河流域汛期地表水主要离子浓度与该流域枯水期及全球河流均值进行对比,发现汛期的 TDS 含量远高于全球河流均值,约是全球河流均值的 2 倍,但低于同流域枯水期的 TDS 含量,其原因可能在于汛期降雨集中,雨水稀释了河流中主要离子总含量;与枯水期相比,汛期 Na^+ 含量变多, Cl^- 含量减少,表明汛期水体受以钠长石为主的硅酸盐岩风化作用强烈; NO_3^- 含量降低,且具有高 NO_3^-/Cl^- 低 Cl^- 、高 Cl^- 低 NO_3^-/Cl^- (Chen Z X et al., 2013) 的特征,表明汛期因受降水影响,土壤淹水,产生厌氧环境,抑制作物光合作用,消减了土壤呼吸对氮肥的响应,因此 NO_3^- 含量相应变少。

2.2 水化学类型

汾河流域汛期地表水 Piper 三线图见图 3。阳离子三角图中,多数样点远离 Mg^{2+} 端,多集中在 $(Na^+ + K^+)$

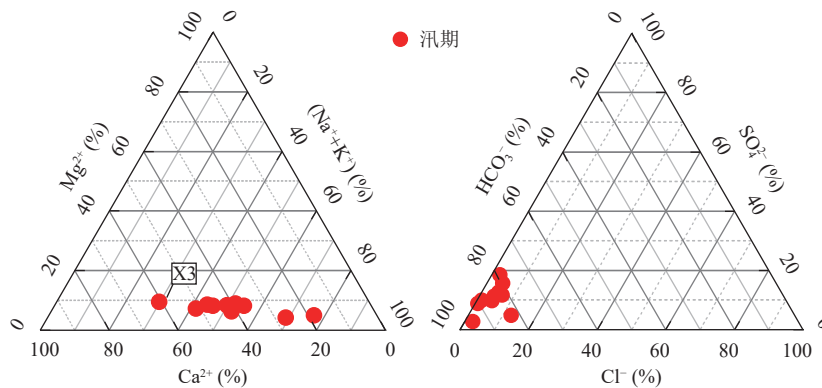


图 3 汾河流域汛期地表水 Piper 三线图

Fig. 3 Piper trilinear map of surface water in the Chan River basin during the flood season

端,且主离子为 Na^+ , 阴离子以 HCO_3^- 为主, 占总阴离子含量的 80%~95%。值得注意的是 X3 是以 Ca^{2+} 为主导阳离子的样点。综上, 除 X3 样点是 Ca-HCO_3 型外, 其余样点的水化学类型均为 Na-HCO_3 型。

2.3 空间差异分析

在空间分布上, TDS 含量从上游到下游呈现上升的趋势(图 4), 下游靠近市区, 属于人类活动敏感区, 其中 X10 是沂河汇入濰河的出水口, TDS 含量最高, 为 303 mg/L。4 大阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+)和 Cl^- 含量整体上呈 ES 低 WN 高的趋势, SO_4^{2-} 含量中部高两边低, HCO_3^- 含量除 X3 外整体上变化不大。 NO_3^- 可以反映人类活动对研究区域的影响(李书鉴等, 2022), X5 和 X7 的硝酸盐污染较其他样点高, 原因在于这两个样点的土地利用类型为农田类型, 汛期降雨频繁, 雨水将农田里的化肥、粪便冲刷至河流中(Ji W et al., 2021), 使其 NO_3^- 含量增加。

笔者进一步统计了沂河流域各采样点的流速(表 2)。上游的流速(X1、X2、X3、X4)平均值约为 0.62 m/s; 中游的流速(X5、X6、X7、X8、X9)平均值约为 0.91 m/s; 下游的流速(X10)平均值约为 0.20 m/s, 呈现中游流速快上下游流速慢且上游流速大于下游流速的特点。结合离子浓度来看, 下游流速慢, 但主要离子(TDS、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^-)浓度都偏高, 说明流速慢的地方水中离子更容易聚集; 中游流速最快, 主要离子浓度处于中等水平; 上游流速较快, 除 SO_4^{2-} 以外其余离子浓度处于中等及中等偏下水水平, 说明流速快的地方, 离子浓度相对来说中等, 这可能是因为流速快会带走此处的离子, 但又因为其他因素(降水、人类活动)的限制, 还有不少的离子存在。值得注意的是, 无论是流速快的地方还是流速慢的地方, SO_4^{2-} 的变化不明显, 说明流速不是影响其变化的主要因素。

表 2 沂河流域各采样点流速统计

Tab. 2 Flow rate statistics for each sampling site in the Chan River basin

采样点编号	流速(m/s)	采样点编号	流速(m/s)
X1	0.16	X6	0.55
X2	0.53	X7	1.55
X3	1.09	X8	0.35
X4	0.7	X9	0.90
X5	1.18	X10	0.20

综上, 除 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 HCO_3^- 外, 沂河流域主要离子在出水口含量均为最高, 说明支流汇流后离子聚集

作用大于河流溶质稀释作用, 且下游流速慢, 加大了离子聚集作用。值得注意的是, X9 为沂河 3 条支流汇入干流后的控制点, 其主要离子含量也比支流上的含量高, 更加证明干流离子聚集明显。同时, 也可以看出河流流速对水中离子浓度有一定程度的影响。

2.4 主要离子来源及控制因素分析

2.4.1 水化学控制因素

借助 Gibbs 图可以判断水体离子的主要控制类型(孙龙等, 2022; 韩朝辉等, 2023)。水化学组成的因素主要分为大气沉降、岩石风化、蒸发-结晶、人类活动 4 大类, 沂河流域样点主要分布在岩石风化区, 个别点分布在人类活动区, 整体上受大气沉降和蒸发-结晶的影响较少(图 5): 上游位于源头山地区, 以片麻岩影响为主, 偏酸性, 且河流流速较快, 受岩石风化影响较大; 中下游为黄土地貌, 偏碱性, 且中游河流流速最快上游流速慢, 受岩石风化和人类活动的共同作用影响。其中, X5 附近有河流改道施工, X7 是沂河在此流域的水位监测点, 故 X5 和 X7 主要离子受人类活动影响较大; 同理, X9, X10 位于人类活动密集区, 人类影响反馈更多。但总体来看, 沂河流域水化学控制因素主要为岩石风化。

利用 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 及 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的关系端元图(延子轩等, 2022)进一步探究岩石风化对沂河流域地表水的贡献。根据沂河流域地表水主要离子计算的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的摩尔比值分别为 1.20、0.21 和 2.43, 水化学特征值处于蒸发岩和硅酸盐岩之间(图 6), 说明研究区域主要受硅酸盐岩风化的控制作用, 且存在受蒸发岩溶解影响的情况。

2.4.2 离子间相关性分析

借助各离子水化学参数相关系数分析来进一步探讨不同种类岩石风化对沂河流域内离子浓度的影响(表 3)。

汛期 TDS 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 极显著相关并与 Ca^{2+} 显著相关, 表明水中离子总浓度与这些离子关系密切。汛期中, Ca^{2+} 与 HCO_3^- 无显著相关, 说明方解石(CaCO_3)对水中离子的贡献较小。汛期离子来源分析图(图 7a、图 7b)进一步证明, 汛期除 X3 外大多样点均高于方解石、白云石的溶解线, 说明方解石、白云石溶解对离子的贡献在个别样点存在, 但总体作用不大, 值得注意的是, X3 既趋近方解石溶解线又在白云石溶解线上, 说明 X3 同时受到白云石和方解石的共同风化作用。 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 无显著相关, 说明石膏(Ca -

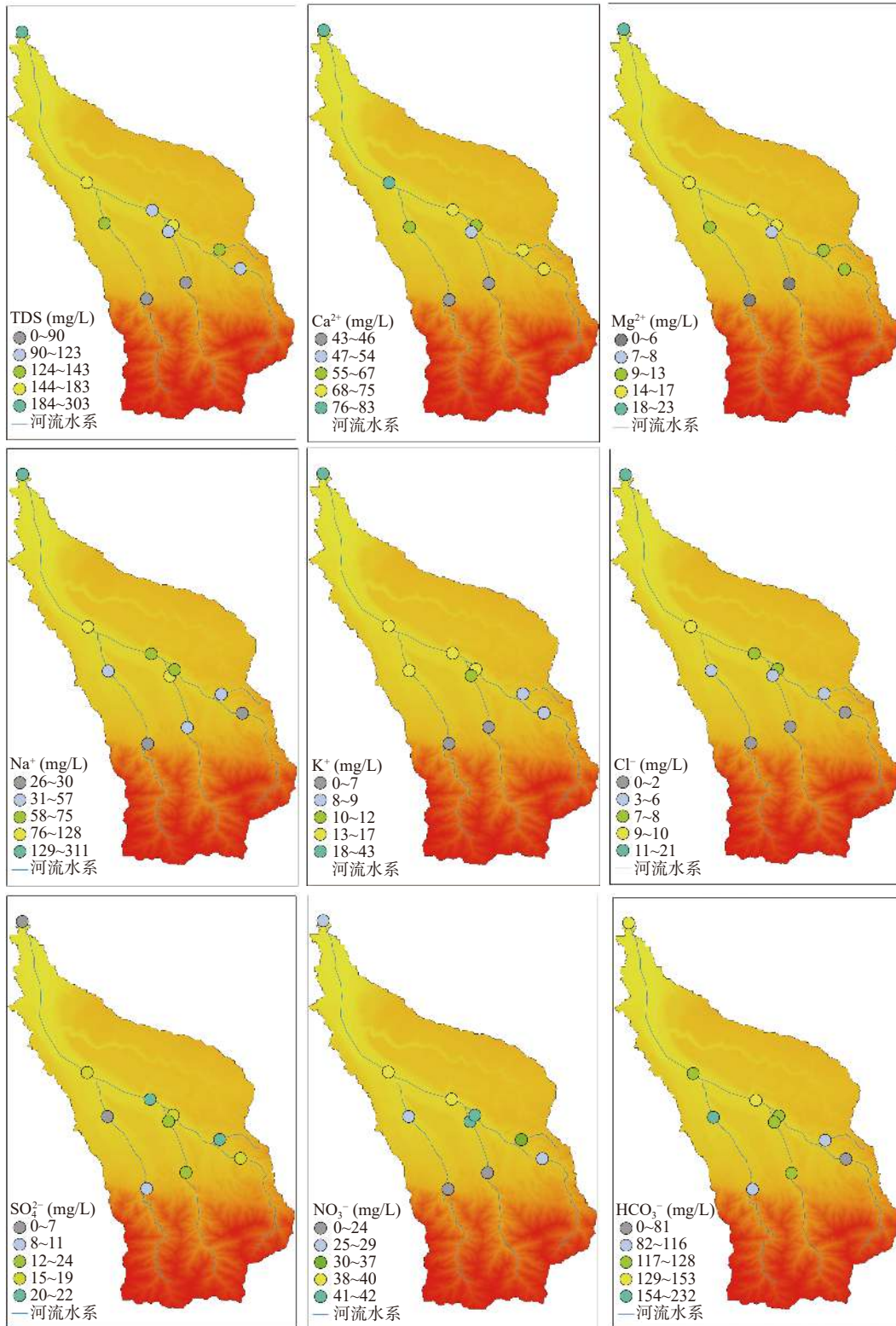


图4 泾河流域汛期地表水主要离子的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of major surface water ions in the Chan River basin during the flood season

SO₄)不参与泾河流域汛期的岩石风化作用。如果水中的离子仅仅来源于白云石、方解石及石膏的风化作用,则水中离子呈现(SO₄²⁻+HCO₃⁻):(Ca²⁺+Mg²⁺)=1:1

的关系,而图7c所示样点均高于1:1,说明HCO₃⁻和SO₄²⁻过剩,而汛期HCO₃⁻和SO₄²⁻与其他离子相关性都不显著,说明其来自人类活动影响较大。除此之外,

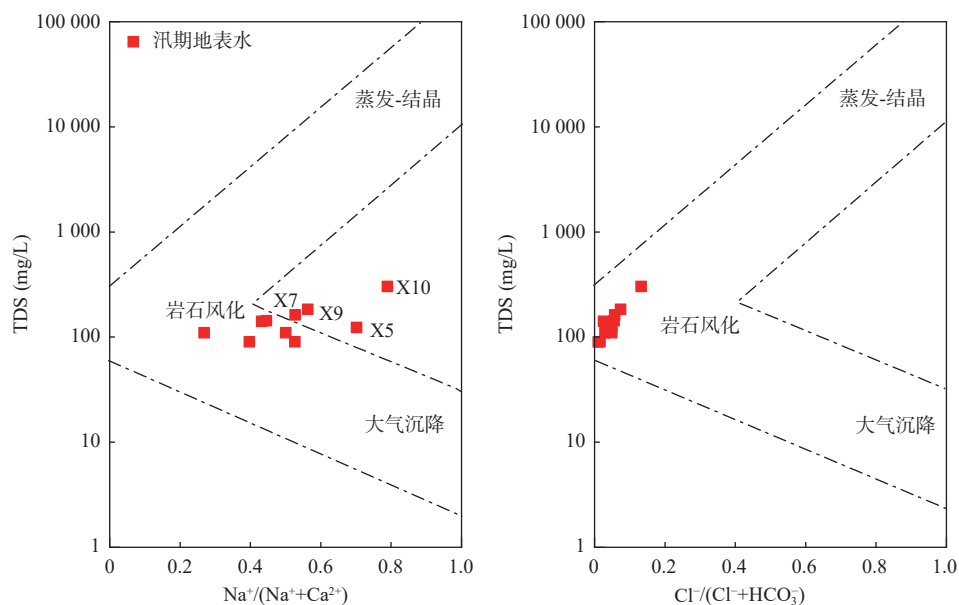


图5 沂河流域汛期地表水 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs map of surface water in the Chan River basin during the flood season

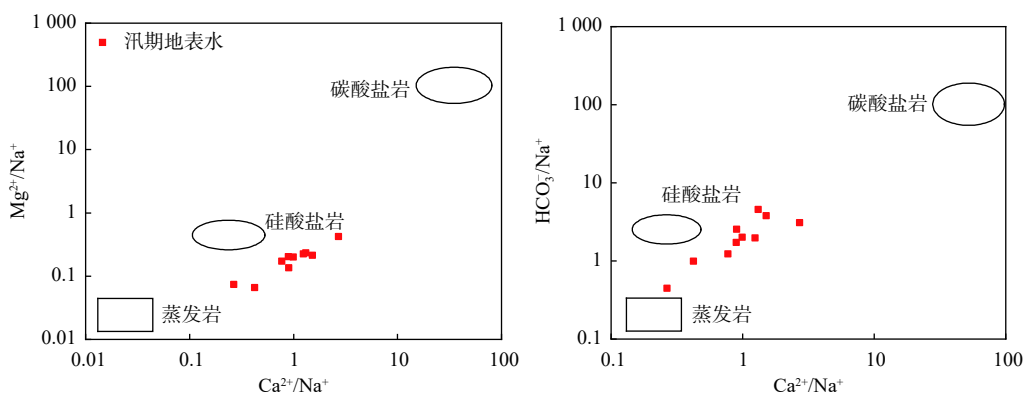


图6 沂河流域汛期地表水 Ca^{2+}/Na^+ 与 Mg^{2+}/Na^+ 及 Ca^{2+}/Na^+ 与 HCO_3^-/Na^+ 的关系

Fig. 6 Ca^{2+}/Na^+ , Mg^{2+}/Na^+ and Ca^{2+}/Na^+ , HCO_3^-/Na^+ in surface waters of the Chan River basin during flood season

表 3 沂河流域汛期地表水水化学参数相关系数分析

Tab. 3 Analysis of correlation coefficients of surface water chemistry parameters in the Chan River basin during the flood season

	TDS	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
TDS									
Ca ²⁺	0.679*								
Na ⁺	0.906**	0.474							
Mg ²⁺	0.884**	0.905**	0.730*						
K ⁺	0.951**	0.626	0.940**	0.846**					
HCO ₃ ⁻	0.137	0.108	0.073	0.139	0.254				
Cl ⁻	0.963**	0.713*	0.937**	0.912**	0.962**	0.187			
SO ₄ ²⁻	-0.298	0.235	-0.378	0.032	-0.431	-0.554	-0.227		
NO ₃ ⁻	0.152	0.419	0.149	0.375	0.068	-0.003	0.295	0.588	

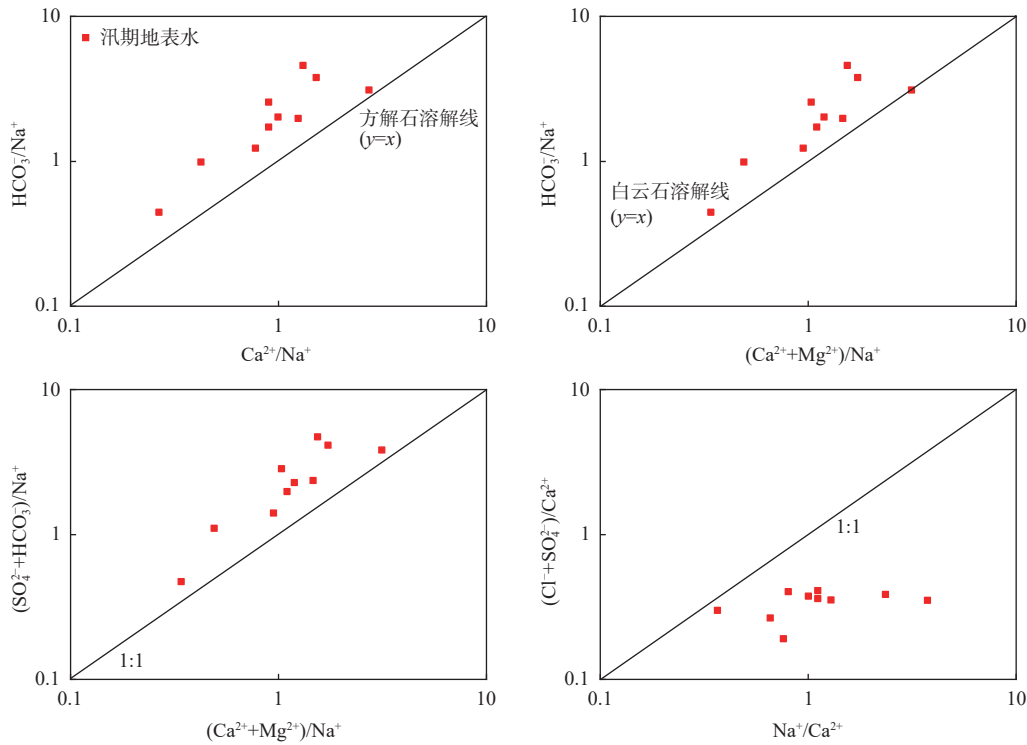


图7 泾河流域汛期离子来源分析图

Fig. 7 Chan River Basin flood ion source analysis map

Na^+ 和 Cl^- 呈极显著相关,相关系数为0.937,说明蒸发盐岩溶解也为泾河流域汛期提供了离子,与上述端元图表征一致。但当地表水的阳离子受流域蒸发岩控制时,其 $(\text{K}^++\text{Na}^+)/\text{Cl}^-$ 当量比值应接近1(许秋瑾等, 2021),而泾河流域地表水的 $(\text{K}^++\text{Na}^+)/\text{Cl}^-$ 当量比值均大于1,说明 Cl^- 不足以平衡 K^+ 和 Na^+ ,过剩的 K^+ 和 Na^+ 还来源于该流域其他岩石的风化作用,即钠长石和钾长石等硅酸盐岩的风化产物。

3 结论

(1)泾河流域水体整体呈弱碱性,均值在8.74;TDS值均值在145.50 mg/L,低于同流域枯水期均值高于全球河流均值。优势阳离子为 Ca^{2+} 和 Na^+ ,优势阴离子为 HCO_3^- 。

(2)泾河流域水化学类型以 Na-HCO_3 为主。Gibbs图、离子间相关性分析等综合研究表明,泾河流域主要受硅酸盐岩风化的控制作用,且存在受蒸发岩溶解影响的情况。

(3)从空间分布来看,4种阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+)和 Cl^- 含量整体上呈ES低WN高的趋势, SO_4^{2-} 含量中部高两边低, HCO_3^- 含量除X3外整体上变化不大。

(4)从开发利用与保护角度来看,靠近源头的山地水受人类活动波动较小,可以用于关中城市生活用水的开采,但要注意保护水源地;中游水受农业、小型工业和生活影响大,可以用于工业发展;下游水受城市影响大,要注意水质,防止水体污染事件发生。

致谢:感谢陕西师范大学邵天杰副教授给予的资金支持,野外工作得到了同课题组的李东泽、许志平、孙康的大力支持;同时感谢实验办王瑞媛老师提供的实验帮助。

参考文献(References):

- 白福,杨小荟.河西走廊黑河流域地下水化学特征研究[J].西北地质,2007,40(3):105-110.
- BAI Fu, YANG Xiaohui. Hydrochemical Characteristics of Groundwater of the Heihe Basin in the Hexi Corridor, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(3): 105-110.
- 高榕,王志盈,邵远,等.西安泾河城市人造水面富营养化分析[J].西安科技大学学报,2008,28,(1):145-149.
- GAO Rong, WANG Zhiying, SHAO Yuan, et al. Eutrophication evaluation of urban constructed pool of Xi'an Chan river[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28,(1):145-149.
- 韩朝辉,王郅睿,田辉,等.汉中盆地地下水水化学特征及其成因研究[J].西北地质,2023,56(4):263-273.

- HAN Chaohui, WANG Zhirui, TIAN Hui, et al. Hydrochemical Characteristics and Genesis of Groundwater in the Hanzhong Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 263–273.
- 胡甜, 谢先军, 严璐, 等. 东寨港流域地表水水化学组成特征及其成因[J]. *安全与环境工程*, 2022, 29(1): 154–162.
- HU Tian, XIE Xianjun, YAN Lu, et al. Hydrochemical Characteristics and Genesis of Surface Water in Dongzhai Harbor Watershed[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(1): 154–162.
- 蒋亦媛, 张永奎, 袁宏林. 汾河水质污染特征及水质改善措施分析[J]. *供水技术*, 2014, 8(6): 1–6.
- JIANG Yiyuan, ZHANG Yongkui, YUAN Honglin. Analysis for the water contamination characteristics and water quality improvement measures in Chanhe River[J]. *Water Technology*, 2014, 8(6): 1–6.
- 李果, 吕情绪, 许峰. 神东矿区地表水和地下水水化学特征及其影响因素研究[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(4): 145–150.
- LI Guo, LYU Qingxu, XU Feng. Hydrochemistry characteristics and its influencing factors of surface water and groundwater in the Shendong mining area[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(4): 145–150.
- 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.
- 孙龙, 刘廷玺, 段利民, 等. 平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因[J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5547–5559.
- SUN Long, LIU Tingxi, DUAN Limin, et al. Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12): 5547–5559.
- 王博, 刘卫国. 汾河流域水-土-植物硝酸盐和氮同位素组成及氮源示踪[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(5): 480–488.
- WANG Bo, LIU Weiguo. Nitrogen isotopic composition and source analysis of water, soil and plant in Chanhe River[J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(5): 480–488.
- 王彦国. 新疆木垒县地表水水质评价及变化趋势分析[J]. *陕西水利*, 2021, (10): 116–118.
- WANG Yanguo. Evaluation of surface water quality and trend analysis in Mubi County, Xinjiang[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2021, (10): 116–118.
- 邢萌, 刘卫国, 胡婧. 汾河、涝河河水硝酸盐氮污染来源的氮同位素示踪[J]. *环境科学*, 2010, 31(10): 2305–2310.
- XING Meng, LIU Weiguo, HU Jing. Using Nitrate Isotope to Trace the Nitrogen Pollution in Chanhe and Laohe River[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(10): 2305–2310.
- 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 等. 成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5364–5374.
- XU Qiu-jin, LAI Chengyue, DING Yao, et al. Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5364–5374.
- 延子轩, 冯民权. 长河流域矿区地表水水化学特征及驱动因子分析[J]. *环境化学*, 2022, 41(2): 632–642.
- YAN Zixuan, FENG Minquan. Hydrochemical characteristics and driving factors of surface water in the mining area of Changhe River Basin[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(2): 632–642.
- 杨媛媛, 余志鹏, 夏梦洁, 等. 西安市沣灞生态区地表水水质变化特征研究[J]. *水利规划与设计*, 2022, (3): 50–53+70.
- YANG Yuanyuan, SHE Zhipeng, XIA Mengjie, et al. Study on variation characteristics of surface water quality in Chanba ecological area of Xi'an city[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2022, (3): 50–53+70.
- 张嘉欣, 朱秉启. 北疆地区的水化学组成特征及其影响因素[J]. *地理研究*, 2022, 41(5): 1437–1458.
- ZHANG Jiixin, ZHU Bingqi. Hydrochemical characteristics and influencing factors in Northern Xinjiang: Research progress and overview[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(5): 1437–1458.
- 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.
- 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.
- 赵倩, 张耀文, 迟宝明, 等. 锦州市小凌河扇地地表水与地下水水化学特征[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(2): 65–69.
- ZHAO Qian, ZHANG Yaowen, CHI Baoming, et al. Hydrochemical Characteristics of Surface Water and Groundwater in Xiaoling River Fan of Jinzhou City[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(2): 65–69.
- 朱娅娣, 邵天杰. 汾河流域地表水水化学特征[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(3): 7–12.
- ZHU Yadi, SHAO Tianjie. Preliminary Study on Hydrochemical Characteristics in Chan River Basin[J]. *Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)*, 2022, 44(3): 7–12.
- Chen Zixiang, Yu Lei, Liu Weiguo, et al. Nitrogen and oxygen isotopic compositions of water-soluble nitrate in Taihu Lake water system, China: implication for nitrate sources and biogeochemical process[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71: 217–223.
- 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: 3–30.
- Ji Wangjia, Xiao Jun, Guralp S Toor, et al. Nitrate-nitrogen transport in streamwater and groundwater in a loess covered region: Sources, drivers, and spatiotemporal variation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143278.