

基于水化学和氢氧同位素的拜城盆地 泉水成因研究

许艾龙^{1,2}, 吴彬^{1,2}, 刘坤^{1,2}, 王翠^{1,2}, 杜明亮^{1,2}, 杨鹏年^{1,2}, 邹长江^{1,2}

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052;

2.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 分析拜城盆地泉水水化学及同位素特征, 识别泉水、河水、潜水三者的转化关系, 揭示泉水成因, 为拜城盆地水资源合理开发利用提供理论依据。[方法] 通过采集拜城盆地泉水样品, 测试分析, 综合运用 Gibbs 图、PCA-APCS-MLR 模型、氢氧同位素等方法, 定量探讨泉水与其他水体的转化量, 分析泉水来源及其成因。[结果] ①泉水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Ca} \cdot \text{Na}$ 型, 泉水与潜水、河水转化频繁; ②泉水水化学组分中 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 源于石膏等盐类的风化溶解, Na^+ 和 Cl^- 源于钠长石和蒙脱石等硅酸盐矿物风化溶解, 且农业及工矿生产、人类生活对泉水中硝酸盐的影响较大; ③泉水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分别为 $-81.28\text{‰} \sim -50.27\text{‰}$ 和 $-12.20\text{‰} \sim -8.57\text{‰}$, 拜城盆地南部潜水、泉水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 整体贫于北部, 大量河水的补给使南部潜水、泉水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 趋于贫化; ④盆地内地表水—地下水转化关系主要为河水补给潜水、泉水, 木扎提河中游、克孜尔河上游, 河水、潜水对泉水的补给比例分别为 $8.3\% \sim 50.1\%$, $49.9\% \sim 91.7\%$ 。[结论] 拜城盆地泉水主要为侵蚀下降泉和溢出下降泉。拜城盆地北部高山区的大气降水、冰雪融水沿基岩裂隙入渗形成地下水, 受河流、山洪沟切割第四系松散岩类孔隙水含水层影响, 潜水溢出形成侵蚀下降泉, 主要分布在木扎提河上游至中游段; 高山区形成的地下水在河流或沟谷切割含水层后出露形成地表水, 地表水入渗到平原区后再次转化为地下水, 地下水在运移过程中遇到新近系泥岩、砂岩、砾岩形成的相对隔水层后运动受阻, 水位壅高出露地表, 形成溢出下降泉, 主要分布在木扎提河中游与克孜尔河下游。

关键词: 泉水成因; 氢氧同位素; PCA-APCS-MLR 模型; 线性端元混合模型; 拜城盆地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0047-13

中图分类号: P641

文献参数: 许艾龙, 吴彬, 刘坤, 等. 基于水化学和氢氧同位素的拜城盆地泉水成因研究[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 47-59. Xu Ailong, Wu Bin, Liu Kun, et al. Spring formation mechanism in Baicheng basin based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 47-59. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.038; CSTR:32312.14.stbctb. 2025.03.038.

Spring formation mechanism in Baicheng basin based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes

Xu Ailong^{1,2}, Wu Bin^{1,2}, Liu Kun^{1,2}, Wang Cui^{1,2}, Du Mingliang^{1,2}, Yang Pengnian^{1,2}, Zou Changjiang^{1,2}

(1.College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2.Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective] The hydrochemical and isotopic characteristics of spring in Baicheng basin were analyzed, the transformation relationships among spring, river water, and phreatic water was identified, and the formation mechanisms of spring were explored to provide a theoretical basis for the rational development and utilization of water resources in Baicheng basin. [Methods] Spring samples from the Baicheng basin were collected and analyzed. Comprehensive methods, including Gibbs diagrams, the PCA-APCS-MLR model, and hydrogen-

收稿日期: 2024-09-13

修回日期: 2025-02-27

采用日期: 2025-02-27

资助项目: 第三次新疆综合科学考察项目“塔里木河流域光热水资源现状与演变调查”(2021xjkk0203)

第一作者: 许艾龙(1994—), 女(汉族), 甘肃省平凉市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与保护。Email: 1229510953@qq.com。

通信作者: 吴彬(1972—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事内陆干旱区水资源利用与环境保护方面的研究。Email: wubinxj@163.com。

oxygen isotopes, were used to quantitatively assess the transformation between spring and other water bodies and analyze the sources and formation mechanisms of the spring. [Results] ① The hydrochemical type of spring water was mainly of $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}$ type, and the spring water was frequently transformed with phreatic water and river water. ② The chemical components of the spring, including Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , and SO_4^{2-} , primarily originated from the weathering and dissolution of gypsum and other salts, while Na^+ and Cl^- were derived from the weathering of silicate minerals such as albite and montmorillonite. Agricultural, industrial, and domestic activities significantly influenced nitrate levels in the spring. ③ The δD and $\delta^{18}\text{O}$ values of the spring ranged from -81.28‰ to -50.27‰ and -12.20‰ to -8.57‰ , respectively. The δD and $\delta^{18}\text{O}$ values of phreatic water and spring in the southern Baicheng basin were generally more depleted than those in the north. This was attributed to substantial recharge from river water. ④ The transformation relationships between surface water and phreatic water in the basin mainly involved river water recharging phreatic water and spring. The recharge proportions of river water and phreatic water to spring were $8.3\%\text{—}50.1\%$ and $49.9\%\text{—}91.7\%$ in the middle reaches of the Muzati River and the upper reaches of the Kezier River, respectively. [Conclusion] Spring in Baicheng basin are primarily classified as erosional and overflow-descending spring. In the northern high mountainous area, atmospheric precipitation and snowmelt infiltrate bedrock fractures to form phreatic water. Phreatic water emerged as erosional descending spring, mainly distributed in the upper to middle reaches of the Muzati River, owing to the river and floodplain erosion of Quaternary porous aquifers. Phreatic water that formed in high-mountain areas was discharged as surface water where rivers or valleys intersected the aquifer. This surface water infiltrated the plain area and was converted back into phreatic water. During migration, phreatic water encountered relatively impermeable layers composed of Neogene mudstone, sandstone, and conglomerate, causing water levels to rise and form overflow descending spring, predominantly located in the middle-lower reaches of the Muzati River and the lower reaches of the Kezier River.

Keywords: spring formation mechanism; hydrogen-oxygen isotopes; PCA-APCS-MLR model; linear end-member mixing model; Baicheng basin

泉水是地下水的天然露头,在生产、生活中发挥着独特作用^[1]。在古代丝绸之路的贸易与文化交流中,泉水是驿站选址的关键因素^[2]。在现代,泉水在环境、生态、文化和景观方面具有重要价值^[3],特别是在干旱区,泉水对保障生活用水和农业灌溉至关重要^[4]。然而,近年来随着气候变化和人类活动日益加剧,泉水受到的影响愈发显著,出现流量衰减,甚至干涸现象^[5]。探究泉水成因有助于准确评价地下水资源量^[6]。

Gibbs图、Durov图、离子比例法等传统水化学方法^[6-7]和氢氧同位素法^[8-9]是研究地下水来源的主要方法,也适用于泉水成因研究。这些方法为理解地下水循环和补给机制提供了直接证据,并能评估外部因素对泉水质量的影响。许庆宇等^[6]、王楠等^[7]通过水化学特征分析揭示了趵突泉地下水化学成分主要受多种矿物溶解过程的调控,这些矿物包含碳酸盐、硫酸盐、岩盐等,同时阳离子交换、溶滤作用也在地下水化学组分的形成中扮演着重要角色,此外人类活动也导致了 Cl^- 、 NO_3^- 含量增加,进而影响地下水化学演化。环境同位素示踪技术作为水形成、运

移过程的指针,有助于识别不同水循环路径和地表水—地下水之间的转化关系,反映泉水补给来源及演化信息^[10]。王雅璇等^[11]通过对百脉泉泉群的降水及氢氧稳定同位素特征分析,明确了泉水主要由大气降水进行补给,且在入渗之前经历了较弱的蒸发作用。然而,传统水化学法难以定量计算泉水转化量,同位素信号可能受到多种地质和环境因素的影响,其解释需要综合考虑水文地质条件和人类活动等。考虑到上述方法在研究中均存在一些限制,毛龙富等^[8]、吕琳等^[12]将水化学和稳定同位素技术结合用于泉水成因研究,可以更好地识别泉水补给来源,揭示区域地下水与环境的相互作用机制。并且在太行山北段金龙洞岩溶泉^[12]研究中已经得到了应用,成功提取水化学组分源贡献率,为泉水成因的研究提供了理论依据。

拜城盆地河沟纵横分布,地表水—地下水转化频繁,泉水溢出点多面广,溢出形式多样,泉水来源分析及泉水量计算是影响地下水资源评价成果精度的关键因素^[13-15]。在充分收集水文地质资料的基础上,采集河水、泉水、潜水等不同水体水样,分析拜城

盆地泉水水化学及同位素特征,识别泉水、河水、潜水三者的转化关系,揭示泉水成因。为拜城盆地水资源合理开发利用提供理论依据。

1 研究区概况

拜城盆地位于天山南麓,呈狭长带状,东西长160 km,南北宽25 km,地势西高东低、北高南低^[16]。盆地内年均降水量97 mm,年蒸发量为893.2 mm。发育5条常年性河流,分别为以西的木扎提河,中部的喀普斯浪河、台勒维丘克河、卡拉苏河和以东的克孜尔河,在克孜尔水库处汇合后称渭干河,5条河流皆起源于天山南坡,多年平均径流量为 $2.774 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

拜城盆地是一个大型新生代向斜拗陷盆地,其北部新近系地层逆冲覆盖于第四系中更新统之上,形成低山丘陵区,构成了低山丘陵区与平原区地下水的天然隔水屏障,南部的却勒塔格山新生代背斜再次阻隔了盆地内地下水与外部的连通性。盆地基底主要由新近系泥岩、砂岩和砾岩形成相对隔水层,使拜城盆地成为一个独立的水文地质单元。盆地内部堆积了巨厚的第四系松散堆积物,为地下水的存储和运移提供了良好的空间。含水层主要由冲洪积卵砾石和砂砾石(Q_4^{al+pl})构成,具有较强的富水性。盆地内平原区地下水主要由河道水渗漏、渠系水渗漏和田间灌溉水入渗补给,以及山前侧向补给和少量降水入渗补给。地下水主要由西北向东南方向径流,水力坡度2‰~8‰。地下水的排泄方式包括河道排泄、泉水溢出、潜水蒸发和少量人工开采。地下水埋深由上游向下游逐渐变浅。盆地内的泉水类型主要为下降泉,包括侵蚀下降泉和溢出下降泉。泉水主要分布在山前基岩抬升区和潜水溢出带,盆地内较大泉眼有9处,其中3处位于木扎提河沿岸,1处位于克孜尔河上游黑英山乡,其余则散布盆地各处。位于喀普斯浪河与木扎提河交汇处以东至赛里木以南的泉为溢出下降泉,其余均为侵蚀下降泉。据监测,年径流量为 $2.767 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2 数据来源与研究方法

2.1 样品采集与测试

2023年8—9月,共采集水样48组,其中泉水20组,潜水(机井水)14组,河水14组。所有水样均进行了常规离子分析和氢氧同位素分析,水质参数均为pH值, Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-} ,总硬度,总碱度,溶解性总固体,稳定同位素D和 ^{18}O 。取样前先用待取水润洗聚乙烯采样瓶3次,采样时采

样瓶瓶口始终置于水面之下,直至采满整瓶水样,样品经薄膜密封后用暗箱冷藏保存,每处采集3瓶水样,1份用于分析,2份用于同位素测试,并在一周内送检。水质分析委托新疆地矿局第二水文大队检测完成,氢氧同位素分析由北京泰斯特检测公司完成。氢氧同位素测试采用美国Picarro L2140-i水同位素分析仪,测试方法为WS-CRDS,每个样品测6针,取后3针平均值作为测试结果,测试精度D为 4.00×10^{-4} , ^{18}O 为 1.00×10^{-4} 。

2.2 研究方法

2.2.1 舒卡列夫分类法 舒卡列夫分类法在地下水化学类型分析中广泛使用,其主要依据水质分析结果,将主要离子($\text{K}^+ + \text{Na}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-})中大于25%毫克当量百分数的阴离子和阳离子进行排列组合。

2.2.2 水化学特征法 采用Durov图解法、Gibbs法和离子比值法、端元图法等^[17-18]判断水化学的控制机制和不同岩层溶解对水化学组分的影响。

2.2.3 多元统计方法

(1) 皮尔逊相关性 r 可以确定水化学变量之间的关系。当 r 的绝对值大于0.6,表示高度相关;在0.4~0.6之间,表示相关;小于0.4,表示不相关。当检验概率小于0.05时,水化学变量之间的相关性显著。

(2) 绝对主成分得分多元线性回归(PCA-APCS-MLR模型)。PCA可以用较少的变量来解释水化学数据的变化,可以帮助确定地下水中离子的关系和来源。

由于研究区河水、潜水、泉水是相互转化的连续体,因此将三者统一进行主成分分析。检验得到KMO值,依据Bartlett球形检验显著性水平与0接近程度来判断是否可以主成分分析。APCS-MLR模型提取主成分时,首先对原始数据进行标准化处理,再基于因子分析得到因子的真实绝对得分(APCS),之后通过多元线性回归分析指标值与因子得分之间的关系,并利用回归系数来估计各个公因子的值。最终,计算出公因子对水体指标的相对贡献度。数学表示为^[19]:

$$C_j = \sum_{i=1}^n B_i \cdot \text{APCS}_{ij} + B_0 \quad (1)$$

式中: C_j 为第 j 个指标浓度; B_i 为多元线性回归系数, $B_i \times \text{APCS}_{ij}$ 为主成分 i 对指标浓度 C_j 的贡献; B_0 为多元线性回归常数项。当指标线性拟合 R^2 的值在0.62~0.99,同时预测值与实测值之比接近1,则模型结果具有较高可信度。

2.2.4 氢氧同位素特征法 将研究区泉水、河水、潜

水氢氧同位素数据散点图与天山地区大气降水线的斜率和截距作对比,判断泉水的补给水源类型。

2.2.5 线性端元混合模型 在同位素质量平衡的基础上,通过比较不同水源的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值来确定水体的补给来源及其相互转化关系^[20]。在对 n 种水源进行区分时,需要引入 $n-1$ 种示踪剂。但示踪剂的选择会面临多种限制因素,最终决定通过二元线性混合模型估算各端元混合比例,模型如下^[21]:

$$\delta_s = f_1 \cdot \delta_1 + f_2 \cdot \delta_2 \quad (2)$$

$$\beta_s = f_1 \cdot \beta_1 + f_2 \cdot \beta_2 \quad (3)$$

$$f_1 + f_2 = 1 \quad (4)$$

式中: δ_s 代表混合后水体的 δD 值; β_s 代表其 $\delta^{18}O$ 值; δ_1, δ_2 分别表示两种不同补给水源的 δD 值; β_1, β_2 分别对应这两种水源的 $\delta^{18}O$ 值; f_1, f_2 则分别指这两种补给水源在混合过程中的比例。

3 结果与讨论

3.1 泉水水化学特征及水体离子来源分析

3.1.1 泉水水化学特征 拜城盆地泉水与河水、潜水的阴、阳离子浓度分析结果详见表1。泉水pH值和溶解性总固体(TDS, total dissolved solids)变化范围分别为7.86~8.44 mg/L和231.27~829.38 mg/L,平均值分别为8.18, 577.48 mg/L。河水pH值和TDS变化范围分别为8.00~8.53 mg/L和297.36~966.06 mg/L,平均值分别为8.25, 518.58 mg/L;潜水pH和TDS变化范围分别为7.27~8.52 mg/L和174~898 mg/L,平均值分别为7.91, 543.69 mg/L;研究区泉水与河水、潜水均呈弱碱性,均为低矿化度淡水(TDS<1 000 mg/L),且TDS值相差不大,表明泉水与河水、潜水3者之间水体转化频繁,水力联系密切。

表1 拜城盆地泉水、河水和潜水水化学组分及氢氧同位素指标统计

Table 1 Statistics on chemical components and hydrogen-oxygen isotope indexes of spring, river and phreatic water in Baicheng basin

指标	泉水($n_1=20$)			河水($n_2=14$)			潜水($n_3=14$)		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
pH值	7.86	8.44	8.18	8.00	8.53	8.25	7.27	8.52	7.91
K ⁺	2.31	7.50	4.42	2.07	10.56	5.31	2.51	13.72	6.56
Na ⁺	16.25	119.83	69.41	19.44	164.82	54.30	2.06	121.21	57.23
Ca ²⁺	55.78	159.71	96.74	63.88	129.38	88.63	12.02	141.51	82.91
Mg ²⁺	4.87	46.49	24.57	7.85	41.45	23.25	2.45	62.69	29.25
Cl ⁻	12.04	179.23	104.51	14.05	293.64	77.37	10.59	192.35	82.55
SO ₄ ²⁻	50.74	278.33	161.78	70.21	243.55	172.58	48.03	370.43	163.27
HCO ₃ ⁻	122.24	327.59	228.13	137.40	370.48	189.97	37.70	420.25	210.77
CO ₃ ²⁻	0.00	8.42	1.98	0.00	7.24	2.15	0.00	12.16	1.99
NO ₃ ⁻	0.49	11.96	6.02	0.36	3.41	1.41	0.90	2.50	1.53
TDS	231.27	829.38	577.48	297.36	966.06	518.58	174.00	898.00	543.69
总硬度	159.32	540.08	342.89	191.83	467.45	317.02	120.11	534.08	327.51
总碱度	100.24	268.64	190.57	112.67	303.81	159.38	38.02	344.70	174.81
δD	-81.28	-50.27	-62.50	-101.87	-59.05	-75.06	-81.81	-56.91	-65.62
$\delta^{18}O$	-12.20	-8.57	-9.84	-14.17	-9.17	-11.20	-12.11	-9.14	-10.20

注:①pH值无量纲,其余单位为mg/L;② n_1, n_2, n_3 分别为泉水、河水和潜水的样本数。

采用Durov图对河水、泉水和潜水水化学特征进行分析(图1),泉水水化学类型主要为HCO₃·SO₄·Cl-Ca·Na型(所占比例为45%,主要分布在木扎提河中下游和克孜尔河)。河水水化学类型共计4种,以HCO₃·SO₄·Cl-Ca·Na型(所占比例42.86%,主要分布在克孜尔河下游、卡拉苏河中游、喀普斯浪河上游、木扎提河上游等)、SO₄·HCO₃-Ca型(比例为28.75%,主要分布在克孜尔河上游、卡拉苏河上游、喀普斯浪河下游等)、SO₄·HCO₃-Ca·Mg型(比例为21.43%,主要分布在台勒维丘克河)为主。潜水水化学类型以HCO₃·SO₄·Cl-Ca·Na型(比例37%,主要

分布在台勒维丘克河、卡拉苏河中游、克孜尔河下游)、SO₄·HCO₃-Ca型(比例为29%,主要分布在木扎提河、喀普斯浪河上游)、HCO₃·SO₄-Ca·Mg型(比例14%,主要分布在克孜尔河上游)为主。泉水与河水取样点的分布更为集中且接近,具有相似的化学性质,野外调查过程中发现,这是由于泉水排泄流入河水(以木扎提河最为显著)所致。

3.1.2 泉水水化学形成机理及影响因素

(1) 岩石风化。Gibbs图划分了3类水化学控制机制,分别为大气降水、岩石风化和蒸发浓缩^[22]。由图2可知,泉水、河水、潜水中(Na⁺)/(Na⁺+Ca²⁺)

的比值分别为 0.23~0.60, 0.17~0.59, 0.05~0.82, $(\text{Cl}^-)/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的比值分别为 0.09~0.47, 0.09~0.57, 0.08~0.84。取样点大多分布在 Gibbs 图中部及中部偏左侧, 表明研究区泉水与河水、潜水的

浓缩作用的影响很小, 大气降水对水化学组分几乎没有影响。向蒸发浓缩作用区偏移的个别点均位于平原区地下水埋深较浅的区域。此外, 有个别点落在外部, 说明阳离子交换作用可能也产生了部分影响^[23]。

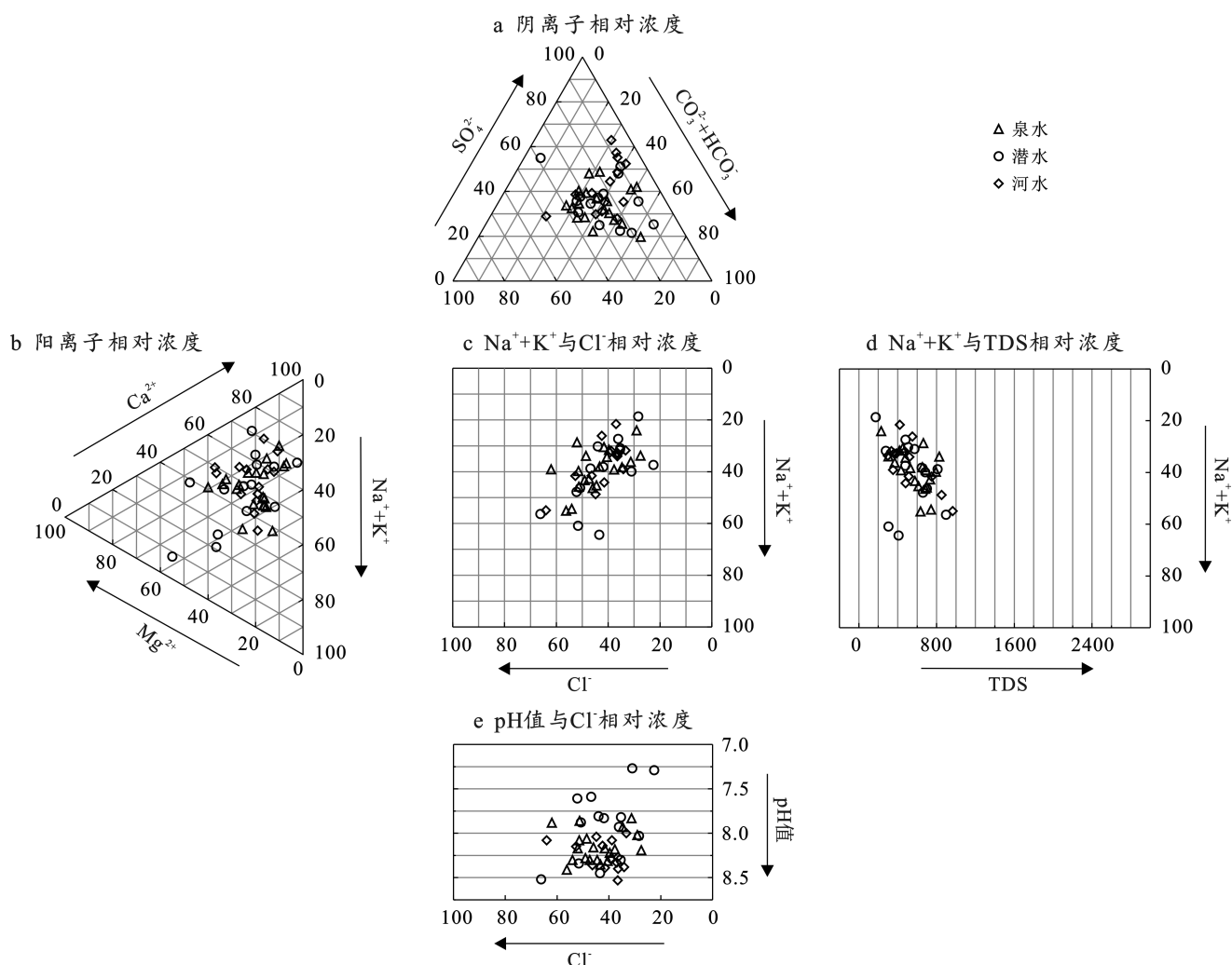


图1 拜城盆地泉水、潜水、河水的水化学 Durov 图

Fig.1 Durov diagrams of springs, phreatic and river water in Baicheng basin

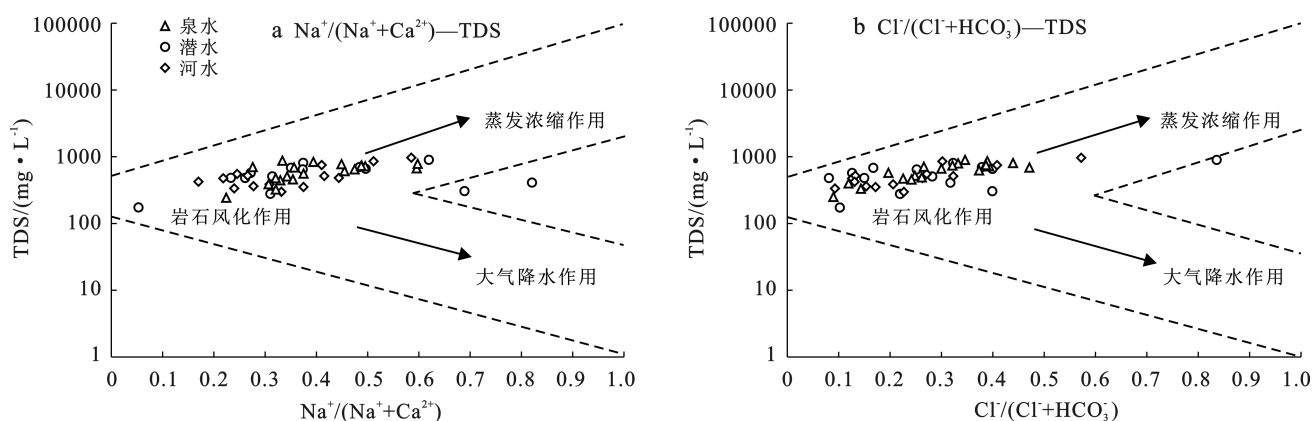


图2 拜城盆地泉水、潜水、河水的水化学 Gibbs 图

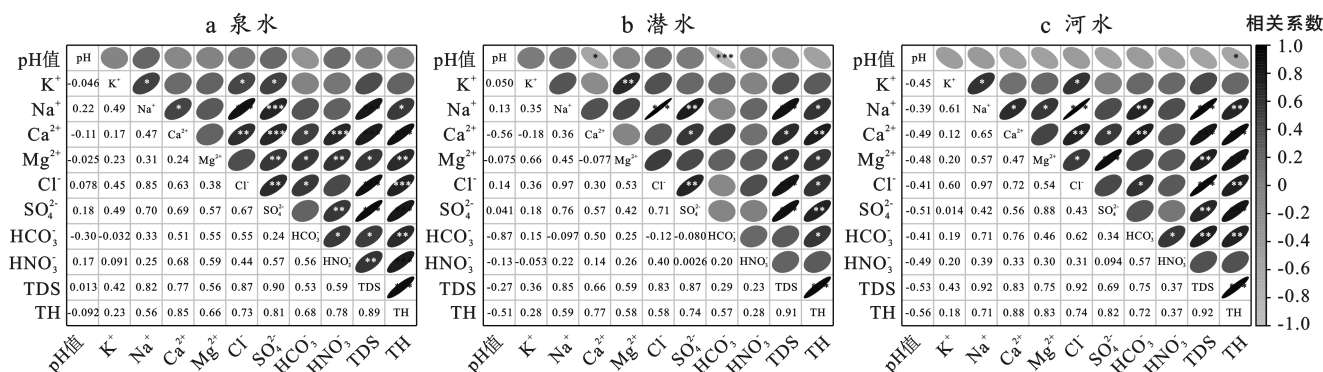
Fig.2 Hydrochemical Gibbs diagrams of spring, phreatic and river water in Baicheng basin

石膏等盐类的风化和溶解可能是研究区泉水、潜水中 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的来源之一^[18]:



皮尔逊相关系数矩阵可判断水化学组分中的离子是否具有相同的来源,颜色深浅对应不同相关系数,椭圆越扁对应绝对值越大的相关系数^[23]。结果表明,泉水(图 3a)中 SO_4^{2-} 和 Na^+ , Cl^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 之间相关性强,相关系数 r 介于 0.49~0.70,表明它们之间可能具有相同来源,可能受蒸发岩溶解或人类

活动的影响;潜水(图 3b)中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} , Na^+ 相关性较强,相关系数 r 介于 0.57~0.76,表明它们之间可能具有相同的来源或形成机制;河水(图 3c)中 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 之间相关性强,相关系数 $r=0.88$,表明它们之间具有相同的来源;与潜水、河水相比,泉水中的硝酸盐含量与 Ca^{2+} , Mg^{2+} 等成分有较强的相关性,这表明泉水可能在一定程度上受到人类活动的影响^[24]。这种相关性可能源于人类活动导致的硝酸盐污染,如工矿生产、农业施肥和生活污水排放,这些活动增加了泉水、潜水中硝酸盐的浓度,进而影响泉水的化学组成。



注: *表示 $p \leq 0.05$ 水平显著相关, **表示 $p \leq 0.01$ 水平显著相关, ***表示 $p \leq 0.001$ 水平显著相关。

图 3 拜城盆地泉水、潜水、河水的皮尔逊相关系数矩阵

Fig.3 Pearson's correlation coefficient matrix for spring, phreatic and river water in Baicheng basin

为进一步明确泉水水化学特征的形成机制,对水中主要离子进行离子比值分析(图 4)。水样主要集中在 1:1 线的两侧,表明盐岩溶解并不是水体中 Na^+ 和 Cl^- 的唯一来源,1:1 线以上的样本, Cl^- 含量超过 Na^+ 含量,可能受到人类活动的影响^[25], 1:1 线以下的样本, Na^+ 含量超过 Cl^- 含量,可能是由于钠长石和蒙脱石等硅酸盐矿物风化溶解产生过量的 Na^+ 。此外,含水层内的阳离子交换过程也会影响 Na^+ 浓度^[26](图 4a)。研究区水样主要分布在 1:1 线的右侧,说明石膏的溶解可能不是 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的唯一来源(图 4b)。水样主要分布在 1:1 线以下,少数样本分布在 1:1 线或 1:1, 1:2 线之间,说明碳酸盐岩的风化过程存在,但不是主要的水文地球化学反应(图 4c)。水样主要出现在 1:1 线以上,说明硅酸盐的风化是影响研究区泉水、潜水化学成分的主要因素,碳酸盐风化有部分影响(图 4d)。

从离子比值端元图(图 5)中可以看出,大多数水样都位于硅酸盐岩内含物附近,且泉水更集中,说明硅酸盐岩风化是影响研究区泉水化学组分的主要因素。此外,在碳酸岩和蒸发岩末段附近也可以看到少量水样,说明碳酸盐的分化、蒸发岩的溶解也发挥了作用。

(2) 阳离子交换。阳离子交换作用常通过 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 和 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ 的比值进行分析,反映阳离子交换作用对水体矿化的影响^[27]。由图 6 可以看出,水样均位于斜率为 -1 线附近,表明阳离子交换是重要的水文地质化学反应^[28]。大部分取样点集中于第 2 象限,表明岩石和土壤表面与水进行了正阳离子交换作用,即岩石和土壤表面的 Ca^{2+} , Mg^{2+} 与水中 Na^+ , K^+ 进行交换;少部分取样点集中于第 4 象限,则主要进行反阳离子交换作用。由图 6 可知,泉水取样点绝大多数位于第 2 象限,表明泉水正阳离子交换起重要作用。

(3) 人类活动的影响。人类活动目前已经成为影响水化学的重要因素^[29],其中工业活动的表征因子主要是 SO_4^{2-} ,生活污水的表征因子主要是 Cl^- ,农业活动的表征因子主要是 NO_3^- ^[30-31]。由图 7a 可知,研究区河水与潜水样本呈现沿 Y 轴的变化趋势。图 7 中取样点 DB_{02} , DB_{13} , DX_{14} , DX_{01} 位于铁热克镇工业厂矿附近, DB_{14} 位于康其乡工业厂矿附近, DB_{04} 位于布隆乡工业厂矿附近, DX_{03} 位于黑英山乡工业厂矿附近,较频繁的工业活动、矿业活动对河水、潜水造成了一定程度的影响,对泉水的影响比较小;泉水样本主要呈现沿 X 轴的变化趋势,图 7 中取样

点 BC_{41} , BC_{34} , BC_{45} 主要位于黑英山乡农业种植区, BC_{28} , BC_{01} 主要位于亚吐尔乡、温巴什乡人类聚集区。可以看出, 农业种植、人类聚居使得农业生产使用的氮肥和人类生活产生的污水和粪便对泉水的影响程度较大。由图7b可知, 大多数样本均位于受农业活动与生活污染影响区域的中部, 相比较, 泉水取样点更加偏向农业活动端元, 例如图中 BC_{41} , BC_{34} 均位于黑英山乡农业种植区, 河水 and 潜水

取样点则更加偏向生活污染端元, 例如图中 DX_{02} , DX_{11} , DB_{04} , DB_{08} 则位于人口较为稠密的托克逊乡、温巴什乡。表明大部分泉水取样点的硝酸盐来源于农业活动, 大部分河水、潜水取样点的硝酸盐来源于生活污染^[24]。

部分取样点超出图7a范围, 但在图7b范围内, 如 DX_{08} , 说明除了上述因素外, 还可能还有其他影响硝酸根来源的因素, 如岩石风化等^[23]。

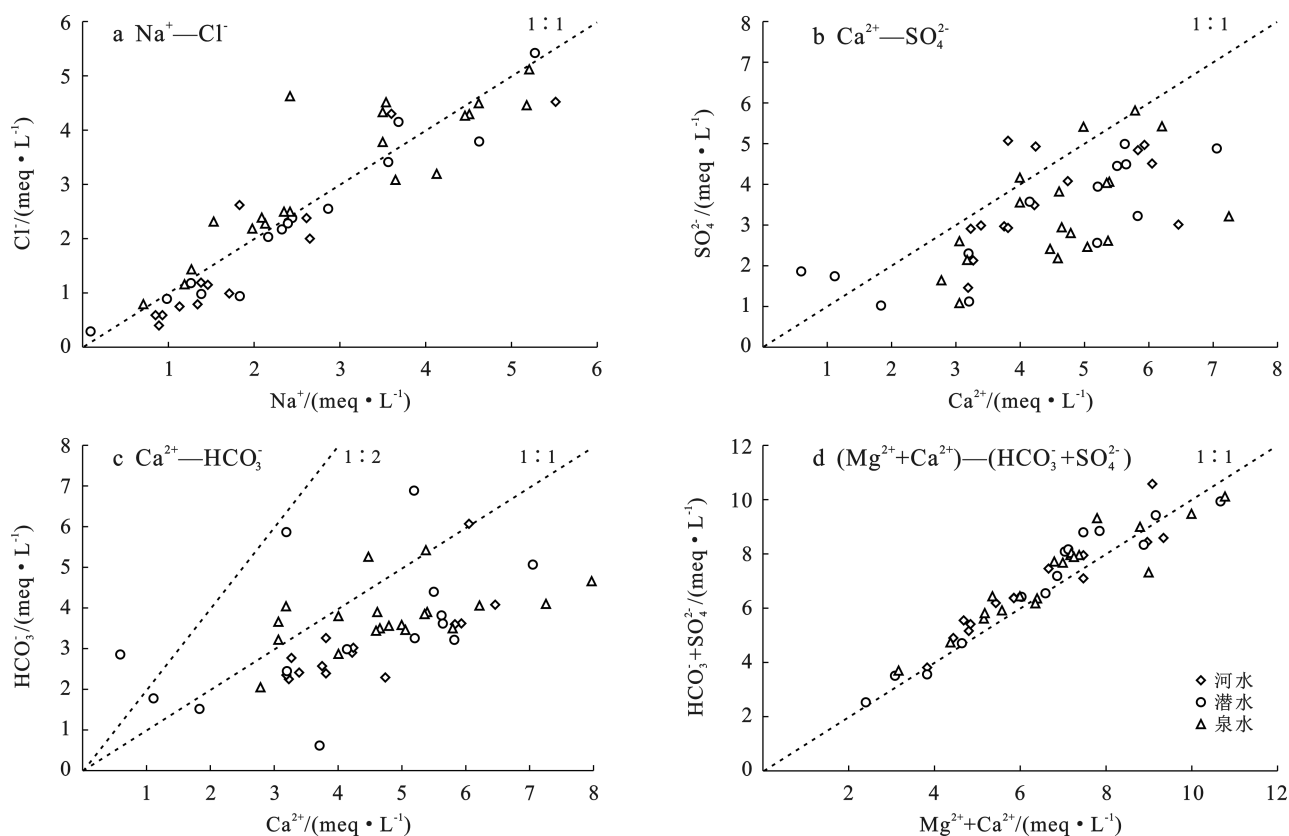


图4 拜城盆地河水、潜水、泉水的主要离子比率散点图

Fig.4 Scatter plots of major ionic ratios of river, phreatic and spring water in Baicheng basin

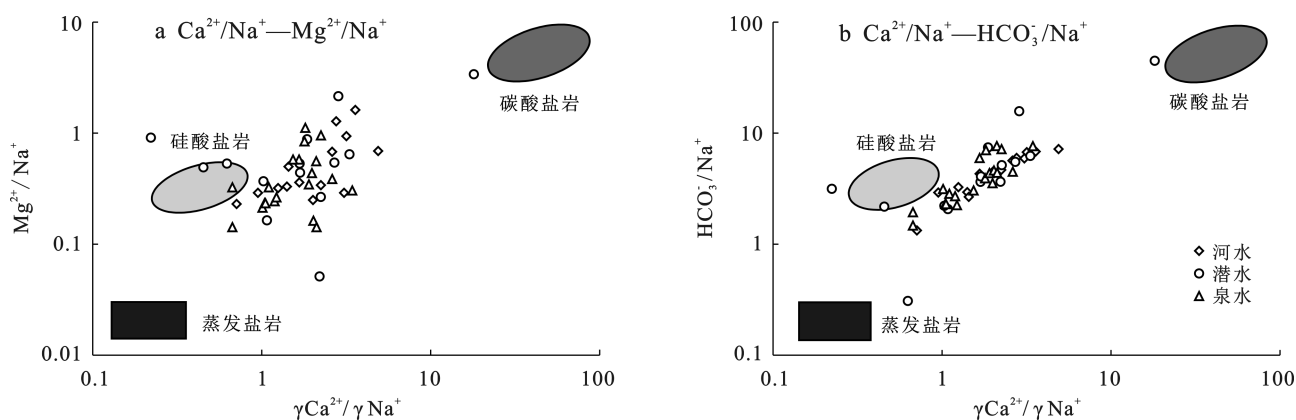


图5 拜城盆地河水、潜水、泉水的离子比值端元图

Fig.5 Ion ratio end-element plots of river, phreatic and spring water in Baicheng basin

(4) 水化学来源解析。选取 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , TDS, TH, pH值, NO_3^- 共计11项指标进行主成分分析。首先对各指标实测值标

准化处理, 进行KMO-Bartlett球形检验。检验结果显示KMO值为0.611, Bartlett检验量为1 038.465, 显著性水平达到0.00, 表明指标之间具有显著的相

关性,符合做主成分分析的前提条件,因此提取 3 个公因子: F_1 (贡献率 49.34%), F_2 (贡献率 14.72%)和 F_3 (贡献率 13.96%),累计的方差贡献率达到 78.02%(表 2)。

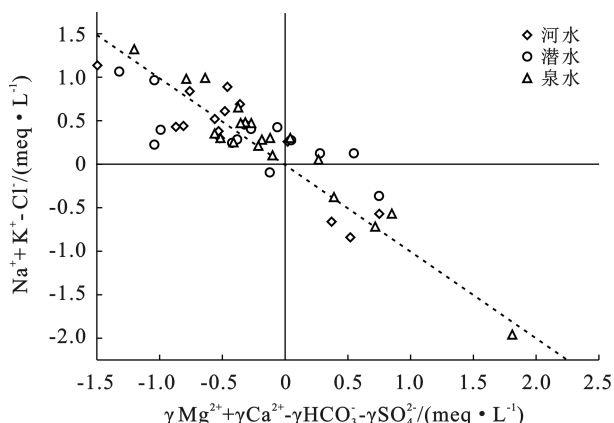
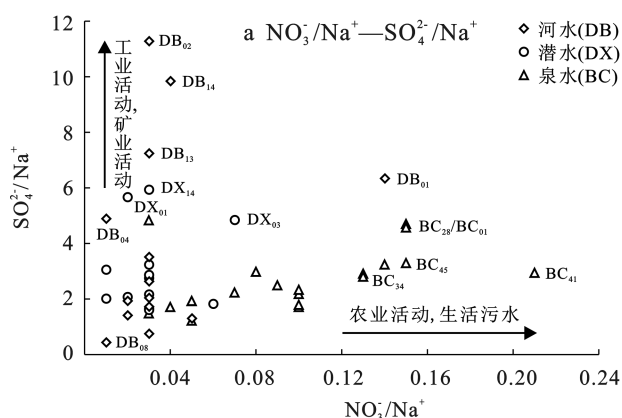


图 6 拜城盆地泉水、潜水、河水的 $[(Na^+K^+)-Cl^-]$ 与 $[(Ca^{2+}Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})]$ 的关系图

Fig.6 Relationship plot of $[(Na^+K^+)-Cl^-]$ versus $[(Ca^{2+}Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})]$ for spring, phreatic, and river water in Baicheng basin

由成分矩阵(表 2)、指标源贡献率(图 8)可以看出,与主成分 F_1 关联度较高的指标有 TDS, TH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , 均呈正相关,贡献率分别为 72.5%, 40.2%, 33.2%, 52.8%, 38.7%, 38.5%



和 61.1%。其中 TDS 的荷载最大,表明天然水文地球化学过程显著影响了水化学成分,研究区主要由第四纪松散沉积物构成,这些地层具有发达的孔隙结构,为水流提供了良好的条件,水岩相互作用促进了石膏等蒸发岩、方解石等碳酸盐以及钠长石和蒙脱石等硅酸盐矿物的分化、溶解和迁移,进而导致水中离子浓度的升高,从而引起 TDS 和总硬度(TH)的变化。解析结果与 Gibbs 图模型、皮尔逊相关系数矩阵、离子比值法得出结论一致。因此将公因子 F_1 定义为水—岩相互作用自然影响因子。主成分 F_2 主要荷载为 pH 值, HCO_3^- , 呈较强的负相关性,贡献率分别为 82.6%, 53.1%。水中的 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩的溶解,当处于碱性或偏碱性环境时, HCO_3^- 会向 CO_3^{2-} 转化,即碳酸盐岩的溶解作用受到地下水酸碱度的影响^[19]。因此将 F_2 命名为酸碱环境影响因子。主成分 F_3 主要荷载为 K^+ , NO_3^- , 贡献率为 46.5%, 62.3%。研究区工矿业、农业及渔业活动频繁,大量使用含钾、氮的化肥及农药^[32],通过灌溉水及大气降水入渗至地下,造成水环境污染,同时未经处理的人畜粪便及生活污水也会对地下水造成一定影响,这与对人类活动影响分析得出的结论一致。此外,阳离子交换也会使水中 K^+ 含量升高。最终将 F_3 命名为农业—厂矿—生活影响因子。

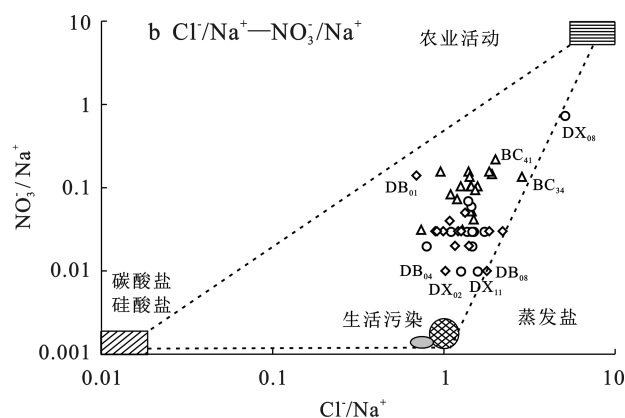


图 7 拜城盆地泉水、潜水、河水中 NO_3^-/Na^+ 与 SO_4^{2-}/Na^+ , Cl^-/Na^+ 与 NO_3^-/Na^+ 的比率

Fig.7 Ratios of NO_3^-/Na^+ to SO_4^{2-}/Na^+ and Cl^-/Na^+ to NO_3^-/Na^+ in spring, phreatic and river water in Baicheng basin

3.2 泉水氧氮稳定同位素特征分析

3.2.1 泉水补给来源 氢氧稳定同位素是研究水体来源的理想天然示踪剂^[31]。泉水、河水、潜水的数据库基本位于区域大气降水线附近(图 9),说明泉水、河水、潜水具有相同来源^[33]。因拜城县河流较多,故以最大河流—木扎提河为例分析河水同位素特征。木扎提河上游,河水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 -80.46‰ 和 -12.00‰ ;中游和下游 δD 和 $\delta^{18}O$ 值逐渐升高,分别为 -74.44‰ , -11.20‰ 和 -71.88‰ , -10.62‰ 。上

游河水取样点 DB_{01} , DB_{11} 接近大气降水线,而中、下游的水样点(DB_{06} , DB_{08})则逐渐偏离大气降水线,河水同位素拟合方程 $\delta D = 8.19\delta^{18}O + 16.64$ ($R^2 = 0.99$) 的斜率与天山地区降水线 $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 10.16$ ^[34] 的斜率接近,表明大气降水、冰雪融水是木扎提河的初始补给来源^[35-36]。木扎提河河水的 δD , $\delta^{18}O$ 值变化范围介于大气降水 δD ($-183.4\text{‰} \sim -15.1\text{‰}$), $\delta^{18}O$ ($-24.64\text{‰} \sim -2.06\text{‰}$)^[37] 和潜水 δD , $\delta^{18}O$ 值之间,表明河水既受大气降水、冰雪融水补给,也受部分地下水补给(图 9a)。

表 2 拜城盆地泉水、潜水、河水水化学组分主成分荷载值
Table 2 Principal component loading values of spring, phreatic and river water chemical components in Baicheng basin

公因子	总方差解释			化学指标	成分矩阵		
	初始特征值				公因子		
	合计	方差贡献率%	累计贡献率%		F_1	F_2	F_3
1	5.43	49.34	49.34	TDS	0.99	0.11	0.01
2	1.62	14.72	64.06	TH	0.94	-0.18	0.03
3	1.54	13.96	78.02	Na ⁺	0.81	0.36	0.03
4	0.85	7.77	85.78	Cl ⁻	0.84	0.31	0.06
5	0.80	7.25	93.04	SO ₄ ²⁻	0.75	0.28	0.08
6	0.37	3.34	96.37	Ca ²⁺	0.75	-0.36	0.36
7	0.27	2.47	98.85	NO ₃ ⁻	0.46	-0.12	0.58
8	0.12	1.08	99.92	pH	-0.25	0.72	0.51
9	0.01	0.05	99.98	HCO ₃ ⁻	0.56	-0.70	-0.12
10	0.00	0.03	100	K ⁺	0.30	0.31	-0.77
11	0.00	0.00	100	Mg ²⁺	0.65	0.15	-0.42

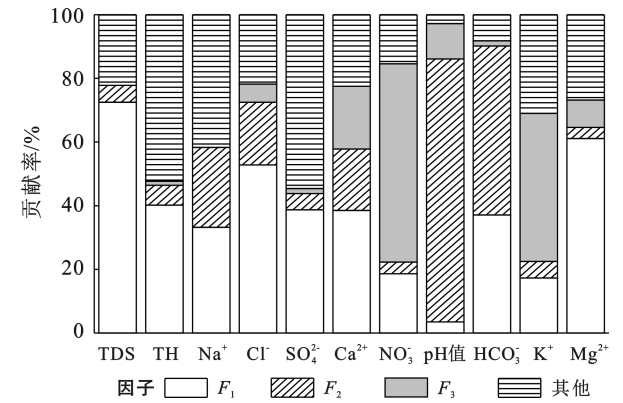


图 8 拜城盆地泉水、潜水、河水水化学组分中指标源贡献率
Fig.8 Indicator source contributions in hydrochemical fractions of spring, phreatic and river water in Baicheng basin

泉水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分别为 -81.28‰ ~ -50.27‰ 和 -12.20‰ ~ -8.57‰ , 平均值分别为 -62.56‰ 和 -9.85‰ ; 潜水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分

别为 -81.81‰ ~ -56.91‰ 和 -12.11‰ ~ -9.14‰ , 平均值分别为 -65.62‰ 和 -10.20‰ 。泉水、潜水位均落在大气降水线附近, 表明泉水、潜水存在相当密切的水力联系。泉水和潜水的同位素拟合方程斜率分别为 8.14, 7.89, 与大气降水线斜率接近, 表明泉水、潜水的初始补给来源主要为大气降水、冰雪融水^[35], 但因研究区南部 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 整体贫于北部, 证明河水也对泉水、潜水进行了补给, 河水的补给使得南部泉水、潜水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 趋于贫化。例如, 在木扎提河与克孜尔河交汇处附近, 泉水 BC_{46} 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -62.30‰ 和 -9.70‰ , 潜水 DX_{05} 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -64.42‰ 和 -9.85‰ , 与河水 DB_{07} 的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (-62.40‰ 和 -9.64‰) 接近, 水化学类型均为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型, 受河水补给的影响南部泉水与潜水的 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 值趋于贫化, 其余 4 条河流取样点也遵循这一规律。泉水、潜水的相互交错, 表明某些时段泉水、潜水发生混合或者转化(如图 9b 所示)。

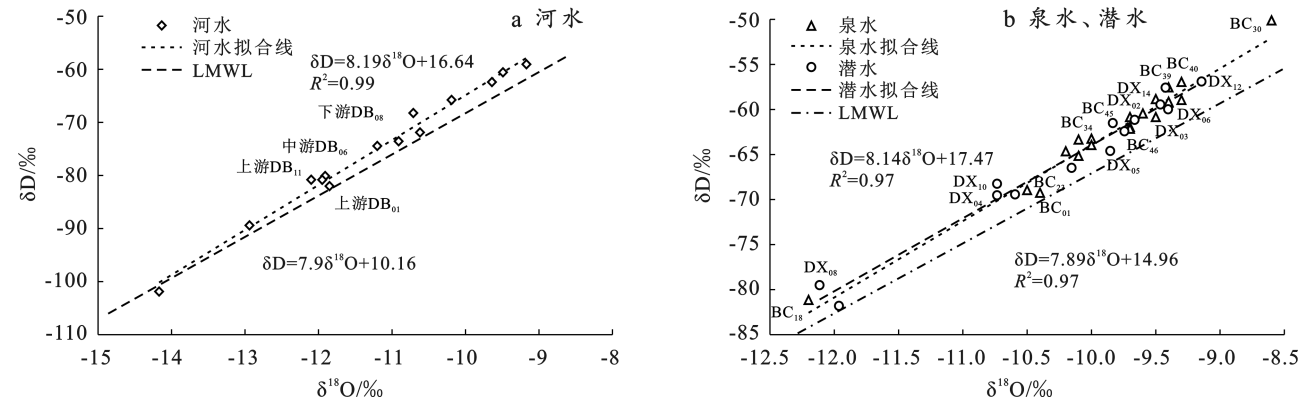


图 9 拜城盆地泉水(BC)、潜水(DX)、河水(DB)的 δD — $\delta^{18}\text{O}$ 关系
Fig.9 Spring (BC), river (DB) and phreatic water (DX) δD — $\delta^{18}\text{O}$ relationships in Baicheng basin

3.2.2 泉水与潜水—河水转化关系 稳定同位素 D, ^{18}O 被普遍应用于评估地下水补给、排泄量等^[19]。以 D 同位素示踪剂为例,利用线性端元混合模型计算泉水与河水、潜水的转化关系及转化量(图 10)。木扎提河上游为单一的潜水含水层,埋深较大,为地下水的径流区,通过对泉水 BC_{18} (δD 值为 -81.3‰) 至 BC_{01} (δD 值为 -69.4‰) 的分析,发现 δD 值呈逐渐增大趋势。相似的,河水 DB_{11} (δD 值为 -80.80‰) 至 DB_{06} (δD 值为 -74.44‰) 也呈现相同趋势。河水 DB_{11} , DB_{06} 的水化学类型相同,为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型;泉水 BC_{18} , 潜水 DX_{08} 水化学类型相同,为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型,这表明泉水 BC_{18} , 潜水 DX_{08} 对河水 DB_{11} 进行补给,泉水补给比例为 1.5%, 潜水补给比例为 98.5%。中游段,木扎提河切割潜水含水层较深,地下水溢出成为泉,两岸泉沟纵横,此段为地下水补给河水。泉水 BC_{23} 与潜水 DX_{04} 的 D 值较接近,但水化学类型分别为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$,说明潜水对泉水进行补给,这与模型计算结果一致,潜水、河水对泉水的贡献比例分别为 49.4%, 50.1%。木扎提河下游,喀普斯浪河与木扎提河交汇处以东至赛里木以南,受构造阻挡,大面积水位壅

高,溢出成泉。潜水 DX_{11} , 泉水 BC_{46} 与河水 DB_{08} 的 D 值接近,3 者水化学类型相同,为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型,表明潜水 DX_{11} 不仅从河水 DB_{08} 获得补给,补给比例为 72%, 还从泉水 BC_{46} 得到补给,补给比例为 28%。

结合图 1, 图 10 分析,此段区域为大面积农耕区和大量机电井分布区,人为的引水灌溉和开采地下水影响了河水、泉水、潜水的转化关系,使得补排关系较为复杂。田间灌溉入渗补给成为此区域潜水的主要补给来源。

克孜尔河上游,黑英山南麓分布的数条山洪沟切割潜水含水层,地下水溢出成泉,为地下水排泄区。泉水 BC_{42} (δD 值为 -59.04‰) 与河水 DB_{09} (δD 值为 -60.56‰) 的 D 值非常接近,水化学类型分别为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}$, 河水、潜水共同补给泉水,河水补给比例为 8.3%, 潜水补给比例为 91.7%。克孜尔河下游泉水溢出带,潜水 DX_{05} , 泉水 BC_{46} 与河水 DB_{07} 的 δD 值接近,水化学类型相同,为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型,表明潜水 DX_{05} 不仅从河水 DB_{07} 获得补给,还从泉水 BC_{46} 得到补给,河水补给比例为 72%, 泉水补给比例为 28%。

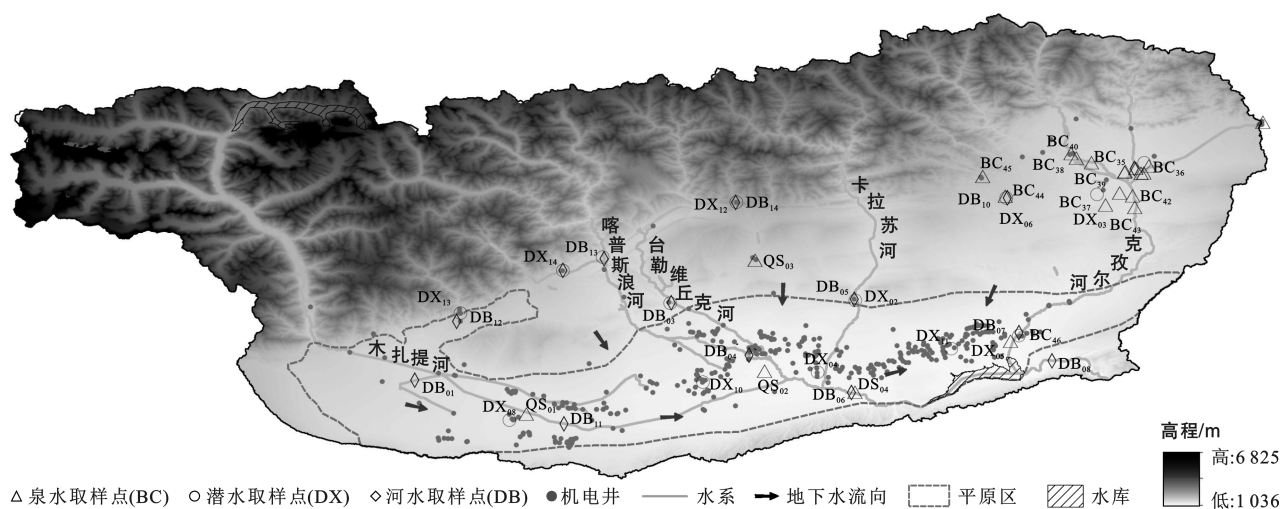


图 10 拜城盆地泉水、潜水、河水的转化关系

Fig.10 Transformational relationship between spring, phreatic and river water in Baicheng basin

3.3 泉水成因分析

拜城盆地北部高中山区的大气降水、冰雪融水沿基岩裂隙入渗,并在入渗过程中与围岩介质中硅酸盐岩、碳酸盐岩发生水—岩相互作用,溶解形成 Na^+ , Ca^{2+} 和 HCO_3^- 等化学组分。在木扎提河上游至中游段,受河流切割第四系松散岩类孔隙水含水层影响,潜水溢出形成侵蚀下降泉(BC_{01} , BC_{18}),水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型,河水、潜水对泉水的补给比例分别为 50.1%, 49.9%。在克孜尔河上游段,黑英

山盆地北部的断裂构造带为地下水径流提供条件,基底的新近系泥岩、砂岩、砾岩,形成相对隔水层,盆地内堆积的巨厚漂卵砾石构成巨大的贮水空间,地下水由北向南运移过程中,南麓分布的数余条山洪沟切割第四系松散岩类孔隙水含水层,地下水溢出形成侵蚀下降泉,水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型,河水、潜水对泉水的补给比例分别为 8.3%, 91.7%。黑英山西侧(BC_{44} , BC_{45})、台勒维丘克河上游与卡拉苏河上游之间(BC_{28}),泉水成因大致相

同,为山洪沟切割古生界志留—泥盆系碳酸盐夹碎屑岩岩溶裂隙水含水层使潜水溢出,形成侵蚀下降泉。

木扎提河中下游与克孜尔河下游段,即喀普斯浪河与木扎提河交汇处以东至赛里木以南,泉水成因为高中山区形成的地下水在河流或沟谷切割含水层后出露形成地表水,地表水流经冲洪积扇,受水力坡度影响,入渗到平原区后再次转化为地下水,地下水在运移过程中遇到新近系泥岩、砂岩、砾岩形成的相对隔水层后运动受阻,在压力作用下水位大面积壅高,地下水在上覆地层相对薄弱处出露地表,形成溢出下降泉(BC_{23} , BC_{46}),最终形成地表径流汇入木扎提河。地下水径流过程中水岩相互作用促进了岩盐矿物的分化、溶解和迁移,使水化学类型由木扎提河上游的 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Ca$ 型转变为 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Cl \cdot Ca \cdot Na$ 型。

4 结论

(1) 拜城盆地泉水水质呈弱碱性,其水化学类型主要为 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Cl \cdot Ca \cdot Na$ 型,泉水与潜水、河水的 TDS 值相差不大,3 者之间水量转化频繁;

(2) 拜城盆地泉水水化学组分主要来源于岩石风化作用、蒸发浓缩作用、阳离子交换作用以及农业—厂矿—生活影响。水—岩相互作用自然影响因子、酸碱环境影响因子、农业—厂矿—生活影响因子对水化学离子的平均贡献率分别为 49.34%, 14.72%, 13.96%;

(3) 泉水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化范围分别为 $-81.28\text{‰} \sim -50.27\text{‰}$ 和 $-12.20\text{‰} \sim -8.57\text{‰}$, 拜城盆地南部 δD 和 $\delta^{18}O$ 整体贫于北部,河水对泉水、潜水进行补给,使得南部泉水、潜水 δD 和 $\delta^{18}O$ 趋于贫化;

(4) 拜城盆地内地表水—地下水转化关系主要为河水补给潜水、泉水,木扎提河中游、克孜尔河上游,河水、潜水对泉水的补给比例分别为 8.3%~50.1%, 49.9%~91.7%;

(5) 拜城盆地泉水成因主要有两种:北部高中山区的大气降水、冰雪融水沿基岩裂隙入渗形成地下水,受河流、山洪沟切割第四系松散岩类孔隙水含水层影响,潜水溢出形成侵蚀下降泉,主要分布在木扎提河上游至中游和克孜尔河上游;高中山区形成的地下水在河流或沟谷切割含水层后出露形成地表水,地表水流经冲洪积扇,受水力坡度影响,入渗到平原区后再次转化为地下水,地下水在运移过程中遇到新近系泥岩、砂岩、砾岩形成的相对隔水层后运动受阻,水位壅高,出露地表,形成溢出下降泉,此类泉主要分布在木扎提河中下游与克孜尔河下游。

参考文献(References)

- [1] 陶旭瑞,边凯,韩贵雷,等.百泉泉域地下水水量—水位双控管理[J].环境工程,2023,41(S2):908-913.
Tao Xurui, Bian Kai, Han Guilei, et al. Double control management of groundwater quantity and water level in Baiquan spring area [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 908-913.
- [2] 李如意,李骊明.数字旅游在大线路旅游开发中的应用:兼论丝绸之路信息驿站建设的意义[J].人文地理,2015,30(3):151-155.
Li Ruyi, Li Liming. Analysis on application of digital tourism in large line tourism development: A case study of building information station in silk road [J]. Human Geography, 2015, 30(3): 151-155.
- [3] 赵斌.北方地区泉水聚落形态研究[D].天津:天津大学,2017.
Zhao Bin. Study on the form of spring settlement in northern China [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [4] 袁建飞,邓国仕,徐芬,等.西昌市尔乌泉域泉水水文地球化学特征及成因[J].水文地质工程地质,2017,44(4):15-22.
Yuan Jianfei, Deng Guoshi, Xu Fen, et al. Hydrogeochemical characteristics and genesis of springs in the catchment area of the Erwu spring of Xichang [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 15-22.
- [5] 胡雪雪,栗晓玲,朱兴宇,等.考虑水转化过程的干旱区内陆河流域适宜灌溉规模[J].农业工程学报,2024,40(6):228-236.
Hu Xuexue, Su Xiaoling, Zhu Xingyu, et al. Suitable irrigation scale of inland river basin in arid areas considering water transformation process [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 228-236.
- [6] 许庆宇,刘春伟,李常锁,等.济南趵突泉泉域水化学特征空间差异性及其控制因素分析[J].环境科学,2024,45(8):4565-4576.
Xu Qingyu, Liu Chunwei, Li Changsuo, et al. Analysis on spatial variability of hydrochemical characteristics and control factors of Jinan Baotu spring area [J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4565-4576.
- [7] 王楠,胥芹,孙小艳,等.趵突泉泉域岩溶水化学特征及成因研究[J].中国岩溶,2024,43(2):279-290.
Wang Nan, Xu Qin, Sun Xiaoyan, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of karst water in Baotu spring watershed [J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(2): 279-290.
- [8] 毛龙富,付舒,刘宏,等.基于氢氧稳定同位素的喀斯特泉水补给来源分析[J].地球科学,2023,48(9):3480-3493.
Mao Longfu, Fu Shu, Liu Hong, et al. Analysis of

- recharge source of karst spring water based on stable hydrogen and oxygen isotopes [J]. *Earth Science*, 2023, 48(9):3480-3493.
- [9] 唐春雷,赵春红,申豪勇,等.娘子关泉群水化学特征及成因[J].*环境科学*,2021,42(3):1416-1423.
Tang Chunlei, Zhao Chunhong, Shen Haoyong, et al. Chemical characteristics and causes of groups water in Niangziguan spring [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3):1416-1423.
- [10] 王海静,张金流,刘再华,等.基于水化学和同位素特征的四川黄龙沟泉群分类研究[J].*地球学报*,2011,32(3):367-372.
Wang Haijing, Zhang Jinliu, Liu Zaihua, et al. Classification of spring groups based on hydrochemical and isotopic features of Huanglong ravine [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(3):367-372.
- [11] 王雅璇,肖蓓,崔步礼,等.百脉泉泉群泉水氢氧稳定同位素时空变化特征[J].*地球环境学报*,2024,15(1):69-77.
Wang Yaxuan, Xiao Bei, Cui Buli, et al. The spatio-temporal characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes of Baimai spring group [J]. *Journal of Earth Environment*, 2024, 15(1):69-77.
- [12] 吕琳,李伟,刘元晴,等.太行山北段金龙洞岩溶泉水化学及同位素动态特征[J].*中国岩溶*,2023,42(1):149-160,181.
Lyu Lin, Li Wei, Liu Yuanqing, et al. Dynamic analysis of hydrochemistry and isotope of the karst spring of Jinlong cave in the northern section of Taihang Mountains [J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1):149-160,181.
- [13] 刘亮.拜城县水资源供需平衡及开发利用现状探析[J].*地下水*,2017,39(5):138-141.
Liu Liang. Analysis on the balance between supply and demand and the present situation of development and utilization of water resources in Baicheng County [J]. *Ground Water*, 2017, 39(5):138-141.
- [14] 段少远.拜城县水资源现状、存在的问题及开发对策[J].*新疆农垦科技*,2012,35(8):50-52.
Duan Shaoyuan. Present situation, existing problems and development countermeasures of water resources in Baicheng County [J]. *Xinjiang Farm Research of Science and Technology*, 2012, 35(8):50-52.
- [15] 段建军,曹晓莉,沈永平,等.天山南坡渭干河流域地表水资源量及其变化趋势[J].*冰川冻土*,2010,32(6):1211-1219.
Duan Jianjun, Cao Xiaoli, Shen Yongping, et al. Surface water resources and its trends in Weigan River basin on the south slope of Tianshan, China during 1956—2007 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(6):1211-1219.
- [16] 陈波.浅谈拜城县水资源开发利用现状分析与对策[J].*地下水*,2017,39(5):164-166.
Chen Bo. Analysis and countermeasures of water resources development and utilization in Baicheng County [J]. *Ground Water*, 2017, 39(5):164-166.
- [17] 冯邵依.黄河中下游冲积平原地下水水化学演变模式[D].河南 郑州:华北水利水电大学,2023.
Feng Shaoyi. Hydrochemical evolution model of groundwater in the Alluvial Plain of the middle and lower Yellow River [D]. Zhengzhou, Henan: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.
- [18] 梅世杰,曾妍妍,周金龙.渭干河流域浅层地下水水化学特征及成因分析[J].*环境化学*,2023,42(10):3439-3448.
Mei Shijie, Zeng Yanyan, Zhou Jinlong. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Weigan River basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(10):3439-3448.
- [19] 雷米,周金龙,张杰,等.新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系[J].*环境科学*,2022,43(4):1873-1884.
Lei Mi, Zhou Jinlong, Zhang Jie, et al. Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River basin, Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4):1873-1884.
- [20] 许秀丽,李云良,高博,等.黄河中游汾河入黄口湿地水源组成与地表地下水转化关系[J].*湖泊科学*,2022,34(1):247-261.
Xu Xiuli, Li Yunliang, Gao Bo, et al. Composition of water sources and transformation relationship between surface water and groundwater in the Fenhe River estuarine wetland of the middle Yellow River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1):247-261.
- [21] 章斌,郭占荣,高爱国,等.用氢氧稳定同位素评价闽江河口区地下水输入[J].*水科学进展*,2012,23(4):539-548.
Zhang Bin, Guo Zhanrong, Gao Aiguo, et al. Estimating groundwater discharge into Minjiang River estuary based on stable isotopes deuterium and oxygen-18 [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4):539-548.
- [22] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, 170(3962):1088-1090.
- [23] 姜凤,周金龙,周殷竹,等.巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别[J].*环境科学*,2023,44(11):6050-6061.
Jiang Feng, Zhou Jinlong, Zhou Yinzhu, et al. Hydro-

- chemical characteristics and pollution source identification of groundwater in plain area of Barkol-Yiwu basin [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(11): 6050-6061.
- [24] Liu Jiutan, Lou Kexin, Gao Zongjun, et al. Comprehensive hydrochemical fingerprint, spatial patterns, and driving forces of groundwater in a topical coastal plain of northern China based on hydrochemical and isotopic evaluations [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 461: 142640.
- [25] Liu Jiutan, Peng Yuming, Li Changsuo, et al. Characterization of the hydrochemistry of water resources of the Weibei Plain, northern China, as well as an assessment of the risk of high groundwater nitrate levels to human health [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115947.
- [26] Chitsazan M, Aghazadeh N, Mirzaee Y, et al. Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia City, Iran [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2019, 21(1): 331-351.
- [27] Toumi N, Hussein B H M, Rafrati S, et al. Groundwater quality and hydrochemical properties of Al-Ula Region, Saudi Arabia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187: 1-16.
- [28] Saleh A, Gad A, Ahmed A, et al. Groundwater hydrochemical characteristics and water quality in Egypt's central eastern desert [J]. *Water*, 2023, 15(5): 971.
- [29] 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水—地下水水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2021, 42(9): 4202-4210.
- Kong Xiaole, Yang Yonghui, Cao Bo, et al. Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River basin [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(9): 4202-4210.
- [30] 魏信祥, 杨周白露, 许乃政. 极端洪涝作用下江西乐安河沿岸地下水化学组分特征及来源分析[J]. *水资源与水利工程学报*, 2023, 34(5): 52-60.
- Wei Xinxiang, Yang Zhou Bailu, XU Naizheng. Characteristics and sources of chemical components in groundwater along the Le'an River of Jiangxi Province under an extreme flood event [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(5): 52-60.
- [31] Vaiphei S P, Kurakalva R M. Hydrochemical characteristics and nitrate health risk assessment of groundwater through seasonal variations from an intensive agricultural region of upper Krishna River basin, Telangana, India [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 213: 112073.
- [32] 李军, 邹胜章, 赵一, 等. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1750-1760.
- Li Jun, Zou Shengzhang, Zhao Yi, et al. Major ionic characteristics and factors of karst groundwater at Huixian karst wetland, China [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1750-1760.
- [33] 余斌, 李升, 王友年. 阿克苏河流域地表水与地下水转化关系研究[J]. *人民长江*, 2021, 52(8): 56-62.
- Yu Bin, Li Sheng, Wang Younian. Transformation of surface water and groundwater in Aksu River basin [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(8): 56-62.
- [34] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Hughes C E, et al. Meteoric water lines in arid central Asia using event-based and monthly data [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 435-445.
- [35] 杜明亮, 吴彬, 李英连. 吐鲁番盆地水环境同位素分析与应用[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(4): 177-182.
- Du Mingliang, Wu Bin, Li Yinglian. Isotope analysis and application of water environment in Turpan basin [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(4): 177-182.
- [36] 邢晓红, 刘桂民, 李红琴, 等. 哈思山地区泉水成因及其氢氧稳定同位素特征探讨[J]. *水文*, 2016, 36(2): 46-50.
- Xing Xiaohong, Liu Guimin, Li Hongqin, et al. Sources of spring water and its characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in Hasi Mountain [J]. *Hydrology*, 2016, 36(2): 46-50.
- [37] Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, et al. Stable isotopic compositions of precipitation in China [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2014, 66(1): 1-17.