

青海省北川河流域孔隙水水化学特征 及源贡献解析



陆丹¹⁾, 陈京鹏²⁾, 闫燕²⁾, 杨询昌²⁾, 刘春伟³⁾, 耿昭克⁴⁾

1) 青海省水文水资源测报中心, 西宁, 810001;

2) 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队

(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东德州, 253000;

3) 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, 济南, 250014;

4) 青海省水资源及节约用水技术服务中心, 西宁, 810001

内容提要:根据2020年采集的53个青海省北川河孔隙水样品,利用ArcGIS10.7、SPSS20.0、Origin2022等软件,基于APCS-MLR模型研究了北川河流域孔隙水水化学特征及并定量分析来源贡献率,结果表明:①研究区孔隙水pH介于7.0~8.0,呈中性~弱碱性。沿水流方向,Ca²⁺和HCO₃⁻质量浓度逐渐降低,Na⁺、Cl⁻和SO₄²⁻质量浓度逐渐升高,水化学类型逐渐由HCO₃⁻-Ca²⁺和HCO₃⁻·SO₄²⁻-Ca²⁺转化为HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻-Na⁺·Ca²⁺和HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻-Na⁺型,与上游相比,TDS及Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻等主要离子质量浓度均明显增高,下游水质变差。②北川河流域孔隙水水化学特征总体受矿物溶滤作用的控制,硅酸盐岩、碳酸盐岩矿物溶解是地下水化学组分的主要来源,同时阳离子交换作用强烈,上游到下游,蒸发浓缩作用显著增加,人类活动增加,对孔隙水水化学特征有一定影响。③北川河流域上游孔隙水主要受天然状态下的水文地球化学进程控制,APCS-MLR模型表明,碳酸盐岩矿物溶滤,岩盐钾盐溶解和离子交换,蒸发浓缩的贡献率分别为35.93%、29.68%、26.54%。下游孔隙水中硅酸盐岩溶解、蒸发浓缩作用、工业活动,农业活动,碳酸盐岩矿物溶解的贡献率分别为41.27%、27.73%、22.91%,应加强下游流域水源保护工作。

关键词:北川河流域;孔隙水;水化学特征;APCS-MLR模型;青海

地下水不仅是人类生存和发展的重要物质资源,也是重要的生态环境因子,为生活、农业和工业提供水源,保障社会经济可持续发展(秦鹏一等,2020)。地下水是水文地球化学循环的重要组成部分,通过与岩石发生化学作用,不同地区的地下水水化学组分表现出不同的特征(彭红霞等,2021)。可利用地下水化学组分来示踪地下水循环途径,对研究地下水资源开发利用、保护、管理等具有重要意义(唐玺雯等,2014;侯国华等,2019;袁利娟等,2021,2022;白华等,2023)。

北川河流域位于青藏高原东北部的青海省河湟谷地,处于青藏高原和黄土高原过渡地区,是典型的高原河谷平原区,北川石家庄和北川塔尔2处全国重要饮用水水源地均位于北川河流域,是西宁市城镇生活用水和工业用水的主要供水水源。因此,北

川河流域的水源保护尤为重要。目前,学者们开展的关于地表水的相关研究较多,包括生态水文响应(王先棒,2020)、流域降水与径流的关系(董喆等,2018)、植被变化对蒸散发量变化及成因分析(杨明楠等,2021),集中于流域地表水、地下水化学特征、水质评价和水资源量方面的分析等(薛建军,2005)。朱亮等(2022)基于流域内地下水水化学和富水性分级特征,构建了区内基于地下水富水性分级的区域水质评价方法。刘春燕等(2022)以西宁市浅层地下水水化学数据为依据,结合地质、地貌、土地利用类型、水文地质调查资料与人类活动影响,研究了西宁市浅层地下水中Fe、Mn分布特征及影响因素。为北川河流域水资源保护提供了借鉴,特别是关于地下水水化学、水质评价方面的研究为本次研究提供了扎实的资料基础,但尚无流域内孔隙

注:本文为第七届青年人才托举工程资助项目(编号:2021QNRC001)的成果。

收稿日期:2024-03-22;改回日期:2024-07-09;网络首发:2024-07-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.085

作者简介:陆丹,女,1985年生,学士,高级工程师,主要从事水环境监测评价工作;Email: 249141572@qq.com。通讯作者:闫燕,女,1975年生,学士,工程师;主要从事水文地质、环境地质、地热地质研究;Email: 1240003049@qq.com。

水化学特征及影响因素贡献率的定量解析。基于此,本文以北川河流域河谷平原的孔隙水为研究对象,借助 ArcGis10.7、SPSS20.0、Origin2022 等软件,采用数理统计、Schoeller 图、Durov 图、Gibbs 图 (Roubil Allal et al., 2022; Suparna Jha et al., 2021; Liu Shuaishuai et al., 2020; 余东等, 2021) 等研究软件和方法,综合分析自然条件和人为活动影响条件下对于北川河流域孔隙水水化学特征的影响。利用绝对因子分析-多元线性回归受体模型 (APCS-MIR) 定量解析影响因素的贡献率 (沈宸宇等, 2022; 涂春霖等, 2023), 以期为流域内地下水水资源开发利用和水源地保护提供依据。

研究区内北川河流经西宁市大通县桥头镇,是县城政府驻地所在地,人口较为集中。以桥头镇为界,沿河上游,人口稀疏,人类活动较少,近似处于不受人类活动影响的自然地下水化学场;沿河下游人类活动频繁,地下水开发利用程度较高,地下水水化学场处于人类活动影响条件下。为甄别人类活动对孔隙水水化学特征的潜在影响,将北川河流域上游和下游分别对应自然条件和人类活动影响条件下开展研究。

1 研究区概况

北川河发源于西宁市大通县西北部达坂山西段的开甫托山,河源海拔 4487 m,河口海拔 2232 m,河长 153 km,平均比降 8.56‰,流域面积 3370.7 km²。流域属大陆性气候,气温的时空变化比较大,多年平均年降水量为 559 mm,降水的区域分布由东南向西北递增。流域内属山地丘陵地形,境内多山,沟壑纵横,有大小山峰 30 多座,大都分布于境内东、北、西和中部区域,中南部区域地势较为平坦,从西北部到东南部海拔高度逐渐降低。

流域地下水资源量为 4.60×10⁸ m³/a,河谷平原地下水资源量占总量的 50% 左右。基岩山区大气降水入渗补给地下水后沿构造断裂、裂隙运移,大部分以泉的形式排泄于冲沟中,少部分以地下潜流的形式补给干流河谷潜水。研究区广泛分布松散地层孔隙水广泛分布,河谷潜水主要呈条带状分布于干流及其河漫滩和 I、II 级阶地的砂砾卵石层中,各自形成一个由补给、径流到排泄相对独立的水文地质单元,河谷潜水与河水有着密切的水力联系;河谷平原区潜水主要接受上游地下水径流补给、河水渗漏补给、大气降水入渗补给以及农田灌溉水入渗补给,河谷潜水与河水互为补给和排泄,交换频繁 (朱亮

等, 2022)。北川河下游有煤矿、火电厂、机床厂、化工厂和水泥厂等大中型厂矿企业。流域内有农耕地约 5×10⁴ hm²,宜牧草地约 14×10⁴ hm²,林地 11×10⁴ hm²,森林覆盖率 37.2%。多年平均年径流量 6.41×10⁸ m³ (青海省水利厅, 2018)。

2 材料与方法

2.1 样品采集和测定

2020 年 8~9 月采集了共计 53 个孔隙水样品,井深 12.0~63.2 m,水位埋深 1.1~29.2 m,其中北川河上游 31 个,下游 22 个 (图 1)。对样品的 pH 和 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、F⁻、TDS (溶解性总固体) 和 TH (总硬度) 的质量浓度进行测定,其中 pH 采用美国 YSI6600 多参数水质仪现场测定, Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、TH 等的质量浓度采用瑞士万通 848 型自动电位滴定仪进行分析,利用美国热电 ICE3500 原子吸收分光光度法测定 K⁺、Na⁺、NO₃⁻ 采用美国铂金埃尔默 Lambda25 紫外可见分光光度计进行测定,采用美国赛默飞 ICS-600 型离子色谱仪测定 Cl⁻、SO₄²⁻ 和 F⁻, TDS 采用重量法进行分析。样品中 K⁺、Ca²⁺、Na⁺ 和 Mg²⁺ 阳离子总量 (TZ⁺), HCO₃⁻、SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 阴离子总量 (TZ⁻), 符合阴阳离子电荷平衡 NICB = $\left| \frac{\gamma(\text{TZ}^+) - \gamma(\text{TZ}^-)}{\gamma(\text{TZ}^+)} \right| < 5\%$ 的要求 (Liu Jiutan et al., 2021), 样品测定精度满足评价要求。

2.2 数据处理

运用 ArcGIS10.7 绘制地下水采样点示意图,使用 Excel 对地下水主要离子进行分析统计,采用 SPSS20.0 软件分析各离子的相关性,Origin2021 软件绘制 Schoeller 图、Durov 图、Gibbs 图等,APCS-MLR 模型定量解析各因子贡献率。

APCS-MLR 模型主要运用 SPSS20.0 软件将各因子组分转化为绝对主成分因子得分 (APCS),再分别针对各指标进行主成分因子多元线性回归,运用回归系数和常数来计算各因子的贡献率,主要计算步骤如下 (张旺等, 2022):

首先,对各离子质量浓度值标准化,并引入 1 个含量为 0 的人为样本,计算各离子 0 含量的样本因子分数,见式 (1) 和式 (2):

$$Z_{i,j} = \frac{C_{i,j} - \bar{C}}{\sigma_j} \quad (1)$$

$$Z_{0,j} = \frac{-\bar{C}}{\sigma_j} \quad (2)$$

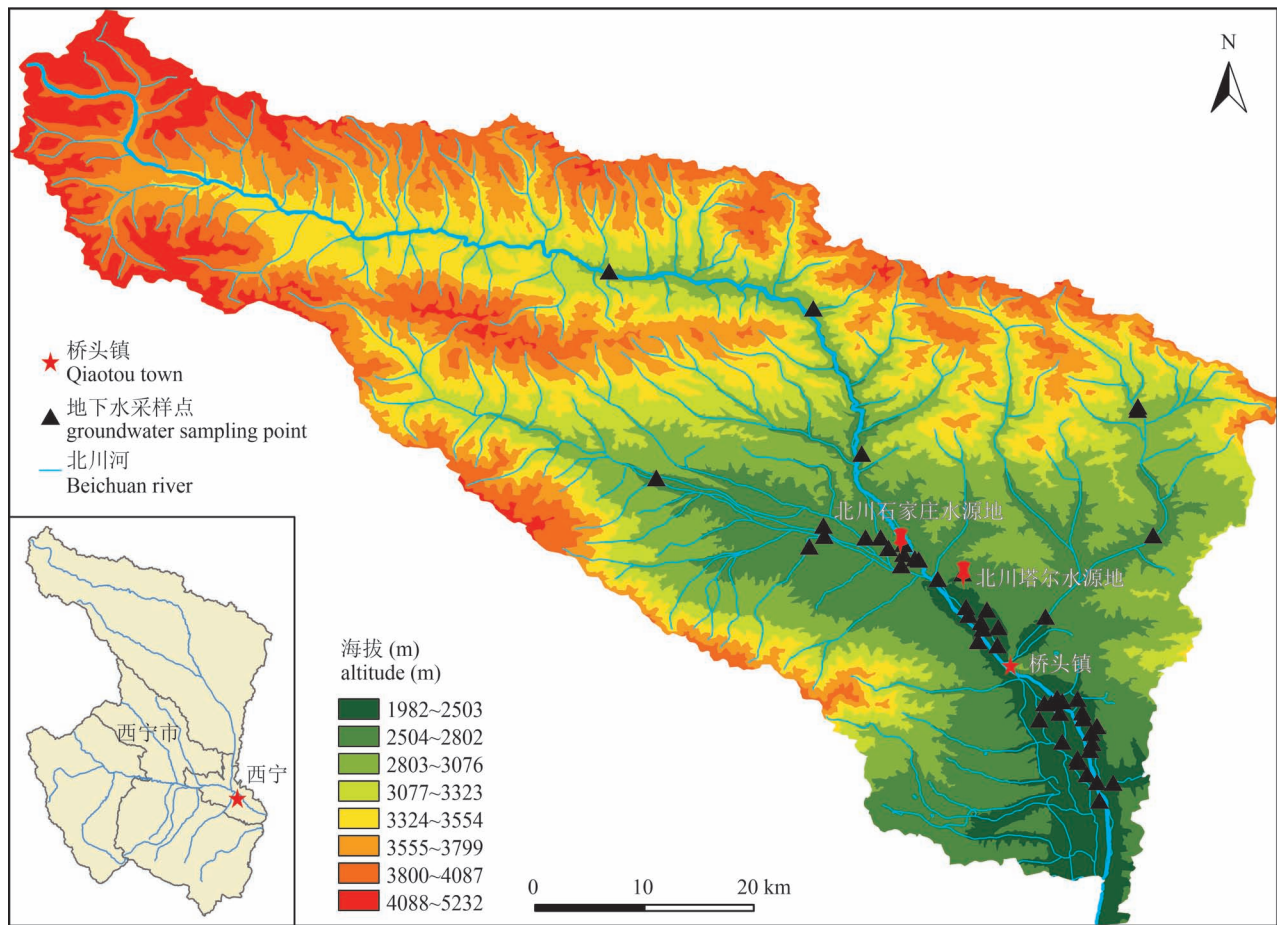


图 1 青海省北川河流域孔隙水采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites of pore water in Beichuan River Basin, Qinghai Province

其次,由主因子得分减去 0 含量样本因子分数得到每个样本的 APCS,将 APCS 作为自变量,各离子质量浓度作为因变量进行多元线性回归分析,利用回归方程斜率和常量计算各离子模拟的质量浓度,见式(3),利用式(4)和(5)计算各影响因子的贡献率:

$$C_{j,m} = b_{0,j} + \sum_{p=1}^p (APCS_p \cdot a_{p,j}) \quad (3)$$

$$P_j = \frac{\left| \sum_{p=1}^p (APCS_p \cdot a_{p,j}) \right|}{\left| b_{0,j} \right| + \left| \sum_{p=1}^p (APCS_p \cdot a_{p,j}) \right|} \quad (4)$$

$$P_{j,x} = \frac{\left| b_{0,j} \right|}{\left| b_{0,j} \right| + \left| \sum_{p=1}^p (APCS_p \cdot a_{p,j}) \right|} \quad (5)$$

其中 $Z_{i,j}$ —第 i 个样品中 j 种离子质量浓度的标准化值,mg/L; $C_{i,j}$ —第 i 个样品中 j 种离子实测质量浓度,mg/L; \bar{C} —实测质量浓度平均值,mg/L; σ_j — j 种

离子质量浓度标准差; $Z_{0,i}$ —第 i 个样品中 0 浓度的样本,mg/L; $C_{j,m}$ —第 j 种离子模拟质量浓度,mg/L; $b_{0,j}$ —第 j 种离子实测值与模拟值回归方程常数项; $a_{p,j}$ —第 j 种离子实测值与模拟值回归方程斜率; $APCS_p$ —因子旋转得分; P_j —各影响因子对第 j 种离子贡献率; $P_{j,x}$ —未知源对第 j 种离子贡献率。

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

青海省北川河流域孔隙水水化学指标统计见表 1,53 个样品的 pH 介于 7.0~8.0,总体上呈中性~弱碱性,统计数据显示,北川河上游样品中主要离子含量明显低于下游样品。上游地下水样品均为淡水,下游样品中淡水、微咸水、咸水的比例分别为 60.9%、34.8%、4.3%(中国地质调查局,2012)。根据 TH 的分类标准(钱会等,2005),北川河上游以微硬水为主,下游主要为硬水,零星分布有微硬水和极硬水。

变异系数常用于分析数据的离散程度,通常变异系数越大代表稳定性越差(李修成等,2021),北川河上游样品中各项指标变异系数较低,仅Na⁺变异系数为1.57,表明北川河上游孔隙水化学指标含量较稳定,而下游样品中Na⁺、Mg²⁺和Cl⁻质量浓度的变异系数均大于1,具有离散程度大、波动性大的特征,其余指标变异系数较小,表明这些指标的空间差化程度相对较小(李玲等,2018)。

基于主要离子的统计特征,为判断地下水中主要离子的变化规律,引入Schoeller图用于识别优势阴阳离子(付凯等,2022)。图2显示,北川河上游样品中优势阴、阳离子分别为Ca²⁺、HCO₃⁻,下游样品中则为Na⁺和Cl⁻。北川河下游样品中主要离子含量较上游有了较大的增加,且下游中各离子含量有较大的空间变化。

运用地下水主要阴阳离子(K⁺+Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻)的毫克当量值和TDS的质量浓度值绘制Durov图,Durov图可反映地下水阴阳离子的主要类型,TDS和pH的大致分布范围,将阴离子所在的三角形分为硫酸盐型、碳酸盐型、氯化物型和混合型等四个区,将阳离子所在三角形也分为四个区,分别为镁型、钙型、钠型和混合型(师环环等,2021)。图3显示,北川河上游地下水中阳离子主要为钙型,阴离子主要为碳酸盐型,下游地下水阳离子中钙型、钠型和混合型均有分布,阴离子主要为碳酸盐型和混合型。综合Durov图和舒卡列夫法,可以看出,北川河上游地下水类型共5种,以HCO₃⁻-Ca²⁺和HCO₃⁻·SO₄²⁻-Ca²⁺为主,分别占比达到40.0%和

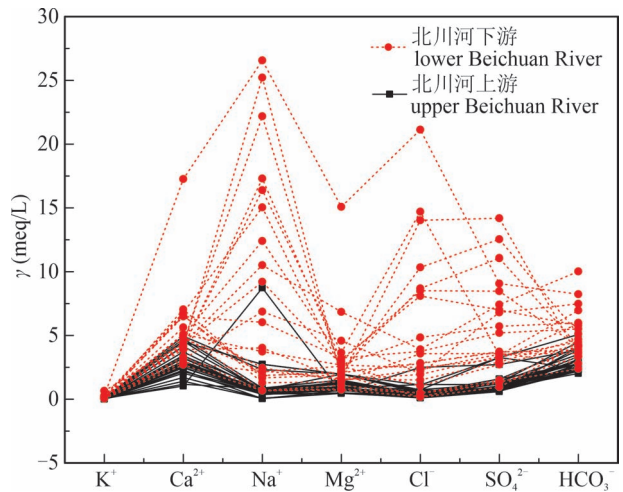


图2 青海省北川河流域孔隙水水化学主要离子Schoeller图

Fig. 2 Schoeller diagram of major ions of pore water hydrochemistry in Beichuan River basin, Qinghai Province

36.7%;下游地下水类型复杂多样,共计11种,主要以HCO₃⁻·SO₄²⁻-Ca²⁺、HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻-Ca²⁺、HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻-Na⁺·Ca²⁺和HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻-Na⁺为主。

基于以上水化学特征可以看出,沿地下水流向,下游地下水中Ca²⁺和HCO₃⁻的质量浓度逐渐降低,Na⁺、Cl⁻和SO₄²⁻的质量浓度逐渐增加,水化学类型逐渐由HCO₃⁻-Ca²⁺和HCO₃⁻·SO₄²⁻-Ca²⁺转化为HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻-Na⁺·Ca²⁺和HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻-Na⁺型。与上游相比,TDS及Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻

表1 青海省北川河流域孔隙水水化学主要离子浓度统计

Table 1 Mass Concentration statistics of hydrochemical ions in groundwater in Beichuan River Basin in Qinghai Province

点位	项目	质量浓度 ρ (mg/L)									
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	TDS	TH
北川河上游	均值	1.95	23.4	59.6	12.3	182	17.1	58.5	4.06	334	198
	中值	1.80	14.1	57.5	10.0	167	11.5	46.8	3.30	283	193
	标准差	0.57	36.9	20.5	5.65	46.1	16.5	33.6	3.14	124	45.3
	变异系数	0.29	1.57	0.34	0.46	0.25	0.96	0.57	0.77	0.37	0.23
	最小值	1.10	1.03	20.7	5.45	124	4.00	29.0	0.30	206	84.0
	最大值	3.59	201	98.7	23.9	310	89.0	157	12.2	601	299
北川河下游	均值	5.95	191	108	35.6	303	185	256	8.00	1054	392
	中值	4.08	92.8	94.9	25.8	262	101	178	7.33	756	352
	标准差	4.96	192	58.0	35.5	112	194	177	5.23	728	188
	变异系数	0.83	1.00	0.54	1.00	0.37	1.05	0.69	0.65	0.69	0.48
	最小值	1.83	1.03	54.1	8.80	146	5.53	45.8	0.60	223	168
	最大值	25.2	611	345	181	611	749	680	26.3	3493	1017

注:样品总数为53件。TDS—溶解性总固体;TH—总硬度。变异系数和标准差无量纲。

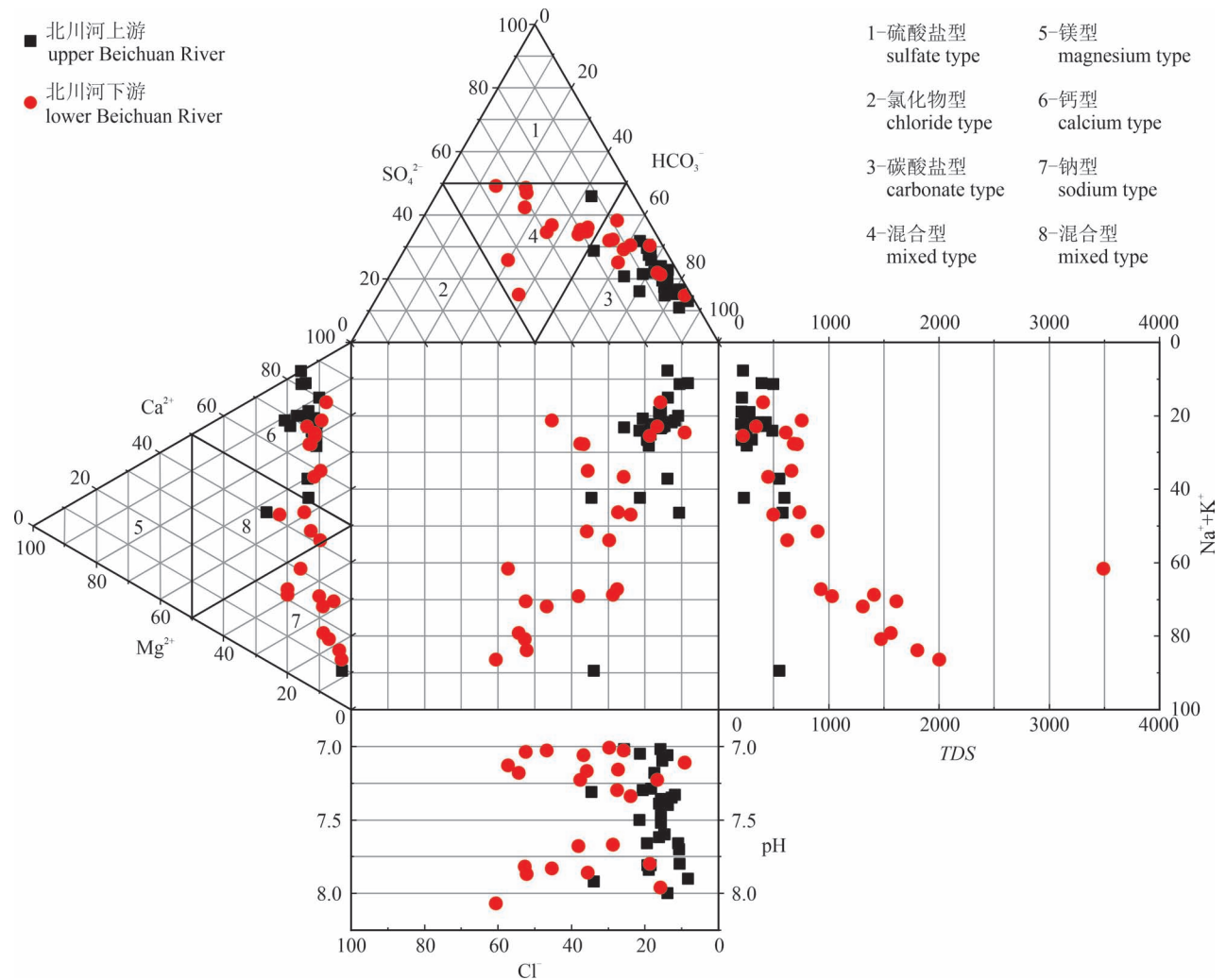


图 3 青海省北川河流域孔隙水 Durov 图

Fig. 3 Durov diagram of pore water in Beichuan River basin, Qinghai Province

等主要离子含量均明显增加,下游水质变差。

3.2 离子来源及控制因素

上述水化学特征统计表明,北川河上游和下游的地下水化学特征差异性明显,通过 Gibbs 图、端元图、离子比值等方法研究研究区孔隙水水化学特征的主要控制因素及离子来源。

3.2.1 溶滤作用

水在径流过程中往往伴随着方解石、白云石、石膏、硅酸盐矿物的溶解,地下水水化学特征主要受岩石风化溶解、蒸发浓缩、大气降水的影响,可利用 Gibbs 图宏观地反映地下水中主要离子的控制因素(魏兴等,2019;汪生斌等,2020)。绘制了北川河流域地下水 Gibbs 图(图 4),北川河上游大部分水样点落在岩石风化区域内,而下游水样点分布在岩石风化和蒸发结晶之间,表明研究区上游水化学特征

受岩石风化溶滤作用控制,下游水化学特征受到岩石风化和蒸发浓缩共同影响,地下水自上游向下游蒸发浓缩作用变强。

为进一步判断盐岩风化的类型,利用 $\gamma(\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{Na}^+)$ 、 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Na}^+)$ 和 $\gamma(\text{HCO}_3^-)/\gamma(\text{Na}^+)$ 之间的比值绘制端元图,当三者比例为 0.11、0.02 和 0.004 时,主要为蒸发盐岩风化溶解,当比值接近 0.24、0.35 和 2 时主要受硅酸盐岩溶解影响关系,当比值分别接近 10、50 和 120 时主要受碳酸盐岩的风化溶解(王建等,2022)。图 5 可以看出,研究区地下水水样点主要位于硅酸盐岩和碳酸盐岩之间,仅有极少样点位于硅酸盐岩和蒸发盐岩之间,表明地下水化学组成主要来源于硅酸盐岩和碳酸盐岩风化溶解,同时上游碳酸盐岩溶解贡献较大,下游硅酸盐岩溶解占据主导地位。

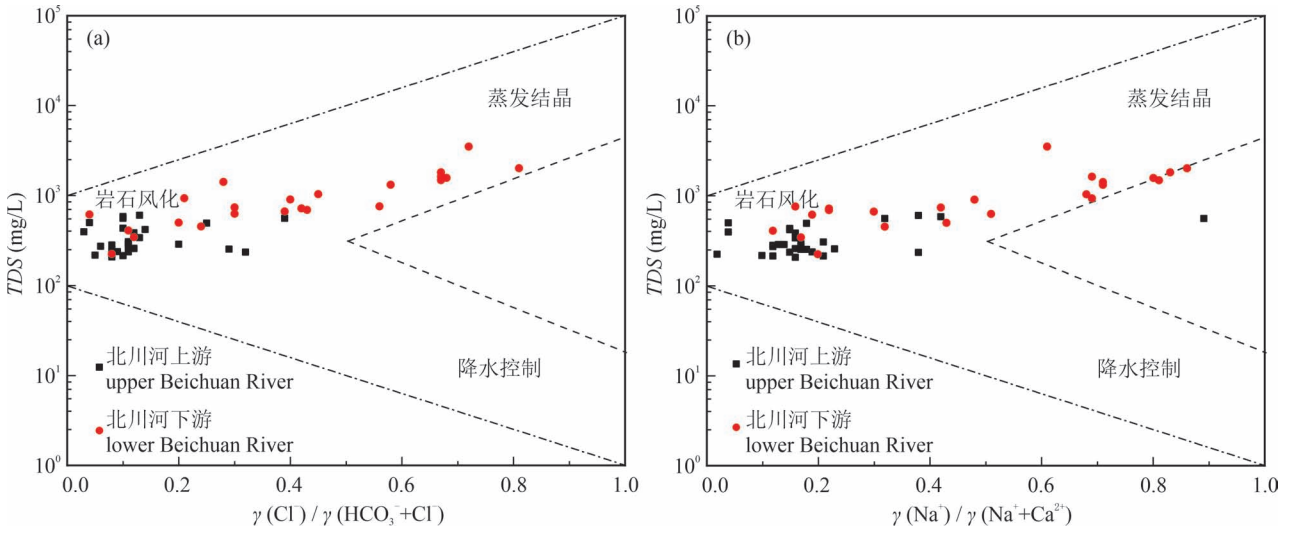


图4 青海省北川河流域孔隙水 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram of pore water in Beichuan River basin, Qinghai Province

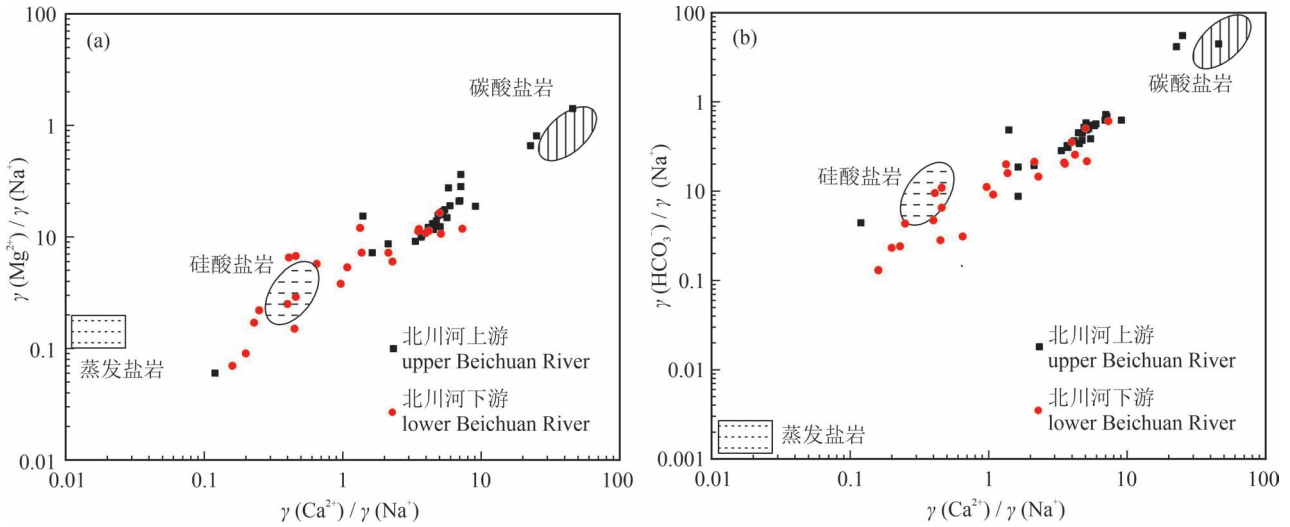


图5 青海省北川河流域孔隙水化学侵蚀模式

Fig. 5 Chemical erosion model of pore water in Beichuan River Basin, Qinghai Province

3.2.2 阳离子交换作用

采用 $[\gamma(\text{Ca}^{2+}) + \gamma(\text{Mg}^{2+}) - \gamma(\text{HCO}_3^-) - \gamma(\text{SO}_4^{2-})]$ 与 $[\gamma(\text{Na}^+) + \gamma(\text{K}^+) - \gamma(\text{Cl}^-)]$ 的浓度关系图可以判断孔隙水中是否发生阳离子交换作用,若出现在 $\gamma = -x$ 直线附近,则表明发生了阳离子交换(崔佳等, 2018)。由图 6a 可以看出,研究区大部分孔隙水均位于 $\gamma = -x$ 直线附近,表明孔隙水中存在阳离子交换作用。通常采用氯碱指数(CAI)来进一步验证孔隙水演化过程中阳离子交换的方向和强度,根据公式(6)(7)计算 CAI-I 和 CAI-II 值,当 CAI-I 和 CAI-II 为正值时,发生了由 K^+ 、 Na^+ 向 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的离子

交换,使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量升高,反之,则发生了反向离子交换(张涛等, 2020),通过计算,研究区地下水中氯碱指数小于 0 的孔隙水共计 44 个,占总数的 83.02%,见图 6b,表明孔隙水阳离子交换作用活跃,且以反向离子交换为主, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量降低, K^+ 、 Na^+ 含量增加。

$$CAI-I = \frac{\gamma(\text{Cl}^-) - \gamma(\text{Na}^+) - \gamma(\text{K}^+)}{\gamma(\text{Cl}^-)} \quad (6)$$

$$CAI-II = \frac{\gamma(\text{Cl}^-) - \gamma(\text{Na}^+) - \gamma(\text{K}^+)}{\gamma(\text{HCO}_3^-) + \gamma(\text{SO}_4^{2-}) + \gamma(\text{CO}_3^{2-}) + \gamma(\text{NO}_3^-)} \quad (7)$$

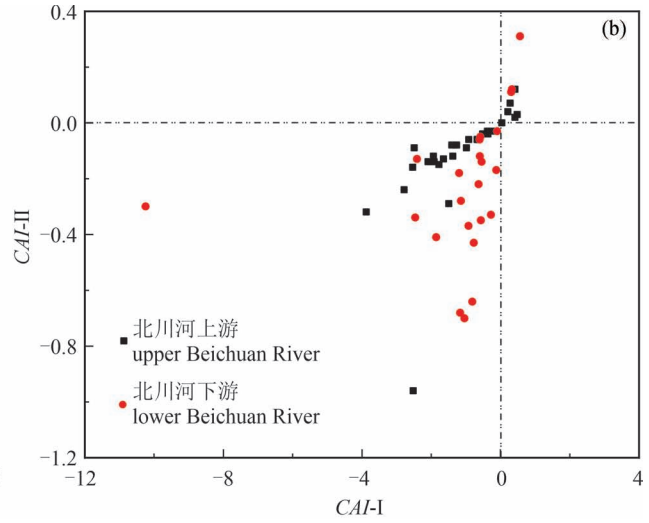
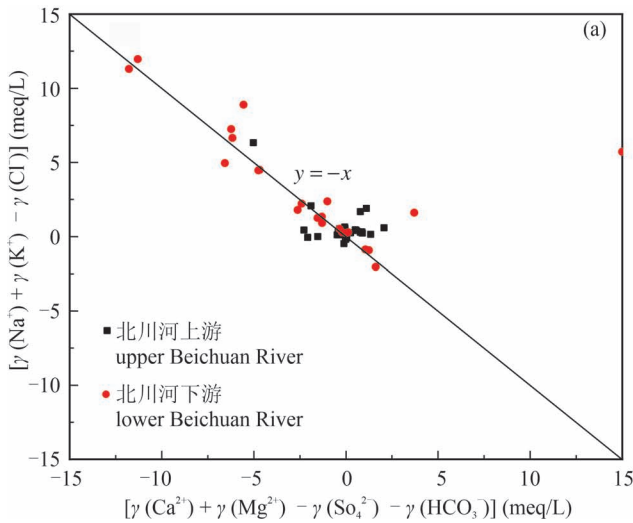


图 6 青海省北川河流域孔隙水阳离子交换作用

Fig. 6 The cation exchange of pore water in Beichuan River Basin, Qinghai Province

3.2.3 人类活动影响

天然状态下地下水的化学成分受自然环境控制(陈京鹏等, 2023), 高原地区人口稀薄, 工矿、农业活动分布较少, 人类活动影响小, 但随着经济社会的发展, 人类活动对于地下水环境的影响已经到了不可忽视的地步。研究区属高原河谷地区, 上游水质较好, 几乎所有水样均为《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017) 中 II 类或 III 类水, 各离子含量均较低, 表明上游流域地下水化学成分受人类活动影响小。下游的中-上段是人类活动聚集区, 水质较差, 各离子含量急剧增加, 特别是指示工矿活动和人类活动的 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等, 达到《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017) 中 IV 类或 V 类水标准。下游的下段部分人类活动减少, 水质明显好于下游的中-上段。

通常以 $\gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 和 $\gamma(\text{NO}_3^-)/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 的浓度比值可以用来判断工矿活动、农业活动、生活污水排放对于地下水的影响(唐金平等, 2019; 吴嘉铃等, 2022), 图 7 显示上游地下水受到人类活动影响较小, 下游中部分水样受到工矿活动影响, 图中 $\gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 值大于 1 部分表明受到工矿活动影响较大, 同时该区域样品点分布较集中, 均位于下游的中-上段人类活动聚集区。而硝酸盐在全区的分布含量均较低, 表明农业活动排放对于该地区地下水环境影响相对较小。

3.3 APCS-MLR 模型的源贡献力定量解析

3.3.1 来源因子识别

运用 SPSS20.0 软件对各指标标准化处理后进

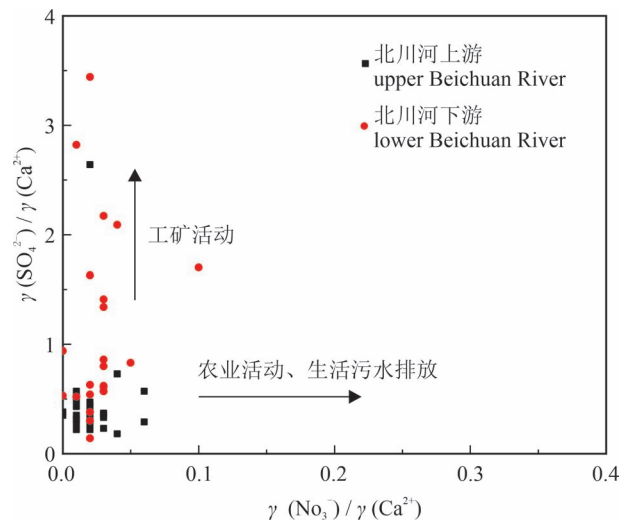


图 7 人类活动对青海省北川河流域孔隙水的影响

Fig. 7 Impacts of human activities on pore water in Beichuan River Basin, Qinghai Province

行因子分析(孟利等, 2017), 通常用 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和 Bartlett 球度检验 Bartlett P 值来识别数据是否符合进行因子分析(段海静等, 2024), 经检验, 北川河上、下游的 KMO 度量分别为 0.62 和 0.68, 和 Bartlett 球度检验 Bartlett P 值为 0, 满足做因子分析的条件, 适合做因子分析(沈宸宇等, 2022)。经方差极大正交旋转后, 提取特征值大于 1 的 3 个因子 (APCS1、APCS2、APCS3), 由表 3 可知, 两个区域均提取了 3 个特征值大于 1 的因子, 其中, 北川河上游区域 3 个因子累计解释率为 81.18%, 北

表 2 KMO 和 Bartlett 检验结果

Table 2 Test results of KMO and Bartlett

项目		北川河上游	北川河下游
取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量 (KMO)		0.62	0.68
Bartlett 的球形度检验	检验值	237.34	302.02
	自由度	45.00	45.00
	显著性水平 sig	0	0

表 3 旋转成分矩阵

Table 3 Rotational composition matrix

指标	北川河上游			北川河下游		
	APCS1	APCS2	APCS3	APCS1	APCS2	APCS3
K ⁺	0.74	0.31	0.06	0.21	0.84	0.09
Na ⁺	0.92	-0.14	0.29	0.96	0.46	0.31
Ca ²⁺	0.11	0.92	-0.18	0.19	0.36	0.84
Mg ²⁺	0.20	0.89	0.23	0.34	0.44	0.81
HCO ₃ ⁻	0.32	0.41	0.72	0.25	0.65	0.34
Cl ⁻	0.85	-0.12	0.28	0.85	0.43	0.33
SO ₄ ²⁻	0.84	0.30	-0.01	0.94	0.44	-0.16
NO ₃ ⁻	0.11	0.71	0.24	-0.08	0.88	-0.08
TDS	0.19	0.07	0.95	0.82	0.38	0.43
TH	-0.38	0.73	0.40	0.09	0.25	0.67
特征值	3.15	3.08	1.89	3.47	3.02	2.34
贡献率 (%)	31.50	30.83	18.85	34.70	30.25	23.44
累计贡献率 (%)	31.50	62.33	81.18	34.70	64.95	88.39

表 4 APCS-MLR 模型分析结果

Table 4 Analysis results of APCS-MLR model

指标	北川河上游			北川河下游		
	回归系数	常数	R ²	回归系数	常数	R ²
K ⁺	0.74	0.21	0.72	0.74	0.30	0.73
Na ⁺	0.95	0.03	0.95	0.98	0.02	0.98
Ca ²⁺	0.90	0.30	0.89	0.90	0.19	0.89
Mg ²⁺	0.88	0.25	0.88	0.94	0.06	0.94
HCO ₃ ⁻	0.79	0.81	0.79	0.76	0.66	0.74
Cl ⁻	0.80	0.20	0.80	0.92	0.08	0.91
SO ₄ ²⁻	0.79	0.37	0.78	0.90	0.15	0.90
NO ₃ ⁻	0.68	0.55	0.66	0.79	0.32	0.80
TDS	0.94	0.15	0.94	1.00	0.01	1.00
TH	0.84	0.70	0.83	0.90	0.20	0.90

川河下游区域 3 个因子累计解释率为 88.39%，由此推断，流域孔隙水水化学影响因素主要有 3 个。

北川河上游区域 APCS1 贡献率为 31.50%，主要载荷为 K⁺(0.74)、Na⁺(0.92)、Cl⁻(0.85) 和 SO₄²⁻

(0.84) 等，通常 Na⁺ 和 Cl⁻ 主要来源于岩盐溶解，K⁺ 和 SO₄²⁻ 分别来源于钾盐的溶解(刘楠等, 2024)，因此可以判断 4 种离子来源于岩盐和钾盐等矿物溶解，加之 TH 载荷为 -0.38，且 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 载荷较小，此处进一步证实地下水中存在反向离子交换作用，因此 APCS1 可看作为岩盐钾盐为主的矿物溶滤作用和离子交换作用的共同影响。

APCS2 的贡献率为 30.80%，主要载荷为 Ca²⁺(0.92)、Mg²⁺(0.89)、NO₃⁻(0.71) 和 TH(0.73) 等，主要原因是地下水溶解了矿物中的可溶性离子，使得 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量升高，相应的 TH 的含量也增大，同时依据化学组分统计显示上游 NO₃⁻ 的含量低，最大值也仅为 12.2mg/L，表明人类活动影响小，因此可将 APCS2 定义为碳酸盐岩类矿物溶滤作用。

APCS3 贡献率为 18.85%，HCO₃⁻(0.72)、TDS(0.95) 的载荷较大，HCO₃⁻ 主要来源于以碳酸盐岩为主的矿物溶解，TDS 来源于地下水径流过程中矿物溶滤作用，蒸发浓缩作用也会导致 TDS 变大等。因此 APCS3 可以定义为蒸发浓缩作用。可以看出北川河上游地下水主要受天然状态下的各类矿物溶滤作用、离子交换作用、蒸发浓缩等天然水文地球化学过程控制。

北川河下游区域 APCS1 贡献率为 34.70%，主要载荷为 Na⁺(0.96)、Cl⁻(0.85) 和 SO₄²⁻(0.94) 和 TDS(0.82) 等，结合前述端元图分析结果，下游区域硅酸盐岩溶解占主导，同时蒸发浓缩作用增加，下游区域内存在一定的工业活动且 SO₄²⁻ 含量较大，最大达 680mg/L，因此 APCS1 可看作为硅酸盐岩矿物溶解、蒸发浓缩作用与工业活动的共同影响。

APCS2 的贡献率为 30.25%，主要载荷为 K⁺(0.84)、HCO₃⁻(0.65) 和 NO₃⁻(0.88)，一般情况下 K⁺ 来源于天然矿物，但下游区域农业耕地施用钾肥，K⁺ 随降水进入地下水中(刘楠等, 2024)，因此可考虑 APCS2 为农业活动影响。

APCS3 贡献率为 Ca²⁺(0.84)、Mg²⁺(0.81) 和 TH(0.67)，可视为碳酸盐岩矿物溶解的影响。

3.3.2 因子贡献解析

利用 APCS-MLR 模型建立各指标的模拟含量与实测含量的相关关系，计算公式见(3)(4)(5)，模拟结果见表 4，北川河上游区域线性拟合 R² 在 0.66~0.95，除了 NO₃⁻(0.66) 外，其余指标的 R² 均大于 0.70；北川河下游区域线性拟合 R² 在 0.73~1.00，除了 K⁺(0.73) 和 HCO₃⁻(0.74) 外，其余指标的 R²

表 5 因子贡献率

Table 5 Factor contribution

指标	贡献率(%)							
	北川河上游				北川河下游			
	APCS1	APCS2	APCS3	未知源	APCS1	APCS2	APCS3	未知源
K ⁺	50.97	29.04	6.11	13.89	24.79	61.05	6.40	7.76
Na ⁺	58.91	12.50	26.20	2.39	79.66	4.94	10.98	4.42
Ca ²⁺	6.25	69.83	14.37	9.56	20.78	4.47	63.72	11.03
Mg ²⁺	10.62	63.41	16.97	9.00	29.41	22.71	43.22	4.65
HCO ₃ ⁻	15.86	27.59	50.29	6.26	23.44	44.60	18.10	13.87
Cl ⁻	57.71	11.40	26.72	4.17	70.89	1.81	23.03	4.26
SO ₄ ²⁻	61.52	30.09	0.84	7.55	82.98	7.10	3.03	6.89
NO ₃ ⁻	7.24	64.87	22.79	5.09	11.21	71.05	6.81	10.94
TDS	10.67	5.51	75.03	8.79	60.91	9.02	24.33	5.75
TH	17.09	45.08	26.12	11.71	8.64	50.57	29.43	11.36

均大于 0.80。由此可见,APCS-MLR 模型分析结果较准确。

计算各因子贡献率,结果见表 5,北川河上游区域 APCS1(岩盐钾盐溶解和离子交换)对 K⁺、Na⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 贡献率较大,分别为 50.97%、58.91%、57.71% 和 61.52%,其余指标的贡献率为 6.25%~17.09%。APCS2(碳酸盐岩矿物溶解)对 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 TH 的贡献率分别为 69.83%、63.41% 和 45.08%,对 K⁺、HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的贡献率也均大于 20%。APCS3(蒸发浓缩作用)对 HCO₃⁻ 和 TDS 的贡献率大于 50%,对其余指标的贡献率为 6.11%~26.72%。4 类因子对地下水的贡献率分别为:29.68%、35.93%、26.54% 和 7.84%,碳酸盐岩矿物溶解>岩盐钾盐溶解和离子交换>蒸发浓缩作用>未知源。

北川河下游区域 APCS1(硅酸盐岩溶解、蒸发浓缩作用、工业活动)对 Na⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 和 TDS 的贡献率均大于 60%,对其余指标的贡献率为 8.64%~29.41%;APCS2(农业活动)对 K⁺、HCO₃⁻、NO₃⁻ 和 TH 的贡献率分别为 61.05%、44.60%、71.05% 和 50.57%,对其余指标的贡献较小;APCS3(碳酸盐岩矿物溶滤作用)对 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 贡献率分别为 63.72% 和 43.22%,对 Cl⁻、TDS 和 TH 的贡献率也大于 20%。4 类因子对地下水的贡献率分别为:41.27%、27.73%、22.91% 和 8.09%,硅酸盐岩溶解、蒸发浓缩和工业活动>农业活动>碳酸盐岩矿物溶滤作用>未知源。

4 结论

(1) 研究区地下水 pH 介于 7.0~8.0,呈中性~弱碱性。沿地下水流向, Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 百分含量逐渐减少, Na⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 百分含量逐渐增加,水化学类型逐渐由 HCO₃⁻-Ca²⁺ 和 HCO₃⁻·SO₄²⁻-Ca²⁺ 转化为 HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻-Na⁺·Ca²⁺ 和 HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻-Na⁺ 型,与上游相比, TDS 及 Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 等主要离子含量均明显增加,下游水质变差。

(2) 北川河流域孔隙水水化学特征总体受矿物溶滤作用的控制,硅酸盐岩、碳酸盐岩矿物溶解是地下水化学组分的主要来源,同时阳离子交换作用强烈,上游到下游,蒸发浓缩作用显著增加,人类

活动增加,对地下水化学特征有一定影响。

(3) 北川河流域上游孔隙水主要受天然状态下的水文地球化学进程控制,APCS-MLR 模型表明,碳酸盐岩矿物溶滤,岩盐钾盐溶解和离子交换,蒸发浓缩的贡献率分别为 35.93%、29.68%、26.54%。下游孔隙水中硅酸盐岩溶解、蒸发浓缩作用、工业活动,农业活动,碳酸盐岩矿物溶解的贡献率分别为 41.27%、27.73%、22.91%,应加强下游流域水源保护工作。

致谢:由衷感谢匿名审稿专家的宝贵意见!感谢柴元冰、贾洁在水质检测工作中给予帮助。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 白华, 杨会峰, 孟瑞芳, 徐步云, 闫晓雪. 2023. 保定平原区地下水化学特征及演化. 地质论评, 69(6): 2216~2228.
- 陈京鹏, 闫燕, 冯颖, 吴晓华, 刘欢, 谭志容, 蒋书杰. 2023. 黄河流域下游德州地区地下水水化学成因及生态环境影响. 环境化学, 42(1): 125~137.
- 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 孙亚楠, 安海, 邢进平. 2020. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制. 环境科学, 41(9): 4011~4020.
- 董喆, 贺康宁, 王根柱, 王先棒. 2018. 北川河流域降水与 NDVI 变化特征及其对径流的影响. 干旱区研究, 35(2): 287~295.
- 段海静, 申浩欣, 彭超月, 任翀, 王艳锋, 刘德新, 马建华. 2024. 基于 APCS-MLR 模型的开封市公交站周边灰尘重金属源解析及健康风险评估. 环境科学, 45(6): 3502~3511.
- 付凯, 张秋英, 李兆, 乔云峰, 李发东, 冷佩芳, 柏树巍. 2022. 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.

- 环境科学学报 42(11): 160~171.
- 侯国华, 高茂生, 党显璋. 2019. 唐山曹妃甸浅层地下水水化学特征及咸化成因. 地质前缘, 26(6): 49~57.
- 李玲, 周金龙, 齐万秋, 陈锋, 陈云飞. 2018. 新疆和田河流域绿洲区浅层地下水水化学特征及成因分析. 水资源与水工程学报, 29(3): 14~20.
- 李修成, 张俊良, 李益朝, 王鹏, 唐力. 2021. 汉中市西南部岩溶水水化学特征及其形成机制. 人民长江, 52(12): 54~58.
- 刘春燕, 刘景涛, 朱亮, 张玉玺, 荆继红, 黄冠星, 周冰, 陈玺, 解飞, 李备. 2023. 高原河谷城市浅层地下水铁锰分布特征、影响因素及其对生态环境的影响—以西宁市为例. 中国地质, 1~19.
- 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王孺瞳. 2024. 德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价. 环境科学, 45(4): 2129~2141.
- 孟利, 左锐, 王金生, 杨洁, 滕彦国, 翟远征, 石榕涛. 2017. 基于PCA-APCS-MLR的地下水污染源定量解析研究. 中国环境科学, 37(10): 3773~3786.
- 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰. 2021. 雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析. 环境科学, 42(11): 5375~5383.
- 钱会, 马致远, 李培月. 2005. 水文地球化学. 北京: 地质出版社: 132~133.
- 秦鹏一, 徐先锋, 蔡五田, 李贵恒, 魏盛辉. 2020. 河南安阳冲洪积扇含水层水化学分布特征及成因分析. 水文, 40(6): 89~96.
- 青海省水利厅. 2018. 青海河湖概况. 武汉: 长江出版社: 87~88.
- 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌. 2022. APCS-MLR结合PMF模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源. 环境科学, 43(5): 2476~2488.
- 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞. 2021. 雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价. 环境科学, 42(9): 4246~4256.
- 唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟. 2019. 湟江冲洪积扇地下水水化学特征及控制因素分析. 环境科学, 40(7): 3089~3098.
- 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede. 2014. 锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素. 环境科学, 35(1): 131~142.
- 涂春霖, 杨润柏, 马一奇, 令狐昌卫, 赵瑞刚, 和成忠. 2023. 黔西拖长江流域水化学演化特征及驱动因素. 环境科学, 44(2): 740~751.
- 汪生斌, 祁泽学, 王万平, 张国强. 2020. 格尔木河水化学特征及成因. 水资源保护, 36(5): 93~98.
- 王建, 张华兵, 许君利, 李永山. 2022. 盐城地区地下水溶质来源及其成因分析. 环境科学, 43(4): 1908~1919.
- 王先棒. 2020. 北川河流域生态水文响应研究. 导师: 贺康宁. 北京: 北京林业大学博士学位论文: 1~146.
- 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌. 2019. 新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律. 环境科学, 40(9): 4042~4051.
- 吴嘉铃, 王莹, 胡倩, 柯小兵, 成建梅, 唐仲华. 2022. 雷州半岛地下水水化学特征及成因分析. 安全与环境工程, 29(1): 145~153+162.
- 薛建军. 2005. 湟水北川河流域地下水分布规律及特征. 地下水, (6): 438~439+472.
- 杨明楠, 刘景涛, 朱亮, 周冰, 温得平. 2021. 植被恢复对青海省北川河流域水循环演变趋势的影响. 水土保持通报, 41(5): 44~50.
- 余东, 周金龙, 张杰, 孙英, 艾力哈木·艾克拉木, 曾妍妍. 2021. 新疆喀什地区地下水铁锰水文地球化学及演化规律. 环境科学学报, 41(6): 2169~2181.
- 袁利, 蒋少杰, 汪定圣, 李婷. 2022. 宿州市城区地下水化学特征及成因机制研究. 地质论评, 68(4): 1555~1566.
- 袁利娟, 张进平, 何云成, 孔祥军, 高剑. 2021. 北京市通州区地热流体水化学和同位素特征及其地热学意义. 地质论评, 67(5): 1545~1556.
- 张涛, 王明国, 张智印, 刘廷, 何锦. 2020. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素. 环境科学, 41(9): 4003~4010.
- 张旺, 高珍冉, 邵粤鹰, 陈小然, 黄啸云, 何腾兵. 2022. 基于APCS-MLR受体模型的贵州喀斯特矿区水土土壤重金属源解析. 农业工程学报, 38(3): 212~219.
- 中国地质调查局. 2012. 水文地质手册. 北京: 地质出版社: 156~157.
- 朱亮, 刘景涛, 杨明楠, 刘春燕, 周冰, 解飞, 李备. 2022. 青海省北川河流域地下水水化学特征与水质评价. 水土保持通报, 42(2): 235~241+249.
- Bai Hua, Yang Huifeng, Meng Ruifang, Xu Buyun, Yan Xiaoxue. 2023&. Chemical characteristics and evolution of groundwater in Baoding Plain. Geological Review, 69(6): 2216~2228.
- Chen Jingpeng, Yan Yan, Feng Yin, Wu Xiaohua, Liu Huan, Tan Zhirong, Jiang Shujie. 2023&. Hydrochemical Genesis and Ecological Environment Influence of Groundwater in Dezhou city at lower Yellow River Basin. Environmental Chemistry, 42(1): 125~137.
- China Geological Survey. 2012#. Handbook of hydrogeology. Beijing: Geology Press: 156~157.
- Cui Jiaqi, Li Xianye, Shi Haibin, Sun Yanan, An Haijun, Xing Jinping. 2020&. Chemical evolution characteristics and formation mechanism of groundwater in hetao irrigation area. Environmental Science, 41(9): 4011~4020.
- Department of Water Resources of Qinghai Province. 2018. Overview of Qinghai River and lake. Wuhan: Yangtze River Press: 87~88.
- Dong Zhe, He Kangning, Wang Genzhu, Wang Xianbang. 2018&. Variation of precipitation and vegetation NDVI and their effects on streamflow in the Beichuan River Basin. Arid Zone Research, 35(2): 287~295.
- Duan Haijing, Shen Haoxin, Peng Chaoyue, Ren Chong, Wang Yanfeng, Liu Dexin, Wang Yulong, Guo Ruichao, Ma Jianhua. 2024&. Source Apportionment and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Dust Around Bus Stops in Kaifeng City Based on APCS-MLR Model. Environmental Science, 35(2): 3502~3511.
- Fu Cangcang, Liu Cong. 2022&. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of Hoh Xil Salt Lake. Yangtze River, 53(7): 36~41.
- Fu Kai, Zhang Qiuying, Li Zhao, Qiao Yunfeng, Li Fadong, Leng Peifang, Bo Yangwei. 2022&. Characteristics and influencing factors of hydrochemical evolution of the mainstream of the Yangtze River in the Yangtze River Economic Belt in the process of urbanization. Acta Scientiae Circumstantiae, 42(11): 160~171.
- Hou Guohua, Gao Maosheng, Dang Xianzhang. 2019&. Hydrochemical characteristics and salinization causes of shallow groundwater in Caofeidian, Tangshan City. Earth Science Frontiers, 26(6): 49~57.
- Liu Chunyan, Liu Jingtao, Zhu Liang, Zhang Yuxi, Jing Jihong, Huang Guanxing, Zhou Bing, Chen Xi, Xie Fei, Li Bei. 2023. Distribution characteristics, influencing factors of Fe and Mn of shallow groundwater in the plateau valley city, Xining, Qinghai Province and its impacts of ecological environment. Geology in China, 1~19.
- Li Ling, Zhou Jinlong, Qi Wanqiu, Chen Feng, Chen Yufei. 2018&.

- Hydrochemical characteristics and formation reasons of shallow groundwater in oasis area of Hotan River Basin, Xinjiang. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 29(3): 14~20.
- Li Xiucheng, Zhang Junliang, Li Yichao, Wang Peng, Tang Li. 2022&. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of karst water in southwestern Hanzhong. *Yangtze River*, 52(12): 54~58.
- Liu Jiutan, Peng Yuming, Li Changsuo, Gao Zongjun, Chen Shaojie. 2021. 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. *Environmental Pollution*, 268: 115947.
- Liu Nan, Chen Meng, Gao Dongdong, Wu Yong, Wang Xiaotong. 2023&. hydrochemical characteristics and health risk assessment of shallow groundwater in the Plain zone of Deyang City. *Environmental Science*, 45(4): 2129~2141.
- Liu Shuaishuai, Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, Liang Yongping, Jia Zhenxing, Li Xuqing. 2020. Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in Jinci spring area, north China. *Carbonates and Evaporites*, 35(3): 1~14.
- Meng Li, Zuo Rui, Wang Jinsheng, Yang Jie, Teng Yanguo, Zhai Yuanzheng, Shi Rongtao. 2017&. Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR. *China Environmental Science*, 37(10): 3773~3786.
- Peng Hongxia, Hou Qingqin, Zeng Min, Huang Changsheng, Shi Huanhuan, Pi Pengcheng, Pan Yujie. 2021&. Hydrochemical characteristics and controlling factors of groundwater in the Leizhou Peninsula. *Environmental Science*, 42(11): 5375~5381.
- Qian Hui, Ma Zhiyuan, Li Peiyue. 2005#. *Hydrological geochemistry*. Beijing: Geology Press; 132~133.
- Qin Pengyi, Xu Xianfeng, Cai Wutian, Li Guiheng, Wei Shenghui. 2021&. Analysis on aquifers hydrochemical distribution characteristics and genesis of the alluvial fan in Anyang, Henan Province. *Journal of China Hydrology*, 40(6): 89~96.
- Roubil Allal, Anas El Ouali, Ali Bülbül, Abderrahim Lahrach, Jacques Mudry, Younes Mamouch, Ali Essahlaoui, Abdellah El Hmadi, Abdelhadi El Ouali. 2022. Groundwater Hydrochemical and Isotopic Evolution from High Atlas Jurassic Limestones to Errachidia Cretaceous Basin (Southeastern Morocco). *Water* 14, 11: 1747.
- Shen Chenyu, Yan Jue, Yu Ruilian, Hu Gongren, Cui Jianyong, Yan Yan, Huang Huabin. 2022&. APCS-MLR combined with PMF model to analyze the source of metals in sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen. *Environmental Science*, 43(5): 2476~2488.
- Shi Huanhuan, Pan Yujie, Zeng Min, Huang Changsheng, Hou Qingqin, Pi Pengcheng, Peng Hongxia. 2021&. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in groundwater of Leizhou Peninsula. *Environmental Science*, 42(9): 4246~4256.
- Suparna Jha, Sayan Sinha, Suparna Hazra. 2021. Hydrochemical evolution and assessment of groundwater quality in fluorosis-affected area, Mandla District, central India. *Groundwater for Sustainable Development*, 14: 100614.
- Tang Jinping, Zhang Qiang, Hu Yang, Zhang Yu, Nie Baowei. 2019&. Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River. *Environmental Science*, 40(7): 3089~3098.
- Tang Xiwen, Wu Jinkui, Xue Liyang, Zhang Mingquan, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede. 2014&. Characteristics and controlling factors of main chemical ions in surface water of Xilin River Basin. *Environmental Science*, 35(1): 131~142.
- Tu Chunlin, Yang Runbo, Ma Yiqi, Linghu Cangwei, Zhao Ruigang, He Chengzhong. 2023&. Characteristics and driving factors of hydrochemical evolution in Tuochangjiang River Basin, Western Guizhou Province. *Environmental Science*, 44(2): 740~751.
- Wang Jian, Zhang Huabing, Xu Junli, Li Yongshan. 2022&. Analysis of groundwater solute source and its genesis in Yancheng. *Environmental Science*, 43(4): 1908~1919.
- Wang Shengbin, Qi Zexue, Wang Waping, Zhang Guoqiang. 2020&. Hydrochemical characteristics and origin of the Golmud River. *Water Resources Protection*, 36(5): 93~98.
- Wang Xianbang. 2020&. Response on eco-hydrology in Beichuan River Basin. Supervisor: He Kangning. Thesis of Doctor degree. Beijing: Beijing Forestry University; 1~146.
- Wei Xing, Zhou Jinlong, Nai Weihua, Zeng Yanyan, Fan Wei, Li Bin. 2019&. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang. *Environmental Science*, 40(9): 4042~4051.
- Wu Jialing, Wang Ying, Hu Qian, Ke Xiaobing, Chen Jianmei, Tang Zhonghua. 2022&. Hydrochemical Characteristics and Genetic Analysis of Groundwater in Leizhou Peninsula. *Safety and Environmental Engineering*, 29(1): 145~153+162.
- Xue Jianjun. 2005#. Distribution and characteristics of groundwater in Beichuan river basin of Huangshui River. *Groudwater*, (6): 438~439+472.
- Yang Mingnan, Liu Jingtao, Zhu Liang, Zhou Bing, Wen Deping. 2021&. Effects of vegetation restoration on evolution trend of water cycle at Beichuan River in Qinghai Province. *Bulltion of Soil and Water Conservation*, 41(5): 44~50.
- Yu dong, Zhou Jinlong, Zhang Jie, Sun Ying, Ailihamu · Aikelamu, Zeng Yanyan. 2021&. Hydrological geochemistry and evolution of iron and manganese in groundwater in Kashi, Xinjiang. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 41(6): 2169~2181.
- Yuan Li, Jiang Shaojie, Wang Dingsheng, Li Ting. 2022&. Study on hydrochemical characteristics and formation of groundwater in urban district of Suzhou. *Geological Review*, 68(4): 1555~1566.
- Yuan Lijuan, Zhang Jinping, He Yuncheng, Kong Xiangjun, Gao Jian. 2021&. Hydrochemical and isotopic characteristics of geothermal fluids in Tongzhou District, Beijing, and their geothermal significance. *Geological Review*, 67(5): 1545~1556.
- Zhang Tao, Wang Mingguo, Zhang Zhiyin, Liu Ting, He Jin. 2020&. Chemical characteristics and control factors of surface water in Ranwu Lake basin. *Environmental Science*, 41(9): 4003~4010.
- Zhang Tao, He Jin, Li Jingjie, Cao Yueting, Gong Lei, Liu Jinwei, Cai Yuemei. 2018&. Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin. *Environmental Science*, 39(11): 4981~4990.
- Zhang Wang, Gao Zhenran, Tai Yueying, Chen Xiaoran, Huang Xiaoyun, He Tengbing. 2022&. Source analysis of the heavy metals in paddy field soils in Karst mining areas of Guizhou using APCS-MLR receptor model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(3): 212~219.
- Zhu Liang, Liu Jingtao, Yang Mingnan, Liu Chunyan, Zhou Bing, Xie Fei, Li Bei. 2022&. Chemical characteristics and quality evaluation of groundwater in Beichuan River Basin in Qinghai Province. *Bulltion of Soil and Water Conservation*, 42(2): 235~241+249.

Hydrochemical characteristics and source contribution analysis of pore water in Beichuan River Basin, Qinghai Province

LU Dan¹⁾, CHEN Jingpeng²⁾, YAN Yan²⁾, YANG Xunchang²⁾, LIU Chunwei³⁾, GENG Zhaoke⁴⁾

1) *Hydrology and Water Resources Forecast Center of Qinghai Province, Xining, 810001;*

2) *The Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou, Shandong, 253000;*

3) *No. 801 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade of Shandong Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan, 250014;*

4) *Water Resources and Water Conservation Technical Service Center of Qinghai Province, Xining, 810001*

Objectives: Based on the 53 pore water samples of Beichuan River in Qinghai Province collected in 2020, the hydrochemical characteristics of the pore water in the Beichuan River Basin and the quantitative analysis of the contribution of the sources were investigated.

Methods: Using ArcGIS10.7, SPSS20.0 and Origin 2022 software, the hydrochemical characteristics of the pore water in the Beichuan River Basin and the quantitative analysis of the source contribution were studied based on the APCS-MLR model.

Results: The results showed that: ① The pH of the pore water in the study area ranged from 7.0 to 8.0 and was neutral to weakly alkaline. Along the direction of water flow, the mass concentrations of Ca^{2+} and HCO_3^- gradually decreased, and the mass concentrations of Na^+ , Cl^- and SO_4^{2-} gradually increased, and the hydrochemical type was gradually transformed from $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ to $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- - \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- - \text{Na}^+$ type, compared with the upstream, the mass concentration of TDS and major ions such as Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} increased significantly, and the downstream water quality became worse. ② The hydrochemical characteristics of pore water in Beichuan River Basin were generally controlled by mineral dissolution and filtration, silicate rock, carbonate rock mineral dissolution were the main source of chemical components of groundwater, while cation exchange was strong, upstream to downstream, evaporation and concentration increased significantly, and the increase in human activities, which had a certain impact on the pore water hydrochemical characteristics. ③ The pore water in the upstream of Beichuan River Basin was mainly controlled by hydrogeochemical processes in the natural state, and the APCS-MLR model showed that the contributions of carbonate rock mineral leaching, rock salt potassium salt dissolution and ion exchange, and evapotranspiration and concentration were 35.93%, 29.68%, and 26.54%, respectively. The contribution of silicate rock dissolution, evaporation concentration, industrial activities, agricultural activities, and carbonate rock mineral dissolution in the downstream pore water were 41.27%, 27.73%, and 22.91%, respectively.

Conclusions: The activity of industry and agriculture in the downstream pore water was greater than that in the upstream. We should strengthen the protection of water resources in the downstream basin.

Keywords: Beichuan River Basin; pore water; hydrochemical characteristics; APCS-MLR model; Qinghai

Acknowledgements: This paper is funded by the 7th Youth Talent Lifting Project (No. 2021QNRC001)

First author: LU Dan, female, born in 1985, bachelor, senior engineer, is mainly engaged in water Environmental monitoring assessmen; Email: 249141572@qq.com

Corresponding author: YAN Yan, female, born in 1975, bachelor, engineer, mainly engaged in hydrogeology, environmental geology, geothermal geology research; Email: 1240003049@qq.com

Manuscript received on: 2024-03-22; Accepted on: 2024-07-09; Published online on: 2024-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.085

Edited by: ZHANG Yuxu