



## 班公湖流域水化学特征及主控因素分析

黄峻川, 严步青, 刘 沛

中国地质调查局 应用地质研究中心, 四川 成都 610036

**摘 要:** 通过班公湖流域水资源调查、数据采集与分析, 运用数理统计、水化学分析方法综合研究流域水化学特征及主控因素。结果表明: 水化学类型河水以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型水为主、湖水以  $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$  型水为主、地下水以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型水为主。河水和地下水形成过程中主要受碳酸盐岩和硅酸盐岩控制, 湖水主要受蒸发结晶作用控制。湖水中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$  来源于降雨、蒸发岩溶解以及其他含钾钠矿物溶解; 河水以及地下水中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$  主要来源于蒸发岩溶解; 各水体中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  来源于碳酸盐岩矿物和石膏溶解, 其中河水和地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  主要来源于碳酸盐岩矿物溶解。地下水中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  与含水层或土壤中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  发生离子交换作用。

**关键词:** 水化学; 蒸发岩; 班公湖; 西藏

## HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS AND MAIN CONTROLLING FACTORS IN BANGONG LAKE BASIN

HUANG Jun-chuan, YAN Bu-qing, LIU Pei

Applied Geology Research Center, CGS, Chengdu 610036, China

**Abstract:** Based on the survey, data collection and analysis of water resources in Bangong Lake Basin, the hydrochemical characteristics and main controlling factors of the area are studied through mathematical statistics and hydrochemical analysis. The results show that the  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  type water is dominated in river,  $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$  type water in lake and  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  type water in groundwater in terms of hydrochemical types. The formation of river water and groundwater is mainly controlled by carbonate rocks and silicate rocks, and the lake water by evaporation-crystallization. The  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{K}^+$  in lake water are derived from precipitation, evaporite dissolution and dissolution of other potassium-sodium minerals, while those in river water and groundwater mainly come from evaporite dissolution. The  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  in all water bodies are from the dissolution of carbonate rock minerals and gypsum, among which the  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in river water and groundwater mainly originate from the dissolution of carbonate rocks. There is ion exchange action of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  in groundwater with  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in aquifer or soil.

**Key words:** hydrochemistry; evaporite; Bangong Lake; Tibet

### 0 引言

水体在补给、运移和排泄过程中往往会与周围环

境发生一系列的水岩作用<sup>[1-3]</sup>, 其水化学特征常被用来研究区域内各种水化学的类型、控制因素、反应环境

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-10. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“喀纳-尼苏综合地质调查(DD20211580)。

作者简介: 黄峻川(1991—), 男, 工程师, 主要从事水文地质与水资源调查研究工作, 通信地址 四川省成都市金牛区茶店子路 399 号, E-mail//hjunchuan@mail.cgs.gov.cn

通信作者: 刘沛(1989—), 男, 硕士, 工程师, 通信地址 四川省成都市金牛区茶店子路 399 号, E-mail//304789204@qq.com

等<sup>[4-6]</sup>,是研究水环境质量的重要方法。基于上述研究,国内外已经取得了很多成果,研究方法也越来越多样化。Gibbs<sup>[7]</sup>通过研究全球各种水体水化学组分,分析水体水化学组分的三大控制因素;孙岐发等<sup>[8]</sup>利用 SPSS 数理统计软件以及 Gibbs 模型模拟分析了莲花山地区地下水化学类型以及成因;孙平安等<sup>[9]</sup>计算大溶江、灵渠流域各离子间比值,探讨了离子主要来源以及控制因素;林聪业等<sup>[10]</sup>根据氯碱指数,判断拉萨河流域地下水中是否存在离子交换作用等。

水是生命之源、生态之基,是影响当地经济、社会发展的关键因素。随着西藏阿里地区社会经济发展,区内水资源开发利用与保护要求也不断提高。但国内外对阿里地区开展的水文地质研究工作较少,目前仅限于地下水资源分布、地下水系统划分<sup>[11-12]</sup>等方面的研究,有关区域水化学特征与成因机制等方面的研究尚未系统开展。班公湖是阿里地区的重要湖泊,在维系区域水平衡、生态环境与社会经济可持续发展等方面具有举足轻重的作用。鉴于此,本文依托喀纳-尼苏综合地质调查项目,以班公湖流域为研究对象,采用数理统计、Piper 三线图、离子比值法、Gibbs 图、氯碱指数等方法全面分析班公湖流域水化学特征及其主控因素,为班公湖流域生态环境保护、水资源开发利用等方面提供理论支撑。

## 1 研究区概况

班公湖流域位于青藏高原西北部、阿里地区最北端,地理坐标为:东经 78°43′24″—79°56′30″,北纬 33°25′53″—33°46′41″。南距日土县城 14 km,国道 G219 呈南北向贯穿整个研究区(图 1)。

班公湖研究区海拔在 4 200 m 以上,属高原季风气候,海拔高,含氧量低,受喜马拉雅山脉阻挡,降雨稀少,蒸发剧烈。地貌为高原湖盆区,整体地势为中间低、四周高,总流域面积约为 2 500 km<sup>2</sup>。

研究区主要出露中生代地层,侏罗系到白垩系均有出露,岩性主要为砂砾岩、灰岩、板岩、变质砂岩和蛇绿混杂岩,第四纪沉积物主要出露更新统湖积层以及全新统湖积层和冲洪积层,湖积层主要分布在湖盆四周,冲洪积层则主要分布在河流及沟谷的山间缓坡地带。研究区为多年冻土区,可开发利用的地下水类型主



图 1 研究区交通位置图

Fig. 1 Traffic location map of the study area

1—研究区(study area); 2—国道(national highway); 3—河流(river);  
4—湖泊(lake)

要为冻结层上水。主要含水岩组为湖区附近的第四系松散岩类冻结层上水,其次为碎屑岩类冻结层上水,区域地下水水位普遍小于 15 m,单井涌水量小于 100 m<sup>3</sup>/d,水量较小,局部可抽干。研究区补给来源主要包括大气降水、地表水侧向入渗、冰雪融水及周边地下水径流汇入。

## 2 样品采集及分析

本研究共采集地表水样 9 组(其中湖水 4 组、河水 5 组),地下水样 11 组(均为井深 50 m 以内浅井),见图 2。样品采集严格按照《水质采样技术规程(SL 187—96)》进行:采取地下水样品时,用 GPS 全球定位系统定位,待水温、pH 等水化学指标稳定后,开始取样;样品保存时,需采用干净的聚乙烯塑料容器密封,并送至实验室 4℃冷藏,直至分析测试。所有样品均委托西藏晟源环境工程有限公司室内分析测试完成,计算结果误差均小于 5%,说明数据测定结果可靠<sup>[13]</sup>。水样阳离子通过电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES: ICP6300)进行测试,测试精度为 0.1 mg/L,阴离子通过离子色谱仪测定,测试精度为 0.1 mg/L,重碳酸根为酸碱滴定法测定。



图 2 水体取样位置图

Fig. 2 Water sampling location map

1—地下水取样点(groundwater sampling point); 2—河流取样点(river sampling point); 3—湖泊取样点(lake sampling point)

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

3.1.1 基本理化参数

水化学分析结果见表 1. 河流水体的 pH 为 8.3~8.8, 平均值 8.5, 呈弱碱性, 矿化度 90~251 mg/L, 属于淡水<sup>[14]</sup>. 湖泊 pH 为 8.4~9.0, 呈弱碱性, 矿化度 630~2 066 mg/L, 除入湖口以及东侧流域偏低以外, 整体属于微咸水<sup>[14]</sup>. 地下水的 pH 为 8.2~8.5, 平均 8.3, 呈弱碱性, 矿化度 128~797 mg/L, 整体属于淡水<sup>[14]</sup>.

班公湖湖泊主要离子和矿化度含量的空间变化关系为东部偏低、向西部增加的趋势(图 3). 主要原因为

东部受大量低矿化度的地表水补给, 西部仅少量地表水补给.

河流 2(见图 2)中的主要离子和矿化度具有从上游至下游浓度由小变大的趋势(图 4). 主要原因为河流源头多为冰雪融水补给, 在地表水流动过程中, 受水岩作用控制, 导致矿化度逐渐增加.

地下水除 QSY07 号点外, 主要离子和矿化度由东向西沿径路整体呈减小趋势(图 5). 流域东部村镇水井和 QSY07 号水井位置海拔较低、离湖较近, 湖水与地下水水力联系较密切, 湖水在雨季易对地下水构成一定程度的补给.

表 1 水化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of hydrochemical compositions

| 采样点 | 分析值 | pH  | 钾    | 钠     | 钙     | 镁     | 氯化物    | 硫酸盐   | 硝酸盐   | 重碳酸根  | 矿化度    |
|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 河流  | 最小  | 8.3 | 1.0  | 1.3   | 10.0  | 3.2   | 1.5    | 12.8  | 1.0   | 56.0  | 90.0   |
|     | 最大  | 8.8 | 2.2  | 19.0  | 90.0  | 23.4  | 7.1    | 78.9  | 2.2   | 204.0 | 251.0  |
|     | 平均  | 8.5 | 1.6  | 10.9  | 46.5  | 12.3  | 4.0    | 35.9  | 1.3   | 119.6 | 157.6  |
| 湖泊  | 最小  | 8.4 | 40.0 | 500.0 | 8.1   | 240.0 | 600.0  | 750.0 | 0.003 | 200.0 | 630.0  |
|     | 最大  | 9.0 | 83.1 | 765.0 | 32.5  | 189.0 | 1095.0 | 849.0 | 0.003 | 500.0 | 2066.0 |
|     | 平均  | 8.6 | 65.9 | 655.0 | 19.6  | 210.2 | 925.3  | 813.0 | 0.003 | 317.5 | 1348.3 |
| 地下水 | 最小  | 8.2 | 0.9  | 3.1   | 18.0  | 8.2   | 3.7    | 21.9  | 0.9   | 96.0  | 128.0  |
|     | 最大  | 8.5 | 11.2 | 184.0 | 180.0 | 85.0  | 256.0  | 628.0 | 13.3  | 337.0 | 797.0  |
|     | 平均  | 8.3 | 4.5  | 35.6  | 54.4  | 29.7  | 43.5   | 109.3 | 5.6   | 250.5 | 311.4  |

含量单位:mg/L.

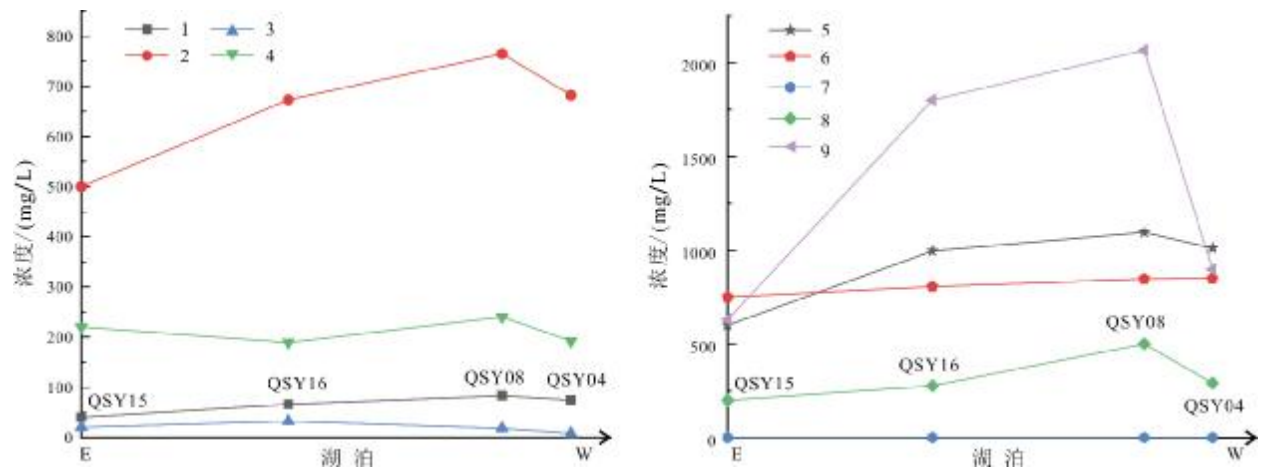


图 3 班公湖离子浓度空间变化特征

Fig. 3 Spatial variation characteristics of ion concentration in Bangong Lake

1— K<sup>+</sup>; 2— Na<sup>+</sup>; 3— Ca<sup>2+</sup>; 4— Mg<sup>2+</sup>; 5— Cl<sup>-</sup>; 6— SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 7— NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; 8— HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; 9—矿化度(salinity)

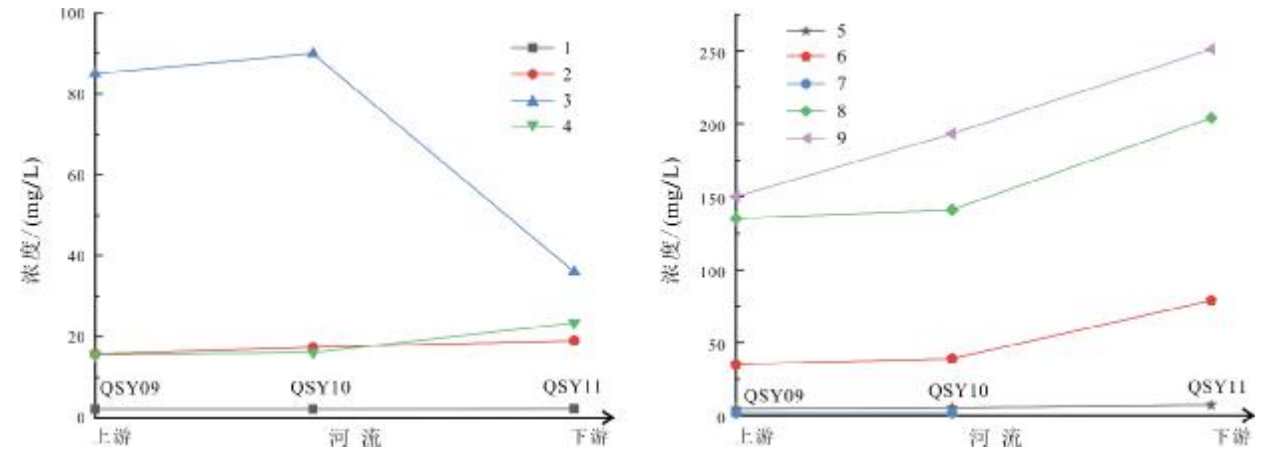


图 4 河流离子浓度空间变化特征

Fig. 4 Spatial variation characteristics of ion concentration in rivers

1— K<sup>+</sup>; 2— Na<sup>+</sup>; 3— Ca<sup>2+</sup>; 4— Mg<sup>2+</sup>; 5— Cl<sup>-</sup>; 6— SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 7— NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; 8— HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; 9—矿化度(salinity)

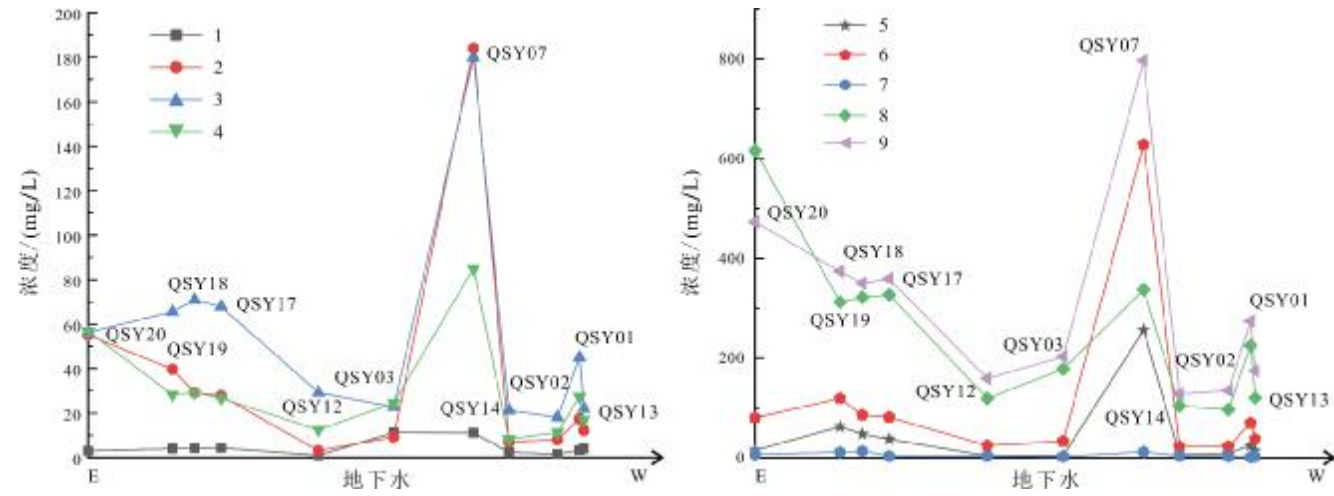


图 5 地下水离子浓度空间变化特征

Fig. 5 Spatial variation characteristics of ion concentration in groundwater

1— K<sup>+</sup>; 2— Na<sup>+</sup>; 3— Ca<sup>2+</sup>; 4— Mg<sup>2+</sup>; 5— Cl<sup>-</sup>; 6— SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 7— NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; 8— HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; 9—矿化度(salinity)

3.1.2 水化学成分特征

表 2 为研究区水体矿化度及离子摩尔浓度大小,其中湖泊优势阳离子主要为  $\text{Na}^+$ 和  $\text{Mg}^{2+}$ , 优势阴离子为  $\text{Cl}^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ ; 河流中优势阳离子主要为  $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Mg}^{2+}$ , 优势阴离子为  $\text{HCO}_3^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ ; 地下水中优势离子与河水一致. 由 Piper 三线图(图 6)可知,湖水以碱金属离子以及强酸根离子为主, 河水以碱金属离子以及弱酸根离子为主, 地下水以碱金属离子以及弱酸性离子为主. 结合舒卡列夫分类标准, 湖水水化学类型为  $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$  型,河水水化学类型为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型,地下水水化学类型以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型为主.

3.2 水化学控制因素

3.2.1 Gibbs 分析

Gibbs 图可以用来判别水体中各种离子的控制因素<sup>[15-16]</sup>. 由图 7 可以看出,河水矿化度为 90~251 mg/L,  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  0.09~0.31,  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  0.04~0.05, 表明河水水化学离子组成受岩石风化控制为主; 湖水矿化度为 630~2 066 mg/L,  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  0.92~0.98,  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  0.79~0.86,表明蒸发-结晶一定程度上控制着湖水水化学特征;地下水矿化度为 135~797 mg/L,

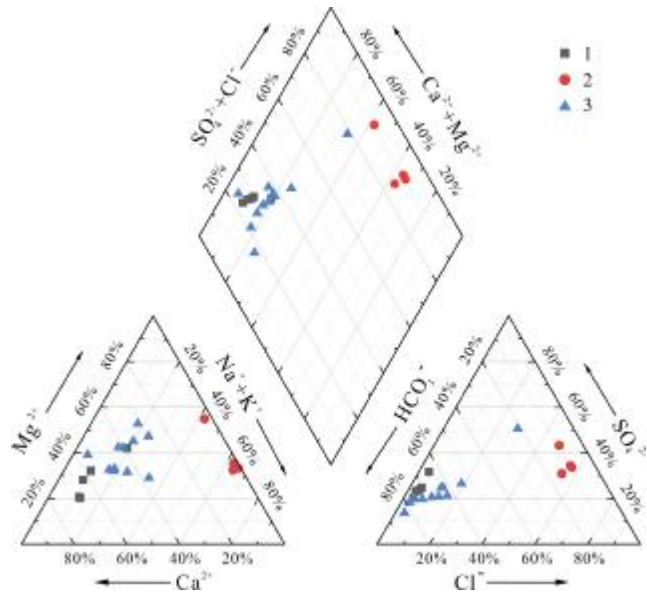


图 6 班公湖流域水体 Piper 图

Fig. 6 Piper diagram of water in Bangong Lake Basin  
1—河流(river); 2—湖泊(lake); 3—地下水(groundwater)

$\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  0.08~0.47,  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  0.03~0.57, 表明地下水水化学离子组成受岩石风化控制为主.

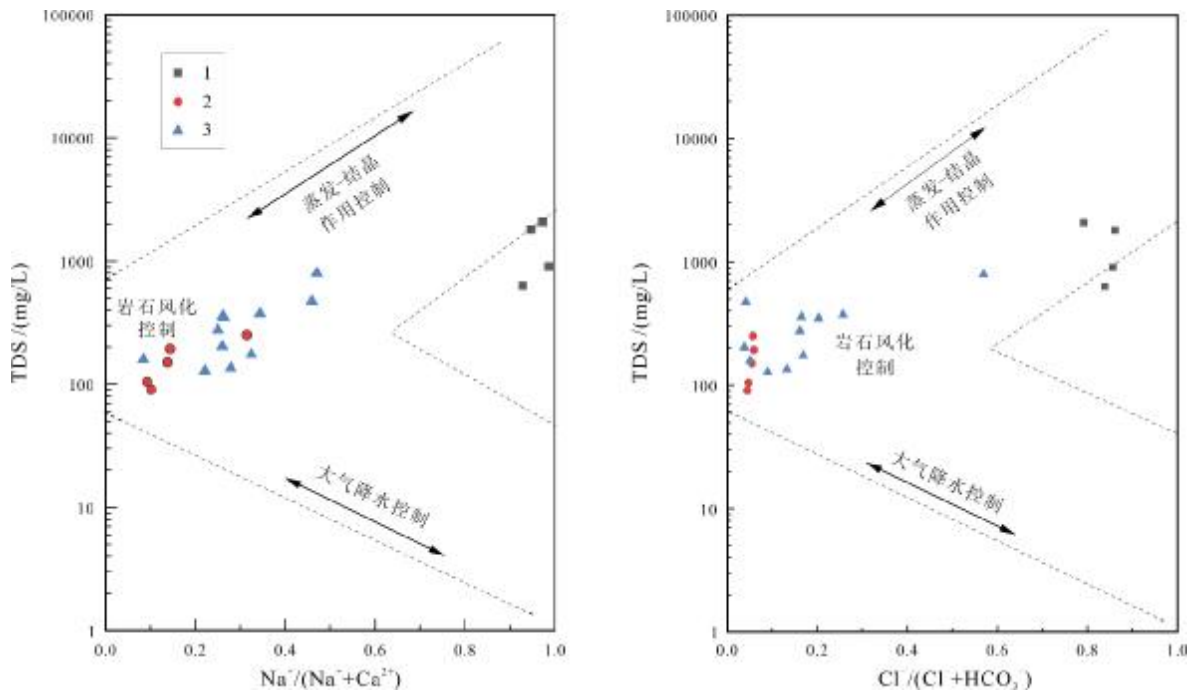


图 7 水化学 Gibbs 图

Fig. 7 Gibbs diagram showing the hydrochemical characteristics of water  
1—湖泊(lake); 2—河流(river); 3—地下水(groundwater)

表 2 水体离子浓度及矿化度  
Table 2 Ion concentration and salinity in water

| 采样点   | 点性质 | 钾    | 钠     | 钙    | 镁     | 氯化物   | 硫酸盐   | 硝酸盐  | 重碳酸根  | 矿化度  |
|-------|-----|------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| QSY05 | 河水  | 0.03 | 0.06  | 0.50 | 0.28  | 0.04  | 0.29  | 0.02 | 0.92  | 90   |
| QSY06 | 河水  | 0.03 | 0.06  | 0.60 | 0.27  | 0.05  | 0.27  | 0.04 | 1.02  | 104  |
| QSY09 | 河水  | 0.05 | 0.68  | 4.25 | 1.30  | 0.13  | 0.73  | 0.03 | 2.21  | 150  |
| QSY10 | 河水  | 0.05 | 0.76  | 4.50 | 1.34  | 0.15  | 0.81  | 0.03 | 2.31  | 193  |
| QSY11 | 河水  | 0.06 | 0.83  | 1.80 | 1.95  | 0.20  | 1.64  | 0.00 | 3.34  | 251  |
| QSY08 | 湖水  | 2.13 | 33.26 | 0.90 | 20.00 | 31.29 | 17.65 | 0.00 | 8.20  | 2066 |
| QSY16 | 湖水  | 1.69 | 29.26 | 1.63 | 15.75 | 28.46 | 16.79 | 0.00 | 4.56  | 1800 |
| QSY04 | 湖水  | 1.92 | 29.65 | 0.41 | 16.00 | 28.86 | 17.69 | 0.00 | 4.79  | 897  |
| QSY15 | 湖水  | 1.03 | 13.04 | 1.00 | 18.33 | 17.14 | 15.63 | 0.00 | 3.28  | 630  |
| QSY01 | 地下水 | 0.09 | 0.75  | 2.25 | 2.28  | 0.71  | 1.45  | 0.02 | 3.69  | 274  |
| QSY02 | 地下水 | 0.04 | 0.35  | 0.90 | 0.94  | 0.24  | 0.47  | 0.05 | 1.58  | 135  |
| QSY03 | 地下水 | 0.29 | 0.40  | 1.14 | 2.05  | 0.12  | 0.68  | 0.03 | 2.92  | 203  |
| QSY07 | 地下水 | 0.28 | 8.00  | 9.00 | 7.08  | 7.31  | 13.08 | 0.19 | 5.52  | 797  |
| QSY12 | 地下水 | 0.02 | 0.13  | 1.46 | 1.03  | 0.11  | 0.51  | 0.06 | 1.95  | 159  |
| QSY13 | 地下水 | 0.10 | 0.53  | 1.10 | 1.42  | 0.40  | 0.78  | 0.04 | 1.97  | 174  |
| QSY14 | 地下水 | 0.06 | 0.30  | 1.06 | 0.69  | 0.17  | 0.46  | 0.06 | 1.70  | 128  |
| QSY17 | 地下水 | 0.11 | 1.20  | 3.40 | 2.23  | 1.06  | 1.69  | 0.05 | 5.36  | 359  |
| QSY18 | 地下水 | 0.11 | 1.27  | 3.55 | 2.44  | 1.35  | 1.79  | 0.21 | 5.28  | 350  |
| QSY19 | 地下水 | 0.10 | 1.72  | 3.28 | 2.35  | 1.77  | 2.48  | 0.18 | 5.11  | 374  |
| QSY20 | 地下水 | 0.07 | 2.40  | 2.82 | 4.73  | 0.43  | 1.68  | 0.10 | 10.10 | 473  |

单位:矿化度为 mg/L,其他为 mmol/L.

3.2.2 离子来源分析

根据碳酸盐、硅酸盐和蒸发岩矿物风化产生的  $Mg^{2+}/Na^{+}$ 、 $Ca^{2+}/Na^{+}$ 和  $HCO_3^{-}/Na^{+}$ (摩尔浓度比值),可以表征地下水和地表水在岩石风化作用下水化学组分的变化<sup>[47]</sup>,从而进一步分析受水岩作用影响的水体水化学类型来源.图 8 可以看出,研究区地下水和河水离子端元图位于碳酸盐岩溶解和硅酸盐岩风化区域之间,且更靠近碳酸盐岩,表明河水和地下水受二者共同控制,同时受碳酸盐岩溶解控制作用的影响更大.

$(Na^{+}+K^{+})/Cl^{-}$ 比值关系可以判断  $Na^{+}$ 、 $K^{+}$ 、 $Cl^{-}$ 是否主要来源于蒸发岩溶解, $Na^{+}/Cl^{-}$ 比值可以判断水体水化学成分是否受降雨影响<sup>[48]</sup>.从图 9 可以看出地下水以及河流地表水主要分布在  $Na^{+}/Cl^{-}=1$  直线上方,表明

地下水以及河水离子来源受降雨作用影响较小,而湖水取样点基本靠近  $Na^{+}/Cl^{-}=1$  这条直线,显示湖水中  $Na^{+}$ 、 $K^{+}$ 、 $Cl^{-}$ 离子成分来源受降雨影响.另外由图 10 得出河水、地下水采样点均在  $(Na^{+}+K^{+})/Cl^{-}=1$  线上,偏移程度较小,说明河水、地下水主要为蒸发岩溶解得到;湖水采样点沿  $(Na^{+}+K^{+})/Cl^{-}=1$  线两侧分布,说明  $Na^{+}$ 、 $K^{+}$ 、 $Cl^{-}$ 受蒸发岩溶解、降雨、含钾钠矿物溶解等因素共同控制.

$Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^{-}$ 、 $SO_4^{2-}$ 之间的相互比值关系可以判定水体化学中这些离子的来源<sup>[49]</sup>.如图 11 大部分河水点以及地下水水点均靠近  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/HCO_3^{-}=1$  直线,表明河水与地下水主要离子来源为碳酸盐岩溶解.湖水点以及近湖地下水点 SY07 均远远高于  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/$

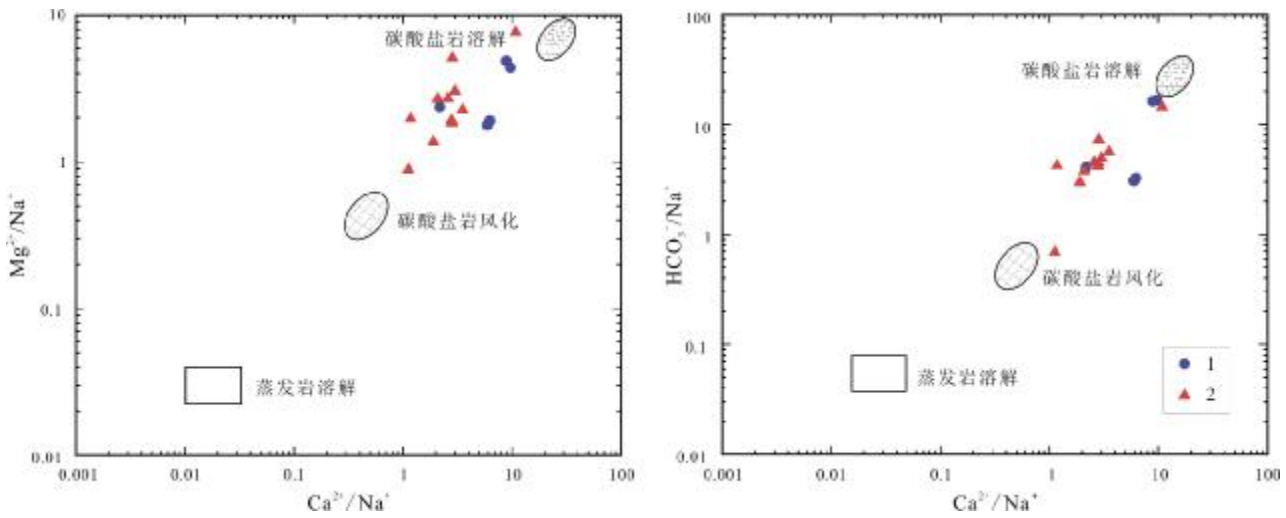


图 8 离子摩尔浓度比值端元图  
Fig. 8 Molar concentration ratio endmember diagram of ions  
1—河流(river); 2—地下水(groundwater)

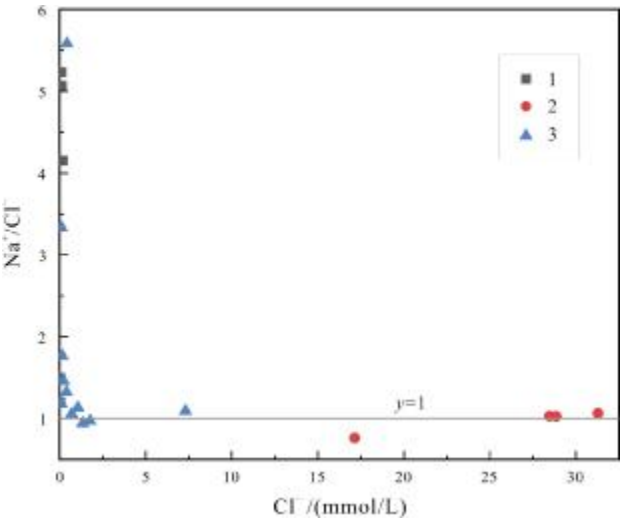


图 9  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  与  $\text{Cl}^-$  关系曲线图  
Fig. 9 Relationship curve of  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  vs.  $\text{Cl}^-$   
1—河流(river); 2—湖泊(lake); 3—地下水(groundwater)

$\text{HCO}_3^- = 1$  这条直线,说明离子来源受其他因素影响. 图 12 班公湖流域水体点离子摩尔浓度比值均分布在  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1$  这条直线上,说明水体中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子来源主要受碳酸盐岩、石膏矿物溶解控制,其中河水以及地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  主要来源于碳酸盐岩溶解.

3.2.3 地下水阳离子交换作用

氯碱指数(CAI-1 和 CAI-2)可以对地下水阳离子交换方向以及交换的强度进行判断<sup>[20]</sup>. 当氯碱指数(公式 1、2)为负值时,表明地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  与围岩或

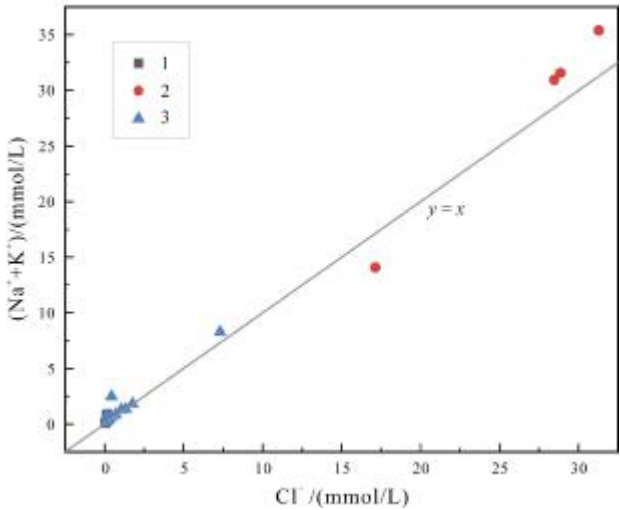
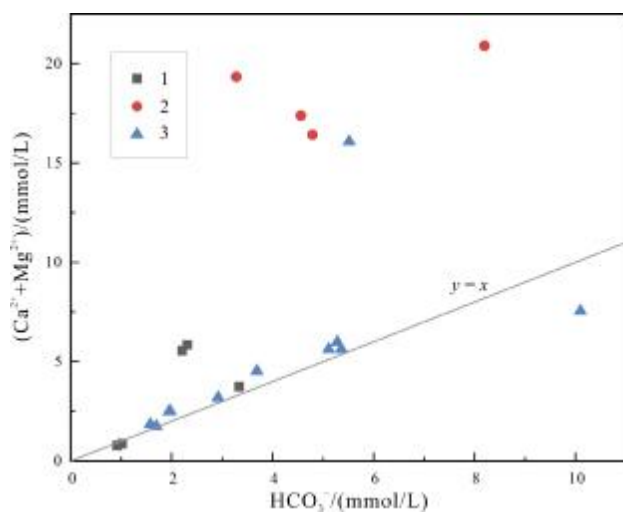


图 10  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$  与  $\text{Cl}^-$  关系曲线图  
Fig. 10 Relationship curve of  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$  vs.  $\text{Cl}^-$   
1—河流(river); 2—湖泊(lake); 3—地下水(groundwater)

土壤中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  进行离子交换(公式 3);同理氯碱指数为正值时,表示地下水中的  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  置换出围岩或土壤中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ (公式 4, X 表示围岩或土壤中的离子). 其中,氯碱指数绝对值越大,置换作用越明显. 根据野外采样数据分析,研究区地下水中的氯碱指数均为正值(图 13),表明研究区地下水中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  与围岩或土壤中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  发生交换,使得地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子含量增加,  $\text{Na}^+$  与  $\text{K}^+$  离子含量减少,即存在阳离子交替置换过程.

$$\text{CAI-1} = \text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^- \quad (1)$$

图 11  $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 与  $\text{HCO}_3^-$ 关系曲线图Fig. 11 Relationship curve of  $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$  vs.  $\text{HCO}_3^-$ 

1—河流(river); 2—湖泊(lake); 3—地下水(groundwater)

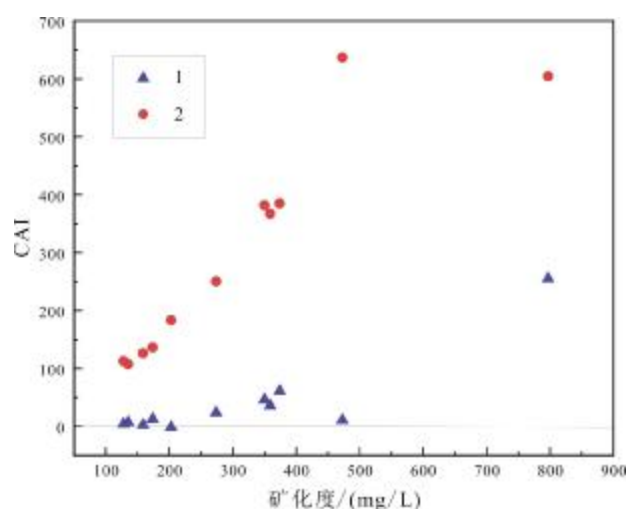
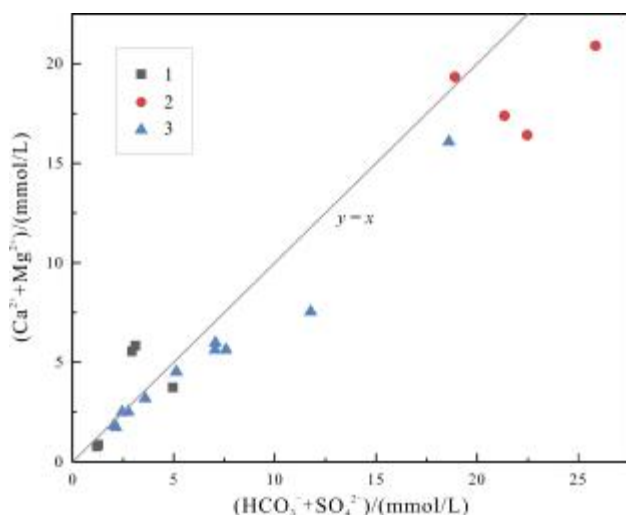


图 13 氯碱指数与矿化度关系图

Fig. 13 Relationship between CAI and salinity

1— CAI-1; 2— CAI-2

图 12  $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 关系曲线图Fig. 12 Relationship curve of  $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$  vs.  $(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 

1—河流(river); 2—湖泊(lake); 3—地下水(groundwater);

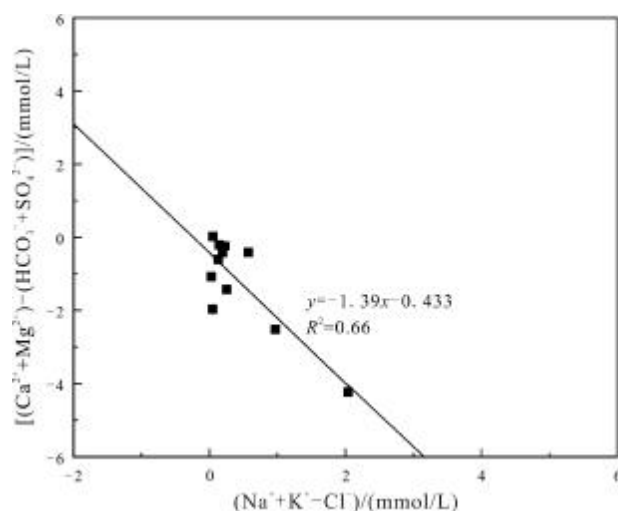


图 14 离子浓度关系图

Fig. 14 Linear fitting diagram of ion concentration relation

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

$$(\text{Ca}, \text{Mg})^{2+} + 2(\text{Na}, \text{K})\text{X} = 2(\text{Na}^+ + \text{K}^+) + (\text{Ca}, \text{Mg})\text{X}_2 \quad (3)$$

$$2(\text{Na}^+ + \text{K}^+) + (\text{Ca}, \text{Mg})\text{X}_2 = (\text{Ca}, \text{Mg})^{2+} + 2(\text{Na}, \text{K})\text{X} \quad (4)$$

$(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)$ 之间比值关系(离子浓度单位: mmol/L)能判断是否发生阳离子交换作用<sup>[21]</sup>,当二者比值为-1时,存在明显阳离子交换作用.通过研究区地下水采样点计算 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)$ 比值绘制散点图(见图14),拟合分析其斜率为-1.39,  $R^2=0.66$ ,即存在阳离子交换作用.

#### 4 结论

1)班公湖流域水体 pH 变化区间为 8.2~9.0,整体呈弱碱性.班公湖流域不同水体之间矿化度差异大,河流和近湖地下水多为淡水,湖泊受蒸发作用、本身形态、河流补给等共同影响具有东淡西咸的特点.不同位置的地下水受地形地貌控制,矿化度存在一定规律性差异.

2)水化学类型:河水为  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型,湖水为  $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Mg}$  型,地下水以  $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$  型为主.湖水离子特征受蒸发-结晶作用控制,河水和地下水受岩

石风化作用控制为主。其中,河水和地下水受硅酸盐岩影响更大,受碳酸盐岩溶解影响次之。

3)湖水中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 来源于降雨、蒸发岩溶解以及其他含钾钠矿物溶解;河水以及地下水中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 主要来源于蒸发岩溶解。各水体中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 来源于碳酸盐岩矿物和石膏溶解,其中河水和地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 主要来源于碳酸盐岩矿物溶解。地下水中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 与含水层或土壤中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 发生离子交换作用。

### 参考文献(References):

- [1]陈松,桂和荣. 淮北煤田太原组灰岩水年龄及同位素地球化学特征[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 337-345.  
Chen S, Gui H R. The age and isotopic characteristics of groundwater in Taiyuan Formation limestone aquifer of the Huaibei coalfield[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 337-345.
- [2]叶阳,常园. 鄂尔多斯盆地盐池-定边地区水化学场分布特征及形成机理[J]. 地质与资源, 2020, 29(3): 260-265, 293.  
Ye Y, Chang Y. Distribution characteristics and formation mechanism of hydrochemical field in Yanchi-Dingbian area of Ordos Basin[J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 260-265, 293.
- [3]张涛,蔡五田,李颖智,等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4537-4545.  
Zhang T, Cai W T, Li Y Z, et al. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin[J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4537-4545.
- [4]郭小娇,王慧玮,石建省,等. 白洋淀湿地地下水系统水化学变化特征及演化模式[J]. 地质学报, 2022, 96(2): 656-672.  
Guo X J, Wang H W, Shi J S, et al. Hydrochemical characteristics and evolution pattern of groundwater system in Baiyangdian wetland, North China Plain[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(2): 656-672.
- [5]黄荷. 复杂岩溶矿区地下水化学组分演化研究及充水条件辨识——以云南毛坪铅锌矿为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.  
Huang H. Study on hydrochemical evolution pattern and water-filling conditions in complicated carbonate-hosted deposit: A case study of Maoping lead-zinc deposit, Yunnan[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [6]严宇鹏,牛凤霞,刘佳,等. 雅鲁藏布江上游夏季水化学特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(2): 815-825.  
Yan Y P, Niu F X, Liu J, et al. Hydrochemical characteristics and sources of the upper Yarlung Zangbo River in summer[J]. China Environmental Science, 2022, 42(2): 815-825.
- [7]Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [8]孙岐发,贾林刚,田辉,等. 长春莲花山地区地下水化学特征及成因分析[J]. 地质与资源, 2020, 29(5): 476-482.  
Sun Q F, Jia L G, Tian H, et al. Chemical characteristics and genesis analysis of the groundwater in Lianhuashan area, Changchun City[J]. Geology and Resources, 2020, 29(5): 476-482.
- [9]孙平安,于爽,莫付珍,等. 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 123-131.  
Sun P A, Yu S, Mo F Z, et al. Hydrochemical characteristics and influencing factors in different geological background: a case study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 123-131.
- [10]林聪业,孙占学,高柏,等. 拉萨地区地下水水化学特征及形成机制研究[J]. 地学前缘, 2021, 28(5): 49-58.  
Lin C Y, Sun Z X, Gao B, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Lhasa area, China[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(5): 49-58.
- [11]康小兵,许模. 阿里第四系地下水资源形成控制因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(2): 102-106.  
Kang X B, Xu M. Formation and controlling factors of groundwater resources in Quaternary of Ali area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(2): 102-106.
- [12]田原,余成群,雒昆利,等. 西藏地区天然水的水化学性质和元素特征[J]. 地理学报, 2014, 69(7): 969-982.  
Tian Y, Yu C Q, Luo K L, et al. Water chemical properties and the element characteristics of natural water in Tibet, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(7): 969-982.
- [13]Xiao J, Jin Z D, Zhang F, et al. Major ion geochemistry of shallow groundwater in the Qinghai Lake catchment, NE Qinghai-Tibet Plateau[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(5): 1331-1344.
- [14]周训. 深层地下卤水的基本特征与资源量分类[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 4-10.  
Zhou X. Basic characteristics and resource classification of subsurface brines in deep-seated aquifers[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 4-10.
- [15]徐洪飞,周训,王蒙蒙,等. 云南泸水登埂与玛布温泉形成特征及成因研究[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1739-1754.  
Xu H F, Zhou X, Wang M M, et al. Characteristics and origin of the Denggeng and Mabu hot spring in Lushui County, Yunnan Province[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1739-1754.
- [16]刘久潭,李颖智,高宗军,等. 拉萨河流域中下游地区水化学及地表水-地下水转化关系研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 10-20.  
Liu J T, Li Y Z, Gao Z J, et al. Hydrochemistry and relationship between groundwater and surface water in the middle and lower reaches of Lhasa River Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(5): 10-20.

(下转第 479 页/Continued on Page 479)

- 2019, 43(1): 111–121.
- [15]胡官兵, 刘舫, 党伟, 等. 不同尺度遥感数据在乌蒙山西部区域地质调查中的应用[C]//云南省首届青年地质科技论坛优秀学术论文集. 昆明: 云南省科学技术协会, 2017: 10.
- Hu G B, Liu F, Dang W, et al. Application of remote sensing data of different scales in regional geological survey of western Wumeng Mountain[C]//Yunnan Provincial Association of Science and Technology. Geological Society of Yunnan Province, 2017: 10. (in Chinese)
- [16]张聪, 包书景, 段文哲. 遥感技术在复杂山区页岩气早期勘探中的应用[J]. 地质与资源, 2014, 23(5): 492–494, 499.
- Zhang C, Bao S J, Duan W Z. Application of remote sensing technology in early exploration for shale gas in complex terrain[J]. Geology and Resources, 2014, 23(5): 492–494, 499.
- [17]霍润斌, 刘博, 鲁敏, 等. 遥感影像三维可视化在白音吉日嘎拉大队幅 1:5 万区域地质调查中的应用[J]. 现代矿业, 2018, 34(7): 67–69.
- Huo R B, Liu B, Lu M, et al. Application of 3D visualization of remote sensing image in 1:50 000 regional geological survey of Rigala in Baiyinjia area[J]. Modern Mining, 2018, 34(7): 67–69. (in Chinese)
- [18]邢京磊, 朱杰勇, 王雷. 基于遥感影像的地理特征信息的提取与分析——以云南省会泽县为例[J]. 地质与资源, 2012, 21(2): 250–255.
- Xing J L, Zhu J Y, Wang L. Extraction and analysis of geographical characteristic information based on remote sensing image: A case study of Huize area, Yunnan Province[J]. Geology and Resources, 2012, 21(2): 250–255.
- [19]钱建平, 伍贵华, 陈宏毅. 现代遥感技术在地质找矿中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2012, 27(3): 355–360.
- Qian J P, Wu G H, Chen H Y. The application of modern remote sensing technology to geology and ore exploration[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2012, 27(3): 355–360.
- [20]张兴洲, 马志红. 黑龙江东部中—新生代盆地演化[J]. 地质与资源, 2010, 19(3): 191–196.
- Zhang X Z, Ma Z H. Evolution of Mesozoic-Cenozoic basins in the eastern Heilongjiang Province, Northeast China [J]. Geology and Resources, 2010, 19(3): 191–196.
- [21]杨佳佳, 冯雨林, 孙中任, 等. 基于多源遥感数据的融合算法变换效果对比研究[J]. 地质与资源, 2015, 24(5): 489–495.
- Yang J J, Feng Y L, Sun Z R, et al. Comparative study on the transformation effects of fusion algorithm based on multisource remote sensing data[J]. Geology and Resources, 2015, 24(5): 489–495.
- [22]赵院冬, 迟效国, 车继英, 等. 延边—东宁地区晚三叠世花岗岩地球化学特征及其大地构造背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(3): 425–434.
- Zhao Y D, Chi X G, Che J Y, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of Late Triassic granites in Yanbian-Dongning area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(3): 425–434.
- [23]林敏. 福建沿海高植被覆盖区构造地质遥感解译应用研究[J]. 福建地质, 2020, 39(4): 294–307.
- Lin M. Research on remote sensing interpretation of structural geology in high plant cover area, Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 2020, 39(4): 294–307.
- 
- (上接第 461 页/Continued from Page 461)
- [17]曾妍妍, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什噶尔河流域地下水形成的水文地球化学过程[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 541–550.
- Zeng Y Y, Zhou J L, Nai W H, et al. Hydrogeochemical processes of groundwater formation in the Kashgar River Basin, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 541–550.
- [18]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 C H, Sheng H Y, Wang Z H, 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.
- [19]杨景燕, 杨余辉, 胡义成, 等. 新疆伊犁喀什河流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境化学, 2021, 40(12): 3815–3827.
- Yang J Y, Yang Y H, Hu Y C, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Kashi River Basin, Ili, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(12): 3815–3827.
- [20]郝启勇, 徐晓天, 张心彬, 等. 鲁西北阳谷地区浅层高氟地下水化学特征及成因[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(5): 668–677.
- Hao Q Y, Xu X T, Zhang X B, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of high-fluorine shallow groundwater in Yanggu area of the northwestern Shandong, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(5): 668–677.
- [21]王建, 张华兵, 许君利, 等. 盐城地区地下水溶质来源及其成因分析[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 1908–1919.
- Wang J, Zhang H B, Xu J L, et al. Provenance of groundwater solute and its controlling factors in Yancheng area[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1908–1919.