#### DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2017.02.2016062001

栾风娇,周金龙,贾瑞亮,等.新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J].环境化学,2017,36(2):380-389. LUAN Fengjiao, ZHOU Jinlong, JIA Ruiliang, et al. Hydrochemical characteristicsand formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-YiwuBasin, Xinjiang[J].Environmental Chemistry,2017,36(2):380-389.

# 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因\*

栾风娇<sup>1,2</sup> 周金龙<sup>1,2\*\*</sup> 贾瑞亮<sup>1,2</sup> 陆成新<sup>3</sup> 白 铭<sup>3</sup> 梁红涛<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院,乌鲁木齐,830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心,乌鲁木齐,830052;3. 新疆地矿局第二水文地质工程地质大队,昌吉,831100)

**摘 要** 为查明新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及其成因,采用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图、离 子比例系数等方法对研究区 2011 年 9 月的 75 组地下水水样测试结果进行分析.研究结果表明,潜水以 HCO<sub>3</sub> 和 SO<sub>4</sub>型水为主,承压水以 SO<sub>4</sub>型水为主,两者都是矿化度中等、硬度中等的弱碱性水;Gibbs 图表明,研究区潜 水水化学成分主要受蒸发浓缩和岩石风化双重作用的影响,承压水补给水源的水化学成分主要受蒸发浓缩作 用影响;离子比例系数法及饱和指数表明潜水和承压水中离子主要来自岩盐、硫酸盐、硅酸盐的风化溶解.此 外,(Na<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>)与(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)-(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub>)之间的比值关系表明阳离子交换作用也是地下水中化学组分形 成的重要作用之一.

关键词 水化学特征, Gibbs 图, 离子比例系数法, 阳离子交换, 饱和指数, 新疆巴里坤-伊吾盆地.

# Hydrochemical characteristicsand formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-YiwuBasin, Xinjiang

LUAN Fengjiao<sup>1,2</sup> ZHOU Jinlong<sup>1,2 \*\*</sup> JIA Ruiliang<sup>1,2</sup> LU Chengxin<sup>3</sup> BAI Ming<sup>3</sup> LIANG Hongtao<sup>3</sup>

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

2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi, 830052, China;

3. No.2 Hydrologeology and Engineering Geology Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral

Resources Exploration and Development, Changji, 831100, China)

Abstract: To investigate the chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang, the test data of 75 groundwater samples were analyzed by mathematical statistics, Piper diagram, Gibbs diagram, iron rationanalysis, etc. The results showed that the main hydrochemistry types of unconfined groundwater were  $HCO_3$  water and  $SO_4$  water, the main hydrochemistry types of confined groundwater were  $SO_4$  water, and both types were weak alkaline, which belonged to medium hardness of water. Gibbs diagram showed that the hydrochemical compositions of unconfined groundwater in the study area were mainly controlled by evaporation and rock weathering, the hydrochemical composition of the recharge source of the confined groundwater were mainly controlled by evaporation. Ion ratio analysisand mineral saturation indices showed that the major sources of ions in the study area were mainly the dissolution of halite,

<sup>2016</sup>年6月20日收稿(Received: June 20, 2016).

<sup>\*</sup>新疆自治区地质勘查基金(S12-1-XJ01)和新疆自治区水文学及水资源重点学科基金(xjswszyzdxk20101202)资助.

Supported by Geological Prospecting Foundation of Xinjiang Autonomous Region(S12-1-XJ01) and Key Discipline Foundation of Hydrology and Water Resources of Xinjiang Uyghur Autonomous Region (xjswszyzdxk20101202).

<sup>\* \*</sup> 通讯联系人,Tel:13263381574,E-mail:zjzhoujl@163.com

Corresponding author, Tel: 13263381574, E-mail: zjzhoujl@ 163.com

sulfate and silicate. The ratio relationship between  $(Na^+-Cl^-)$  and  $(Ca^{2+}+Mg^{2+}) - (SO_4^{2-}+HCO_3^-)$  demonstrates that cation exchange is a major mechanism controlling the composition of groundwater. **Keywords**: hydrochemical characteristics, Gibbs diagram, ion ratio analysis, cation exchange, saturation indices, Barkol-Yiwu basin, Xinjiang.

地下水化学成分是与周围的环境(大气、地表水、岩石)长期作用的产物<sup>[1]</sup>.一个地区地下水的化学 面貌既可以反映该地区地下水的历史演变,也可以帮人们重塑水文地质历史,研究地下水的化学成分可 以阐明地下水的起源与形成,同时对地下水保护和可持续开发利用具有重要意义<sup>[2]</sup>.目前,国内外学者 均采用数理统计、Piper 三线图、相关性分析、Gibbs 图、离子比、钠吸附比、氯碱指数、饱和指数及同位素 示踪等方法对地下水化学特征及成因进行分析<sup>[39]</sup>.

新疆巴里坤-伊吾盆地(以下简称"巴伊盆地")位于西北内陆干旱水资源匮乏地区,降水稀少,地下 水作为一种洁净而又较丰富的淡水资源,已成为该地区工农业生产及生活的主要水源<sup>[10]</sup>.截至目前,前 人尚未在该区域进行过系统的水化学特征及成因研究.为此,本文依据 2011 年 9 月该地区 75 组地下水 水样检测数据,采用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图、离子比例系数及饱和指数等方法进行研究,阐明 该地区地下水水化学特征,揭示该地区地下水化学成分的形成作用.

## 1 材料与方法(Materials and methods)

#### 1.1 研究区概况

巴伊盆地地处新疆东疆地区,隶属哈密地区,位于东经91°15′—96°45′,北纬42°50′—45°10′之间, 包括巴里坤哈萨克自治县(以下简称"巴里坤县")和伊吾县两个县.巴伊盆地地处中纬度亚欧大陆腹 地,属大陆性中温带干旱气候,光照充足,夏季炎热,冬季寒冷,昼夜温差大,降水稀少,蒸发强烈(山区 多年平均降水量500 mm 左右,平原区多年降水量40 mm 左右;山区多年平均蒸发量一般在1100 mm 左 右,干旱指数3—5,平原区多年平均蒸发量2300 mm 左右,干旱指数>50).

巴伊盆地地形轮廓可概括为三山夹两盆.南部是天山山脉——巴里坤山、哈尔里克山,中部为莫钦 乌拉山,北部是东准格尔山地及阿尔泰山余脉.天山主脉——巴里坤山、哈尔里克山和莫钦乌拉山之间 为巴里坤盆地,莫钦乌拉山与东准噶尔山地及阿尔泰山余脉之间是三塘湖-淖毛湖盆地.

巴伊盆地内盆地与山地之间以深大断裂构成分界线,形成不同的地貌单元,山地为侵蚀剥蚀区,盆 地则为山区侵蚀物质提供堆积场所,在盆地边缘的山前地带,形成大面积的洪积倾斜平原、冲积扇等,而 在盆地中心为平坦的洪积平原和湖积平原.

研究区内山前洪积平原分布有由卵砾石、砂砾石、含砾中粗砂组成单一结构的孔隙潜水,呈片状分布,孔隙发育,透水性强,含水介质颗粒由山前向盆地中心逐渐变细;在淖毛湖和牛圈湖附近分布有多层 结构孔隙潜水-碎屑岩类孔隙裂隙承压水.第四系松散岩类孔隙潜水含水层岩性为卵砾石、砂砾石、含砾 中砂、中细砂和粉细砂,碎屑岩类孔隙裂隙承压水含水层岩性为砂砾岩、砂岩、砾岩和粗砂岩等,承压含 水层分层不明显,隔水层岩性为泥岩和砂质泥岩.

研究区地下水的补给主要有降水入渗、山区基岩裂隙水侧向径流补给,在老爷庙有邻区的侧向径流补给.地下水自山前向盆地中心径流,在洪积平原中上部水力坡度 20%~70%,在洪积平原下部水力坡度 1%~10%。地下水的排泄方式以蒸发蒸腾、泉水溢出、人工开采、坎儿井溢出和自流井溢出为主. 1.2 研究方法

1.2.1 地下水水样采集与测试

地下水采样点分布于巴伊盆地平原区,采样时间为2011年9月,采样点控制面积为8923 km<sup>2</sup>,共采 集地下水水样75组(其中:潜水水样42组,承压水水样33组),采样点分布见图1.水样严格按《地下水 环境监测技术规范(HJ/T164—2004》)进行采集、保存和送样.



图1 巴伊盆地平原区地下水采样点分布图

Fig.1 Distribution of the groundwater sampling sites in the plain areas of Barkol-Yiwu basin

水样测试由新疆地矿局第二水文工程地质大队化验室完成.K<sup>+</sup>和 Na<sup>+</sup>用火焰原子吸收分光光度法 测定,Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定,Cl<sup>-</sup>用硝酸银容量法测定,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>用硫酸钡比浊法测 定,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>用盐酸滴定法测定,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>用紫外分光光度法测定,pH 用玻璃电极法测定.K<sup>+</sup>检测下限为 0.05 mg·L<sup>-1</sup>,Na<sup>+</sup>检测下限为 0.01 mg·L<sup>-1</sup>,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和 Cl<sup>-</sup>检测下限为 1.0 mg·L<sup>-1</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>检测下限为 5.0 mg·L<sup>-1</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的检测下限为 0.2 mg·L<sup>-1</sup>.

#### 1.2.2 数据分析方法

采用阴阳离子平衡检验方法对水样数据进行可靠性检验,取阴阳离子平衡的相对误差 E 的绝对值 小于 5%为可靠数据,经检验,所有数据均为可靠数据.本次研究采用 Piper 三线图及相关性分析等方法 分析地下水水样的水化学类型及其特征.同时,采用 Gibbs 图解法、离子比例系数法及饱和指数法等方法 进行水化学成因分析.

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

#### 2.1 地下水中主要离子特征

#### 2.1.1 潜水中主要离子特征

对潜水水样检测数据各个指标用 SPSS 软件进行数理统计分析,统计结果见表 1.由表 1 可知,水样 pH 值的变化范围 7.32—9.07,水样呈弱碱性;水样中的 TDS 的变化范围 90.17—4947.09 mg·L<sup>-1</sup>,均值 1086.53mg·L<sup>-1</sup>;按 TDS 可将地下水类型划分为<sup>[2]</sup>:小于 1 g·L<sup>-1</sup>为淡水,1—3 g·L<sup>-1</sup>为微咸水,3— 10 g·L<sup>-1</sup>为咸水,10—50 g·L<sup>-1</sup>为盐水,其中淡水水样、微咸水水样、咸水水样分别占潜水水样的 66.7%、23.8%和 9.5%.水样中总硬度(TH)的变化范围 30.80—1056.80 mg·L<sup>-1</sup>,平均值 385.33 mg·L<sup>-1</sup>;按 TH 可 将地下水类型可划分为<sup>[1]</sup>:小于 75 mg·L<sup>-1</sup>为极软水,75—150 mg·L<sup>-1</sup>为软水,150—300 mg·L<sup>-1</sup>为微硬

水,300—450 mg·L<sup>-1</sup>为硬水,大于 450 mg·L<sup>-1</sup>为极硬水,其中极软水水样、软水水样、微硬水水样、硬水水样和极硬水水样分别占潜水水样的 4.8%、21.4%、28.6%、16.6%和 28.6%.

潜水常量组分主要为 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>,其次是 Mg<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub>;从各离子含量均值来看:Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>> Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Cl<sup>-</sup>>HCO<sub>3</sub>.因此,潜水中阳离子以 Na<sup>+</sup>为主,阴离子 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 以为主.

<b>Table 1</b> Statistics of chemical indexes of the unconfined groundwater samples ( $n = 42$ )											
统计值 Statistical value	$K^+$	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl	$\mathrm{SO}_4^{2-}$	HCO <sub>3</sub>	$NO_3^-$	pН	TDS	TH
最小值 Minimum	0.88	2.43	1	10.67	7.17	3.07	49.81	0.02	7.32	90.17	30.80
极大值 Maximum	7.37	1499.39	88.89	364.33	1428.22	1801.27	435.85	24.86	9.07	4947.09	1056.8
均值 Mean	3.04	225.91	27.25	109.39	200.24	397.85	179.69	3.85	7.90	1086.53	385.33
标准差 Standard deviation	1.68	337.5	23.17	90.15	310.94	492.11	91.32	5.87	0.30	1206.04	307.84
变异系数 Coefficient of variation	0.55	1.49	0.85	0.82	1.55	1.24	0.51	0.65	0.04	1.11	0.80

**表1** 潜水水样主要水化学指标统计表(n=42)

注:pH 和变异系数无量纲,其它指标单位均为 mg·L<sup>-1</sup>.下同.

Note: pH and coefficient of variation arenondimensional parameters, other indicators units are  $mg \cdot L^{-1}$ . Similarly hereinafter.

#### 2.1.2 承压水中主要离子特征

由表 2 可知,承压水水样 pH 值的变化范围 7.41—8.72,水样呈弱碱性;水样中的 TDS 的变化范围 193.34—6250.02 mg·L<sup>-1</sup>,平均值 1658.08 mg·L<sup>-1</sup>,其中淡水水样、微咸水水样和咸水水样分别占承压水 水样的 36.4%、51.5%、12.1%;水样中 TH 的变化范围 41.00—1482.90 mg·L<sup>-1</sup>,平均值 363.41 mg·L<sup>-1</sup>,其 中极软水水样、软水水样、微硬水水样、硬水水样和极硬水水样分别占潜水水样的 12.1%、15.2%、21.2%、21.2%和 30.3%.

从各离子含量均值可以看出承压水水样中阳离子以 Na<sup>+</sup>为主,阴离子以 SO<sub>4</sub><sup>-</sup>为主.

Table 2	Statistic	is of chem	ncar mu	exes of th	ie comme	ea grouna	water sar	npies ( $n$	- 33)		
统计值 Statistical value	$K^+$	$Na^+$	$\mathrm{Mg}^{2+}$	Ca <sup>2+</sup>	Cl-	$\mathrm{SO}_4^{2-}$	$\mathrm{HCO}_3^-$	$NO_3^-$	$_{\rm pH}$	TDS	TH
最小值 Minimum	0.96	28.06	2.41	11.49	12.37	41.03	54.79	0.07	7.41	193.34	41.00
极大值 Maximum	21.05	1931.36	101.4	426.67	1879.23	2187.98	286.42	39.48	8.72	6250.02	1482.9
均值 Mean	4.16	436.85	25.14	102.69	339.05	634.48	151.32	4.53	8.00	1658.08	363.41
标准差 Standard deviation	3.71	447.61	23.76	90.2	451.64	529.71	56.84	7.14	0.30	1462.38	301.19
变异系数 Coefficient of variation	0.89	1.02	0.95	0.88	1.33	0.83	0.38	0.63	0.04	0.88	0.83

**表 2** 承压水水样主要水化学指标统计表(*n*=33) Statistics of abamical indexes of the confined groundwater complete

#### 2.2 主要常规离子之间的关系

#### 2.2.1 潜水

利用各离子含量之间的相关性分析,可以推测出地下水中各离子之间是否为相同来源<sup>[11]</sup>.通过 SPSS 软件对潜水水样的常规水化学参数进行相关系数计算,计算结果如表 3 所示.从表 3 可以看出 CI<sup>-</sup> 与各阳离子之间的相关性显著,其中与 Na<sup>+</sup>的相关性系数达到 0.989;SO<sup>2-</sup> 与各阳离子之间的相关性显 著,其中与 Na<sup>+</sup>的相关性系数达到 0.966.由于研究区分布有岩盐、石膏、芒硝等,由此可以推断研究区地 下水中的主要组分来自岩盐、石膏和芒硝等硫酸盐的风化溶解.

TDS 与各离子含量之间的相关性关系可以较好地反映地下水的成因<sup>[12]</sup>.由表 3 可以看出 TDS 与各离子含量之间均存在较好的相关性,其中 TDS 与 Ca<sup>2+</sup>之间的相关性最为显著,相关系数为 0.988,其次 为 Mg<sup>2+</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,相关系数为 0.901 和 0.859,其中 TDS 与 Cl<sup>-</sup>和 Na<sup>+</sup>之间的相关系数为 0.794 和 0.761,表明在富含岩盐和硫酸盐的研究区,这 5 种离子决定该区的地下水化学类型. 2.2.2 承压水

从表4可以看出 Cl<sup>-</sup>与 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>之间相关性显著,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与各阳离子之间的相关性显著,表明研究区可能存在岩盐、石膏和芒硝等硫酸盐的风化溶解.TDS 与各离子含量之间大都存在较好的相关性,其中 TDS 与各离子之间的相关性关系表现为 Ca<sup>2+</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Mg<sup>2+</sup>>Na<sup>+</sup>>Cl<sup>-</sup>,表明在富含岩盐和硫酸盐的研究区,

表3 潜水水样主要水化学参数相关系数矩阵(n=42)

Table 5	Correlation matric	es of hydrocl	nemical paran	neters of the t	incontined gr	oundwater sa	mples $(n=42)$	/
项目	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	$SO_4^{2-}$	$Cl^-$	HCO <sub>3</sub>	TH	TDS
Na <sup>+</sup>	1							
$Mg^{2+}$	0.548 **	1						
Ca <sup>2+</sup>	0.801 **	0.823 **	1					
$SO_{4}^{2-}$	0.966 **	0.657 **	0.890 **	1				
Cl-	0.989 **	0.591 **	0.829 **	0.948 **	1			
$HCO_3^-$	-0.136	0.175	-0.069	-0.163	-0.154	1		
TH	0.992 **	0.635 **	0.869 **	0.986 **	0.986 **	-0.122	1	
TDS	0.761 **	0.901 **	0.988 **	0.859 **	0.794 **	-0.005	0.837 **	1
$1 \rightarrow 1$		1 1						

注:\*表示在 0.05 水平上显著相关;\*\*表示在 0.01 水平上显著相关.下同.

Note: \* indicates a significant correlation at the 0.05 level; \* \* indicates a significant correlation at the 0.01 level. Similarly hereinafter.

表4 承压水水样主要水化学参数相关系数矩阵(n=33)

Table 4	Correlation matrices of hydrochemical parameters of the confined groundwater samples ( $n=33$ )									
项目	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	$SO_4^{2-}$	Cl-	HCO <sub>3</sub>	TH	TDS		
Na <sup>+</sup>	1									
Mg <sup>2+</sup>	0.366 *	1								
Ca <sup>2+</sup>	0.656 **	0.694 **	1							
$SO_{4}^{2-}$	0.854 **	0.691 **	0.887 **	1						
C1 <sup>-</sup>	0.985 **	0.318	0.647 **	0.799 **	1					
HCO <sub>3</sub>	-0.213	0.005	-0.294	-0.241	-0.259	1				
TH	0.976 **	0.523 **	0.795 **	0.940 **	0.955 **	-0.237	1			
TDS	0.603 **	0.832 **	0.974 **	0.886 **	0.582 **	-0.219	0.760 **	1		

2.3 地下水水水化学特征

研究区水化学类型采用舒卡列夫法进行分类.

### 2.3.1 潜水

由研究区地下水水样 Piper 三线图(图 2)可以看出研究区潜水水样主导阴离子是 HCO<sub>3</sub> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,阳 离子是 Ca<sup>2+</sup>和 Na<sup>+</sup>.水化学类型以 HCO<sub>3</sub>型和 SO<sub>4</sub>型为主.



Fig.2 Piperdiagram for the groundwater samples in the study area

研究区南部的山间盆地潜水水化学类型并没有 明显的分带性,水化学类型呈现多样性,主要有 HCO<sub>3</sub>-Ca、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Na、SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Na·Ca和 SO<sub>4</sub>·Cl-Na型;北部的三塘湖盆地潜水水化学类型由 山前的 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Na、SO<sub>4</sub>-Na·Ca型向盆地中心 转化为 SO<sub>4</sub>·Cl-Na·Ca型、Cl·SO<sub>4</sub>-Na·Ca型;淖毛湖盆 地水化学类型较为复杂,水平分带性不够明显,主要 水化学类型有 HCO<sub>3</sub>-Ca·Na、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Na、 SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Na·Ca和 SO<sub>4</sub>·Cl-Na型.

2.3.2 承压水

由 Piper 三线图(图 2)可以看出,承压水水样中 主导阴离子是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,阳离子是 Na<sup>+</sup>.水化学类型以 SO<sub>4</sub> 型为主.

承压水取样点主要分布在北部的三塘湖盆地和淖 毛湖盆地.三塘湖盆地承压水水化学类型呈现水平分带 规律,从南部至北部水化学类型由 SO4·HCO3-Na·Ca 型

向 SO<sub>4</sub>-Na、SO<sub>4</sub>·Cl-Na 和 Cl·SO<sub>4</sub>-Na 型转化. 淖毛湖盆地承压水水化学类型较为复杂, 水平分带不明显,

水化学类型有 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Na·Ca、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>·Cl-Na·Ca、SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Na·Ca 和 SO<sub>4</sub>·Cl-Na·Ca 型水.

- 2.4 地下水化学成分的天然形成作用
- 2.4.1 基于 Gibbs 图的离子分析

Gibbs 图是一种半对数坐标图,它可以直观地看出地表水中化学成分形成的作用,判断区域地表水中的主要化学成分受蒸发浓缩、岩石和土壤、大气降水作用等的影响<sup>[3,13-14]</sup>.Gibbs 图图解方法不但可以用来分析地表水的离子起源问题,也可以用来分析地下水的离子起源问题.Gibbs 图是以 TDS 的对数为 Y 轴, γNa<sup>+</sup>/γ(Na<sup>+</sup> + Ca<sup>2+</sup>)和 γCl<sup>-</sup>/γ(Cl<sup>-</sup> + HCO<sub>3</sub>)为 X 轴的关系图.在 Gibbs 图中, TDS 值较低且 γNa<sup>+</sup>/γ(Na<sup>+</sup> + Ca<sup>2+</sup>)比值或 γCl<sup>-</sup>/γ(Cl<sup>-</sup> + HCO<sub>3</sub>)比值大于 0.5 时,表明该区域水化学组分主要受大气降 水作用;TDS 值中等且 γNa<sup>+</sup>/γ(Na<sup>+</sup> + Ca<sup>2+</sup>)比值或 γCl<sup>-</sup>/γ(Cl<sup>-</sup> + HCO<sub>3</sub>)比值小于 0.5 时,表明该区域水化 学组分主要受岩石分化作用;TDS 值较高且 γNa<sup>+</sup>/γ(Na<sup>+</sup> + Ca<sup>2+</sup>)比值或 γCl<sup>-</sup>/γ(Cl<sup>-</sup> + HCO<sub>3</sub>)比值接近于 1时,表明该区域水化学组分主要受蒸发作用.从研究区地下水水化学 Gibbs 分布图(图 3)中可以看出, 由于研究区干旱少雨,所以大气降水作用对研究区地下水化学组分几乎没有影响;潜水取样点主要分布 在 Gibbs 图的中部及右上角,说明潜水水化学组分主要受岩石风化及蒸发双重作用影响;承压水取样点 主要分布在右上角,在中部零星分布着个别取样点,说明承压水补给水源水化学组分主要受蒸发作用影响, 个别取样点受岩石风化作用影响.





(Note: AWD means rock weathering; APD means atmospheric precipitation; ECD means evaporation)

#### 2.4.2 基于离子比的地下水中化学成分来源分析

为了进一步分析研究区地下水化学离子形成作用,采用离子之间的比值关系来进行分析.

 $(1)\gamma(\mathrm{Na}^++\mathrm{K}^+)/\gamma\mathrm{Cl}^-$ 

 $(Na^{+}+K^{+})$ 与 Cl<sup>-</sup>之间的毫克当量比值关系可以反映 Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>的来源,当  $\gamma(Na^{+}+K^{+})/\gamma$ Cl<sup>-</sup>大于 1 时, 表示此时发生的是岩盐的溶解;当  $\gamma(Na^{+}+K^{+})/\gamma$ Cl<sup>-</sup>小于 1 时表示此时发生的是硅酸岩的溶解<sup>[11,15]</sup>.由 图 4(a)可以看出,研究区不论是潜水取样点还承压水取样点大多数都位于  $\gamma(Na^{+}+K^{+})/\gamma$ Cl<sup>-</sup>=1 的上方, 只有极小部分潜水取样点位于  $\gamma(Na^{+}+K^{+})/\gamma$ Cl<sup>-</sup>=1 的下方,说明研究区 Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>主要来自岩盐溶解.

 $(2)\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_{3}^{-}+SO_{4}^{2-})$ 

地下水中的 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>主要是来自碳酸盐或硅酸盐及蒸发岩的溶解,因此可以用(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)与(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)之间的毫克当量比值来判断 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>的主要来源,当 $\gamma$ (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)/ $\gamma$ (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 大于1时,地下水中 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>主要是来自碳酸盐的溶解;当 $\gamma$ (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)/ $\gamma$ (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)小于1时, 地下水中 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>主要是来自硅酸盐和蒸发岩的溶解<sup>[14,16]</sup>.由图 4(b)可以看出,潜水取样点大多数 位于 $\gamma$ (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)/ $\gamma$ (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)=1的下方,说明研究区潜水中的 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>主要来源于硅酸盐和

O 潜水 Unconfined groundwater ▲ 承压水 Confined groudwater 100 30 b.  $\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^{-}+SQ_4^{2-})$ a.  $\gamma(Na^++K^+)/\gamma Cl^-$ 25 80  $\eta(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(meq\cdot L^{-1})$  $\chi(Na^+\!\!+\!K^+)/(meq\!\cdot\!L^{-1})$ 20 60 15 40 10 20 5 30 40 50 60 20 30 40 10 10 50  $\gamma \text{Cl}^{-1}/(\text{meq}\cdot\text{L}^{-1})$  $\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}+\text{SO}_{4}^{2-})/(\text{meq}\cdot\text{L}^{-1})$ d.  $\gamma(Na^+-Cl^-)/[\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})-\gamma(SO_4^{2-}+HCO_3^-)]$ c.  $\gamma(SO_4^{2-}+Cl^{-})/\gamma HCO_3^{-}$ 100 35 1.111x + 0.26130 80 25  $M(SO_4^{2-}+CI^-)/(meq\cdot L^{-1})$  $Na^+-CI^-/meq\cdot L^{-1}$ 20 60 15 40 10 ° a 20 0 0 -40 -30 -20 -1010 0  $\gamma HCO_3^-/(meq \cdot L^{-1})$  $\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})-\gamma(SO_4^{2-}+HCO_3^{-})/(meq\cdot L^{-1})$ 

蒸发岩(硫酸盐)的溶解,部分来自碳酸盐的溶解;研究区承压水取样点绝大部分都位于 $\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^{2+}+SO_4^{2-})=1$ 的右下方,说明承压水中发生了硅酸盐或硫酸盐的溶解,可能存在碳酸盐的溶解.



Fig.4 Relationships between the rates of the selected ions of groundwater

 $(3)\gamma(SO_4^2+Cl^-)/\gamma HCO_3^-$ 

 $(SO_4^{2-}+Cl^{-})$ 与 HCO<sub>3</sub> 的毫克当量比值反映地下水中化学成分的主要来源,当 $\gamma(SO_4^{2-}+Cl^{-})/\gamma$ HCO<sub>3</sub> 大于 1 时,地下水中化学成分主要是来自蒸发岩的溶解;当 $\gamma(SO_4^{2-}+Cl^{-})/\gamma$ HCO<sub>3</sub> 小于 1 时,地下水中化 学成分主要是来自碳酸盐的溶解<sup>[17]</sup>.由图 4(c)看出除了个别潜水取样点位于 $\gamma(SO_4^{2-}+Cl^{-})/\gamma$ HCO<sub>3</sub> = 1 的右下方,其他取样点均位于左上方,说明蒸发岩的溶解占主导作用.

 $(4)\gamma(Na^{+}-Cl^{-})/(\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})-\gamma(SO_{4}^{2-}+HCO_{3}^{-}))$ 

可以用 $\gamma(Na^+ - Cl^-)/(\gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - \gamma(SO_4^{2-} + HCO_3^-))$ 之间的比值关系来反映阳离子交换作 用<sup>[18-19]</sup>,如果在地下水中发生了阳离子交换作用,则 $\gamma(Na^+ - Cl^-) = \gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - \gamma(SO_4^{2-} + HCO_3^-)$ 的关系将表现出负相关性,斜率为-1,即随着 Na<sup>+</sup>含量的增加 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>含量减少.在矿物的溶解过程中,  $\gamma(Na^+ - Cl^-)$ 可以反映 Na<sup>+</sup>含量的增加或减少.图 4(d)表示不同水体中 $\gamma(Na^+ - Cl^-) = \gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - \gamma(SO_4^{2-} + HCO_3^-)$ 的关系,研究区潜水水样分布在斜率为-1.111的直线周围, $R^2$ 为 0.993;承压水水样分布 在斜率为-0.956的直线周围, $R^2$ 为 0.909,说明潜水与承压水均发生了阳离子交换作用.同时,从图 4(d) 中可以看出,承压水水样的斜率更接近-1,说明阳离子交换作用在承压水中强于潜水.同时也证明了在 Gibbs 阳离子图中有部分点落在图外,原因就是发生了阳离子交换. 2.4.3 饱和指数法

计算岩盐、石膏、白云石及方解石等矿物的饱和指数,可以进一步确定地下水中是否发生了溶滤作用,从而反映地下水组分存在的实际形式.饱和指数值是表示地下水对某特定矿物的饱和程度,常用 SI 表示,它可用来判断地下水与某特定矿物的反应状态<sup>[20]</sup>.SI 的表达公式为:

$$SI = lg \frac{IAP}{K}$$

式中,IAP 表示矿物所含组分在水体中的离子活度积,无量纲;K 为矿物在某温度下溶解反映的平衡常数,无量纲.

利用水文地球化学模拟软件 PHREEQC 对地下水水样进行水溶组分平衡分布计算,可得到各地下 水水样的各矿物的饱和指数(SI).SI>0时,表示该矿物相对水溶液处于过饱和状态;SI=0时,表示矿物 相对水溶液正好处于平衡状态;SI<0时,表示该矿物相对水溶液未达到饱和状态,矿物将发生溶解.但 是,由于水质分析以及矿物平衡常数和离子活度计算中的误差,使矿物饱和指数也存在不确定性,因此, 在实际情况中,一般认为当 SI=-0.5—0.5时,矿物相对水溶液处于平衡状态<sup>[1]</sup>.

通过计算可以得出岩盐、石膏、白云石和方解石等饱和指数(图5).



图 5 地下水中主要矿物饱和指数与 TDS 相关关系图 Fig.5 Relations between saturation indices of the four minerals and TDS in groundwater

由图 5 可知,岩盐的 SI 变化范围为:潜水-8.52—-4.42,承压水-8.03—-4.21;石膏的 SI 变化范围 为:潜水-2.86—0.18,承压水-1.68—0.25;白云石的 SI 变化范围为:潜水-0.32—2.10,承压水-0.53— 2.16;方解石的 SI 变化范围为:潜水0.19—1.30,承压水-0.13—1.21.岩盐 SI 均小于 0,石膏 SI 只有极小 部分点大于 0,说明在研究区地下水中,岩盐与石膏这两种矿物的溶解占主导地位,在上文离子比分析 中也证明了地下水化学成分主要来源于岩盐与硫酸盐.白云石与方解石 SI 除了个别点之外均大于 0,但 是大部分取样点位于 0 附近,说明研究区含水层中可能存在碳酸盐的溶解.同时研究区白云石和方解石

SI虽然为正,但并不代表地下水在径流过程中会产生沉淀,因为用 SI 来判断矿物溶解是可靠的,但是判断沉淀不一定可靠,尤其是对白云石和方解石等矿物来说,虽然处于过饱和状态,但也可能不产生沉淀<sup>[21]</sup>.

2.5 人类活动影响

由于巴伊盆地降水较少,蒸发较大,且天然来水量较少,生产活动用水主要是开采地下水.据新疆地 矿局第二水文地质工程地质大队 2012—2013 年调查,巴里坤县 2011 年地下水开采量为 7352×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 伊吾县 2011 年地下水开采量为 2648×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>.由于研究区城镇及绿洲灌区大量开采地下水,导致区域地 下水水位下降,引起水动力场改变,对溶滤、阳离子交换等作用产生了复杂的影响.

除此之外,伊吾县淖毛湖盆地由于矿产资源丰富,还有煤化工基地和石油基地,会对地下水造成污染.采用地下水采样点离子比值趋势图<sup>[22]</sup>(图6)对淖毛湖盆地进行分析,由图6可以看出 Cl<sup>-</sup>/NO<sub>3</sub> 远大于1,说明该地区的地下水均受到生活污染的影响;Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 大多数值较小,说明该地区绝大部分地下水在受到生活污染的同时还受到了工业污染;而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub> 的值较大,说明该地区农业污染较小.



图6 地下水离子含量比值趋势图

Fig.6 Tendency of ions concentration ratios in groundwater

## 3 结论(Conclusion)

(1)研究区潜水、承压水均为弱碱性、高矿化度和中等硬度的水,两者阳离子均以 Na<sup>+</sup>为主,阴离子 均以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主.

(2)研究区潜水水化学类型有 HCO<sub>3</sub>-Ca、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Na、SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Na·Ca、SO<sub>4</sub>·Cl-Na 型和 Cl·SO<sub>4</sub>-Na·Ca型.承压水水化学类型有 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Na·Ca、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>·Cl-Na·Ca、SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Na·Ca 和 SO<sub>4</sub>·Cl-Na·Ca型.

(3)研究区潜水水化学特征主要受蒸发浓缩和岩石风化双重作用影响;承压水补给水源水主要受蒸发浓缩作用影响,个别水样也受岩盐及硫酸盐岩石风化作用影响.除此之外,潜水和承压水水化学特征还受阳离子交换作用的影响.

#### 参考文献(References)

QIAN H, MA Z Y, LI P Y, et al. Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Press, 2005:2 (in Chinese).

- [2] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础(第二版)[M].北京:地质出版社,2011:52. ZHANG R Q, LIANG X, JIN M G, et al.Fundamentals of hydrogeology[M]. Beijing: Geological Press,2011:52 (in Chinese).
- [3] 李巧,周金龙,高业新,等.新疆玛纳斯河流域平原区地下水水文地球化学特征研究[J].现代地质,2015,29(2):238-244. LI Q, ZHOU J L, GAO Y X, et al. Groundwater Hydro-geochemistry in Plain of Manasi River Basin, Xinjiang [J]. Geoscience, 2015,29 (2):238-244 (in Chinese).
- [4] 叶宏萌,李国平,袁旭音,等.山区性小流域水化学特征及物源贡献研究——以武夷山九曲溪流域为例[J].环境化学,2016,35(3): 581-589.

YE H M, LI G P, YUAN X Y, et al. Hydrochemical characteristics and source contribution for small mountainous basin: A case study in the Jiuquxi basin, Wuyishan[J]. Environmental Chemical, 2016, 35(3):581-789 (in Chinese).

- [5] 党慧慧,董军,岳宁,等.贺兰山以北乌兰布和沙漠地下水水化学特征演化规律研究[J].冰川冻土,2015,37(3):793-802.
  DANG H H, DONG J, YUE N, et al. Study of the evolution of hydrochemical properties of groundwater in Ulan Buh Desert in the north of the Helan Mountains[J].Journal of Glaciology and Geocryology, 2015,37(3):793-802 (in Chinese).
- [6] 佟浩,杨凤根,李汝君.奎河与沿岸地下水水化学特征及形成作用分析[J].水资源保护,2015,31(6):109-114.
  TONG H, YANG F G, LI R J, et al. Analysis on hydrochemical characteristics and formation mechanism of Kuihe River and its coastal groundwater[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):109-114(in Chinese).
- [7] RAJESH R, BRINDHA K, ELANGO L. Groundwater quality and its hydrochemical characteristics in a shallow weathered rock aquifer of southern India[J]. Water Quality Exposure & Health, 2015, 7(4):1-10.
- [8] ALFY M E, LASHIN A, AL-ARIFI N, et al. Groundwater characteristics and pollution assessment using integrated hydrochemical investigations GIS and multivariate geostatistical techniques in arid areas [J]. Water Resources Management, 2015, 29(15):5593-5612.
- [9] XIAO J, JIN Z D, WANG J, et al. Hydrochemical characteristics, controlling factors and solute sources of groundwater within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau[J]. Quaternary International, 2015, 380(5):738-745.
- [10] ZHOU J L, DONG X G, LI G M, et al. Evaluation of groundwater quality in Xinjiang plain area [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2010,4(2):183-186.
- [11] 张艳,吴勇,杨军,等.阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J].环境科学,2015,36(9):3230-3237.
  ZHANG Y, WU Y, YANG J, et al. Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City[J]. Environmental Science,2015,36(9):3230-3237 (in Chinese).
- [12] 张群利,郭会荣,吴孔军,等.荥巩矿区岩溶地下水系统的水文地球化学特征及其指示意义[J].水文地质工程地质,2011,38(2): 1-7.

ZHANG Q L, GUO H R, WU K J, et al. Characteristics and indication of hydrogeochemisty for thekarst groundwater system in the Xinggong coal field [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2):1-7 (in Chinese).

- [13] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962):1088-1090.
- [14] 邢丽娜.华北平原典型剖面上地下水化学特征和水文地球化学过程[D].北京:中国地质大学硕士论文,2012. XING L N. Groundwater hydrochemical characteristics and hydrogeochemical processes approximately along flow paths in the North China Plain[D].Beijing:Master's degree thesis of China University of Geosciences, 2012 (in Chinese).
- [15] 洪涛,谢运球,喻崎雯,等.乌蒙山重点地区地下水水化学特征及成因分析[J].地球与环境,2016,44(1):11-18.
  HONG T, XIE Y Q, YU Q W, et al. Hydrochemical characteristics study and genetic analysis of groundwaterin a key region of the Wumeng Mountain, Southwestern China[J]. Earth and Environment, 2016,44(1):11-18 (in Chinese).
- [16] 安乐生,赵全升,叶思源,等.黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用[J].环境科学,2012,33(2):370-378.
  AN L S, ZHAO Q S, YE S Y, et al. Hydrochemical characteristics groundwater in the Yellow Riverand formation mechanism of shallow delta[J]. Environmental Science, 2012,33(2):370-378 (in Chinese).
- [17] 李小等.青海省诺木洪地区地下水化学特征及演化规律[D].西安:长安大学硕士学位论文, 2012.
  LI X D. Study on the groundwater chemistry evolution of Nuomuhong area in Qinghai province[D]. Xi'an:Master's degree thesis of Chang' an University, 2012 (in Chinese).
- [18] 肖国强,杨吉龙,胡云壮,等.秦皇岛洋-戴河滨海平原海水入侵过程水文化学识别[J].安全与环境工程,2014,21(2):32-39. XIAO G Q, YANG J L, HU Y Z, et al. Hydrogeochemical recognition of seawater intrusion processes in Yang River and Dai River coastal plain of Qinhuangdao City[J].Safety and Environmental Engineering, 2014,21(2):32-39 (in Chinese).
- [19] ZHU G F, SU Y Z, HU C L, et al. Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Heihe River Basin, northwest[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60 (1): 139-153.
- [20] 孙亚乔,钱会,吴学华.银川地区地下水矿物的水文地球化学模拟[J].安全与环境学报, 2006, 6(6):29-32.
  SUN Y Q, QIAN H, WU X H, et al. Hydrogeochemical modeling of mineralsingroundwater in Yinchuan region [J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 6(6):29-32 (in Chinese).
- [21] 沈照理,朱宛华,钟佐燊.水文地球化学基础[M].北京:地质出版社,1993:15.
  SHEN Z L, ZHU W H, ZHONG Z S. Fundamentals of hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Press, 1993:5 (in Chinese).
- [22] 赵江涛,周金龙,曾妍妍,等.新疆焉耆盆地平原区地下水质量评价与污染成因探讨[J].地球与环境,2015,43(6):628-636.
  ZHAO J T, ZHOU J L, ZENG Y Y, et al. Assessment of groundwater quality and pollution causes discussionfor the plain area of Yanqi Basin, Xinjiang autonomous region, China[J].Earth and Environment, 2015, 43(6):628-636 (in Chinese).