

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018121801

冯建国, 赫明浩, 李贵恒, 等. 泰莱盆地孔隙水水化学特征及其控制因素分析[J]. 环境化学, 2019, 38(11): 2594-2600.

FENG Jianguo, HE Minghao, LI Guiheng, et al. Analysis of hydrochemical characteristics and controlling factors of porewater in the Tailai Basin [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(11): 2594-2600.

## 泰莱盆地孔隙水水化学特征及其控制因素分析\*

冯建国<sup>1</sup> 赫明浩<sup>1</sup> 李贵恒<sup>1</sup> 李伟<sup>2</sup> 高宗军<sup>1\*\*</sup>  
陆瀛<sup>1</sup> 汪云<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛, 266590;

2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定, 071051;

3. 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 泰安, 271000)

**摘要** 为了解泰莱盆地孔隙水水化学特征及控制因素, 运用数理统计、相关性分析、Piper图、Gibbs图等方法, 分析了研究区孔隙水的主要离子及水化学特征, 并探讨了其控制因素。结果表明, 泰莱盆地孔隙水中主要阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ , 占阳离子总量的86%以上, 而阴离子则以  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为主, 占阴离子总量的85%以上; 水化学类型较为复杂, 以  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$  ( $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ )- $\text{Ca} \cdot \text{Mg}$  ( $\text{Ca}$ ) 为主; pH均值为7.42, 其pH变异系数较小, 整体呈现弱碱性; 研究区TDS均值为  $866.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其北部及南部靠近基岩区的TDS值整体较小, 呈现出南、北两侧值低, 越向泰莱盆地中部越高的现状。Gibbs图及离子端元图结果表明, 水化学组分主要受水-岩作用控制, 以硅酸盐岩风化溶解为主且存在碳酸盐岩风化溶解, 分析与研究区南、北部基岩裂隙水和岩溶水的补给有关。

**关键词** 泰莱盆地, 孔隙水, 水化学, 控制因素。

## Analysis of hydrochemical characteristics and controlling factors of porewater in the Tailai Basin

FENG Jianguo<sup>1</sup> HE Minghao<sup>1</sup> LI Guiheng<sup>1</sup> LI Wei<sup>2</sup>  
GAO Zongjun<sup>1\*\*</sup> LU Ying<sup>1</sup> WANG Yun<sup>3</sup>

(1. College of Earth Science and engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, 266590, China;

2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding, 071051, China;

3. Shandong Zhengyuan Institute of Geological Exploration, China Metallurgical Geology Bureau, Taian, 271000, China)

**Abstract:** In order to survey chemical characteristics and control factors of pore water in Tailai basin, 40 pore water were sampled in 2017. By means of mathematical statistics, correlation analysis, Piper diagram and Gibbs diagram, main ion and hydrochemical characteristics of porewater were analyzed, and its control factors were discussed. The results showed that  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$  were the main positive ions in porewater of Tailai basin, accounting for more than 86% of the total positive

2018年12月18日收稿(Received: December 18, 2018).

\* 中国地质调查局“沂蒙山革命老区1:5万水文地质调查”工作项目(1212012000150003)的“大汶河流域水化学演化特征研究”专题研究和山东省地下水水源地调查评价(泰莱盆地)(鲁地环201604)

**Supported by** Study on the Characteristics of Hydrochemical Evolution in the Dawen River Basin under the Hydrogeological Survey Project in the Revolutionary Area of Yimeng Mountains, China Geological Survey(1212012000150003) and Groundwater Source Survey and Evaluation of Shandong Province(Tailai Basin) (LDH201604).

\*\* 通讯联系人, E-mail: gaozongjun@126.com

**Corresponding author**, E-mail: gaozongjun@126.com

ions,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  were the main anions, accounting for more than 85% of the total anions. The types of hydrochemistry were complex and mainly type was  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$  ( $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ )- $\text{Ca} \cdot \text{Mg}$  (Ca). Mean of pH was 7.42, and variation coefficient was small, belong weak alkalinity. Mean of TDS was  $866.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , in the north and south of the study area near the bedrock area showed low values, and higher in the middle of the Tailai Basin. The hydrochemical components were mainly controlled by water-rock action, mainly by weathering dissolution of silicate rocks and carbonate rocks.

**Keywords:** Tailai basin, porewater, hydrochemistry, control factors.

地下水水化学分析研究是开展水文地质工作的重要组成部分,对其深入探讨分析不仅能清楚地了解到区域地下水水化学环境特征,更为地下水水资源的保护和合理开发利用提供了科学依据<sup>[1-2]</sup>.水体中的离子类型、离子含量及分布特征受到气象水文条件、地形地貌特征、赋存类型、补给径流排泄过程及人类活动等多种因素的控制影响.Carol 等<sup>[3]</sup>对滨海平原地区地下水的盐化过程进行了研究,结果表明地下水的盐化受溶滤作用、蒸发作用以及人类活动的影响.周俊等<sup>[4]</sup>运用描述性统计、相关性分析、Gibbs 图、阴阳离子三角图和主成分分析法,对贡嘎山海螺沟流域水化学主离子特征及其控制因素进行了分析,结果表明岩石的化学风化是主离子来源的主要控制因素,碳酸盐岩的风化是海螺沟流域岩石风化的主要类型,而蒸发—结晶和大气降水的作用影响较小.张涛等<sup>[5]</sup>综合运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 模型和离子比等方法对滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征进行分析研究,结果表明该流域水化学离子组成受岩石风化和硅酸盐岩的溶解控制,碳酸盐岩的溶解也是离子组成的重要原因.

泰莱盆地为鲁中重要工业区,人口密集,工农业发达.随着社会经济的发展,区域水资源供需矛盾日益突出,人类活动对地下水系统的影响越来越显著,通过对水体中水化学离子特征的分析研究,对了解水体中离子来源及生态环境的保护具有重要的意义.

## 1 实验部分 (Experimental section)

### 1.1 研究区概况

研究区(图 1)地处山东省中南部,行政区范围主要涉及莱芜市莱城区、钢城区和泰安市岱岳区、泰山区.地理位置东经  $117^{\circ}00' - 117^{\circ}53'$ ,北纬  $36^{\circ}00' - 36^{\circ}23'$ ,面积约  $3000 \text{ km}^2$ .泰莱盆地属暖温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温  $13.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温  $40.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温  $-21.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .初冻最早见于 11 月,解冻最晚在 3 月,冻土层一般小于  $0.5 \text{ m}$ .降水年际变化较大,历年降水量丰枯差异明显,年平均降水量  $720.8 \text{ mm}$ .该地区降水量年际变差可达 4.7 倍,最大降水量是 1990 年的  $1236.9 \text{ mm}$ ,最小降水量是 1989 年的  $263.1 \text{ mm}$ .年内降水量分配不均,降水有明显的季节性,降水多集中在 6 月下旬至 9 月下旬,约占年平均降水量的 70% 左右.区内地表水系发育,其主干河流为大汶河两大主流之一的牟汶河,其两岸分布呈树枝状的支流数十条,南北两岸的支流具有不对称性,河流长度南短北长,河床坡度南陡北缓.研究区属华北地层大区,晋冀鲁地层区,鲁西地层分区.区内地层发育有太古界前震旦纪泰山岩群变质岩,下古生界寒武纪、奥陶纪碳酸盐岩、页岩,石炭—二叠纪煤系地层,中生界侏罗纪、白垩纪砂岩,新生界古近纪、新近纪砂岩、砾岩、泥岩、泥灰岩、黏土岩及第四纪松散岩等.

### 1.2 材料与方法

本次研究采用 2017 年丰水期所采孔隙水水样共 40 组,采样点分布如图 1 所示.水样多采自于常用农业灌溉井,居民饮用水井.样品采集前,取样瓶进行了酸洗和蒸馏水冲洗,采样时用新鲜水冲洗至少 3 次,取样点均为经常提水的开采井或压水井,取水前抽水  $10 \text{ min}$  以上,保证取得的水样可以反映采样点地下水的真实状况.

研究选取样品水质测试结果中的主要常规指标,包括 pH、TDS、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  10 项指标,综合运用 Piper 三线图、SPSS 统计分析、相关性分析、Gibbs 模型、离子比值端元图等研究方法对泰莱盆地孔隙水水化学特征及其控制因素进行了分析.

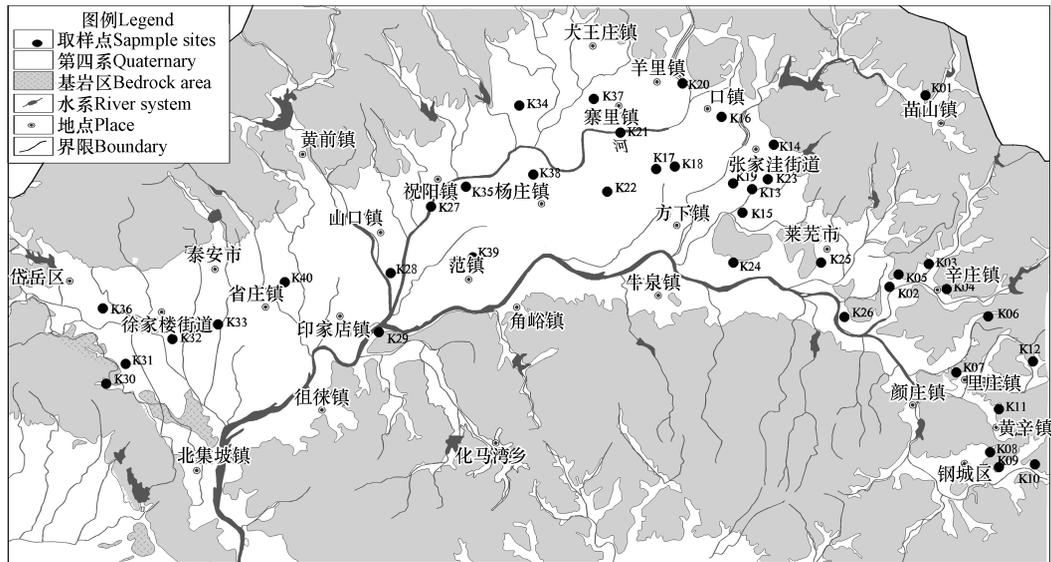


图 1 研究区位置及采样点示意图

Fig.1 The location and sampling point of the study area

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 水化学组成特征

#### 2.1.1 主要离子特征

本次研究采用泰莱盆地 40 组孔隙水潜水水样,水位埋深在 6—12 m.对其常规水化学指标进行了统计(表 1).通过对泰莱盆地孔隙水主要离子分析得出,阳离子存在  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$  的关系,以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$  为主,占阳离子总量的 86% 以上,其中  $\text{Mg}^{2+}$  也占据了阳离子总量 13.24%.阴离子呈现出  $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$  的关系,其中以  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为主,占到阴离子总量的 85% 以上.变异系数(CV)是标准差与相应平均值的商值,其用来衡量数据的离散程度.从统计结果可以看出,阳离子变异系数呈现出  $\text{K}^{+} > \text{Na}^{+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$  的关系,其中  $\text{K}^{+}$  和  $\text{Na}^{+}$  变异系数分别达到了 1.34、0.92,阴离子变异系数存在  $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$  的关系,其中  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  变异系数分别为 1.14、0.95,这表明泰莱盆地孔隙水中这些离子的含量在空间上变化较大,受影响的敏感程度较大.从表 1 可以看出,采样点中 pH 值在 6.90—8.00 之间,平均值为 7.42,变异系数为 0.03,说明了整个研究区内 pH 值变化幅度不大,整体呈现弱碱性.TDS 介于 302—2504  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,均值为 866.09  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

表 1 主要离子含量统计表

Table 1 Statistical table of main ion content

	pH	TDS	$\text{K}^{+}$	$\text{Na}^{+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^{-}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^{-}$	$\text{NO}_3^{-}$
最大值	8.00	2504.0	9.5	175.0	513.43	96.79	505.30	398.91	421.95	943.00
最小值	6.90	302.00	0.08	4.09	39.90	12.65	9.94	4.53	52.74	4.62
平均值	7.42	866.09	1.42	37.18	183.50	33.89	102.05	157.82	264.31	195.40
标准差	0.22	504.31	1.91	34.25	103.96	16.59	96.86	100.22	78.26	221.94
变异系数	0.03	0.58	1.34	0.92	0.57	0.49	0.95	0.64	0.30	1.14

注:除 pH 外,其余水化学指标含量单位为  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

#### 2.1.2 TDS 空间变化特征

运用 Surfer 绘制出研究区 TDS 等值线图(图 2).分析得出,研究区北部及南部靠近基岩山区的 TDS 值整体较小,一般小于 400  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,沿地下水径流方向向盆地中部平原区一带,TDS 值逐渐增大,即基本以泰安-莱芜为一中轴线,呈现南、北两侧值低,越向泰莱盆地中部 TDS 值越高,形成一条 SW—NE 走向



从阴离子三角图中可以看出,阴离子分布较为分散,各个阴离子毫克当量都占据了一定的比重.研究区内孔隙水水化学类型主要为  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4(\text{SO}_4\text{·HCO}_3)\text{-Ca·Mg(Ca)}$ 、 $\text{HCO}_3(\text{HCO}_3\text{·Cl})\text{-Ca·Mg(Ca)}$ ,水化学类型较复杂,可进一步说明受影响较大.阴离子类型主要为: $\text{HCO}_3$ 型、 $\text{HCO}_3\text{·SO}_4$ 型、 $\text{SO}_4\text{·HCO}_3$ 型、 $\text{HCO}_3\text{·Cl}$ 型及  $\text{Cl}$ 型,分别占孔隙水总数的16%、37%、11%、10%和9%.

#### 2.1.4 相关性分析

地下水化学组分中主要离子浓度之间的变化存在一定的相互关系,相关分析被广泛应用于地下水水化学统计分析中<sup>[8]</sup>.运用 SPSS 21.0 软件做出研究区水质参数中的常规离子之间的相关性关系矩阵(表2),由表2可以看出, $\text{Cl}^-$ 和 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 具有较好的相关性,这可能由于研究区内人类活动对地下水中 TDS 含量产生一定的影响,如生活污水排放、农药化肥使用等有关. $\text{Na}^+\text{+K}^+$ 与 $\text{Cl}^-$ 离子相关系数为0.729,达到中等相关程度,说明两者之间存在同源性或协同效应. $\text{Na}^+\text{+K}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-$ 呈显著相关,这可能与硅酸盐的风化溶解有关.

表2 水化学参数相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of hydrochemical parameters

	PH	TDS	$\text{K}^+\text{+Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$
PH	1	-0.385*	-0.275	-0.399*	-0.262	-0.327*	-0.216	0.003	-0.397
TDS		1	0.712**	0.978**	0.859**	0.880**	0.692**	0.370*	0.845**
$\text{K}^+\text{+Na}^+$			1	0.610**	0.636**	0.729**	0.678**	0.597**	0.398*
$\text{Ca}^{2+}$				1	0.790**	0.878**	0.650**	0.366*	0.829**
$\text{Mg}^{2+}$					1	0.762**	0.685**	0.292	0.704**
$\text{Cl}^-$						1	0.633**	0.485**	0.585**
$\text{SO}_4^{2-}$							1	0.322*	0.311
$\text{HCO}_3^-$								1	0.008
$\text{NO}_3^-$									1

## 2.2 离子来源及控制因素分析

### 2.2.1 Gibbs 模型分析

地表水体中主要离子来源于大气降水、岩石风化、蒸发岩盐溶解、地下水补给以及人类活动等等.Gibbs图<sup>[9]</sup>能直接反映出水体主要离子的控制因素(蒸发-结晶作用、岩石风化作用、大气降水作用)<sup>[10-11]</sup>.为确定研究区地下水的控制因素,对40组水样进行了Gibbs模型图解分析(图4).由图4可以看出,研究区采样点的离子含量投点绝大部分落于横坐标轴 $\text{Na}^+(\text{Na}^+\text{+Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^+\text{+HCO}_3^-)$ 小于0.5的区域(Gibbs图中间靠左侧部分),处于岩石风化作用带,远离蒸发-浓缩带和大气降水带,表明水-岩作用是研究区地下水水化学离子组分的主要控制因素.该区水化学离子组成来源主要为岩石风化,但可以看到,研究区部分采样点,有向右上方区域偏移的趋势,说明蒸发作用对研究区孔隙水体的水化学组分具有一定的控制作用.整体而言,该区水体的主要离子组成受蒸发-浓缩作用和大气降水作用影响小,而水-岩作用是研究区水化学离子的主要控制因素.

### 2.2.2 离子比值端元图分析

利用 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 离子比值端元图,可以进一步分析地下水化学离子组分来源<sup>[12]</sup>.Gaillardet等<sup>[13]</sup>通过研究得出,硅酸盐岩端元 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 比值分别为 $0.35\pm 0.15$ 、 $0.24\pm 0.12$ 和 $2\pm 1$ ,碳酸盐岩端元 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 比值分别为50、10和120<sup>[7]</sup>.采用研究区40组孔隙水数据绘制出端元图(图5).由图5可以看出,泰莱盆地孔隙水水化学组分介于硅酸盐岩与碳酸盐岩区域之间,更偏于硅酸盐岩区域,表明研究区主要存在硅酸盐岩与碳酸盐岩风化溶解,以硅酸盐岩风化为主.这是由于研究区北部和南部为基岩山区的基岩裂隙水和岩溶地下水的补给有关.

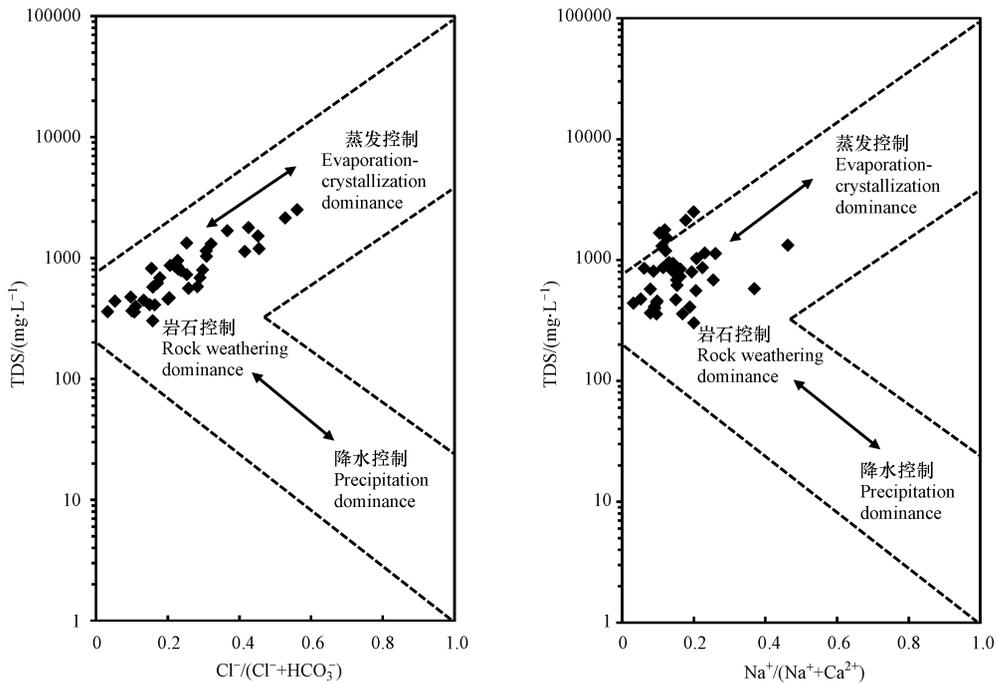


图 4 研究区水化学 Gibbs 图

Fig.4 Gibbs diagram of Hydrochemistry in the study area

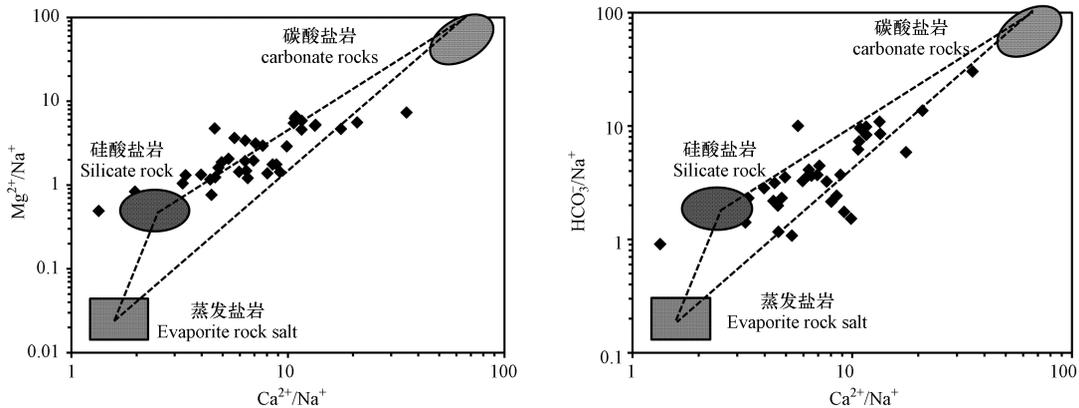


图 5 泰莱盆地孔隙水离子比值端元图

Fig.5 The ion ratio end of porewater in the Taylor Basin

### 3 结论 (Conclusion)

(1) 泰莱盆地孔隙水离子组分阳离子存在  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  的关系, 以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主, 占阳离子总量的 86% 以上, 而阴离子呈现出  $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$  的关系, 则以  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为主, 占阴离子总量的 85% 以上. 水化学类型较为复杂, 以  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 (\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3) - \text{Ca} \cdot \text{Mg} (\text{Ca})$  为主.

(2) pH 值在 6.90—8.00 之间, 平均值为 7.42, 整体呈弱碱性. TDS 介于  $302\text{—}2504 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 均值为  $866.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 北部及南部靠近基岩区的 TDS 含量整体较小, 沿地下水径流途径向盆地中部平原区一带, 值逐渐增大, 即基本以泰安-莱芜一线为中轴线, 呈现南、北两侧值低, 越向泰莱盆地中部 TDS 值越高.

(3) 基于 Gibbs 模型分析得出, 研究区地下水水化学组分主要受水-岩作用控制. 端元图分析表明, 水化学组分来源主要以硅酸盐岩风化溶解为主, 且存在碳酸盐岩风化溶解, 是由于研究区南、内部山区基

岩裂隙水和岩溶水的补给有关.

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 章光新,邓伟,何岩等.中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J].水科学进展,2006,17(1):20-28.  
ZHANG G X, DENG W, HE Y, et al. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. Advances in Water Science, 2006,17(1):20-28(in Chinese).
- [ 2 ] 王晓曦,王文科,王周锋,等.滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征及其形成作用[J].水文地质工程地质,2014,41(1):25-33.  
WANG X X, WANG W K, WANG Z F, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of river water and groundwater along the downstream Luanhe River, northeastern China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014,41(1):25-33(in Chinese).
- [ 3 ] CAROL E, KRUSE E, MASPLA J. Hydrochemical and isotopical evidence of ground water salinization processes on the coastal plain of Samborombon Bay, Argentina [J]. Journal of Hydrology, 2009, 365(3):335-345.
- [ 4 ] 周俊,吴艳宏.贡嘎山海螺沟水化学主离子特征及其控制因素[J].山地学报,2012,30(3):378-384.  
ZHOU J, WU Y H. Major ion chemistry of waters in hailuogou catchment and the possible controls [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(3):378-384 (in Chinese).
- [ 5 ] 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(in Chinese).
- [ 6 ] 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).
- [ 7 ] 高坛光,康世昌,张强弓,等.青藏高原纳木错流域河水主要离子化学特征及来源[J].环境科学,2008,29(11):3009-3016.  
GAO T G, KANG S C, ZHANG Q G, et al. Major ionic features and their sources in the Nam Co Basin over the Tibetan Plateau [J]. Environmental Science, 2008,29(11):3009-3016(in Chinese).
- [ 8 ] 胡春华,童乐,万齐远,等.环鄱阳湖浅层地下水水化学特征的时空变化[J].环境化学,2013,32(6):974-979.  
HU C H, TONG L, WAN Q Y, et al. Spatial and temporal variation of shallow groundwater chemical characteristics around Poyang Lake [J]. Environmental Chemistry, 2013,32(6):974-979(in Chinese).
- [ 9 ] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970,17:1088-1090.
- [ 10 ] 王卓微,赵新锋,庞园,等.流溪河流域地下水水化学时空特征及源辨析[J].环境化学,2017,36(12):2701-2710.  
WANG Z W, ZHAO X F, PANG Y, et al. Spatial and seasonal geochemical and stable isotopic characteristics of groundwater associated with flow system and source identification in Liuxi River catchment [J]. Environmental Chemistry, 2017,36(12):2701-2710(in Chinese).
- [ 11 ] 卓勇,吴勇,孙为奕,等.贵州威宁草海地区地下水化学特征与控制因素研究[J].科学技术与工程,2016,16(8):59-65.  
ZHUO Y, WU Y, SUN W Y, et al. Hydrochemistry characteristic and the control factor of groundwater of Caohai Area in Weining County, Guizhou Province [J]. Science Technology & Engineering, 2016,16(8):59-65(in Chinese).
- [ 12 ] 曾妍妍,周金龙,贾瑞亮,等.新疆祁漫塔格地区地表水水化学特征及成因分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(6):64-70.  
ZENG Y Y, ZHOU J L, JIA R L, et al. Hydrochemical characteristics and causes of surface water in Qimantage area, Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2017,31(6):64-70(in Chinese).
- [ 13 ] GAILLARDET J, DUPRÉ B, LOUVAT P, et al. Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. Chemical Geology, 1999,159(1-4):3-30.