



# Major Ion Geochemistry and Source Mechanism of the Hongfanchi Spring Area, Jinan, China

Li Jinzhen<sup>1</sup>, Sun Tianhe<sup>1,\*</sup>, Jiang Zhenguo<sup>1</sup>, Wang Jilin<sup>2</sup>, Jin Lijie<sup>1</sup>, Yu Chunnan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan, China

<sup>2</sup>Shandong Bureau Testing Center of China Metallurgical Geology Bureau, Jinan, China

## Email address:

251040@qq.com (Li Jinzhen), tianhe03@163.com (Sun Tianhe)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Li Jinzhen, Sun Tianhe, Jiang Zhenguo, Wang Jilin, Jin Lijie, Yu Chunnan. Major Ion Geochemistry and Source Mechanism of the Hongfanchi Spring Area, Jinan, China. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 4, 2022, pp. 217-223. doi: 10.11648/j.sd.20221004.13

Received: July 15, 2022; Accepted: August 6, 2022; Published: August 9, 2022

**Abstract:** Hongfanchi spring area is one of the most important areas of Jinan spring group, and the hydrochemical characteristics and material source mechanism are of great significance for the reasonable development and protection of the spring area. In this study, the water sampling sites were arranged in the typical spring water and the confluent surface water, and the contents of major ion geochemistry were analyzed. The research methods of such as: statistical analysis, Piper diagram, correlation analysis, cluster analysis, Gibbs diagram and mass conservation calculation were used to study the hydrochemical characteristics, and the source mechanism of major ion geochemistry in Hongfanchi spring area has been proposed for the first time. The results show that: the water in the Hongfanchi spring area were mainly with the hydrochemical type of  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ ; and the contents of  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$  in the spring water were much lower than that in the surface water, while the contents of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  and TDS were obviously higher. The spring water was mainly affected by the carbonate weathering (62.91% - 73.10%) and the anthropogenic inputs (12.79% - 23.97%); while the surface water was affected by the carbonate weathering (36.03% - 60.91%), the evaporite dissolution (15.74% - 22.00%), the silicate weathering (11.28% - 16.81%) and the anthropogenic inputs (10.12% - 15.70%). The proportion of atmospheric inputs in both were very small.

**Keywords:** Hongfanchi, Spring, Hydro-Geochemical Characteristics, Ion, Source Mechanism

## 洪范池泉域主要离子水化学特征及物源机制

李金镇<sup>1</sup>, 孙天河<sup>1,\*</sup>, 江振国<sup>1</sup>, 王继林<sup>2</sup>, 靳立杰<sup>1</sup>, 于春楠<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山东省第一地质矿产勘查院, 济南, 中国

<sup>2</sup>中国冶金地质总局山东局测试中心, 济南, 中国

## 邮箱

251040@qq.com (李金镇), tianhe03@163.com (孙天河)

**摘要:** 洪范池泉域是济南市泉群的重要区域之一, 探讨其水化学特征及物源机制对泉域的合理开发及水环境保护具有重要意义。以洪范池泉域范围为研究对象, 通过对典型泉水及汇流地表水的主要离子测定, 采用统计分析、Piper图、相关性分析、聚类分析、Gibbs图和质量守恒推算等方法, 对泉域的水化学特征进行研究, 并首次对主要水化学离子的物源机制进行了分析。结果表明: 研究区内的水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 型; 泉水中 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 含量低于地表水, 而 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、TDS含量则高于地表水; 泉水主要受碳酸盐岩风化 (62.91%~73.10%)

和人类活动(12.79%~23.97%)的影响;而地表水则同时受到了碳酸盐岩风化(36.03%~60.91%)、蒸发岩溶解(15.74%~22.00%)、硅酸盐风化(10.12%~15.70%)及人类活动(10.12%~15.70%)的影响。

**关键词:** 洪范池, 泉水, 水化学特征, 离子, 物源机制

## 1. 引言

作为世界闻名的“泉城”, 济南市的岩溶十分发育, 地下水资源也较为丰富, 其特殊的水文地质条件以及地质构造条件, 造成了地下水在多处地段以泉水形式的排泄, 如“天下第一泉”—趵突泉等。长期以来, 岩溶地下水也一直是济南市的主要供水来源之一, 为当地社会经济的发展做出了重大贡献。自上世纪中叶以来, 随着经济的快速发展以及人口的急剧增加, 各种与泉水相关的地下水环境问题也日益突显[1-3]。

近年来, 围绕济南市泉水水化学环境, 诸多学者也做了相关研究。从水文地质学的角度分析, 泉水的影响因素主要包括大气降水[4]、及人工开采[5], 水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型[6], 泉水的矿化度、硬度、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等常规水化学指标呈现升高趋势[7]; 殷秀兰等[8], 通过对济南泉水样品的采集与分析, 采用主要水化学离子测定、同位素示踪等研究方法, 结合济南市泉域特殊的水文地质条件分析, 研究了四大泉群(趵突泉、黑虎泉、珍珠泉、五龙潭)的水化学特征和环境同位素特征, 确定了泉水在枯水期及丰水期的补给来源及途径; 孟庆晗等[9], 在分析四大泉群的水位、水温、水化学、电导率等指标后, 得出了泉水的补给来源具有差异性, 并确定了不同含水层对济南泉域的补给比例; 邢立亭等[10], 在综合研究济南四大泉群水位、泉水电导率动态变化特征等后发现: 泉水的补给来源存在季节性差异, 丰水期以东南方向管道流补给为主, 枯水期以西南方向裂隙流补给为主; 并指出济南北部岩溶发育非常不均匀, 管道流与裂隙流并存, 奥陶系灰岩区域是较为理想的保泉回灌补给地点。

以往针对济南市泉水的相关研究多集中于四大泉群, 对洪范池泉域水环境及水化学特征的征研究较少, 目前还没有针对洪范池泉域的水化学影响因素或物源机制等方面的研究。为此本研究于2015年采集了洪范池泉域内的主要泉水及泉水汇流后的地表水, 并分析了其主要水化学离子, 采用多元统计分析, piper三线图方法对泉域的水化学特征进行了研究, 并利用相关性分析、聚类分析和质量守恒推算等方法并首次对泉域的主要水化学离子的物源机制进行了分析, 为洪范池泉域泉水的合理开发利用与水环境保护提供了数据支撑。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区概况

洪范池泉域位于济南市洪范池镇浪溪河中上游右岸, 比较著名泉水的有洪范池、书院泉、扈泉、墨池泉、狼泉、白雁泉、拔箭泉、丁泉、长沟泉, 称为洪范九泉。洪范池

泉群被列为济南市十大泉群之一, 洪范池、书院泉、扈泉以及日月泉均在济南市七十二名泉之列。

洪范池泉域位于泰山背斜北翼岩溶水文地质区平阴单斜构造岩溶水为主的水文地质亚区的西南部之银山-东阿水文地质单元内, 地理位置位于平阴县西南部的洪范池乡浪溪河中、上游右侧, 分布面积约 $9\text{km}^2$ , 有泉池10余处。因区内地层产状平缓, 接受降水后, 运动途径短, 张夏组灰岩底部为馒头组页岩隔水层, 下渗运动受阻, 受沟谷切割, 在构造及地形条件有利处, 大多以裂隙下降泉形式排泄地下水。附近的浪溪河就由洪范池、书院泉、白雁泉、丁泉等泉水汇聚而成, 河水流向自南而北。

洪范池地区岩层总体呈单斜状, 倾向 $210\sim 260^\circ$ , 倾角为 $1\sim 3^\circ$ 。其地层岩性分布自下而上依次为: 太古界泰山群片麻岩、巨厚的寒武-奥陶系、第四系。向北倾斜的单斜构造与南高北低地势的一致性, 为洪范池泉水的形成奠定了地质地貌基础。巨厚的寒武—奥陶系石灰岩地层中裂隙、岩溶发育, 为大气降水入渗形成岩溶地下水创造了条件; 在地下, 溶洞、溶孔、溶隙及裂隙的发育为岩溶地下水的存储运移提供了空间与通道。已形成的岩溶地下水顺地势和岩层倾向自南向北流动, 汇集于山前地下。在洪范池镇一带, 东南部为低山丘陵, 西北部为山间平地。张夏组含水层大部分出露于地表, 埋藏于地下的灰岩仅 $5\sim 60\text{m}$ 。在南部及东南部接受大气降水入渗补给后, 沿地势由南向北径流。张夏组岩层底部为馒头组页岩及泥岩厚达 $180\sim 270\text{m}$ , 是良好的隔水层。同时, 由于地表附近岩溶裂隙发育, 故在张夏组灰岩底部, 沿地表岩溶裂隙构造发育部位, 地下水出露地表, 以泉水的形式进行排泄。

### 2.2. 样品与测试

综合考虑研究区水文地质条件和人类活动的影响, 于2015年3月份布设了采样点9个, 其中泉水采样点5个, 由泉水汇流而成的地表水采样点4个, 具体采样点位置信息如图1所示。

采用500mL聚乙烯瓶进行水样的采集, 在采样前用目标水体清洗采样瓶及瓶盖3次, 采样时确保采样瓶内没有气体。每个采样点分别采集阴、阳离子测定样品各1瓶, 阳离子测定样品加硝酸酸化至 $\text{pH} < 2$ , 阴离子测定样品采集原水。采集后的样品置于 $4^\circ\text{C}$ 恒温箱内保存, 并于24h内送检, 测试指标包括 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{F}^-$ 、TDS、pH。

### 2.3. 数据分析与处理

在水文环境地球化学研究中, 多元统计分析可用于研究水化学特征与判断影响因素[11-13], 聚类分析的原理是根据个体或变量之间存在不同程度的相似性, 以一些能够度量样品或指标之间相似程度的统计量作为划分类型的依据, 把一些相似程度较高的个体或变量聚合为一类, 直

到把所有的个体或变量聚合成一类[14]。聚类分析不但可以显示个体或变量之间的地球化学特征的相似程度，还可用于辅助判断其影响因素或物质来源[15, 16]。Piper图、

Gibbs图等则能更为直观的体现水化学特征，进而揭示其水化学演化。

本次进行了多元统计分析及聚类分析，水化学Piper图，以及其他相关水化学图件的绘制。

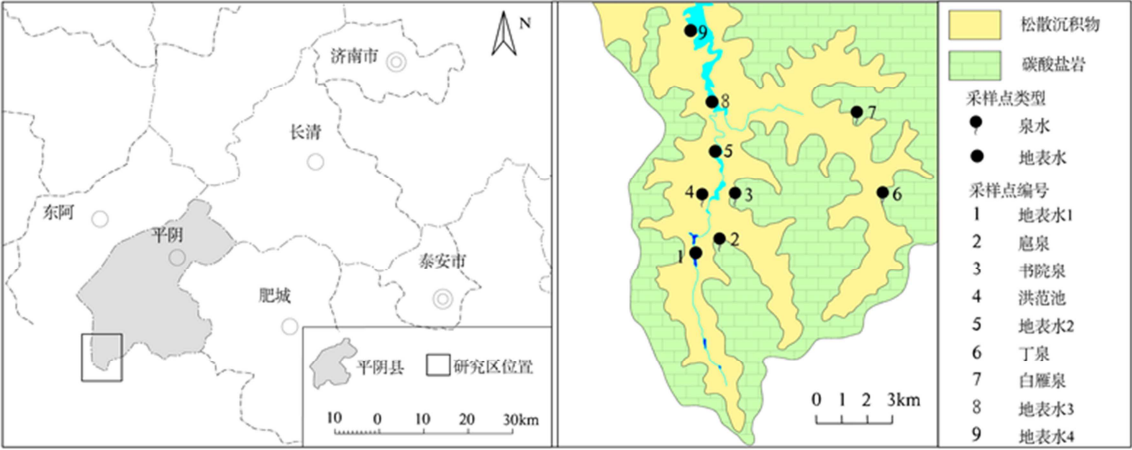


图1 研究区位置及采样点分布。

3. 结果与讨论

3.1. 水化学组分特征

对研究区采集水样主要离子分析结果及相关统计参数如表1。区内泉水及地表水均呈弱碱性，阴离子浓度由高至低均为： $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ ，阳离子浓度由高至低为： $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 。优势阳离子为 $\text{Ca}^{2+}$ ，其毫克当量占比为64.23%~91.56%；优势阴离子主要为 $\text{HCO}_3^-$ ，其毫克当量占比为46.33%~64.86%，其次为 $\text{HCO}_3^-$ ，其毫克当量占比为15.64%~38.34%。研究区泉水及地表水水化学

类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 及 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ，说明洪范池泉域的水化学特征在区域上具有相似性，与李笑[17]等相关研究的结论相吻合，符合岩溶地区地下水的特征。

统计结果显示，泉水中 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 平均含量低于地表水，而 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、TDS平均含量则高于地表水。为了进一步研究及展示研究区水化学主要离子组成及演化特征，绘制了Piper三线图[18-20]。Piper图也显示了洪范池泉域内水化学类型较为相近，主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ ，但泉水中 $\text{Ca}^{2+}$ 的占比要明显高于汇流后的地表水。这均表明了泉水在流出地表后又受到了其他外来因素的影响。

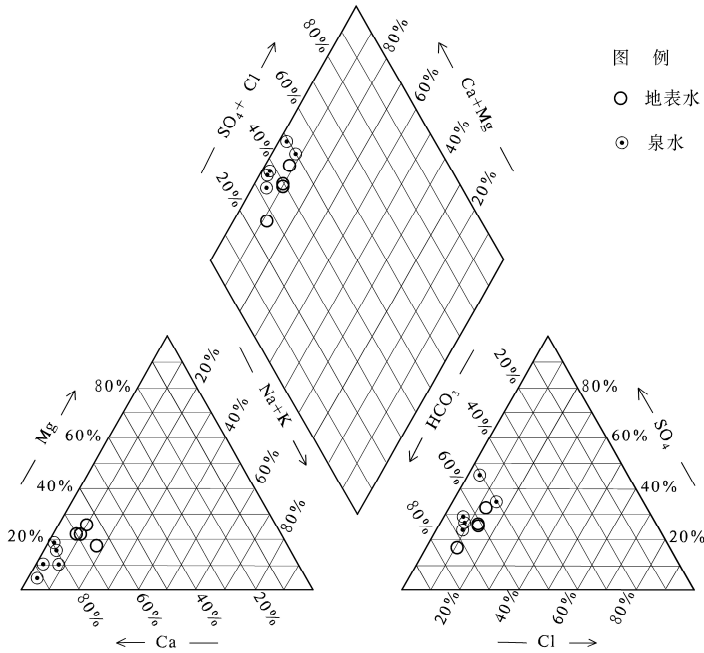


图2 样品水化学Piper图。

表1 水化学指标及统计参数。

样品 Sample	K <sup>+</sup> mg/L	Na <sup>+</sup> mg/L	Ca <sup>2+</sup> mg/L	Mg <sup>2+</sup> mg/L	Cl <sup>-</sup> mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/L	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	F <sup>-</sup> mg/L	TDS mg/L
扈泉	0.50	5.50	139.00	19.40	14.40	162.93	260.63	48.39	0.15	426.98
白雁泉	0.60	6.00	132.38	4.01	16.46	97.25	257.29	41.68	0.22	347.11
丁泉	0.40	5.50	136.80	9.37	18.51	92.62	263.97	54.25	0.18	380.19
书院泉	0.70	8.40	116.94	13.38	22.63	74.10	267.32	46.79	0.25	347.11
洪范池	0.50	16.50	141.21	10.70	45.25	134.30	247.27	38.70	0.27	396.71
地表水1	0.90	16.00	98.18	15.39	26.74	53.26	280.73	39.10	0.28	308.53
地表水2	1.00	13.50	99.29	18.73	32.91	106.52	227.22	16.44	0.25	325.09
地表水3	1.10	14.20	90.46	17.39	31.88	78.73	233.90	7.14	0.27	297.52
地表水4	1.30	14.20	79.43	18.73	30.85	76.41	229.26	4.10	0.35	275.50

### 3.2. 水化学指标相关性分析

为了进一步研究不同离子的来源,对分析水样的水化学指标进行相关性分析,分析结果如表2。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 与TDS的相关系数分别达到了0.935、0.817、0.771及0.396,说明这几种离子是研究区泉水中TDS的主要控制因素,而泉水在流出后TDS明显降低,也说明了大气降水在流经碳酸盐岩的过程中,岩石溶滤作用较为强烈, $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 与TDS均呈负相关,也说明了在泉水的形成过程中岩石溶滤起到了主导作用。

分别绘制了 $[\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}]$ 与 $[\text{HCO}_3^-]$ 和 $[\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}]$ 的当量浓度关系图[17, 21, 22] (图3)。从图3中可以看出, $[\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}]$ 与 $[\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}]$ 的线性拟合程度明显较好,而且其Pearson相关系数也较高(0.954),说明碳酸盐岩及硫酸盐岩在岩石溶滤过程中均具有明显的影响作用。

绘制了 $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ 与 $\text{HCO}_3^-$ 的相关关系图(图4),用来判别洪范池泉域地下水流经地层的主要岩性[17, 23, 24],可以看出,水样的 $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ 值均小于0.26,可以判断 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 主要来源于灰岩中相应矿物成分的溶滤。

表2 主要水化学指标相关性。

	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TDS
K <sup>+</sup>	1.000									
Na <sup>+</sup>	0.606	1.000								
Ca <sup>2+</sup>	-0.979	-0.586	1.000							
Mg <sup>2+</sup>	0.596	0.377	-0.589	1.000						
F <sup>-</sup>	0.798	0.793	-0.769	0.246	1.000					
Cl <sup>-</sup>	0.357	0.882	-0.296	0.199	0.654	1.000				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.539	-0.314	0.661	0.063	-0.589	-0.044	1.000			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.603	-0.367	0.473	-0.386	-0.450	-0.510	-0.128	1.000		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.919	-0.623	0.845	-0.540	-0.730	-0.518	0.291	0.842	1.000	
TDS	-0.907	-0.534	0.935	-0.265	-0.809	-0.266	0.817	0.396	0.771	1.000

### 3.3. 水化学样品聚类分析

聚类分析可以分为Q型聚类及R型聚类,其中Q型聚类是针对不同个体进行分析处理,而R型聚类则是对不同的变量进行分析处理。聚类分析在水环境地球化学研究中的应用可以显示不同个体之间的水化学特征的一致性程度,进而推断及水文地质条件的相似性程度,有助于分析和判别地下水主要化学指标的主要物质来源[14]。利用平均联结(组间关联)的方法,对洪范池泉域所采集的9件水化学样品的分析指标进行了Q聚类分析。聚类分析树状图(图5)显示,9件水化学样品在迭代20次以内,被划分成为了

2类: I类,包括所有地表水样品; II类,包括所有泉水样品。这说明泉水在流出后又受到了一定的外来因素的影响,从而造成了部分水化学指标的变化。统计结果显示,地表水中 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 的含量明显高于泉水,表明人类活动对地表水体产生了污染,这与李洲等[25, 26]的研究是一致的。泉水流出地表后水体温度上升,水中的 $\text{Ca}^{2+}$ 及 $\text{HCO}_3^-$ 发生化学反应( $\text{Ca}^{2+}+2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3$ (沉淀)+ $\text{CO}_2$ (气体)+ $\text{H}_2\text{O}$ ),生成沉淀,会造成水中离子浓度的下降。由于土壤对各种形态的N有一定的吸附作用[27],泉水在流经第四系时,相应离子含量会降低,本次所采集的地表水由南至北 $\text{NO}_3^-$ 含量逐渐降低,也证实了这一点。

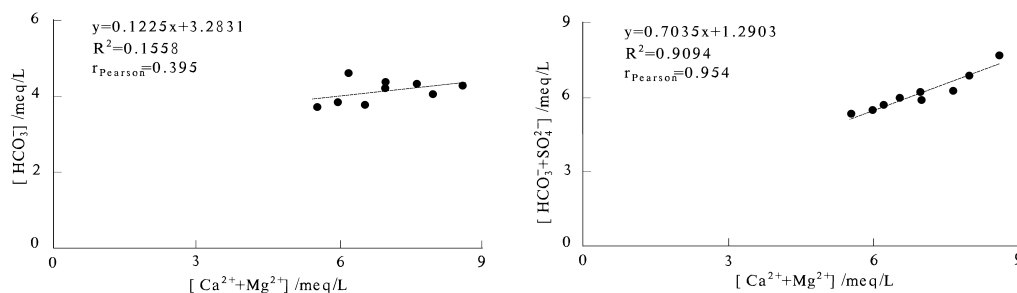


图3 主要离子当量浓度关系图。

3.4. Gibbs图

为了更为清楚直观的通过离子指标反映地下水的成因作用，吉布斯结合大气降水、岩石溶滤、及蒸发浓缩作用所控制的演化过程，提出了一种 $[Na^+]/[Na^++Ca^{2+}]$ 与TDS相关关系的水化学图—Gibbs图[28, 29]。绘制了绘制洪范池泉域水化学样品的Gibbs图（图6），可以看出：所有样品均分布在“岩石溶滤”作用的控制区间，表明岩石溶滤作用是控制洪范池泉域水化学特征的主要因素。

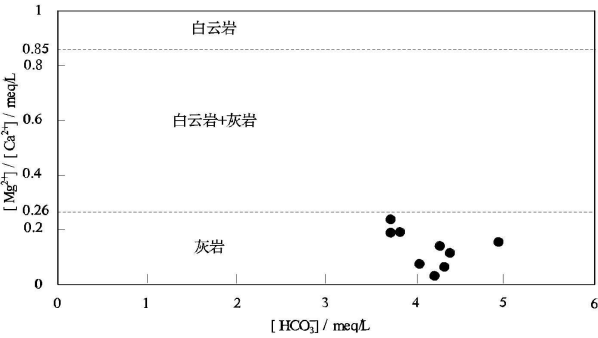


图4 研究区水样 $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ 与 $HCO_3^-$ 关系图。

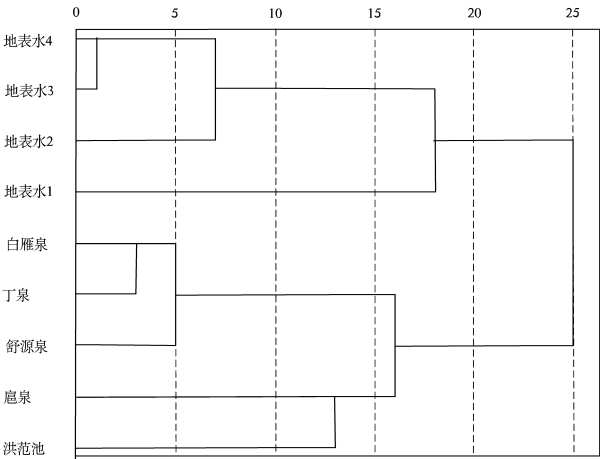


图5 水化学样品聚类分析树状图。

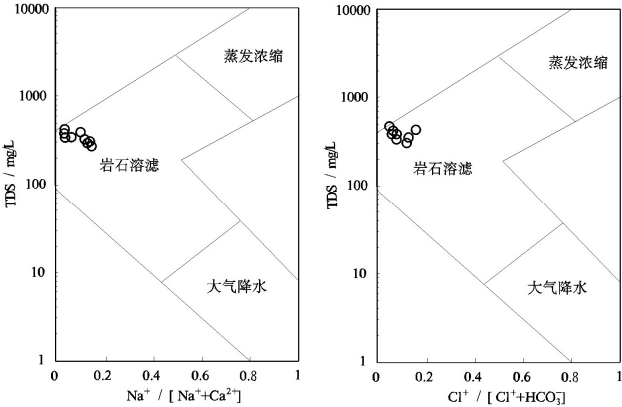


图6 研究区水化学Gibbs图。

3.5. 离子来源分析

本次研究，主要针洪范池泉域泉水及汇流水中的主要离子来源进行定量分析，而大气降水、岩石溶滤及人类活动通常是最重要的三个离子来源。为了量化大气输入，人为输入和岩石溶滤对洪范池全群不同泉水的相对贡献，本次研究使用以下的质量平衡方程：

$$X = X_{\text{大气}} + X_{\text{人类活动}} + X_{\text{蒸发岩}} + X_{\text{碳酸盐岩}} + X_{\text{硅酸盐岩}} \quad (1)$$

其中X代表了水中的目标化学离子，不同离子的质量守恒方程如下：

$$F^- = F^-_{\text{大气}} \quad (2)$$

$$K^+ = K^+_{\text{大气}} + K^+_{\text{硅酸盐}} \quad (3)$$

$$NO_3^- = NO_3^-_{\text{大气}} + NO_3^-_{\text{人类活动}} \quad (4)$$

$$Cl^- = Cl^-_{\text{大气}} + Cl^-_{\text{人类活动}} + Cl^-_{\text{蒸发岩}} \quad (5)$$

$$SO_4^{2-} = SO_4^{2-}_{\text{大气}} + SO_4^{2-}_{\text{人类活动}} + SO_4^{2-}_{\text{蒸发岩}} \quad (6)$$

$$Na^+ = Na^+_{\text{大气}} + Na^+_{\text{人类活动}} + Na^+_{\text{蒸发岩}} + Na^+_{\text{硅酸盐岩}} \quad (7)$$

$$Ca^{2+} = Ca^{2+}_{\text{大气}} + Ca^{2+}_{\text{蒸发岩}} + Ca^{2+}_{\text{碳酸盐岩}} + Ca^{2+}_{\text{硅酸盐岩}} \quad (8)$$

$$Mg^{2+} = Mg^{2+}_{\text{大气}} + Mg^{2+}_{\text{蒸发岩}} + Mg^{2+}_{\text{碳酸盐岩}} + Mg^{2+}_{\text{硅酸盐岩}} \quad (9)$$

有学者参照水中的 $Cl^-$ 来计算水中离子大气输入的贡献[25, 30, 31]，是基于在最初阶段的无外来因素影响条件下， $Cl^-$ 基本都源于大气沉降。然而，但是在洪范池泉域的水化学样品中， $Cl^-$ 的浓度较高，这很有可能是由于研究区的 $Cl^-$ 主要来自蒸发岩或受到了较为强烈的人类活动的影响，故而无法参照此类模式[32]。这这种情况下，大气降水中的 $F^-$ 可以被用于估算大气输入的贡献[32, 33]。本次参照同区域内的雨水中 $F^-$ 以及其他主要离子的测定值来计算大气输入对洪范池泉域中各离子的输入贡献，计算公式如下：

$$[X_{\text{大气}}] = [X_{\text{雨水}} / F^-_{\text{雨水}}] \times F^-_{\text{泉水}} \quad (10)$$

人类活动产生的不同类型的污染物，可能通过各种途径排放，在相关的中，人为输入可以被定义为不包括大气沉降的直接输入[33]。其次，人类活动产生不同类型的污染物可能富含 $Na^+$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$ 和 $NO_3^-$ 等，其中 $Na^+$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$ 同时又是岩石溶滤作用的产物，洪范池泉域主要地质特征是碳酸盐岩广泛发育，因此，可以选取基础地质背景不能产生的 $NO_3^-$ 作为反映人类活动的特征离子[24]。本次研究通过 $NO_3^-$ 来进一步量化人类活动对研究区水中主要地球化学离子的贡献。

由于缺乏蒸发岩端元数据，区分研究区基础地质背景和人类活动对研究区水化学离子的贡献比难以量化。在本次参照Li Jun等[32]研究中 $[SO_4^{2-}/Cl^-]$ 的毫克当量比值进行蒸发岩端元贡献的计算； $[Na^+/K^+]$ ， $[Mg^{2+}/K^+]$ 和 $[Ca^{2+}/Na^+]$ 的毫克当量比值则被引入用于硅酸盐岩端元贡献的计算；而特征离子 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 在除其他端元的贡献后，其余的均源于碳酸盐岩的风化。

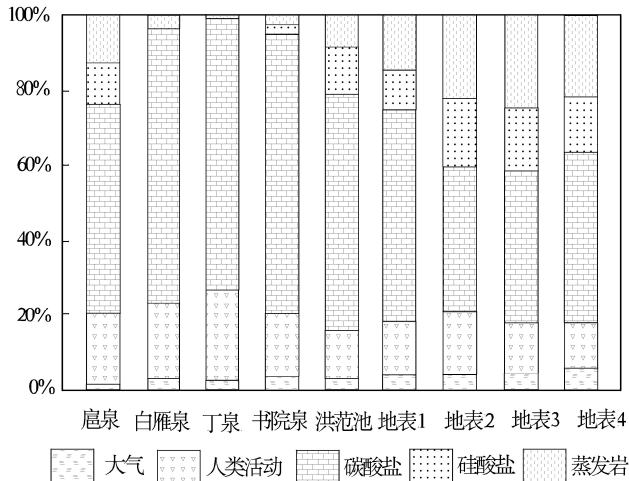


图7 洪范池泉域主要水化学离子的不同端元贡献。

计算结果显示,碳酸盐岩风化对研究区水化学离子来源起主导作用,在泉水中贡献率平均为69.72%,在地表水中贡献率平均为43.18%。泉水在流出地表后蒸发岩及硅酸盐岩溶解作用得到加强,平均贡献率分别从6.30%, 5.87%增加至19.27%, 13.90。端元贡献计算结果与聚类分析结果一致。

#### 4. 结论

通过对2015年3月份洪范池泉域主要泉水及泉水汇流后的地表水的进行了取样测试,分析了其主要水化学离子含量。采用多元统计分析, piper三线图,相关性分析、聚类分析和质量守恒推算等方法并对其物源机制进行了分析研究。本次研究表明,洪范池区域内的泉水主要为弱碱性的 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ -Ca型水,而泉水在流出后 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 含量升高,而 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、TDS含量降低。泉水的水环境化学特征主要受碳酸盐岩风化(62.91%~73.10%)和人类活动(12.79%~23.97%)的影响,蒸发岩溶解、硅酸盐风化及大气输入影响较小;而地表水水环境化学特征则同时受到了碳酸盐岩风化(36.03%~60.91%)、蒸发岩溶解(15.74%~22.00%)、硅酸盐风化(11.28%~16.81%)及人类活动(10.12%~15.70%)的影响,大气输入影响较小。

本次研究首次对洪范池泉域内水体主要离子物源机制进行了研究,为区域内泉水开发利用提供基础资料,并对其他地区相关研究提供了方法借鉴。由于本次研究基于2015年3月份洪范池泉域内的主要泉水及泉水汇流后的地表水水样分析测试结果,样品布设点位有限,时间跨度也较短,其代表性具有一定局限性,建议在该区域类似相关研究中,增加样品点的布设,并进行不同时间段的取样分析。

#### 致谢

本文依托于济南市国土资源局2014年地质环境类项目(JNHZ-GK-2014-020)的研究。

#### 参考文献

- [1] 孟庆斌,邢立亭,滕朝霞. 济南泉域“三水”转化与泉水恢复关系探讨[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38 (5): 82-87。
- [2] 邢立亭,武强,徐军祥,等. 地下水环境容量初探:以济南泉域为例[J]. 地质通报, 2009, 28 (1): 124-129。
- [3] XING LT, WU Q, YE C H, et al. Groundwater environmental capacity and its evaluation index [J]. Environmental Monitoring and Assessment. 2010, 169 (1-4): 217-227.
- [4] 张建芝,邢立亭. 回归分析法在地下水动态分析中的应用[J]. 地下水, 2010, 32 (4): 88-90。
- [5] 祁晓凡,杨丽芝,韩晔,等. 济南泉域地下水位动态及其对降水响应的交叉小波分析[J]. 地球科学进展, 2012, 27 (9): 969-978。
- [6] ZHOU J, XING L T, ZHANG F J, et al. Chemical characteristics research on karst water in Jian spring area [J]. Advanced Materials Research. 2015, 1092-1093: 593-596.
- [7] 何奔,贾超,刘新宇,等. 济南市区泉域地下水时空分布规律及污染物运移特性研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22 (5): 981-988。
- [8] 殷秀兰,王庆兵,凤蔚. 济南岩溶泉域泉群区水化学与环境同位素研究[J]. 地质学报, 2017, 91 (7): 1651-1660。
- [9] 孟庆晗,王鑫,邢立亭,等. 济南四大泉群补给来源差异性研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47 (1): 37-45。
- [10] 邢立亭,周娟,宋广增,等. 济南四大泉群泉水补给来源混合比讨论[J]. 地学前缘, 2018, 25 (2): 260-272。
- [11] 魏兴,周金龙,乃尉华,等. 新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律[J]. 环境科学, 2019, 40 (9): 4042-4051。
- [12] 沈扬,何江涛,王俊杰,等. 基于多元统计方法的地下水水化学特征分析:以沈阳市李官堡傍河水源为例[J]. 现代地质, 2013, 27 (2): 440-447。
- [13] 林永生,裴建国,杜毓超,等. 基于多元统计方法的岩溶地下水化学特征及影响因素分析[J]. 环境化学. 2016, 35 (11): 2394-2401。
- [14] 秦松柏,欧阳正平,程天舜. 分层聚类分析在水文地球化学分类中的应用[J]. 地下水, 2008, 30 (1): 21-24。
- [15] LI X. P, FENG L N. Multivariate and geostatistical analyzes of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China [J]. Atmospheric Environment. 2012, 47: 58-65.
- [16] 杨安,王艺涵,胡健,等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41 (2): 886-894。
- [17] 李笑,于爽,李亮,等. 石河河流域地下水化学特征及物质来源分析[J]. 环境科学, 2020, 41 (9): 4021-4029。

- [18] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2016, 37 (5): 1779-1787。
- [19] 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。
- [20] 刘江涛, 袁五, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, 39 (12): 5428-5439。
- [21] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 黄河三角洲浅层地下水水化学特征及形成作用 [J]. 环境科学. 2012, 33 (2): 370-378。
- [22] 孙英, 周金龙, 魏兴, 等. 巴楚县平原区地下水水化学特征及成因分析 [J]. 环境化学. 2019, 38 (11): 2601-2609。
- [23] 刘伟江, 袁祥美, 张雅, 等. 贵阳市岩溶地下水水化学特征及演化过程分析 [J]. 地质科技情报. 2018, 37 (6): 245-251。
- [24] LONG X, SUN Z Y, ZHOU A G, et al. Hydrogeochemical and Isotopic Evidence for Flow Paths of Karst Waters Collected in the Heshang Cave, Central China [J]. Journal of Earth Science. 2015, 26 (1): 149-156.
- [25] 李洲, 李晨曦, 华琨, 等. 黄土区洛川塬地下水水化学特征及影响因素分析 [J]. 环境科学. 2019, 40 (8): 3559-3567。
- [26] GALY A, FRANCELANORD C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. Chemical Geology. 1999, 159 (1-4): 31-60.
- [27] 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 等. 生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响[J]. 环境科学. 2019, 40 (8): 3799-3807。
- [28] GIBBS R J. Mechanisms Controlling World Water Chemistry [J]. Science. 1970, 170: 1088-1090.
- [29] GIBBS R J. Water chemistry of the Amazon River [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta. 1972, 36 (9): 1061-1066.
- [30] NOH H, HUH Y, QIN J H, et al. Chemical weathering in the Three Rivers region of Eastern Tibet [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009, 73 (7): 1857-1877.
- [31] RAI S K, SINGH S K, KRISHNASWAMI S. Chemical weathering in the plain and peninsular sub-basins of the Ganga: impact on major ion chemistry and elemental fluxes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2010, 74 (8): 2340-2355.
- [32] LI J, YUAN G L, DENG X R, et al. Major ion geochemistry of the Nansihu Lake basin rivers, North China: chemical weathering and anthropogenic load under intensive industrialization [J]. Environmental Earth Sciences. 2016, 75 (6): 453.
- [33] CHETELAT B, LIU C Q, ZHAO Z Q, et al. Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: Anthropogenic impacts and chemical weathering [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008, 72 (17): 4254-4277.