

水工环地质

基于主成分分析法的威海环翠区温泉汤地热水水化学特征

袁星芳, 闫少青*, 刘鹏, 沈傲迪, 游进元, 常宝坤, 柳岸汝

(山东省第六地质矿产勘查院, 山东 威海 264209)

摘要:为进一步分析温泉汤地热水化学特征及控制因素,选取 2000—2024 年共 25 年水样检测数据,运用主成分分析法进行了系统研究。结果表明:地热水中阳离子浓度均值关系为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 阴离子浓度均值关系为 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$, 水化学类型以 $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$ 型和 $\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+$ 型为主,未发生显著变化;可提取 4 个主成分,累积方差贡献率达 82.328%,综合代表了长时间、远距离、深循环的水—岩相互作用对地热水的影响,符合实际情况,研究结果可为温泉汤地热资源可持续开发利用提供科学依据。

关键词:温泉汤; 主成分分析法; 水化学特征; 胶东半岛

中图分类号:P314.1; P59

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.10.005

0 引言

胶东半岛是山东省内天然温泉出露最密集的地区, 目前发现水温超过 49℃ 的温泉有 14 处^[1], 了解区内温泉的水化学特征及变化趋势, 对更好地利用胶东地热资源至关重要。目前, 进行水化学特征分析的方法比较多, 离子相关性分析可以用于判别地热水的同源性, Gibbs 模型可以用来分析地热水的主控因素, 离子比例系数和主成分分析法可进一步确定离子的主要来源^[2-9]。

主成分分析法是在不丢失原始数据的基础上, 将多个变量进行简化, 获得少数几个主要因素来反映大部分信息的方法^[10], 该方法避免人为主观对地热水水质评价的影响, 使得分析更加客观^[11]。因此, 主成分分析法在水化学特征研究中应用日益增多。陈焕雄等^[12]应用主成分分析法分析了豫北平原浅层地下水水化学特征, 刚什婷等^[13]利用主成分分析法研究了青岛市崂山区水化学特征, 郭高轩等^[14]利用主成分分析法系统分析了北京西山岩溶地下水化学组成的来源及控制因素, 刘元晴等^[15]利

用主成分分析法分析了河北省顺平县地下水体的离子组成关系和影响控制因素, 秦怡等^[16]利用主成分分析法提取了枣庄市南部地下水化学组分变化的主要影响因素, 并且分析了不同影响因素的控制程度, 赵艳丽等^[2]利用主成分分析法进一步确定了山东省淄河流域地下水中离子的主要来源。

本文以胶东典型温泉—温泉汤为研究对象, 选取 2000—2024 年共 25 年间水样检测数据, 运用主成分分析法, 对温泉汤地热水进行了系统分析, 探讨了温泉汤地热水化学特征和主要控制因素, 为温泉汤地热资源的合理开发和有效利用提供科学支撑。

1 研究区概况

研究区位于威海市环翠区温泉镇, 面积 43 km²。区内为丘陵地貌, 属北温带季风型大陆性气候, 多年平均降水量 711.3 mm, 平均气温 15℃^[17]。境内主要河流为五渚河, 分东、西 2 条支流, 东支流自东南向西北流, 西支流自西向东流, 自西南向东北汇入崮山水库, 因下游蓄水拦截, 河流常年有水。

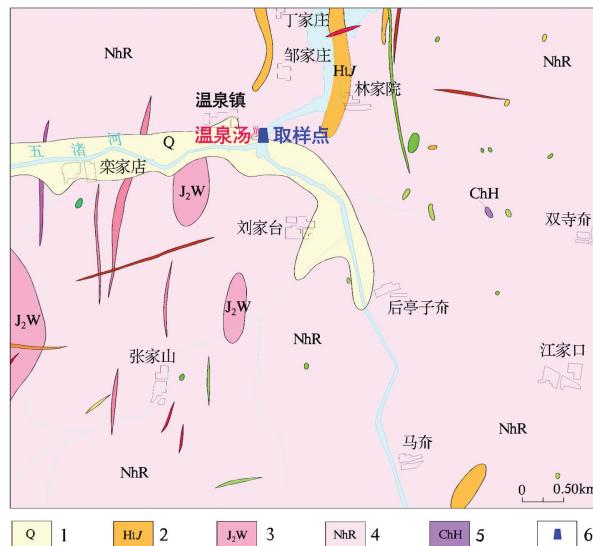
收稿日期:2025-04-03; 修订日期:2025-04-25; 编辑:陶卫卫

基金项目:山东省地质勘查项目, 山东省自然资源厅“威海市温泉汤地热田地热资源调查评价”, 项目编号:鲁勘字〔2024〕81 号

作者简介:袁星芳(1990—), 女, 山西大同人, 高级工程师, 主要从事水工环地质工作; E-mail:lywhyx@163.com

* 通信作者:闫少青(1989—), 女, 山东威海人, 工程师, 主要从事水工环地质工作; E-mail:1396590274@qq.com

研究区地层出露比较简单,分布面积较小,从老至新依次为古元古代荆山群、新生代第四系,古元古代荆山群零星分布在研究区北部和南部,新生代第四系主要沿五渚河两侧发育。岩浆岩广泛发育,从老到新依次为中元古代海阳所序列、新元古代荣成序列、中生代文登序列;中元古代海阳所序列在研究区东部极小面积出露,新元古代荣成序列在研究区内广泛分布,中生代文登序列在研究区西侧零星发育(图 1)^[18]。



1—新生代第四系;2—古元古界荆山群;3—中生代文登序列;4—新元古代荣成序列;5—中元古代海阳所序列;6—采样点位置。

图 1 研究区地质略图

2 研究方法

2.1 样品采集与测试

本研究选取温泉汤 2000—2024 年共 25 年的长序列水样检测数据作为研究对象,每年水样检测分析均由山东省第六地质矿产勘查院实验室完成,测试内容包括 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、总硬度、pH、总碱度、游离 CO₂、TDS、H₂SiO₃、F⁻ 等指标。采样点位置见图 1。运用 AquaChem 软件绘制 Piper 三线图识别地热水类型^[19-25],采用主成分分析法讨论研究区地热水的主要影响因素。

2.2 主成分分析法

主成分分析法(PCA)在多个变量分析中应用比较成熟、也比较广泛,在 1901 年由美国统计学家 Pearson 引入到生物学理论研究中^[26]。

2.2.1 基本原理

PCA 利用降维处理方法,即将原来多个变量重新组合成一组新的相互无关的几个综合变量,且这几个综合变量应尽可能多地反映原来变量的信息。一般情况,使用主成分分析法进行统计分析前需进行适用性检验,常用的检验方法有 KMO 检验和 Bartlett 检验^[26-29]。

(1) KMO 检验。侧重于比较简单相关系数和偏相关系数的相对大小,原始变量之间的简单相关系数的平方和大于偏相关系数的平方和,则原始变量之间的偏相关系数越小,KMO 值越接近 1,那么原始变量数据越适宜做主成分分析。一般情况,KMO 值为 0~1(表 1)。

表 1 KMO 值的度量标准

KMO 值	适用性程度
[1, 0.9]	非常好
(0.9, 0.8]	好
(0.8, 0.7]	一般
(0.7, 0.6]	适合
(0.6, 0.5]	基本适合
(0.5, 0]	不适合

(2) Bartlett 检验。Bartlett 检验的假设条件为相关矩阵是单位矩阵,原始变量数据之间不存在相关性,如果其相伴概率(sig.)小于显著性水平(通常为 0.05),则原始变量数据适合做主成分分析。

2.2.2 基本步骤

(1) 建立原始数据矩阵

假设有 m 个样本,每个样本有 p 个变量,构成一个 $m \times p$ 的数据矩阵 X ,见公式(1):

$$X = (x_{ij})_{m \times p} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 个样本中第 j 个变量的数值。

(2) 标准化原始数据

用于消除原始数据不同量纲、不同数量级带来的影响,得到标准化矩阵,见公式(2):

$$X_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, p) \quad (2)$$

式中: X_{ij} 表示第 i 个样本中第 j 个变量的数值; \bar{X}_j 表示第 j 个变量的平均数; S_j 表示第 j 个变量的标准差。

(3) 建立协方差矩阵

根据标准化数据建立协方差矩阵 R ,它是反映标准化后数据之间相关关系,值越大,说明越适宜进行主成分分析。其中, $R_{ij} \quad (i, j=1, 2, \dots, p)$ 为原

始变量 x_i 与 x_j 的相关系数, R 为实对称矩阵(即 $R_{ij} = R_{ji}$), 因此, 只需要计算上三角或者下三角元素即可, 见公式(3)。

$$R_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_i)(X_{ij} - \bar{X}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}} \quad (3)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 个样本中第 j 个变量的数值; \bar{x}_i 表示原始变量数值; x_j 表示原始变量数值。

(4) 求解协方差矩阵

根据特征方程 $|\lambda E - R| = 0$, 求特征值 λ_j ($j = 1, 2, \dots, p$)。因 R 为正定矩阵, 所以其特征值 λ_j 均为正数, 将其按大小排序, 即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ 。特征值是各主成分的方差, 它的大小反映各主成分的影响力。

主成分贡献率 W_i 的计算见公式(4), 主成分累计贡献率的计算见公式(5):

$$W_i = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m W_i = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \quad (5)$$

式中: W_i 为主成分的贡献率; λ_j 为特征方向的特征值。

根据选取主成分个数的原则, 一般要求特征值大于 1 且累计方差贡献率超过 80% 特征值 $\lambda_1, \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ 所对应的 $1, 2, \dots, n$ ($n \leq p$), 其中整数 n 为主成分个数。

3 结果与讨论

3.1 水化学类型

Piper 三线图是水化学分析中应用比较广泛的图示工具, 可用于分析研究水化学主要成分的组成特征^[2,30]。温泉汤 25 年监测数据显示, 在阳离子三线图中, 所有年份样点均落在 D 区; 在阴离子三线图中, 大部分年份样品均落在 G 区, 仅 2015 年和 2017 年落在 B 区, 说明温泉汤地热水中的离子以 Na^+ 和 Cl^- 为主, 其次为 HCO_3^- 。大部分年份的地热水化学类型为 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型, 少部分年份的地热水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}$ 型, 仅 2017 年地热水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型。整体来说, 温泉汤 25 年间地热水的化学组分变化不大, 水质未发生明显改变(图 2)。

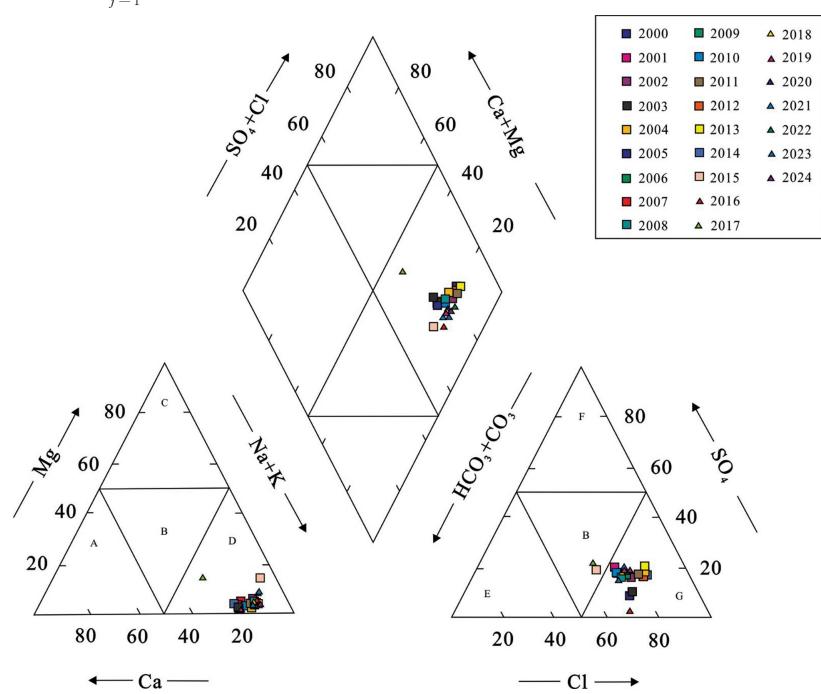


图 2 Piper 三线图

3.2 水化学特征

对研究区 25 年水样检测数据进行统计分析可知(表 2),温泉汤地热水中主要离子的变异系数为 $0.05 \sim 0.71$,说明地热水的化学组分变化不大。地热水中阳离子以 Na^+ 为主,浓度均值关系为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$,阴离子以 Cl^- 为主,浓度均值关系为 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。 pH 是反映水文地球化学平衡信息的重要因子^[13],25 年检测结果显示, pH 的变异系数最小,为 0.05,变化范围为 $6.70 \sim 8.30$,说明研究区地热水 pH 变化不大,基本呈中性至弱碱性。 Mg^{2+} 含量与地热水深循环径流过程中水—岩相互作用密切相关,25 年检测结果显示, Mg^{2+} 的变异系数最大,为 0.71,变化范围为 $0.94 \sim 25.78 \text{ mg/L}$,说明地热水在形成过程中与周边围岩发生水—岩相互作用程度不同,推测可能与区域地质背景或地热水运移途径等有关。

表 2 温泉汤 25 年水样统计结果 单位:mg/L

变量	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数
K^+	22.09	34.10	13.93	5.33	0.24
Na^+	296.43	368.65	158.46	60.10	0.20
Ca^{2+}	47.58	67.33	17.17	11.93	0.25
Mg^{2+}	8.27	25.78	0.94	5.84	0.71
HCO_3^-	236.02	313.73	143.69	40.83	0.17
Cl^-	349.84	465.56	191.35	84.15	0.24
SO_4^{2-}	126.67	196.00	18.46	39.24	0.31
总硬度	151.90	252.23	98.77	27.66	0.18
pH	7.50	8.30	6.70	0.37	0.05
总碱度	194.63	257.28	136.37	32.55	0.17
游离 CO_2	4.46	14.24	0.00	3.11	0.70
TDS	1037.77	1307.88	700.61	180.56	0.17
H_2SiO_3	93.10	119.60	57.20	19.25	0.21
F^-	3.25	6.88	1.60	1.51	0.47

3.3 主成分分析

本次选取地热水中的主要组分(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、总硬度、 pH 、总碱度、游离 CO_2 、TDS)和特征组分(F^- 、 H_2SiO_3)共 14 项指标进行主成分分析。采用 SPSS 软件进行数据处理,得出地热水化学成分间的相关系数矩阵(表 3)和 KMO、Bartlett 检验结果(表 4)。KMO、Bartlett 检验结果显示:KMO 取样适切性量数为 0.529,大于 0.5;Bartlett 球形度检验显著性为 0,小于 0.05,符合主成分的检验要求,说明本次数据适合用主成分分析法(PCA)进行统计分析^[14]。

主成分分析法(PCA)结果显示,以特征值大于

1 为提取原则,本研究可以提取 4 个主成分,累积方差贡献率达 82.328%,大于 80%(表 5),可解释总体指标数据表征的绝大部分信息。其中,F1 的贡献率为 35.953%,主要由 TDS、 Cl^- 、 H_2SiO_3 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 组成;F2 的贡献率为 21.631%,主要由 HCO_3^- 、总碱度、 Mg^{2+} 组成;F3 的贡献率为 14.291%,主要由总硬度、游离 CO_2 、 Ca^{2+} 组成;F4 的贡献率为 10.452%,主要由 SO_4^{2-} 组成。

F1 主要由 TDS、 Cl^- 、 H_2SiO_3 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 组成,其中,TDS 在自然界中广泛分布, Cl^- 是地下水中最稳定的阴离子,主要来源于含氯化物的岩浆岩溶解、海水补给或深层地下水补给;TDS 远小于海水组分,且离海较远,因此排除海水补给;另外,区内大面积出露新元古代荣成序列花岗质片麻岩,氯化物浓度不高,因此排除含氯化物的岩浆岩溶解,推测为深层地下水补给。 Na^+ 、 K^+ 主要来源于钠盐、钾盐或含钠、含钾矿物的溶解,区内围岩以花岗质片麻岩为主,矿物成分包括钾长石、钠长石、石英等,因此推测 Na^+ 、 K^+ 主要来源于围岩中含钠、钾矿物的溶解。 H_2SiO_3 为地热水的典型特征离子,主要是因为地热水在形成过程中,经历了长时间、远距离、深循环的径流过程,与周边围岩发生水—岩相互作用,且地热水温度越高,硅酸盐的溶解度越大。 SO_4^{2-} 主要来源于围岩中硫酸盐的溶解。总之,主成分 F1 代表长时间、远距离、深循环的水—岩相互作用对地热水的影响。

F2 主要由 HCO_3^- 、总碱度、 Mg^{2+} 组成。其中,地热水中的 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐类岩石的溶解和铝硅酸盐溶解,由表 5 可知,主成分 F2 中总碱度贡献率较高,因此, HCO_3^- 主要来源于碳酸盐类岩石的溶解。 Mg^{2+} 主要来源于含镁碳酸盐类岩石的溶解和含镁矿物的溶解,而 HCO_3^- 的贡献率较高,因此, Mg^{2+} 主要来源于含镁碳酸盐类岩石的溶解。总之,主成分 F2 代表围岩中碳酸盐的水—岩相互作用对地热水的影响。

F3 主要由总硬度、游离 CO_2 、 Ca^{2+} 组成。 Ca^{2+} 主要来源于含钙碳酸盐类岩石的溶解和围岩中含钙矿物的溶解,由表 5 可知,游离 CO_2 的贡献率较高,因此, Ca^{2+} 主要来源于含钙碳酸盐类岩石的溶解。总之,主成分 F3 代表围岩中碳酸盐的水—岩相互作用对地热水的影响。

F4 主要由 SO_4^{2-} 组成。 SO_4^{2-} 主要来源于围岩

表3 温泉汤水样参数相关性分析

项目	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	总硬度	pH	总碱度	游离 CO ₂	TDS	H ₂ SiO ₃	F ⁻
K ⁺	1													
Na ⁺	0.706	1												
Ca ²⁺	0.104	0.149	1											
Mg ²⁺	0.063	-0.197	-0.491	1										
HCO ₃ ⁻	0.080	0.162	-0.371	0.594	1									
Cl ⁻	0.715	0.913	0.351	-0.365	-0.050	1								
SO ₄ ²⁻	0.441	0.505	0.349	0.053	-0.160	0.379	1							
总硬度	0.143	-0.036	0.679	0.291	0.066	0.050	0.420	1						
pH	-0.421	-0.284	-0.395	0.171	0.003	-0.427	-0.114	-0.264	1					
总碱度	0.058	0.160	-0.443	0.612	0.971	-0.066	-0.165	0.003	0.107	1				
游离 CO ₂	0.042	-0.031	0.254	-0.043	0.205	0.051	-0.223	0.269	-0.436	0.159	1			
TDS	0.784	0.950	0.327	-0.154	0.085	0.938	0.601	0.201	-0.405	0.063	0.051	1		
H ₂ SiO ₃	0.628	0.721	0.388	-0.276	-0.230	0.673	0.664	0.163	-0.341	-0.220	0.035	0.742	1	
F ⁻	-0.220	0.141	0.160	-0.440	-0.369	0.033	0.280	-0.188	0.217	-0.299	-0.259	-0.002	0.479	1

表4 KMO 和 Bartlet 检验结果

KMO 取样 适切性量数	Bartlet 球形度检验		
	近似卡方	自由度	显著性
0.529	423.522	91	0.000

表5 主成分矩阵和方差贡献率

变量	F1	F2	F3	F4
K ⁺	0.754	0.381	0.085	0.060
Na ⁺	0.855	0.290	0.354	-0.125
Ca ²⁺	0.536	-0.394	-0.624	0.150
Mg ²⁺	-0.344	0.710	-0.024	0.495
HCO ₃ ⁻	-0.178	0.901	0.043	0.005
Cl ⁻	0.896	0.131	0.136	-0.274
SO ₄ ²⁻	0.666	-0.037	0.091	0.641
总硬度	0.273	0.139	-0.723	0.583
pH	-0.509	-0.129	0.517	0.362
总碱度	-0.209	0.884	0.142	0.030
游离 CO ₂	0.076	0.233	-0.660	-0.399
TDS	0.931	0.285	0.122	-0.033
H ₂ SiO ₃	0.875	-0.115	0.152	0.130
F ⁻	0.192	-0.587	0.406	0.208
特征值	5.033	3.028	2.001	1.463
方差/%	35.953	21.631	14.291	10.452
方差贡献率/%	35.953	57.585	71.876	82.328

注:黑色加粗字体表示指标在因子上的最高荷载值。

中硫酸盐的溶解,因此,主成分 F4 代表围岩中硫酸盐的水—岩相互作用对地热水的影响。

4 结论

(1)水化学类型:温泉汤 25 年间水化学类型以 Cl⁻—Na⁺型为主,其次为 Cl⁻—HCO₃⁻—Na⁺型,水化学类型未发生显著变化。

(2)水化学特征:温泉汤 25 年间水中主要离子

的变异系数为 0.05~0.71,说明地热水的化学组分变化不大。

(3)主成分分析:温泉汤 25 年间水化学组分影响因素可提取 4 个主成分,累积方差贡献率达 82.328%,F1 的贡献率为 35.953%,主要由 TDS、Cl⁻、H₂SiO₃、Na⁺、K⁺、SO₄²⁻ 组成,代表长时间、远距离、深循环的水—岩相互作用对地热水的影响;F2 的贡献率为 21.631%,主要由 HCO₃⁻、总碱度、Mg²⁺ 组成,代表围岩中碳酸盐的水—岩相互作用对地热水的影响;F3 的贡献率为 14.291%,主要由总硬度、游离 CO₂、Ca²⁺ 组成,代表围岩中碳酸盐的水—岩相互作用对地热水的影响;F4 的贡献率为 10.452%,主要由 SO₄²⁻ 组成,代表围岩中硫酸盐的水—岩相互作用对地热水的影响。

参考文献:

- [1] 金秉福,张云吉,栾光忠.胶东半岛温泉的地热特征[J].水文地质工程地质,2000(5):31~37.
- [2] 赵艳丽,王敏,李常锁.山东省淄河流域地下水化学污染源解析[J].人民长江,2022,53(12):37~49.
- [3] 高志友,李大鹏,颜梅,等.基于水文地球化学特征的黄河流域(济阳段)地热水成因机制研究[J].山东国土资源,2023,39(3):65~71.
- [4] 刘小平,赵有美,张金鑫,等.沂沐断裂带地热资源特征及成因分析[J].山东国土资源,2023,39(6):1~7.
- [5] 马龙,贾琛,张晔,等.菏泽地区鄄城地热田地热水化学特征及成因研究[J].山东国土资源,2024,40(3):101~108.
- [6] 王琪,秦宇,尹俊凯,等.鲁北平原阳信地区地热田地热地质特征及地热流体化学特征[J].山东国土资源,2024,40(6):1~10.
- [7] 薄本玉,王韶霞,马鹏飞,等.基于水化学的沂源盆地地热太难成热模式探讨[J].山东国土资源,2022,38(7):31~37.

- [8] 崔庆岗.泰安市桥沟地热田水文地球化学特征及其成因分析[J].山东国土资源,2021,37(6):39-47.
- [9] 袁星芳,邢立亭,贾群龙,等.威海市七里汤地热田特征及其成因机制[J].西北地质,2023,56(6):209-218.
- [10] 续常胜,唐书平,黄继超,等.黄河下游河南段浅层地下水质量评价及污染分析[J].地下水,2009,31(3):97-101.
- [11] 曹文军,张四濛,薛伟锋,等.基于主成分分析法的新乡市地下水水质评价[J].地下水,2021,43(2):37-40.
- [12] 陈焕雄,郭林,李静,等.基于主成分分析的豫北平原浅层地下水化学特征[J].地球与环境,2024,52(3):386-396.
- [13] 刚什婷,吕明荟,卢茜茜,等.基于多变量统计分析和水化学特征的海水入侵特征研究[J].中国岩溶,2023,42(5):982-994.
- [14] 郭高轩,代垠东,许亮,等.北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析[J].环境科学,2024,45(2):802-812.
- [15] 刘元晴,周乐,吕琳,等.河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析[J].环境科学,2023,44(5):2601-2612.
- [16] 秦怡,唐小惠,李艳龙,等.枣庄市南部地下水水化学特征及其主要控制因素[J].安全与环境工程,2022,29(6):132-155.
- [17] 威海市统计局和国家统计局威海调查队.威海市统计年鉴[M].2024.
- [18] 山东省地矿局.中华人民共和国威海、羊亭等九幅1:5万区域地质调查报告[R].1995.
- [19] 陈其峰,李营,张帆,等.张渤断裂带山东东部地热水地球化学特征分析[J].地震,2024,44(3):21-37.
- [20] 邹鹏飞,邱杨,范迪富.苏北盆地典型地区中低温地热流体地球化学特征研究[J].高校地质学报,2022,28(2):262-273.
- [21] 袁星芳,王敬,霍光,等.胶东半岛洪水炭汤温泉水化学特征与成因分析[J].地质与勘探,2020,56(2):427-437.
- [22] 周艺颖,欧阳正平,徐子东,等.琼西南九所地热田水文地球化学特征及成因[J].地质科技通报,2025,44(1):216-228.
- [23] 刘春雷,李亚松,洪炳义,等.福建盐田海水补给型地热系统地球化学特征及其成因[J].水文地质工程地质,2023,50(1):158-167.
- [24] 原若溪,王贵玲,刘峰,等.冀东北地区中低温对流型地热系统的氟指示意义研究[J].地质论评,2021,67(1):218-230.
- [25] 袁星芳,杨明爽,王晓翠,等.山东省威海市呼雷汤地热水化学、成因与开发潜力研究[J].地质通报,2024,43(1):143-152.
- [26] 马世骏,王如松.社会-经济-自然符合生态系统[J].生态学报,1984,4(1):1-9.
- [27] GULGUNDI M S, SHETY A. Groundwater quality assessment of urban Bengaluru using multivariate statistical techniques[J]. Applied Water Science, 2018, 8(1): 43.
- [28] KAISER H F, RICE J, LITTLE J. Mark IV[J]. Educational and Psychological Measurement, 1974, 34(1): 111-117.
- [29] 朱蕾.基于主成分分析法的扬州市生态环境质量评价[D].扬州:扬州大学,2013.
- [30] PIPRE A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water - analyses[J]. Neurochemistry International, 1984, 6(1): 27-39.

Hydrochemical Characteristics of Geothermal Water in Wenquantang in Huancui District of Weihai City Based on Principal Component Analysis

YUAN Xingfang, YAN Shaoqing, LIU Peng, SHEN Aodi, YOU Jinyuan, CHANG Baokun, LIU Anru
(No.6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Weihai 264209, China)

Abstract: In order to further analyze hydrochemical characteristics and controlling factors of Wenquantang, choosing 25 years of water sample testing data from 2000 to 2024, by using principal component analysis method, a systematic study has been carried out. It is showed that mean value of cation concentration in geothermal water is $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, mean value of anion concentration is $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$, and the water chemistry type is dominated by Cl-Na type and Cl·HCO₃-Na type without significant changes. Four principal components can be extracted. The cumulative variance contribution is 82.328%, which comprehensively represents the influence of water-rock interaction on geothermal water over a long period of time, long distance and deep circulation. It is in line with actual situation. The study results can provide scientific basis for sustainable development and utilization of Wenquantang.

Key words: Wenquantang; principal component analysis method; hydrochemical characteristics; Jiadong Peninsula