

地热流体水化学特征与地质构造关系的 Q-型聚类分析

于彦, 刘杰, 康楠, 林激, 高宝珠
(天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘要: 以天津地区大量的地热流体水化学数据为研究对象, 利用 Q-型聚类分析法, 以构造单元及热储层为分类依据, 将研究区分为 17 个亚类进行逐级聚类。结果表明: 地热流体的水化学特征与地质构造单元、热储层特征有着较好的相关关系, 与传统地球化学研究方法的结论一致。而且该方法具有客观、高效、直观的特点, 所以对水质数据积累较多的地区, 利用聚类分析法研究地下水的地球化学特征具有很好的应用前景。

关键词: 热储层; 地热流体; 水化学; Q-型聚类分析; 天津地区

中图分类号: P314

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2013)03-0131-05

聚类分析是一种考虑了多因素的数学分类方法, 其基本原理是根据样本自身的属性, 用数学方法按照某些相似性指标, 定量地确定样本之间的亲疏关系, 并按这种亲疏关系程度对样本进行聚类^[1]。相比于传统的水化学分析方法, 聚类分析考虑水化学成分更加全面, 分析更加合理, 在一定程度上反映出水的补给来源、水力联系及其与周围环境相互的特征^[2]。所以, 作为一种十分有效和便捷的统计方法, 聚类分析已被学者们广泛地应用于水化学研究中, 用于大量数据的分析以帮助寻找元素间的内在联系^[3]。

1 资料来源与研究方法

1.1 研究区概况

天津市丰富的中低温地热资源主要赋存于孔隙型热储层和基岩裂隙型热储层两大地热流体系统中。自 20 世纪 30 年代至今, 已成功开发了 5 个热储层, 自上而下分别为: 新近系明化镇组(Nm)和馆陶组(Ng)孔隙型热储层, 古生界奥陶系(O)和寒武系(ε)、中元古界蓟县系雾迷山组(Jxw)基岩裂隙型热储层。在构造上分属于冀中坳陷、沧县隆起和黄骅坳陷三个Ⅲ级构造单元。目前地热井的成井深度一般在 1000~3500m 之间, 受区域地质构造及地层空间分布的控制: 馆陶组地热井主要位于坳陷区, 基岩地热井主要位于沧县隆起区, 明化镇组地热井则普遍分布。地热流体的溶解性总固体在水平方向上自北东向南西、在垂直方向自上而下逐渐增

高, 由 500mg/L 左右逐渐增加至 6000mg/L 左右; 水质类型渐趋复杂, 由 HCO_3-Na 型逐渐向 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{Na}$ 过渡^[4]。

1.2 数据来源

由于寒武系地热井仅数眼, 而有关技术规范指出, 研究不同产地样本的某种统计规律, 其样本数量至少 10 个, 才能保证分析结果具有统计学意义^[5]。所以本次只对 Nm、Ng、O、Jxw 等 4 个热储层进行聚类分析。此次未收集到王草庄凸起、宁河凸起区的地热井水质数据, 仅对武清凹陷、潘庄凸起等 8 个Ⅳ级构造单元的水质进行研究。共取得水质分析报告 108 份(图 1), 其中 Nm 井 19 份、Ng 井 33 份、O 井 14 份、Jxw 井 42 份。

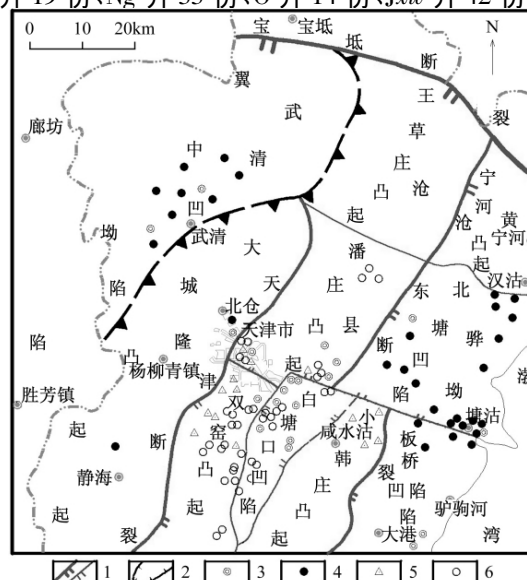


图 1 地热井取样水质点分布图

Fig. 1 Distribution of the sampling geothermal wells

1—断裂; 2—古近系地热井; 3—明化镇组地热井;

4—馆陶组地热井; 5—奥陶系地热井; 6—雾迷山组地热井

收稿日期: 2012-06-19; 修订日期: 2012-10-10

作者简介: 于彦(1980-), 女, 工程师, 研究方向为地热地质及数值模拟。

E-mail: yuyan0034@126.com

此次收集的水质分析报告检测项目有 36 项。运用 SPSS13.0 对其中的 30 项指标(另 6 项指标检测值信息量极低,忽略不计)进行统计分析,结果(表 1)显示:天津地热流体中的 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SiO_2 、 F^- 、总碱度、温度、pH 值的变异系数小于 35%,说明这些含量(或指标)的空间变异性较小,其值相对稳定; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 CO_3^{2-} 、 Mn 、 Br^- 、 NO_3^{2-} 、 NO_3^{3-} 、 I^- 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、硬度、酸度变异系数大于 100%,反映了其含量存在着较强的空间变异性;其余离子的变异系数介于 35%~100% 之间,显示出中等变异性^[6]。

表 1 天津地热流体水化学参数描述统计特征值

Table 1 The characteristic values of hydrochemical compositions of geothermal fluids in Tianjin

指标	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数(%)
K^+ (mg/L)	1.0	99.8	37.89	33.29	87.86
Na^+ (mg/L)	203.4	1572.5	505.1	172.49	34.15
Ca^{2+} (mg/L)	2.0	531.1	54.13	112.77	208.32
Mg^{2+} (mg/L)	0.0	98.6	12.20	20.65	169.24
NH_4^+ (mg/L)	0.0	2.23	0.69	0.49	70.39
Zn^{2+} (mg/L)	0.0	0.51	0.03	0.06	220.58
Cl^- (mg/L)	3.9	2268.8	404.10	256.84	63.56
SO_4^{2-} (mg/L)	1.6	2137.0	369.0	453.20	122.82
HCO_3^- (mg/L)	115.9	688.0	450.35	116.41	25.85
F^- (mg/L)	1.43	12.4	8.13	2.63	32.32
SiO_2 (mg/L)	22.8	75.0	47.99	14.84	30.93
溶解性总固体 (mg/L)	771.6	6013.0	1880.82	845.81	44.97
固形物(TDS) (mg/L)	536.6	5916.9	1633.29	864.81	52.95
Fe^{2+} (mg/L)	0.0	12.8	0.28	1.29	459.72
Fe^{3+} (mg/L)	0.0	2.4	0.18	0.35	201.37
Mn (mg/L)	0.0	0.16	0.01	0.02	222.38
NO_3^{2-} (mg/L)	0.0	0.48	0.01	0.06	536.70
NO_3^{3-} (mg/L)	0.0	3.83	0.46	0.76	164.57
Br^- (mg/L)	0.0	9.0	1.41	2.08	147.37
I^- (mg/L)	0.0	1.8	0.17	0.36	205.84
CO_3^{2-} (mg/L)	0.0	24.0	1.73	4.85	279.87
总碱度 (mg/L)	155.1	560.5	373.66	91.29	24.43
总硬度 (mg/L)	6.5	1651.5	118.06	237.51	201.18
暂时硬度 (mg/L)	6.5	204.7	84.52	56.95	67.38
负硬度 (mg/L)	0.0	547.0	312.89	123.41	39.44
总酸度 (mg/L)	0.0	25.0	6.31	7.2	114.12
S^{2-} (mg/L)	0.02	27.52	0.49	2.62	532.96
游离 CO_2 (mg/L)	2.2	22.0	8.64	4.01	46.46
温度 (°C)	40.0	97.0	69.63	15.62	22.43
pH	7.0	9.0	8.06	0.46	5.73

1.3 系统聚类分析

根据分类对象的不同,可分为 Q-型聚类(对样品分类)和 R-型聚类(对指标分类)。本次研究以不同热

储层在各构造单元的水质样品为聚类对象,建立变量之间的近似程度,所以选择 Q-型聚类分析方法。

1.4 主成分分析

在保证信息损失量最小的前提下,本文对高维变量空间进行降维处理,即进行主成分分析,分析过程借助 SPSS13.0 完成。由表 2 可知,前 9 个主成分的特征值均大于 1,累计贡献率为 78.79%。考虑到第 10~12 主成分的特征值接近于 1,而且前 12 个主成分可以代表原始因子 87.06% 的信息,大大减少了信息的损失量。因此提取前 12 项主成分的特征值,替代原始 36 项指标计算各指标因子在主成分中的载荷(表 3)。

表 2 主成分特征值、贡献率及累计贡献率

Table 2 The principal component value, contribution rate and cumulative contribution rate

主成分	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	7.687	25.622	25.622
2	4.976	16.586	42.208
3	2.352	7.841	50.049
4	2.067	6.889	56.938
5	1.805	6.017	62.955
6	1.353	4.509	67.463
7	1.224	4.080	71.543
8	1.131	3.771	75.314
9	1.043	3.476	78.790
10	0.892	2.973	81.763
11	0.855	2.851	84.613
12	0.735	2.448	87.062
13	0.548	1.826	88.887
14	0.525	1.749	90.637
15	0.453	1.509	92.146
16	0.411	1.371	93.517
17	0.343	1.142	94.658
18	0.319	1.064	95.722
19	0.285	0.950	96.672
20	0.250	0.835	97.507
21	0.199	0.662	98.169
22	0.174	0.580	98.748
23	0.151	0.503	99.251
24	0.097	0.324	99.575
25	0.060	0.201	99.776
26	0.038	0.127	99.903
27	0.023	0.076	99.979
28	0.004	0.013	99.991
29	0.002	0.008	99.999
30	0.000	0.001	100.000

根据表 3 中各指标因子的载荷,选取 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 F^- 、 SiO_2 、溶解性总固体、固形物、pH、总硬度、总碱度、温度等 16 项指标作为天津地热流体的主成分,并将其作为 Q-型聚类分析的指标。

表 3 指标在主成分中的载荷表
Table 3 The index' load in the principal components

指标	主成分											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	-0.191	0.378	0.259	0.256	0.377	0.227	-0.066	0.169	0.397	0.111	-0.274	0.173
总硬度(mg/L)	-0.202	0.369	0.384	0.220	-0.353	0.303	0.080	-0.315	-0.193	-0.158	0.173	0.173
总碱度(mg/L)	0.234	-0.159	-0.330	0.134	0.217	-0.307	0.388	0.395	-0.044	0.330	0.173	-0.373
pH	-0.528	0.188	0.497	-0.205	-0.217	-0.098	-0.136	0.130	0.046	-0.130	-0.158	0.201
暂时硬度(mg/L)	0.329	-0.586	-0.192	0.064	0.235	-0.056	-0.083	0.161	-0.104	-0.186	-0.373	0.030
负硬度(mg/L)	-0.155	0.644	0.153	0.282	-0.055	-0.034	0.458	-0.014	-0.007	-0.010	0.201	-0.054
总酸度(mg/L)	0.444	-0.362	-0.532	0.294	0.098	0.308	0.131	-0.141	-0.154	0.076	0.030	-0.180
S ²⁻ (mg/L)	0.020	-0.127	0.270	-0.617	0.366	0.243	0.301	0.031	-0.362	0.094	-0.054	0.232
游离 CO ₂ (mg/L)	0.283	-0.164	-0.420	0.262	-0.055	0.553	-0.052	-0.296	0.003	0.166	-0.180	-0.158
溶解性总固体 (mg/L)	0.929	0.334	0.086	-0.010	-0.063	0.015	0.009	0.035	-0.008	-0.031	0.009	-0.046
固形物(mg/L)	0.904	0.299	0.144	-0.034	-0.081	0.069	-0.077	-0.040	-0.007	-0.105	-0.046	0.155
Fe ²⁺ (mg/L)	0.284	0.166	0.171	-0.099	0.327	-0.107	-0.194	-0.459	0.486	0.373	0.155	-0.108
Fe ³⁺ (mg/L)	0.153	-0.126	0.115	-0.148	-0.523	0.039	0.112	0.281	0.141	0.400	-0.108	0.196
Mn ²⁺ (mg/L)	-0.101	0.213	0.219	0.122	0.255	-0.066	-0.629	0.156	-0.434	0.262	0.196	-0.290
NO ₂ ⁻ (mg/L)	-0.099	0.167	0.459	0.506	0.306	0.241	0.093	0.252	0.062	-0.001	-0.290	0.179
NO ₃ ⁻ (mg/L)	-0.085	0.221	0.243	0.582	0.455	0.002	0.086	-0.016	-0.231	0.005	0.179	0.176
Br ⁻ (mg/L)	-0.255	0.354	-0.377	-0.202	0.015	0.338	-0.394	0.234	-0.018	0.044	0.176	0.350
I ⁻ (mg/L)	-0.140	0.219	-0.322	-0.146	0.147	0.400	0.007	0.397	0.331	-0.311	0.350	-0.274
Ca ²⁺ (mg/L)	0.835	0.427	-0.095	-0.041	0.132	-0.139	0.048	-0.054	0.072	-0.077	0.023	-0.011
Mg ²⁺ (mg/L)	0.875	0.303	-0.100	-0.037	0.122	-0.142	0.036	-0.015	0.033	-0.128	-0.011	0.183
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.515	-0.349	0.273	0.243	-0.358	0.073	-0.046	0.200	0.069	0.211	0.183	0.035
Zn ²⁺ (mg/L)	0.102	0.004	0.322	-0.687	0.332	0.344	0.220	-0.070	-0.040	0.148	0.035	0.000
Cl ⁻ (mg/L)	0.862	0.103	0.148	0.024	-0.227	0.216	-0.022	0.142	-0.059	0.029	0.000	-0.002
SO ₄ ⁻ (mg/L)	0.855	0.422	0.012	-0.057	0.102	-0.154	-0.003	-0.049	0.006	-0.071	-0.002	0.068
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	-0.819	-0.021	-0.036	0.106	-0.153	0.100	0.165	-0.044	0.062	0.092	0.068	0.052
F ⁻ (mg/L)	0.064	-0.868	0.239	0.131	-0.059	0.081	0.022	-0.088	0.004	0.054	0.052	0.183
可溶性 SiO ₂ (mg/L)	0.180	-0.830	0.280	0.041	0.108	0.087	-0.055	0.028	0.136	-0.132	0.183	0.009
温度(°C)	0.232	-0.736	0.370	0.044	0.118	-0.008	0.011	0.021	0.135	-0.219	0.232	0.062
K ⁺ (mg/L)	0.589	-0.712	0.125	0.001	0.067	-0.022	-0.091	0.011	0.018	-0.032	0.062	-0.023
Na ⁺ (mg/L)	0.805	0.296	0.216	0.018	-0.265	0.170	-0.014	0.143	-0.091	0.031	-0.023	0.023

2 Q-型聚类分析

Q-型聚类用于对样本进行聚类,描述变量之间的接近程度,常用“距离”来度量。聚类分析方法主要包括类间联接法、类内联接法、最短距离法、最长距离法、重心法、中间距离法和离差平方法等 7 种方法。

本次研究根据热储层类别及所处Ⅳ级构造单元位置,将样本分为 17 个亚类,将各亚类的样本数取其均值(表 4)进行 Q-型聚类。通过不同聚类方法的比较,类间联接聚类法的谱系图表现得最为清晰、聚类效果最好。从系统聚类法的性质来看,该方法提取样本的信息较多,聚类空间的浓缩性或扩张性也较适中,聚类结果也与实际情况比较相符^[7],以欧式距离作为聚类样品的测度,通过重新调整距离聚类合并。以上工作通过 SPSS13.0 分析软件完成,最后得出 Q-型聚类分析谱系图(图 2)。

利用 16 项主成分指标对样品聚类的结果显示,108 个样品最终被聚为Ⅰ、Ⅱ两大类(图 2)。

Ⅰ类样品 4、10、7、9、13、6 均来自基岩裂隙型热储层,其中以 Jxw 聚类效果最好,体现在 Jxw 样品 4、7、10 首选以小距离聚合。该组水质类型以 Cl·SO₄—Na 型为主,溶解性总固体在 2000mg/L 左右,不同构造单元内的水质相近,表现出基岩裂隙型地热流体之间良好的连通性。

Ⅱ类样品 1、2、15、17、3、8、14、16、12、11、5 来自孔隙型热储层,聚类结果较发散,说明来自不同构造单元的孔隙型地热流体的水质差异较大;但越是相同构造单元内、越是同类热储层的水质越相近。当聚类距离为 16 时,冀中坳陷和沧县隆起聚为一类,而与黄骅坳陷相区别。随着聚类距离的减小,沧县隆起的多个次级单元的样品聚为一类,而与武清凹陷相区别;黄骅坳陷内的 Ng 样品则与 Nm 相区别。

表 4 天津地热流体水化学分类成果表

Table 4 Hydrochemical classification of geothermal fluids in the Tianjin area

大类	Ⅲ级构造单元	冀中拗陷												沧县隆起				黄骅拗陷			
类	Ⅳ级构造单元	武清凹陷		白塘口凹陷		双窑凸起		潘庄凸起		大成凸起		小韩庄凸起		北塘凹陷		板桥凹陷					
亚类 <i>i</i>	编码	JWM	JWG	CBM	CBJ	CSM	CSO	CSJ	CPM	CPO	CPJ	CDM	CDG	CXO	HTM	HTG	HQN	HQG			
	热储层	Nm	Ng	Nm	Jxw	Nm	O	Jxw	Nm	O	Jxw	Nm	Ng	Jxw	Nm	Ng	Nm	Ng			
	序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
平均含量 (mg/L)	样品数	2	8	8	15	1	7	16	4	3	10	1	2	4	2	19	2	4			
	K ⁺	5	3.8	11.5	69.2	13.1	36.6	76.2	3.5	47	73.1	3.6	25.4	46.7	4.8	12.5	2.7	4.7			
	Na ⁺	341.5	269.1	461.3	485.85	945	713.5	569.1	421	464.6	438.2	605.5	458.5	483.6	402.5	551.6	542.5	599.7			
	Ca ²⁺	3.5	4.75	24.2	33.72	186.4	356.3	58.14	6.5	30.5	33.6	9	18.1	44.95	7	40.6	10.45	10.2			
	Mg ²⁺	1	1.3	4.2	11.22	25.5	64.4	17.15	3.8	7.9	11.5	3	4.6	10	1.3	7.32	0.65	1.0			
	NH ₄ ⁺	0	0.1	0.3	0.82	0.98	0.75	1.06	0.04	0.7	0.9	0.08	0.4	0.9	0.55	0.7	0.14	1.2			
	Cl ⁻	123.5	61.7	297.9	425.45	547.7	689.5	572.4	246	368.8	374.7	698.4	329.7	409.1	216.2	390.9	425.4	563.1			
	SO ₄ ⁻	17	28.4	294.1	317.6	1796	1507	403.7	175.3	284.4	290.4	12	285	279.6	128.5	341.6	346.7	135.3			
HCO ₃ ⁻	661.5	581.5	425.4	404.51	115.9	258.1	372.6	476.7	453.5	406.9	457.6	559.6	504.9	563.1	526.2	329.5	573.6				
F ⁻	6	5.9	4.9	10.59	1.43	4.75	10.5	5.63	8.7	10.7	5.2	8.4	8.5	5.53	7.5	6.73	8.5				
SiO ₂ (mg/L)	48	54.5	29.8	62.15	28.2	32.51	61.9	27.7	47.5	61.7	27.2	45.5	41	34.5	40.6	28.8	38.9				
溶解性总固体(mg/L)	1196	1008.8	1554.5	1812.75	3658.1	3645	2133.1	1377.3	1710.5	1690.3	1822.3	1590.1	1819.5	1363.9	1915.1	1692.6	1927.1				
固形物(mg/L)	870	717.9	1341.9	1610.45	3600.2	3169.3	1946	1138.7	1483.8	1486.9	1593.5	1310.2	1567	1082.6	1652	1527.9	1640.3				
pH 值	8.51	8.2	8.3	7.91	8.64	7.26	7.9	8.4	7.7	8	8.21	8.5	7.6	8.4	8.4	8.4	8.29				
总碱度(mg/L)	371.6	347.8	337.1	330.6	470.4	348.2	320.6	319.7	386.8	355.1	515.5	464.2	396	346.6	456.3	280.3	472.07				
总硬度(mg/L)	105.9	61.6	93.9	130.7	10.5	296	114.2	36.1	127.4	208.9	12.5	9.3	475.9	33	39.4	28.8	29.33				
温度(℃)	62	77.1	52.29	84.4	46	55.96	82.6	45.3	71	82.3	49	50	57.5	45	66.8	52.5	70				

注: 亚类*i*的编码,第1个字母代表Ⅲ级构造单元名称的第1个英文字母;第2个字母代表Ⅳ级构造单元名称的第1或第2个英文字母(因北塘和板桥的第1个英文字母同为B);第3个字母代表热储层代码简写(M=明化镇、G=馆陶组、J=蓟县系雾迷山组、O=奥陶系)。

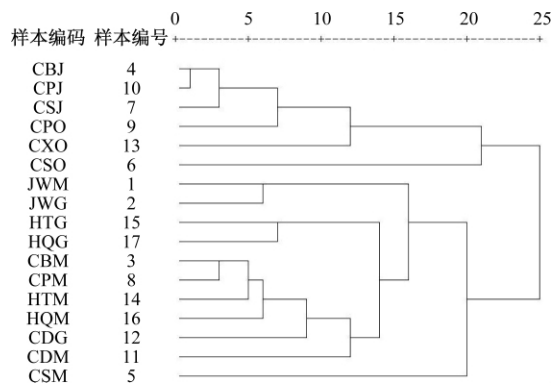


图 2 Q-型聚类分析谱系图

Fig. 2 Dendrogram of Q-type cluster analysis

注: 样本编码见表 4 中对应构造单元的说明

3 Q-型聚类结果分析

(1) 主成分分析显示,在天津地热流体常规检测的 36 项指标中,16 项主成分指标可以代表 36 项检测项目中 87.06% 的信息。

(2) 根据主成分荷载表可知,前 2 项主成分基本包括了天津地热流体中的所有重要成分。第 1 类主成分(荷载绝对值 > 0.8)包括了 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、

SO₄²⁻、HCO₃⁻、溶解性总固体、固形物等 8 项指标,基本对应于水质分析报告中的宏量元素,是地热流体的主要组分;第 2 类主成分(荷载绝对值 > 0.7)为 SiO₂、F⁻、K⁺,显示了与温度较好的相关关系。K⁺ 的高值出现在第 2 类主成分中,是因为 K⁺ 在孔隙型(松散层中的泥质成分对 K⁺ 有较强的吸作用)地热流体中含量很低,而在基岩地热流体中含量显著增高;第 3~11 类主成分主要显示了微量元素之间的相关关系,但荷载普遍 < 0.5;第 12 类主成分显示了 Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 之间极好的相关性,据传统水化学研究,此类水质为高溶解性总固体的 O 地热流体,Cl⁻ 是高矿化水的常见离子。

(3) 聚类分析显示 Jxw 地热流体在各构造单元内水质相似,这与传统的分析结论一致。因为该组较好的连通性,使其水质在空间分布上变异较小。而 O 地热流体在天津断裂附近溶解性总固体可达 4.5g/L 以上,在沧东断裂附近为 2g/L 左右,所以聚类显示了其较大的空间差异。

(4) 孔隙型地热流体的聚类结果较发散,但仍与其所处构造单元有较大的相关性。越是相同构造单元内、越是同类热储层的水质越相近。

4 结论

(1) 本文首次利用 Q-型聚类分析方法,对天津地热流体的水化学数据进行了研究,结果表明:聚类分析事先可以不确定任何标准,即可对流体化学特征进行快速、有效的分类,较好地揭示了地热流体水质的空间分布特征及其与地质构造单元的关系,分析结果直观且效率高,为进一步的研究工作起到指导作用。

(2) 通过对聚类结果的分析,可以初步确定地热流体的主要化学成分及其之间的联系程度,为进一步研究其形成机理、与地质构造的关系指明了方向。

(3) 对天津地热流体水化学聚类分析的结果,与传统的水化学方法研究结论相一致,且该方法具有直观高效的特点,所以在地热流体的地球化学特征研究中有着很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 阳正熙,吴堃虹,彭直兴,等. 地学数据分析教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. [YANG Z X, WU Z H, GU Z X, et al. Geological data analysis course [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]
- [2] 秦公柏, 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. [QIN G B, OUYANG Z P, CHENG T S. Application of Hydrogeochemical classifying with Hierarch Cluster analysis. [J]. Ground water, 2008, 30(1): 21-24. (in Chinese)]
- [3] 陈生华, 王世杰, 肖德安, 等. 典型喀斯特表层岩溶带地下水化学特征 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2130-2135. [CHEN S H, WANG S J, XIAO D A, et al. The hydrochemical characteristics of the epikarst zone. [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(9): 2130-2135. (in Chinese)]
- [4] 高宝珠, 黎雪梅, 聂瑞平. 天津市奥陶系热储层地热流体水化学特征及其主要影响因素 [J]. 地球化学, 2009, 30(3): 269-374. [GAO B Z, LI X M, NIE R P. Hydrochemical properties of geothermal fluids in ordovician reservoirs of Tianjin and main affected factors [J]. ACTA GEOSIENTICA SINICA, 2009, 30(3): 269-374. (in Chinese)]
- [5] 李梅兰, 吴启勋. 柴达木盆地盐湖湖水化学特征的对应聚类分析 [J]. 计算机与应用化学, 2009, 26(7): 943-947. [LI M L, WU Q X. Correspondence cluster analysis of hydrochemistry characteristics of salt lakes in Qardam basin. [J]. Computer and Applied Chemistry, 2009, 26(7): 943-947. (in Chinese)]
- [6] 王红英, 李健华, 李培月. 泾源县地下水水质多元统计分析 [J]. 宁夏工程技术, 2011, 10(4): 368-372. [WANG H Y, WU J H, LI P Y. Multivariate statistical analysis of groundwater quality in Jingyuan County [J]. Ningxia Engineering Technology, 2011, 10(4): 368-372. (in Chinese)]
- [7] 江晓益, 成春奇. 矿区地下水系统水质分类判别的多元统计分析 [J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 60-20. [JIANG X Y, CHENG C Q. Hydrochemical classification and identification of groundwater in mining region using multivariate statistical analysis [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 60-20. (in Chinese)]

The Q-Type cluster analysis of the relationship with geothermal fluid's hydrochemistry characteristics and geological structure

YU Yan, LIU Jie, KANG Nan, LIN wei, GAO Bao-zhu

(Tianjin Institute of Geothermal Exploration and Development Design, Tianjin 300250, China)

Abstract: A large number of hydrochemical data of geothermal fluid in the Tianjin area are examined in this paper. The Q-type cluster analysis method is used based on tectonic units and geothermal reservoirs. According to tectonic units and geothermal reservoir, the study area is divided into 17 subtypes and clustered step by step. The results show that the hydrochemical characteristics of the geothermal fluid in the study area are related to the geological tectonic units and are in good agreement with the characteristics of heat reservoir, which are consistent with the traditional conclusions of hydrochemistry. The results are reliable, intuitive and efficient. The methods has a good application prospect in groundwater quality analyses.

Key words: geothermal reservoirs; geothermal fluid; hydrochemistry; Q-type cluster analysis; Tianjin area

责任编辑: 汪美华