

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2023.02.02

天津地区地热流体主要离子组分特征及地热成因分析

王冰¹,宗振海¹,夏雨波^{2*},张芬娜¹,贾志¹

(1. 天津地热勘查开发设计院,天津 300250; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170)

摘要:天津地区中低温地热资源丰富,地热资源开发利用历史悠久,多年的勘查和开发利用取得了丰富的勘查成果。在研究天津地区地质构造和主要热储层地热流体水化学特征的基础上,本文以天津地区大量的地热流体水化学数据为研究对象,选取主要热储层地热流体中的主要离子与矿化度之间的关系分别进行R聚类分析和相关分析,结果表明, K^+ 含量在裂隙热储层中普遍高于孔隙型热储,且与矿化度的相关性不高; Na^+ 含量、 Ca^{2+} 含量与矿化度呈明显的正相关关系,且相关性较高;裂隙热储中地热流体的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量高于孔隙型热储中的地热流体,且与矿化度呈正相关关系; HCO_3^- 含量则与矿化度关系不大。采用元素比例系数法分析天津地区地热流体特征离子,得知天津地区基岩型地热系统相对比较封闭,有利于地热流体的形成和保存;地热流体属于海相含盐沉积岩溶滤水。综合地热流体水文地球化学、同位素和补给条件等资料分析,天津地区地热水的补给来源为大气降水,入渗水在深循环过程中受到地层围岩的加温过程,并与海相沉积的碳酸盐岩发生溶滤作用,最终形成大气渗入-海相沉积的混合成因溶滤水。

关键词:天津地区;地热流体;R聚类分析;矿化度;元素比例系数法

中图分类号:P314

文献标识码:A

文章编号:2097-0188(2023)02-0009-08

天津地区蕴藏着丰富的中低温地热资源,主要赋存于陆相碎屑沉积为主的新生界孔隙型热储(孔隙型热储)和海相沉积为主的古生界、中新元古界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储(基岩热型储)两大地热流体系统中。目前天津地区地热井的完井深度为1 000~4 000 m左右,其中孔隙型热储主要的开采层位为新近系明化镇组(Nm)和馆陶组(Ng)两个热储层;基岩热储包括古生界奥陶系(O)、寒武系昌平组(ϵ)和中元古界蓟县系雾迷山组(Jxw)三个热储层^[1-2]。其中明化镇组地热井在全天津市均有分布、馆陶组地热井分布在冀中拗陷和黄骅拗陷、基岩裂隙地热井分布于沧县隆起区。

天津地区地热资源开发利用历史悠久,最早可追溯到上世纪30年代,现已形成稳定的地热产业。经过多年的勘查和开发利用,天津地区至今已完成了8个地热田勘查,累积钻探进尺80余万米,最大单井勘探深度达4 041 m,基本查明了天津市的地质构造背景、地层岩性、各热储层的空间展布和物性特征,初步查明了不同热储层动力场、温度场和水化学

特征。其中进行了大量的水化学分析等勘查工作,在查明天津地区地热流体的水化学特征的基础上,根据不同的用途对水质进行了评价,提出了地热流体利用方向^[3]。

目前,国外在水文地球化学方面的研究较早且非常成熟。Favara研究了意大利西西里岛地区的地下热水水化学和地质特征;Rosa研究了摩洛哥地下热水的水化学特征;Davraz利用水文地球化学方法对土耳其乌沙克地区的地下热水进行分析,并研究了矿物成分中的饱和状态;Sener分析了安纳托利亚Kozakli地热田的水化学特征和同位素特征,研究了地热流体的形成机理;Haklidir分析了土耳其Kzldere地热田主要热储层的水化学特征,证明该地区地下热水径流过程中水岩作用强烈并且热储层封闭性良好等^[4-8]。国内的地热水水文地球化学研究也取得了很大进展。张荣华、黄生春、周鑫、陈昌亮、苏玉娟、韩思航、赵明坤等从深部的水-岩反应系统、地下热水的水化学特征、起源、成因、矿物的溶解作用、地热资源演化规律和合理开发利用等方面研究了地热水的

收稿日期:2023-05-22

资助项目:天津市规划和自然资源局项目“天津市地热资源开发利用动态监测(JDGP-2019-B-058)”

作者简介:王冰(1985-),女,工程师,硕士,毕业于吉林大学,从事水文地质、地热勘查和地热地质研究等工作,E-mail:wangbingdry@126.com;通讯作者:夏雨波(1982-),男,高级工程师,博士,毕业于吉林大学,主要研究方向为城市地质调查评价、土工环境地质调查评价,E-mail:sosodragon@163.com。

<http://hbdz.org.cn>

水文地球化学特征^[9-15]。

本文在研究天津地区地质构造和主要热储层地热流体水化学特征的基础上,充分收集分析大量水化学资料,选取主要热储层地热流体中的主要离子与矿化度之间的关系,分别进行R聚类分析和相关分析,并采用元素比例系数法分析天津地区地热流体的水化学特征,进而判断天津地热流体的成因、水化学成分的来源及形成过程,为地热资源的合理开发利用和保护提供依据。

1 地热概况与水化学条件

1.1 地热地质条件

在大地构造单元划分中,天津市属Ⅰ级构造单元—华北准地台的一部分。以区域性深大断裂即宝坻—宁河断裂为界,将天津市构造单元划分为两个Ⅱ级构造单元,即北部的燕山台褶带(基岩浅埋区)和南部断坳区^[16]。北部基岩浅埋区位于燕山台褶带的Ⅲ级构造单元蓟宝隆褶区;沧东断裂、天津断裂将南部断坳区大致分割为冀中坳陷、沧县隆起和黄骅坳陷三个Ⅲ级构造单元,形成了两坳夹一隆、呈北北东(NNE)向展布的构造格局(图1)。

1.2 地热流体水化学特征

天津地区地热流体受区域地质构造、断裂、地层岩性、储层温度、地热流体径流速度和径流距离等因素的影响,矿化度在水平方向自北东向南西、在垂直

方向自上而下逐渐增高^[17],由0.4g/L左右逐渐增加至6g/L左右;水化学类型渐趋复杂,由HCO₃-Na型逐渐向Cl·HCO₃-Na型、Cl·SO₄·HCO₃-Na型、Cl·SO₄-Na型、Cl-Na型过渡^[18]。

1.3 水质取样及检测

本次分析共取地热水样300组,其中:明化镇组热储50组、馆陶组热储90组、奥陶系热储58组、寒武系热储9组、雾迷山组热储93组,取样点分布见图1。收集的水质分析报告检测项目为33项,检测内容为地热水全分析,水样取样和检测参照《水质监测规范》(SD 127-1984)、《地下水水质检验方法》(DZ/T 0064-1993)、《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750-2006)和《地下水质量标准》(GB/T 14848-1993)等相关要求。水质检测方法及其检出限详见表1。各热储层特征见表2。

2 热储层主要离子相关性分析

2.1 R聚类分析

天津地区地热流体主要离子为K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻,将天津地区地热流体分为孔隙型和裂隙型两类,应用SPSS19.0软件对主要离子与矿化度进行R聚类分析,研究天津地区主要离子与矿化度之间的关系,首先计算各离子之间的相关系数,再根据相关系数聚类重新标定距离(表3,表4,图2~图3)。

由聚类分析结果可知:在松散孔隙型热储层中,与矿化度相关性最高的阳离子是Na⁺,相关系数为1.000,优先和矿化度聚类。其次为Ca²⁺,相关系数为0.620,K⁺相关性较小。相关性最高的阴离子为Cl⁻、HCO₃⁻,相关系数依次为0.890、0.864。

对于裂隙型热储层,与矿化度相关性最高的阳离子是Na⁺、K⁺,相关系数为0.990、0.805;阴离子为Cl⁻、SO₄²⁻,相关系数依次为0.998、0.865。

2.2 相关分析

选取主要热储层地热流体中的主要离子与矿化度之间的关系进行相关分析(图4~图9)。

由图可知,地热流体中阳离子的相关性分析结果:K⁺含量在裂隙热储层中普遍高于孔隙型热储,且不受地热流体矿化度的影响;Na⁺含量随矿化度的增加而增加,与地热流体所属热

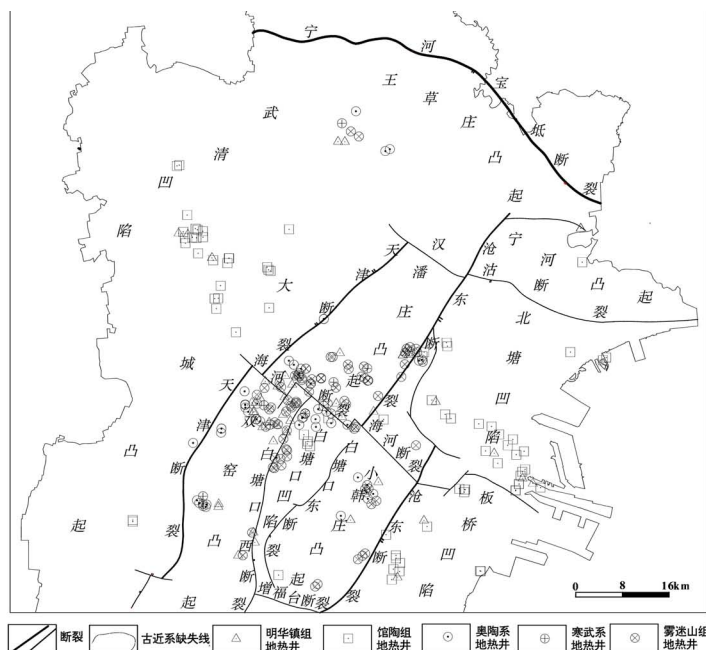


图1 地热井水质取样点分布图

Fig.1 Distribution of the sampling geothermal wells

表 1 水质检测方法及检出限
Table 1 Water quality testing methods and detection limits

检测项目/(mg/L)	检测方法	检出限	检测项目/(mg/L)	检测方法	检出限
Mn ²⁺	DZ/T 0064.22-1993 等离子体原子发射光谱法	0.003	Cl ⁻	DZ/T 0064.50-1993 银量滴定法	0.5
Cu ²⁺		0.003	NO ₃ ⁻	DZ/T 0064.59-1993 紫外分光光度法	0.05
Zn ²⁺		0.01	NO ₂ ⁻	DZ/T 0064.60-1993 分光光度法	0.002
pH	DZ/T 0064.5-1993 玻璃电极法	—	NH ₄ ⁺	DZ/T 0064.57-1993 纳氏试剂比色法	0.03
Pb ²⁺	DZ/T 0064.80-1993 等离子体质谱法	0.001	HBO ₂	GB/T 5750.5-2006 无机非金属指标	0.1
Cd ²⁺		0.000 1	Ca ²⁺		0.1
Cr ²⁺		0.002	Mg ²⁺		0.1
SiO ₂	DZ/T 0064.62-1993 地硅钼黄比色法	0.5	Na ⁺		0.1
Br ⁻	DZ/T 0064.46-1993 溴酚红比色法	0.1	K ⁺		0.1
游离 CO ₂	DZ/T 0064.47-1993 滴定法	—	I ⁻	HJ 778-2015 离子色谱法	0.000 5
CO ₃ ²⁻	DZ/T 0064.49-1993 滴定法	—	S ²⁻	TGMTC/QBH-001-2015	0.005
HCO ₃ ⁻		0.5	COD _{Cr}	HJ828-2017 重铬酸盐氧化法	2.00
F ⁻	DZ/T 0064.51-1993 离子色谱法	0.2	Fe ²⁺	TGMTC/QBH-011-2009	0.01
SO ₄ ²⁻		0.01	Fe ³⁺		0.01

表 2 天津主要热储层地热流体水化学特征
Table 2 Hydrochemistry characteristic of geothermal fluid in major thermal reservoirs of Tianjin

热储层	井口稳定流温	水化学类型	矿化度	pH 值
明化镇组	40 ~ 80℃	HCO ₃ -Na 型、HCO ₃ ·Cl-Na 型、SO ₄ ·Cl-Na 型	一般<1.5 g/L, 局部>3 g/L	8.0 ~ 8.8
馆陶组	I 段: 48 ~ 65℃	HCO ₃ -Na 型、HCO ₃ ·Cl-Na 型	0.8 ~ 1.9 g/L	7.5 ~ 8.8
	III 段: 60 ~ 82℃			
奥陶系	48 ~ 99℃	SO ₄ ·Cl-Na 型、HCO ₃ ·Cl-Na 型	1.8 ~ 5 g/L	7.5 ~ 8.5
寒武系	70 ~ 80℃	HCO ₃ ·SO ₄ -Na 型、Cl·HCO ₃ ·SO ₄ -Na 型、Cl·SO ₄ ·HCO ₃ -Na 型、Cl·SO ₄ -Na 型、Cl-Na 型	1.0 ~ 2.0 g/L	7.3 ~ 8.3
雾迷山组	70 ~ 113℃	HCO ₃ ·SO ₄ -Na 型、Cl·HCO ₃ ·SO ₄ -Na 型、Cl·SO ₄ ·HCO ₃ -Na 型、Cl·SO ₄ -Na 型、Cl-Na 型	1.7 ~ 2.2 g/L, 局部>5 g/L	7.5 ~ 8.5

表 3 孔隙型 R 聚类分析相关系数矩阵
Table 3 Correlation coefficient matrix of R-cluster analysis of pore type

相关性	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
TDS	1.000	0.152	1.000	0.620	0.890	0.591	0.864
K ⁺	0.152	1.000	0.102	0.250	0.084	0.000	0.042
Na ⁺	1.000	0.102	1.000	0.583	0.919	0.568	0.844
Ca ²⁺	0.620	0.250	0.583	1.000	0.429	0.925	0.250
Cl ⁻	0.890	0.084	0.919	0.429	1.000	0.397	0.637
SO ₄ ²⁻	0.591	0.000	0.568	0.925	0.397	1.000	0.171
HCO ₃ ⁻	0.864	0.042	0.844	0.250	0.637	0.171	1.000

表 4 裂隙型 R 聚类分析相关系数矩阵
Table 4 Correlation coefficient matrix of R-cluster analysis of fissure type

相关性	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
TDS	1.000	0.805	0.990	0.673	0.998	0.865	0.779
K ⁺	0.805	1.000	0.884	0.083	0.827	0.396	0.953
Na ⁺	0.990	0.884	1.000	0.501	1.000	0.740	0.882
Ca ²⁺	0.673	0.083	0.501	1.000	0.589	0.965	0.000
Cl ⁻	0.998	0.827	1.000	0.589	1.000	0.802	0.809
SO ₄ ²⁻	0.865	0.396	0.740	0.965	0.802	1.000	0.318
HCO ₃ ⁻	0.779	0.953	0.882	0.000	0.809	0.318	1.000

储层类型关系不大,与矿化度呈明显正相关关系;Ca²⁺含量普遍小于 70 mg/L,但南开及河西区的奥陶系热储流体中 Ca²⁺含量较高(大于 450 mg/L),总体上,地热流体中 Ca²⁺随矿化度的增加而增加。

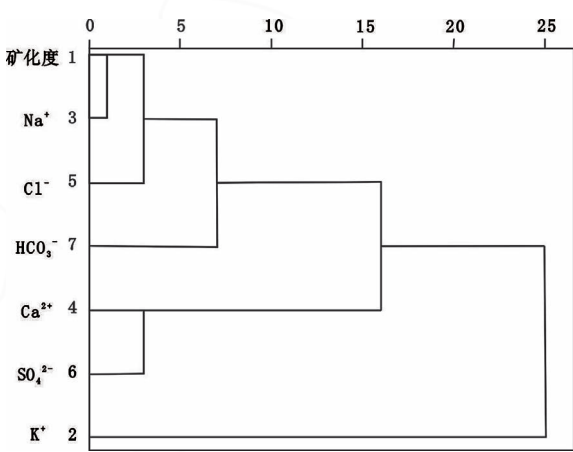


图 2 孔隙型 R 聚类分析树状图
Fig.2 R-cluster analysis tree diagram of pore type
使用平均联接(组间)的树状图,重新调整距离聚类合并

地热流体中阴离子的相关性分析结果:当矿化度较低时,孔隙型热储地热流体以 HCO₃⁻为主,裂隙热储地热流体以 Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻为主;当矿化度增高时,两种类型热储地热流体均以为 SO₄²⁻、Cl⁻为主。整体来说裂隙型热储中地热流体的 Cl⁻、SO₄²⁻含量高于孔隙型热储地热流体,且与矿化度呈正相关关系;HCO₃⁻含量则与矿化度关系不大。

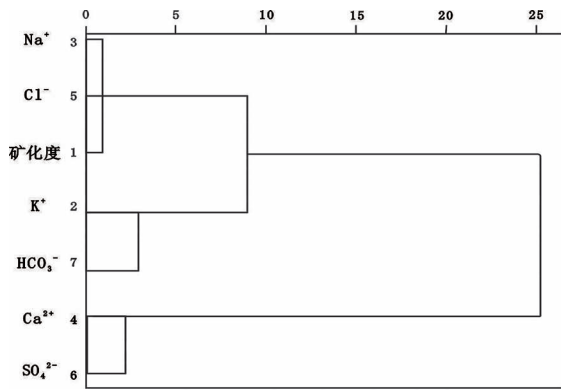


图3 裂隙型R聚类分析树状图

Fig.3 R-cluster analysis tree diagram of fissure type
使用平均联接(组间)的树状图,重新调整距离聚类合并

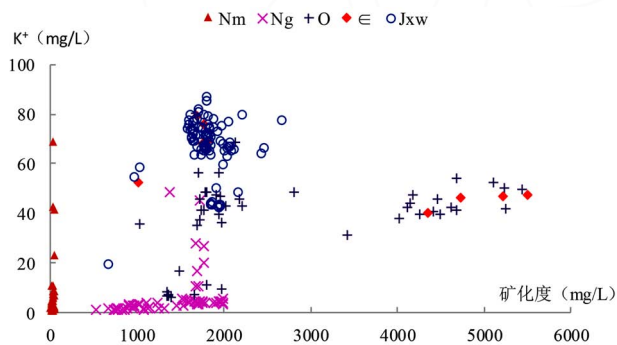
图4 K⁺与矿化度关系图

Fig.4 Relationship diagram between K⁺
and mineralization degree

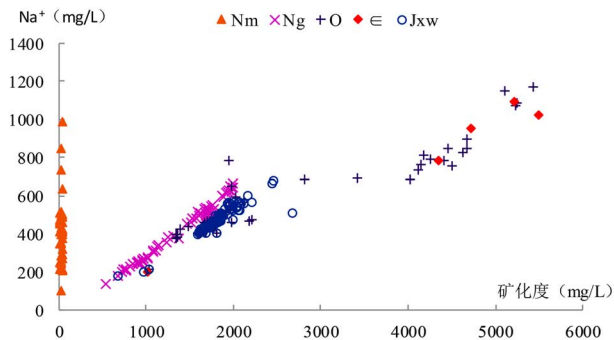
图5 Na⁺与矿化度关系图

Fig.5 Relationship diagram between Na⁺
and mineralization degree

由图4-图9可知,奥陶系地热流体中各离子分布比较分散,Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻与矿化度呈正相关;寒武系地热流体中各离子分布不均,这与其水化学类型多样性(表2)表现一致;雾迷山组地热流体各离子的分布较集中,表明其水质整体稳定性较好。但是由于受地质构造和断裂等因素影响,各构造单元的主要离子与矿化度之间的关系差异性较大^[19-21]。

所有地热流体阳离子均以Na⁺为主,且rNa/rCl

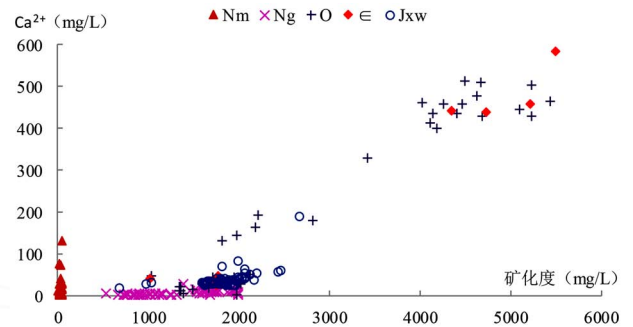
图6 Ca²⁺与矿化度关系图

Fig.6 Relationship diagram between Ca²⁺
and mineralization degree

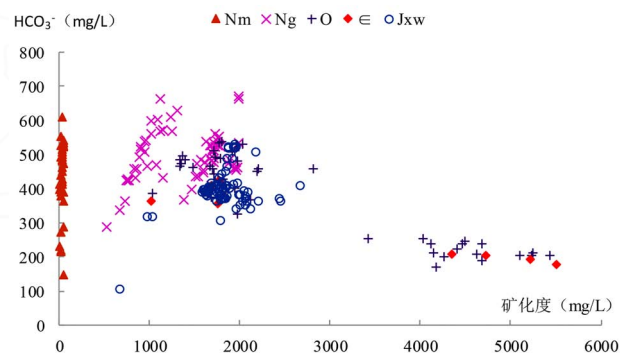
图7 HCO₃⁻与矿化度关系图

Fig.7 Relationship diagram between HCO₃⁻
and mineralization degree

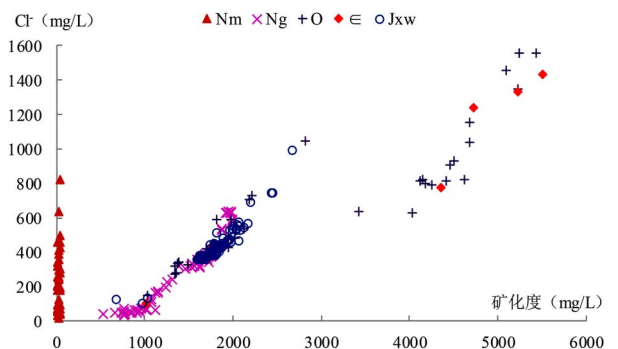
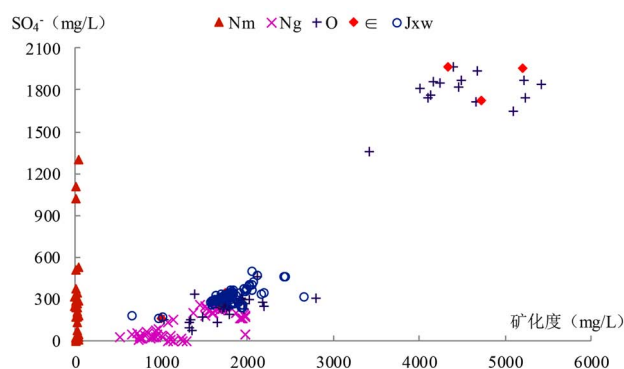
图8 Cl⁻与矿化度关系图

Fig.8 Relationship diagram between Cl⁻
and mineralization degree

比值均大于1,具有典型的溶滤水特征,各离子的百分比含量也显示出地热流体流经不同热储层所受到的地层岩性的影响。对各主要离子与矿化度之间的关系分别进行R聚类分析和相关性分析,两者得出的结论相同。

3 元素比例系数分析

地热流体化学成分中,许多化学组分之间在彼此的含量上存在着某种相关关系(或共生关系),依据某

图9 SO_4^{2-} 与矿化度关系图Fig.9 Relationship diagram between SO_4^{2-} and mineralization degree

些元素含量之间的固定关系,可以对地热流体的成因和所处环境做出分析和判断,这种方法被称之为元素比例系数法。元素比例系数法是表示地下热水赋存的水文地质条件的重要化学指标,可以用来判断地下水的成因、水化学成分的来源及形成过程。选取特征离子,采用元素比例系数法进行计算,结果见表5,进而分析天津地区地热流体水化学特征。

3.1 钠氯系数($\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$)

钠氯系数可以判断地层水的来源、浓缩变质作用程度及水动力条件等,是表征地热水变质程度的水文地球化学的重要参数。地热水中 Na^+ 的化学稳定性相对 Cl^- 较差, Na^+ 可能由于吸附、沉淀等化学反应而减少,而 Cl^- 化学性质稳定,因而在地热水埋藏沉积后,钠氯系数一般都趋于降低。一般认为,钠氯系数越小,地下水越浓缩,变质越深,水体环境越趋于还原。因此,利用钠氯系数的大小可以判定地下热水的变质程度,推测地热水的成因或起源^[22-23]。

通常情况下,标准海水的钠氯系数平均值为0.85,岩盐层溶滤形成的地下水钠氯系数大约为1,受大气降水淋滤作用影响的地下水钠氯系数一般大于1。天津地区地热流体的钠氯系数均大于1,其中NH-GD井的地热流体中钠氯系数最高(达到12.02),其它区域地热流体中钠氯系数为0.96~12.02,钠氯系数变大反映受渗入水的影响,说明天津地区地热

水浓缩程度不高,变质作用不强烈,地热水为大气成因渗透水。

3.2 脱硫酸系数($100 \times \gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{Cl}^-)$)

脱硫酸系数是表征地热水氧化还原的重要参数,在还原环境中,当存在有机质时,脱硫酸细菌能使 SO_4^{2-} 还原成 H_2S ,使热水中 SO_4^{2-} 减少, HCO_3^- 增加,pH值增大。一般认为该系数越小,硫酸盐的还原作用越强烈,地热系统越封闭。

孔隙型热储(即明化镇组和馆陶组热储层)的脱硫酸系数分布不均衡,说明其封闭程度不均衡,其中明化镇组的脱硫酸系数最小值2.21和馆陶组的脱硫酸系数最小值0.11均在武清凹陷内,表明该构造单元内地热系统比较封闭;大城凸起内明化镇组和馆陶组的脱硫酸系数均值分别为5.20和5.55,表明其地热系统也比较封闭;其它构造单元(如潘庄凸起、双窑凸起等)中孔隙型热储的脱硫酸系数分布不均,但在沧东断裂和海河断裂等导水断裂附近的脱硫酸系数较大,说明导水断裂使构造单元的封闭性变差,间接说明了导水断裂两侧热储层存在水力联系。

基岩型热储的脱硫酸系数为10.57~214.16,其中奥陶系、寒武系和蓟县系雾迷山组热储层的脱硫酸系数平均值分别为70.28、94.39和55.78,说明该类热储处于比较封闭状态。

3.3 钙镁系数($\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$)

钙镁系数是表征浓缩变质作用和阳离子吸附交换作用强弱的水文地球化学重要参数,白云岩化作用越强,作用时间越长,热水中 Mg^{2+} 含量就减少,钙镁系数越大,地热系统封闭性就越好。

孔隙型热储的钙镁系数分别为:新近系明化镇组0.54~11.85,新近系馆陶组1.86~25.2,变化范围较大且分布不均,体现水动力条件比较复杂,其中武清凹陷内明化镇组和馆陶组的钙镁系数均值分别为6.23和7.98,表明其地热系统封闭性较好;大城凸起内明化镇组和馆陶组的钙镁系数均值分别为7.58和6.50,表明其封闭性也较好;其它构造单元(如潘庄凸起、双窑凸起等)中孔隙型热储的钙镁系数分布不

表5 不同热储层元素比例系数计算结果一览表

Table 5 List of element proportional coefficient results in different thermal reservoirs

热储层	$\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$	$100 \times \gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{Cl}^-)$	$\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$	$\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Br}^-)$	$\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Sr}^{2+})$
明化镇组	0.96 ~ 12.02	2.21 ~ 228.90	0.54 ~ 11.85	604.90 ~ 1 597.75	11.5 ~ 85.5
馆陶组	1.51 ~ 10.03	0.11 ~ 269.28	1.86 ~ 25.2	652.39 ~ 2 756.05	13.6 ~ 72.2
奥陶系	1.01 ~ 3.02	10.57 ~ 214.16	1.49 ~ 5.79	806.76 ~ 1 947.23	5.96 ~ 39.5
寒武系	1.10 ~ 2.99	53.23 ~ 187.47	1.48 ~ 3.73	579.15 ~ 1 497.92	39.3
雾迷山组	1.21 ~ 3.00	19.24 ~ 117.34	1.02 ~ 3.16	624.08 ~ 1 597.75	8.78 ~ 22.6

均,在导水断裂附近的钙镁系数较低,说明导水断裂附近构造单元封闭性不好,这与脱硫酸系数对导水断裂的判定结果一致。

基岩热储的钙镁系数平均值分别为:奥陶系2.87、寒武系2.61、蓟县系雾迷山组1.86,说明基岩型地热系统相对比较封闭,有利于地热流体的形成和保存,这与脱硫酸系数的判定结果一致。

3.4 氯溴系数($\gamma(\text{Cl}^-)/\gamma(\text{Br}^-)$)

氯和溴均为卤族元素,二者物理性质和化学性质接近,它们共存于海水中,但溴在淡水水体中含量很少,因而氯溴系数即是海水的特征系数,可以判断地热水成因及热储层中溴的富集程度^[24-25]。在现代大洋中,氯溴系数约为300(大气降水标准值);在海相沉积水(古封存水)中,由于浓缩而产生NaCl沉淀,溴化物的溶解度比NaCl大,溴相对富集,氯溴系数小于300;海相含盐沉积岩溶滤水中氯溴系数大于300。天津市地热流体的氯溴系数均大于300,表明天津地区地热流体为流经贫溴岩石的溶滤水,属于海相含盐沉积岩溶滤水。

3.5 钙锶系数($\gamma(\text{Ca}^{2-})/\gamma(\text{Sr}^{2-})$)

当海水浓缩产生盐类沉淀时, SrSO_4 (天青石)的沉淀在 CaCO_3 之后,在 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 CaSO_4 之前。正常海水的钙锶系数约为33,碳酸盐沉积岩中的 Sr^{2-} 并不富集,溶滤此类岩层比例系数在200左右,富含天青石地区地下水在10以内。

天津地区地热流体的钙锶系数远小于200,表明地热水是典型的海相沉积碳酸岩盐经过溶滤而形成的。

4 分析与讨论

4.1 水化学特征分析

由天津地区地热流体水化学特征和热储层主要离子相关性分析可知:在低矿化度时,地热流体组分以 $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ 为主,水化学类型以 HCO_3^-/Na 型为主;随着矿化度的增高,各离子绝对含量除 HCO_3^- 外都逐渐增加,水化学类型逐渐过渡为 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-/\text{Na}$ 型、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}$ 型、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}$ 型,直至 Cl^-/Na 型,水化学类型逐渐向 Cl^-/Na 型演化,地热流体表现为典型的溶滤水特征:即地热流体的大部分离子含量随着矿化度的增加而增高。这与氯溴系数所体现的溶滤水特征相一致。

4.2 氢氧稳定同位素分析

氢氧稳定同位素在判断地热水来源、流向和储存环境等方面具有重要指示作用, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 是确定

地热水补给来源的天然示踪剂。杨吉龙^[26]等绘制了天津地区不同热储层中地热流体的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图,发现大部分数据点均落在全球大气降水线附近,说明该地区地热流体主要补给来源为大气降水,这与钠氯系数表现出的地热水为大气成因渗透水的结论一致;该地区各热储层的地热流体都存在 $\delta^{18}\text{O}$ 漂移现象,基岩型热储的地热流体由于碳酸盐含水介质的水-岩交互作用发生了 $\delta^{18}\text{O}$ 漂移,孔隙型热储地热流体受到下部地热流体的上涌而发生了 $\delta^{18}\text{O}$ 漂移,说明本区地热水是碳酸岩盐经溶滤作用而形成的,这与氯溴系数和钙锶系数的判定结果一致。

4.3 地热水成因分析

依据地热流体水文地球化学、同位素和补给条件等资料分析,天津地区各热储层地热水的补给来源为大气降水和地质历史时期地层中的古沉积水。赋存于热储层中的地热水主要是由北部山区大气降水下渗进入各热储层后,通过地下深部由北向南经过漫长的径流,受到地层围岩的加温过程形成的,各热储层地热水的补给区在北部、东北部的燕山区,排泄区在市区和西南部^[27-28]。

孔隙型热储:古近纪开始,本区构造运动以沉降为主,接受了新近纪和第四纪的沉积,沉积物为陆相碎屑沉积,第四系地层为新近系地下水提供了盖层条件,从而使新近系储层中的水最终发育成低温热水。新近系储层砂层分布广、分布不均、孔隙度大、渗透性好,有利于大气降水渗入,能够广泛接受早期大气降水,最终形成了沉积-渗入混合成因水^[29]。

基岩型热储:中、新元古代和早古生代时期,本区沉积了巨厚的海相碳酸盐岩地层,印支运动使地层褶皱隆起遭受剥蚀,多次的褶皱、断裂活动和碳酸盐岩的风化剥蚀、岩溶化作用使得裂隙和溶隙发育。大气降水入参与地下水发生强烈交替作用,使碳酸盐岩中盐度较高的古岩溶水逐渐淡化。直到新近纪,本区重新接受沉积呈封闭状态,但北部山区仍裸露地表,构成半开启型水文地质构造系统,大气入渗水沿断裂、裂隙等通道向深部运移,补给广大平原隐伏基岩地下水^[30-33]。在本区特有的地质构造环境和高地热背景下,入渗水在深循环过程中不断与围岩产生物理化学作用及热交换,而逐渐形成地热水。

5 结论

(1)天津地区地热流体中阳离子均以 Na^+ 为主。

K⁺含量在裂隙热储层中普遍高于孔隙型热储,且与矿化度的相关性不高;Na⁺含量、Ca²⁺含量与矿化度呈明显的正相关关系,且相关性较高。裂隙热储中地热流体的Cl⁻、SO₄²⁻含量高于孔隙型热储地热流体,且与矿化度呈正相关关系;HCO₃⁻含量则与矿化度关系不大。

(2)在低矿化度时,地热流体组分以Na⁺、HCO₃⁻为主,随着矿化度的增高,各离子的绝对含量除HCO₃⁻外均逐渐增加,地热流体的大部分离子含量随着矿化度的增加而增高,表现为典型的溶滤水特征。

(3)天津地区基岩型地热系统即奥陶系、寒武系和蓟县系雾迷山组热储层的地热系统相对比较封闭,有利于地热流体的形成和保存。

(4)天津地区地热水的补给来源为大气降水,入渗水在深循环过程中受到地层围岩的加温过程,并与海相沉积的碳酸盐岩发生溶滤作用,最终形成大气渗入-海相沉积的混合成因溶滤水。

参考文献:

- [1] 于彦,刘杰,康楠,等.地热流体水化学特征与地质构造关系的Q-型聚类分析[J].水文地质工程地质,2013,40(3):131-135.
- [2] 杨吉龙,汪大明,牛文超,等.天津地热资源开发利用前景及存在问题[J].华北地质,2022,45(3):1-6.
- [3] 宋美钰,刘杰,秦莉红,等.天津地热流体水化学特征及同位素分析[J].地质调查与研究,2018,41(2):138-144.
- [4] R. FAVARA, F. GRASSA, S. INGUAGGIATO, et al. Geochemical and hydrogeological characterization of thermal springs in Western Sicily, Italy [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1998, 84: 125-141.
- [5] ROSA CIDU, SAADIA BAHAJ. Geochemistry of thermal waters from Morocco [J]. Geothermics, 2000, 29: 407-430.
- [6] DAVRAZ A. Hydrogeochemical and hydrogeological investigations of thermal waters in the Usak Area (Turkey) [J]. Environmental Geology, 2008, 54: 615-628.
- [7] SENER M F, BABA A. Geochemical and hydrogeochemical characteristics and evolution of Kozaklı geothermal fluids, Central Anatolia, Turkey[J]. Geothermics, 2019, 80: 69-77.
- [8] HAKLIDIR F, SENGUN R, AYDIN H. Characterization and comparison of geothermal fluids geochemistry within the Kızıldere Geothermal Field in Turkey: New findings with power capacity expanding studies [J]. Geothermics, 2021, 94: 102110.
- [9] 张荣华,胡书敏,R.HELLMANN,等.矿物在热液内化学动力学和物质迁移[M].北京:科学出版社,1992.
- [10] 黄声春.澄海莲花山热矿水形成条件和水质特征[J].西部探矿工程,2006,(10):127-128.
- [11] 周鑫,马致远,李婷,等.咸阳地区地下热水地球化学演化模拟[J].西北地质,2012,45(2):139-145.
- [12] 陈昌亮.长白山玄武岩区地热资源赋存规律及其水化学特征研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [13] 苏玉娟.松辽盆地典型地热田成因机制及合理开发利用研究—以林甸地热田为例[D].长春:吉林大学,2021.
- [14] 韩思航.胶东半岛地热流体水化学特征及成因机理[D].石家庄:河北地质大学,2022.
- [15] 赵明坤.郾城凸起明化镇组地热成因机制及采热驱动下多场演化规律[D].北京:中国矿业大学,2022.
- [16] 《天津地热(温泉)志》编委会.天津地热(温泉)志[M].天津:天津市科学技术出版社,2018.
- [17] 胡燕,高宝珠,靳宝珍,等.天津地热流体水化学分布特征及形成机理[J].地质调查与研究,2007,30(3):213-218.
- [18] 天津地热勘查开发设计院.2010年度-2019年度天津市地热资源开发利用动态监测报告[R].天津:天津地热勘查开发设计院,2010-2019.
- [19] 秦莉红,石晓今,于彦,等.天津市蓟县系雾迷山组地热流体地球化学特征[J].地质找矿论丛,2019,34(1):150-154.
- [20] 陈明涛.天津潘庄凸起构造区砂岩型热储层水-热-力学耦合数值模拟研究[D].长春:吉林大学,2020.
- [21] 岳冬冬,李胜涛,贾小峰,等.天津山岭子地热田雾迷山组热储流体水化学特征[J].科学技术与工程,2020,20(36):14847-14853.
- [22] 林晓英,曾溅辉,杨海军,等.塔里木盆地哈得逊油田石炭系地层水化学特征及成因[J].现代地质,2012,26(2):377-383.
- [23] 谭开俊,张帆,尹路,等.准噶尔盆地乌夏地区地层水与油气保存条件[J].石油实验地质,2012,34(1):36-39.
- [24] 李虎,夏玲晓,江国胜.天津地区奥陶系地热流体离子比例系数分析研究[J].地下水,2015,37(5):35-37.
- [25] 冯欣,张亚哲.深圳地区地下水离子比例系数分析研究[J].中国农村水利水电,2014,(4):18-24.
- [26] 杨吉龙,柳富田,贾志,等.河北牛驼镇与天津地热田水化学和氢氧同位素特征及其环境指示意义[J].地球学报,2018,39(1):71-78.
- [27] 高宝珠,王心义,曾梅香,等.天津市地下热水成因、年龄及补给条件研究[R].天津:天津地热勘查开发设计院,2002.
- [28] 刘畅,李营,陈志,等.华北断陷盆地中北部地热水地球化学特征及成因初探[J].矿物岩石地球化学通报,2018,37(4):663-673.
- [29] 刘杰.天津地区地热流体地球化学特征[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- [30] 杨永江,庞海,靳宝珍,等.天津周良庄地质构造背景

- 和地热成因探讨[J]. 世界地质, 2010, 29(4):646-651.
- [31] 李俊峰, 靳宝珍, 程万庆, 等. 天津蓟县系雾迷山组地热流体水化学特征研究[J]. 地质调查与研究, 2008, 31(4):339-345.
- [32] 高宝珠, 聂瑞平, 黎雪梅, 等. 环境同位素技术在研究天津地热流体补给和径流中的应用[J]. 地下水, 2009, 31(4):1-3.
- [33] 陈瑞军, 李嫒嫒, 唐永香, 等. 天津附近奥陶系地热流体成因与补排分析[J]. 世界地质, 2009, 28(4):539-545.

The characteristics of the main ion components of geothermal fluid and geothermal origin analysis in Tianjin

WANG Bing¹, ZONG Zhenhai¹, XIA Yubo^{2*}, ZHANG Fenna¹, JIA Zhi¹

(1. *Tianjin Geothermal Exploration and Development-Designing Institute, Tianjin 300250, China;*

2. *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China*)

Abstract: Tianjin contains abundant low-temperature geothermal resources. The exploration and utilization of geothermal resources has a long history. After years of exploration and utilization, rich exploration results have been achieved. Based on the study of geological structure and hydrochemistry characteristics of geothermal fluid in main thermal reservoirs in Tianjin, this paper took a large number of geochemical data as the research object, and selected characteristic ions and mineralization degree of geothermal fluid in main thermal reservoirs to conduct R-cluster analysis and correlation analysis. It showed K^+ in fractured reservoir is generally higher than that in porous reservoir, and the correlation between K^+ and mineralization degree is low; Na^+ and Ca^{2+} are positively correlated with mineralization degree, and the correlations were high; Cl^- and SO_4^{2-} of geothermal fluid in fractured reservoir were higher than those in porous reservoir, and they were positively correlated with mineralization degree; HCO_3^- had little correlation with mineralization degree. It used element proportional coefficient method to analysis hydrochemistry characteristics of geothermal fluid in Tianjin. It showed the bedrock geothermal system was relatively closed, which was conducive to the formation and preservation of geothermal fluid; the geothermal fluid belongs to marine saline sedimentary karst filtration. After comprehensively analyzing the data of hydrogeochemistry, isotopes and recharge conditions of geothermal fluid, it shows that the atmospheric precipitation is the supply source of geothermal water in Tianjin, the infiltration water is heated by the surrounding rock in the process of deep circulation and leaching with marine sedimentary carbonate rocks. Finally, the atmospheric infiltration - marine sedimentation mixed genetic dissolved filtered water is formed.

Key words: Tianjin area; geothermal fluid; R-cluster analysis; mineralization degree; element proportional coefficient method