

北京市地热水地球化学特征

刘颖超^{1,2}, 刘凯², 孙颖², 刘久荣², 刘宗明²

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195)

摘要: 依据北京市不同地热田 80 组地热水和地下水样品水化学测试结果分析, 地热水化学类型自北部山区向南部平原依次可划分为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型和 Cl-Na 型水, 中间又有各过渡带水化学类型, 而沉积盆地通常是 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型地热水; 地热水中一些特殊组分如氟、偏硅酸、偏硼酸、硫化氢等含量显著高于常温(冷)地下水。进一步分析认为, 北京地热水是由外部圈层冷水在入渗补给过程中经过增温形成的; 地热水的组分比率受到蒸发浓缩或冷水稀释的影响较小, 冷热水的混入程度不同仍会导致组分比发生变化; 各地热田中地热水绝大部分属于未成熟水, 热水中水-岩之间尚未达到离子平衡状态。计算表明, 北京地热田 K-Mg 温标的计算温度为 $38.1\text{ }^\circ\text{C} \sim 136.6\text{ }^\circ\text{C}$, SiO_2 温标的计算温度在 $57.4\text{ }^\circ\text{C} \sim 154.2\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 而实测温度多为 $22.0\text{ }^\circ\text{C} \sim 118.5\text{ }^\circ\text{C}$, 估算温度与实测温度的对比可反映钻探可及温度与地热水曾经达到的温度, 因此可以为地热勘探提供依据。

关键词: 水化学; 特殊组分; 组分比; 温标

中图分类号: P314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0324-06

Geochemical characteristics of geothermal water in Beijing

LIU Ying-chao^{1,2}, LIU Kai², SUN Ying², LIU Jiu-rong², LIU Zong-ming²

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China)

Abstract: Based on the chemical analysis on 80 geothermal water and groundwater samples, the geochemical types of the geothermal water vary from $\text{SO}_4\text{-Na}$ in the northern mountain area, $\text{HCO}_3\text{-Na}$ in Beijing Depression, and to Cl-Na in the southern edge of Beijing Plain. The concentrations of F^- , SiO_3^{2-} , BO_3^- , and H_2S in geothermal water are higher than those in cold groundwater. Further analysis suggests that the geothermal water is formed by the temperature increasing of peripheral cold water during the infiltration process. The results show that evaporation concentration and cold water dilution have insignificant effects on the component ratios of Na/K , Cl/F , Cl/B , and Cl/SiO_2 ; however, the mixing degree between cold and hot water can affect the ratios. Most of the geothermal water is immature, and the water-rock interaction has not reached ion balance. The calculated K-Mg geothermometer temperature ranges from 38.1 to $136.6\text{ }^\circ\text{C}$, the calculated quartz temperature ranges from 57.4 to $154.2\text{ }^\circ\text{C}$, and the well head temperature of geothermal water ranges from 22.0 to $118.5\text{ }^\circ\text{C}$. The comparison between the calculated and measured temperatures reflects the temperature which the bore can reach and the highest temperature of the geothermal water. The results can provide the hydrogeochemical evidence for geothermal water exploitation in Beijing.

Key words: Hydrochemistry; special components; component ratio; temperature scale

北京地热资源蕴藏丰富, 主要分布在东南城区、小汤山等十个地热田^[1]。地热勘察开发利用可追溯到 20 世纪五十年代, 至今已近六十多年的历史, 范围涉及地热供暖、生活热水、医疗保健、温泉洗浴、农业温室、水产养殖等各个方面^[2-4], 取得了显著的社会经济效益。

地热水孕育和贮存在热储中, 与常温地下水贮存的普通

含水层具有截然不同地球化学环境。对地热水的水化学特征研究可以揭示地热流体的来源、成因、年龄、运移储存状态、储层温度等特征, 还可以用水岩平衡来研究地热地质条件相关的信息。以往的针对北京地热水地球化学研究, 仅限于某个地热井或某一区域^[5-8], 而未涉及整个区域的研究, 本文依据北京市不同地热田 80 个样品, 对北京地热水的化

收稿日期: 2014-07-04 修回日期: 2015-02-05 网络出版时间: 2014-03-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.1627.021.html>

基金项目: 中国地质调查局“全国地热资源调查评价北京市地热资源现状调查评价与区划”项目(水[2013]01-029-006)

作者简介: 刘颖超(1980), 男, 河北安平人, 工程师, 主要从事水文地质、工程地质、地热地质方面研究。E-mail: ly_c95588@163.com

学类型、特殊组分、组分比例以及热储温度进行综合分析,为北京市地热水的合理开发利用提供依据。

1 地质背景

北京地区西北高、东南低,西部为太行山脉,北部为燕山山脉,山区多属中低山地形,大地构造位置处于中朝准地台燕山台褶带中段以及华北断坳之西北隅。自西北到东南分布有延庆新断陷、北京迭断陷(顺义迭凹陷、坨里丰台迭凹陷、琉璃河涿州迭凹陷)、大厂新断陷三个断陷带^[9],断陷带内覆盖巨厚沉积物,为地热资源的运移和聚集提供了条件,构成了北京地热资源的主体^[1]。北京市十个地热田全部分布在这三个断陷带内及与断陷与相接的凸起地带,自西北向东南依次划分为延庆、小汤山、西北城区、后沙峪、李遂、天竺、东南城区、良乡、双桥和风河营地地热田(图2)。地热田总面积约为2760 km²,十个地热田既相对独立,又有一定的水力联系。

研究区地层由新到老主要为第四系、第三系、白垩系、侏罗系、二叠-三叠系、寒武-奥陶系、青白口系、蓟县系、长城系、太古界密云群。地热井地层及岩性见图1。北京地热资源属盆地传导型中低温地热田,主要热储为蓟县系雾迷山组硅质白云岩,全区均有分布,其中以雾迷山组最好,铁岭组次之。寒武系和奥陶系灰岩若具备盖层,也可成为较好的热储,其盖层多由第三系、白垩系及侏罗系构成,分布于凹陷部位,厚度较大。

2 样品采集与测试

本文针对十个地热田,共采取地热水和地下水样品80件,其中地热水样品76件,地下水样品4件,样品采样位置见图1。采样时直接在水的压力下装入采样瓶,现场测试水温和PH值,其它分析项目由室内测试,其中K⁺、Na⁺、Li⁺及大部分金属离子采用原子吸收光谱测定方法测定;总酸、总硬度以及大部分阴离子采用滴定法测试;NH⁴⁺、Fe²⁺、Fe³⁺,偏硼酸、偏硅酸、偏磷酸以及卤素离子采用分光光度法测试;NO₃⁻采用紫外分光光度法测试;硒、原砷酸和汞采用原子荧光光谱法测试;溶解性总固体采用重量分析方法测试。

3 结果与讨论

3.1 水文地球化学特征

水化学分析结果表明(表1),北京市地热水温度为22.0℃~118.5℃,pH值范围7.18~9.2,呈弱碱性至碱性,其溶解性总固体一般小于1g/L;地热水中主要阴离子为HCO₃⁻,主要阳离子为Na⁺。根据地热水阴离子在派珀三线图(图3)分布情况,可以看出北京地热水来源于外部圈层水,其形成与外部圈层冷水入渗过程增温有关。北京地热水由靠近山前的西北城区地热田向东南方向的双桥、风河营地地热田,以及由良乡地热田向东北方向的天竺、李遂地热田,Ca²⁺含量逐渐减小,Na⁺含量逐渐增多。

从水化学类型来看,北京市地热水自北部山区向南部平原依次可划分为SO₄-Na型、HCO₃-Na型和Cl-Na型(图4),而基岩冷地下水大多属于HCO₃-Ca型。北部地区地热井及山区温泉,包括延庆及怀柔北部,基本上为SO₄-Na型水,

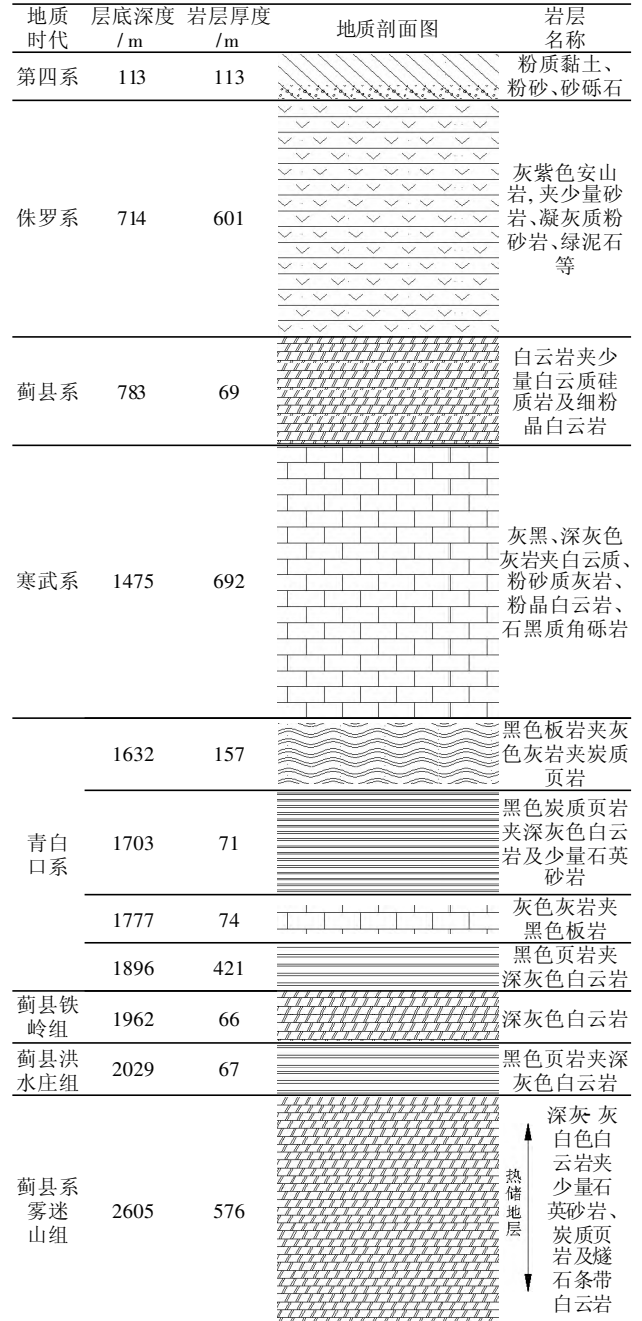


图1 某地热井钻孔柱状图

Fig. 1 Borehole diagram of a geothermal well

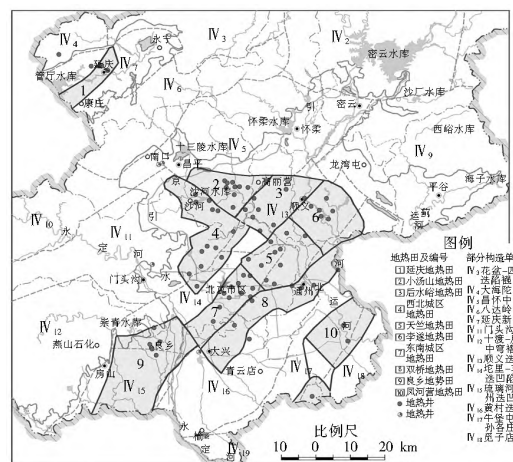


图2 取样点分布

Fig. 2 Location of sampling sites

表 1 部分地热水样地球化学分析结果

Tab. 1 Geochemical analysis results of geothermal water samples

地热田	样品编号	K ⁺ /(mg · L ⁻¹)	Na ⁺ /(mg · L ⁻¹)	Ca ²⁺ /(mg · L ⁻¹)	Mg ²⁺ /(mg · L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ /(mg · L ⁻¹)	Cl ⁻ /(mg · L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(mg · L ⁻¹)	TDS /(mg · L ⁻¹)	T (°C)	pH
延庆	RS01	6.18	115.00	37.90	10.40	307.50	17.20	83.30	603	33.7	7.97
	RS02	2.85	141.00	14.00	2.40	61.00	44.80	198.00	524	36.0	8.34
小汤山	RS03	10.20	76.50	46.50	15.20	305.00	25.60	67.40	554	53.8	7.57
	RS04	16.20	81.20	45.10	13.60	277.00	22.90	68.80	544	48.0	8.24
后沙峪	RS05	32.60	219.00	50.10	16.20	219.70	41.10	396.00	1 035	70.0	8.12
	RS06	31.60	308.00	101.00	26.60	333.20	130.00	586.00	1 570	70.0	7.77
西北城区	RS07	8.57	56.90	49.10	13.40	262.00	15.20	71.80	488	72.0	7.59
	RS08	10.70	62.70	42.50	8.00	233.10	13.80	57.80	480	68.0	7.82
天竺	RS09	13.40	516.00	12.00	6.70	753.00	358.00	18.20	1 700	64.0	7.8
	RS10	17.50	434.00	17.80	7.40	628.50	331.00	2.00	1510	57.0	8.13
李遂	RS11	15.10	161.00	21.00	13.10	378.00	51.70	51.30	703	42.5	7.98
	RS12	5.45	119.00	12.60	4.60	250.00	36.20	49.50	485	43.0	7.93
东南城区	RS13	13.20	82.50	52.10	20.70	247.70	50.70	113.00	620	56.5	7.75
	RS14	7.44	79.00	46.10	18.20	256.00	47.20	91.40	554	52.0	7.65
双桥	RS15	7.23	149.00	12.00	6.40	281.00	50.60	14.00	546	51.0	8.48
	RS16	3.84	127.00	13.00	6.70	268.00	51.40	18.80	507	42.0	8.13
良乡	RS17	10.30	63.80	78.20	26.10	293.00	47.70	133.00	667	36.0	7.44
	RS18	9.37	70.80	56.10	22.50	255.00	29.90	123.00	573	51.0	7.43
凤河营	RS19	156.00	2 330.00	57.50	15.80	592.00	3 380.00	51.40	6 700	100.0	7.84
地下水	RS20	1.36	23.70	53.50	22.50	254.00	14.40	42.80	439	15.8	7.59

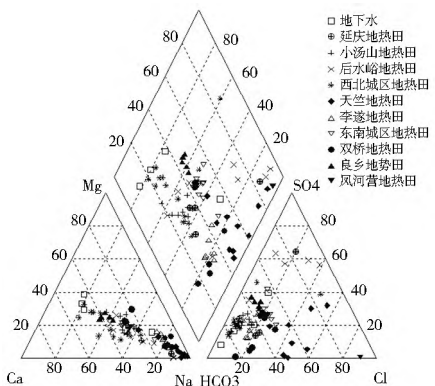


图 3 北京市各地热田地下水化学 Piper 图解

Fig. 3 Piper diagram of geothermal water and groundwater in Beijing

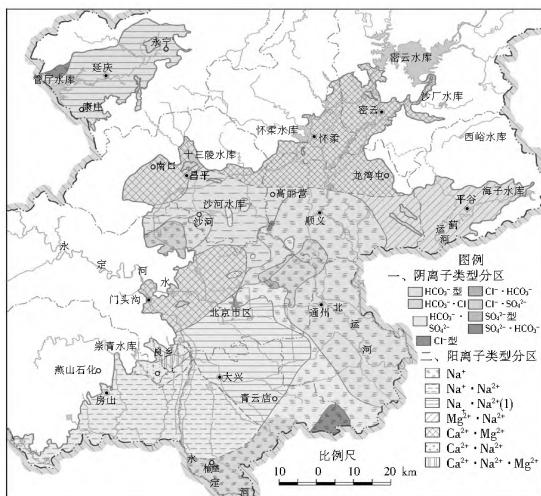


图 4 北京市地热水化学类型分区

Fig. 4 Hydrochemical types of geothermal water

pH 值多为 7.7~ 9.2, 呈弱碱性至碱性, 溶解性总固体多为 0.23~ 0.67 g/L; 北京断陷及延庆断陷地热水整体上属于 HCO₃·Na 型水; 大兴隆起的凤河营地热水, 整体上属于 Cl·Na 型水, pH 值多为 7.2~ 7.8, 偏弱碱性, 溶解性总固体浓度多为 6.7~ 7.5 g/L, 在凤河营北部为 HCO₃·Cl·Na 型水。不同地热田地热水由于所处地质构造单元不同, 地热地质及水文地质条件不同, 其水化学类型出现了不同的亚型, 如 Cl·HCO₃·Na 型、HCO₃·Cl·Na 型、HCO₃·SO₄·Cl·Na 型、HCO₃·SO₄·Na 型、HCO₃·SO₄·Na·Ca 等属于 HCO₃·Na 型的亚型水, 也称为过渡型或混合型, 此类热水 pH 值多为 7.1~ 8.2, 溶解性总固体多为 0.3~ 1.8 g/L。

3.2 特殊组分

北京市平原区地热水中一些特殊组分如氟、偏硅酸、偏硼酸、硫化氢等含量显著高于常温(冷)地下水, 绝大部分地热井水中氟及偏硅酸含量达到医疗价值标准, 有的达到命名浓度, 部分地热井地下水水中偏硼酸达到医疗标准, 个别达到命名浓度, 个别井中氡达到命名标准。

地热水中氟含量从西南良乡地热田沿北京凹陷到东北方向李遂、天竺地热田逐渐上升, 平均由 4.62 mg/L 上升到 10.47 mg/L, 沿着北京凹陷垂向轴两侧往西北、东南方向降低; 地热水中偏硅酸含量一般都在 20 mg/L 以上, 最高达 129 mg/L; 地热水中偏硼酸含量一般在 2~ 9 mg/L, 在丰台凹陷的西北翼含量低, 其他地热田总体水平低于城区热田, 但天竺热田首都机场达到 52 mg/L, 在凤河营达到 72 mg/L; 地热水中硫化氢含量一般在 0.05~ 0.54 mg/L 之间, 东南城区、双桥地热田部分地热井含量达 4.10~ 5.39 mg/L, 凤河营地热田中个别井相对较高达到 8.84 mg/L。各地热

田特殊组分统计见表2。

表2 北京平原区各地热田地热水特殊组分含量

Tab.2 The special components in each geothermal field of Beijing Plain

地热田	氟	偏硅酸	偏硼酸	硫化氢
延庆地热田	5.20~19.00	33.00~61.20	0.94~1.04	0.05~0.37
小汤山地热田	2.60~11.80	22.90~59.79	0.08~1.00	0.05~0.37
后沙峪地热田	1.45~6.00	21.70~68.70	4.60~14.00	0.17~0.22
西北城区地热田	1.05~7.64	12.20~74.10	0.40~1.20	0.05~0.54
天竺地热田	1.94~19.00	24.30~68.60	1.04~52.00	0.05~1.91
李遂地热田	7.60~11.60	25.20~31.70	0.52~4.60	0.05~0.09
东南城区地热田	1.40~11.80	20.00~129.00	0.008~9.40	0.05~4.10
双桥地热田	4.50~12.60	16.40~39.90	0.49~5.00	0.11~5.39
良乡地热田	3.80~5.80	18.80~59.70	0.08~0.80	0.05~0.33
凤河营地热田	3.50~8.40	24.00~70.00	2.10~72.00	0.05~8.84

3.3 组份比

与第四系冷水相比,地热水的组份比率受到蒸发浓缩或冷水稀释的影响较小,更能显示地热水的地球化学内涵。北京地区中低温地热田地热水代表性的组份比率有 Na/K、Cl/F、Cl/B、Cl/SiO₂ 四种(表3)。

表3 北京市平原区各地热田地下热水组份比值

Tab.3 The component ratios in each geothermal field of Beijing Plain

地热田	Na/K	Cl/F	Cl/B	Cl/SiO ₂
延庆地热田	15.21~20.86	1.16~4.67	13.43~15.06	1.17~3.80
小汤山地热田	8.91~97.39	1.71~17.78	6.08~73.56	0.58~2.09
后沙峪地热田	8.19~16.02	2.58~11.95	2.91~9.53	1.29~6.82
西北城区地热田	5.40~11.39	0.88~16.92	7.99~82.20	0.34~38.70
天竺地热田	8.26~73.48	1.64~19.51	8.43~24.99	0.34~26.92
李遂地热田	15.87~18.82	2.53~3.79	14.54~38.09	3.14~4.35
东南城区地热田	7.26~40.46	1.90~41.77	3.89~61.34	0.22~11.77
双桥地热田	17.24~54.86	0.50~6.31	1.52~32.45	1.23~5.06
良乡地热田	9.75~16.88	2.98~28.16	22.92~261.10	1.32~6.54
凤河营地热田	21.34~23.43	4.96~297.57	11.39~68.88	5.98~96.80

(1) Na/K。

Na/K 的低比值一般反映了水的高温条件。北京市平原区各地热田地热水的 Na/K 比值 70% 左右为 20 以下,10% 左右在 20~30 之间;Na/K 相对较低的比值出现在城区地热田的良乡-前门断裂附近,相对较高的比值出现在凹陷中埋藏相对较浅或靠近断裂附近的热储;丰台凹陷内及其以北各地热田的比值相近且比较低,凹陷以南的凤河营地热田和双桥地热田 Na/K 比值较高。

(2) Cl/F。

若有较冷的水进入热储,热水的 Cl/F 比通常会降低,主要由于氟化钙在低温时溶解度增加而使氟离子增多,而在高温时氟、钙离子结合成氟化钙沉淀。凤河营地热田由于地下水属于 Cl-Na 型热水,因此 Cl/F 比最高,北京城区地热田和天竺地热田的 Cl/F 比相对较高,良乡次之,小汤山、李遂、双桥、西北城区、后沙峪热田相对较低。

(3) Cl/B。

通常相同起源或成因的地热水具有相同的 Cl/B 比。北京市各地热田的 Cl/B 比值各不相同,良乡地热田最高,北京城区、小汤山、西北城区、双桥及凤河营地热田次之,李遂和天竺地热田相对较低,后沙峪更低。

(4) Cl/SiO₂。

若 Cl/SiO₂ 比值低,反映了地热水与较低温度水发生混合。凤河营地热田由于其水化学类型为 Cl-Na 型,因此 Cl/SiO₂ 的比值呈现最高,其余热田除天竺热田和西北城区有较高的比值外,李遂和双桥热田次之,良乡、后沙峪次之,小汤山最低。而北京城区自 20 世纪 70-80 年代以来 Cl/SiO₂ 逐渐降低,这与北京城区热田的开采增加了地下冷水的补给比例有很大关系。

3.4 热储温度

地下热储温度常用地球化学温标来估算。地球化学地温标是利用地下热水的化学组分浓度或浓度比计算的地下热储温度,用于地热田潜力预测、地热资源勘探开发和研究^[10-14]。地温标类型有很多,但主要有 4 大类:SiO₂ 地温标、阳离子地温标、同位素地温标和气体温标。阳离子地温标又包括 Na-K 温标、Na-K-Ca 温标、K-Mg 温标、Na-K-Ca-Mg 体系平衡图解地温计等^[15],其中 Na-K 温标仅适用于 150℃ 以上地热水^[16],Na-K-Ca 温标通常适用于富钙地热水。因此本次采用了 Na-K-Mg 三角图解、K-Mg 温标、SiO₂ 温标来估算热储温度。

由 Giggenbach 在 1988 年提出的 Na-K-Mg 三角图解^[17]用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的水样,它分为完全平衡、部分平衡和未成熟水三种状态或类型。

K-Mg 温标适用于低温系统的温标^[18]。当地热井出水温度较低时,用 K-Mg 地温标计算的温度一般高于热水井的出水温度,反之其可能低于出水温度,所以 K-Mg 温标计算的温度被认为是钻探可及温度,即当地热井出水温度较低时继续往深钻进有可能达到的温度。

SiO₂ 地温标是利用地热水中 SiO₂ 溶解度与温度的关系来估算地下热储的温度。地下热水在深部地球化学环境中溶解的二氧化硅服从石英的溶解度曲线,温度越高 SiO₂ 的溶解度越大,但这部分热水在温度下降时暂时不会将多余的 SiO₂ 过饱和析出(必须达到非晶质 SiO₂ 的溶解度时才呈过饱和析出),因此地热水都有“记忆”其曾经达到温度的功能^[9]。用 SiO₂ 温标计算的温度一般高于热水井的出水温度,只反映该地热水在地下深循环过程中曾经达到过的温度。

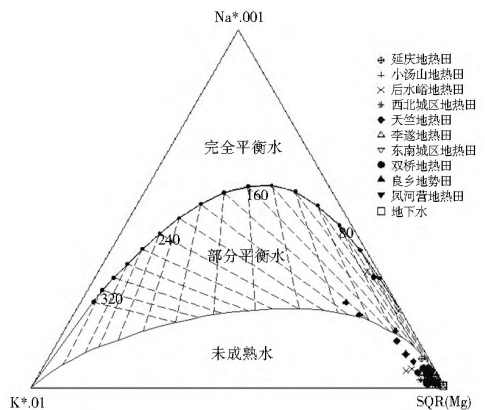


图5 水样的 Na-K-Mg 三角图

Fig.5 Na-K-Mg ternary diagram of water samples

从图 5 中可以看出,北京市各地热田中地热水绝大部分属于未成熟水,水-岩之间未达到离子平衡状态,仅天竺和后沙峪地热田中少数几个水样属于部分成熟水。从表 4 可以看出地下热储温度一般小于 80 ℃,部分在 100 ℃~120 ℃;K/Mg 温标计算的温度大多数在 55 ℃~65 ℃,比实测的温度高约 5 ℃~10 ℃,靠近凹陷中心的中山公园的钾镁温度为 82.5 ℃,比井口温度高 12 ℃;北京城区地热田的石英传导温度大致为 60.5 ℃~107.8 ℃,比实测温度高约 10 ℃~20 ℃,但靠近凹陷中心中山公园地热井和丰台帝京花园地热井石英传导温度分别为 101.8 ℃和 112.6 ℃,此处应该是北京城区地热田的最高温度。

表 4 北京市各地热田地球化学温标及实测温度

Tab. 4 The geothermometer and measured temperature in each geothermal field of Beijing Plain ℃

地热田	钾镁温标	石英温标	实测温度
延庆地热田	55.0~92.4	90.3~111.5	46.0~71.0
小汤山地热田	38.13~102.0	68.6~108.6	30.5~70.0
后沙峪地热田	42.9~92.2	66.5~117.2	32.5~85.0
西北城区地热田	59.2~81.2	63.4~121.1	35.2~76.0
天竺地热田	48.3~114.0	70.9~117.2	42.5~75.0
李遂地热田	46.3~74.3	72.4~81.7	22.0~55.0
东南城区地热田	43.1~107.8	60.5~119.1	30.6~88.0
双桥地热田	40.2~65.1	57.4~91.5	28.0~58.0
良乡地热田	52.5~62.9	61.1~110.3	31.5~72.0
凤河营地热田	66.9~136.6	70.5~154.2	46.0~118.5

注:无蒸汽损失的 SiO₂ 温标计算公式: $t = 1309 / (5.19 - \lg c_1) - 273.15$

(2) 钾镁地热温标计算公式: $t = 4410 / (13.95 - \lg(c_2^2/c_3)) - 273.15$

其中: c_1 表示热水中溶解的 H₄SiO₄ 形式的 SiO₂ 含量; c_2 表示水中钾的浓度; c_3 表示水中镁的浓度。

4 结论

(1) 北京市地热水化学类型自北部山区向南部平原依次可划分为 SO₄-Na 型、HCO₃-Na 型和 Cl-Na 型。大多数地热水中富含氟、偏硅酸等具有医疗价值的特殊成分。

(2) 北京地热水来源于外部圈层水,其形成与外部圈层冷水入渗补给过程中增温有关。与第四系冷水相比,地热水中 Na/K、Cl/F、Cl/B、Cl/SiO₂ 组分比受到蒸发浓缩或冷水稀释的影响较小,不同地热田地热水的组分比不同,反映出冷热水混入程度不同。

(3) 北京市各地热田中地热水绝大部分属于未成熟水,热水中水-岩之间未达到离子平衡状态,仅天竺和后沙峪地热田中少数几个水样属于部分成熟水。

(4) 北京地下热储温度通过采用无蒸汽损失的 SiO₂ 温标和 K/Mg 温标计算,分别为 57.4 ℃~154.2 ℃和 38.1 ℃~136.6 ℃,分别反映了地热水在地下深循环过程中曾经达到的温度和钻探可及温度,为北京市地热资源开发提供有力的水文地球化学依据。

参考文献(References):

[1] 宾德智,刘久荣,王小玲.北京地热资源[A].北京地热国际研讨会论文集[C].北京:地质出版社,2002:169-177.(BING Dezhi,LIU Jirong,WANG Xiaoling. Geothermal resources in

the area of Beijing[A].Proceedings of Beijing 2002 International Symposium[C].Beijing:Geological Publishing House,2002:169-177.(in Chinese)

- [2] 陈建平.北京地热资源管理研究[A].北京地热国际研讨会论文集[C].北京:地质出版社,2002:273-276.(CHEN Jiaping. Geothermal Management in the city of Beijing[A].Proceedings of Beijing 2002 International Symposium[C].Beijing:Geological Publishing House,2002:273-276.(in Chinese))
- [3] 杨亚军,潘小平.北京地热开发利用新范例—世界地热博览园[A].北京地热国际研讨会论文集[C].北京:地质出版社,2002:74-78.(YANG Yajun,PAN Xiaoping. A new pattern of Geothermal development and utilization in Beijing the world Geothermal natural science park[A].Proceedings of Beijing 2002 International Symposium[C].Geological Publishing House,Beijing:2002:74-78.(in Chinese))
- [4] 孙颖,刘久荣,韩征,等.北京市地热资源开发利用状况[J].安徽农业科学,2009,37(16):7564-7566.(SUN Ying,LIU Jirong,HAN Zheng,et al. Exploration and utilization status of geothermal resources in Beijing City[J].Journal of Anhui Agri.2009,37(16):7564-7566.(in Chinese))
- [5] 潘小平,王治.小汤山地热田热水地球化学特征[J].北京地质,1999(4):7-15.(PAN Xiaoping,WANG Zhi. The characteristics of the thermal water in Xiaotangshan geothermal field. Beijing Geology[J].1999(4):7-15.(in Chinese))
- [6] 刘久荣,潘小平,杨亚军,等.北京城区地热田某地热井热水地球化学研究[J].现代地质,2002,16(3):318-321.(LIU Jirong,PAN Xiaoping,YANG Yajun,et al. Long-term geochemistry changes of geothermal water from a geothermal well in the urban geothermal field, Beijing[J].Geoscience,2002,16(3):318-321.(in Chinese))
- [7] 吕金波,车用太,王继明,等.京北地区热水水文地球化学特征与地热系统的成因模式[J].地震地质,2006,28(3):419-429.(LYV Jirbo,CHE Yongtai,WANG Jirmin,et al. Hydrogeochemical characteristics of thermal water and genetic model of geothermal system in North Beijing[J].Seismology and Geology,2006,28(3):419-429.(in Chinese))
- [8] 柯柏林.北京城区地热田西北部地热地质特征[J].现代地质,2009,23(1):49-56.(KE Berlin. Characteristics of geothermal geology in the Northwestern Part of the urban Beijing geothermal field[J].Geoscience,2009,23(1):49-56.(in Chinese))
- [9] 北京市地质矿产局.北京市区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.(Bureau of Geology and Mineral Resources of Beijing Municipality. Regional Geology of Beijing Municipality[M]. Beijing:Geological Publishing House,1991.(in Chinese))
- [10] 王广才,张作辰,汪民,等.延怀盆地地下水与稀有气体的地球化学特征[J].地震地质,2003,25(3):421-429.(WANG Guangcai,ZHANG Zuochen,WANG Min,et al. Geochemistry of geothermal water and noble gases in Yanhuai Basin, China[J]. Seismology and Geology,2003,25(3):421-429.(in Chinese))
- [11] 潘小平,王治.小汤山地热田热水地球化学特征[J].北京地质,1999(4):7-15.(PAN Xiaoping,WANG Zhi. The characteristics of the thermal water in Xiaotangshan geothermal field[J].Beijing Geology,1999(4):7-15.(in Chinese))
- [12] 王海波,薛晓青,邵景力,等.内蒙古临河市地热田水化学研究[J].内蒙古农业大学学报,2013,34(1):102-104.(WANG

- Haibo, XUE Xiaqing, SHAO Jingli, et al. Study of geothermal field chemistry in Inner Mongolia Linhe Region[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2013, 34(1): 102-104. (in Chinese)
- [13] 温煜华, 王乃昂, 朱锡芬, 等. 天水及其南北地区地热水水化学特征及起源[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 668-673. (WEN Yihua, WANG Na'ang., ZHU Xifan, et al. Hydrochemistry of geothermal water in Tianshui and its Northern southern Area [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(6): 668-673. (in Chinese))
- [14] 黄伟斌, 潘树仁. 丁致中苏南地区地下热水的化学特征[J]. 江苏煤炭, 2001(6): 8-10. (HUANG Weibin, PAN Shuren, DING Shuren. Hydrochemistry of geothermal water in Surnan Area [J]. Scientia Energy Technology and Management, 2001(6): 8-10. (in Chinese))
- [15] 王莹, 周训, 于媛, 等. 应用地热温标估算地下热储温度[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 605-612. (WANG Ying, ZHOU Xun, YU Yuan, et al. Application of geothermometers to calculation of temperature of geothermal reservoirs [J]. Geoscience, 2007, 21(4): 605-612. (in Chinese))
- [16] 汪集旸, 熊亮萍, 庞忠和. 中低温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1993. (WANG Jiyang, XIONG Liangping, PANG Zhonghe. Low-medium temperature geothermal system of convective type [M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese))
- [17] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1988, 52: 2749-2765.
- [18] 于媛. 北京城区地热田地下水的水化学及同位素研究[D]. 北京: 中国地质大学水资源与环境学院, 2006. (YU Yuan. A study of hydrochemistry and isotopes in thermal groundwater in the urban geothermal field of Beijing [D]. Beijing: Schoole of Water Resources and Environment China University of Geosciences, 2006. (in Chinese))
- [19] Arnorsson S, Sigurdsson S, Svarvarsson H. The chemistry of geothermal water in Iceland I. Calculation of aqueous speciation from 0 to 370 °C [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1982, 46: 1513-1532.
- (上接第 308 页)
- [8] 陈坚, 娄红岩, 李娟. 大口径自由侧翻式拍门结构和撞击力计算[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 44-47. (CHEN Jian, LOU Hongyan, LI Juan, et al. Structure and impact force calculating of the Side turn over flap valve of large diameter [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 44-47. (in Chinese))
- [9] 王志祥, 李端明, 李娜, 等. 泵站不同类型拍门的开启角和撞击力分析[J]. 中国农村水利水电, 2012(7): 87-90. (WANG Zhixiang, LI Duaming, LI Na, et al. Opening angle and impact force analysis of different types flap valve in pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(7): 87-90. (in Chinese))
- [10] Anthony Spiteri Staines. Modeling and analysis of a cruise control system [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2008, 3(10): 652-656.
- [11] Demm DM, Hallman Eric. Power take off (PTO) safety [R]. Department of Agricultural and Biological Engineering, Cornell University, New York, 2009.
- [12] 杨帆, 周济人, 刘超. 泵装置拍门水力损失数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 108-112. (YANG Fan, ZHOU Jiren, LIU Chao. Numerical simulation and experiment of hydraulic loss of pump unit flap valve [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 108-112. (in Chinese))
- [13] 成立, 刘超. 大型泵站水力稳定性探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(2): 75-77. (CHENG Li, LIU Chao. A discussion on the hydraulic stability of large pumping station [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(2): 75-77. (in Chinese))
- [14] 何志坚, 叶锋. 侧向式拍门流态分析及能效估算[J]. 陕西水利, 2013: 119-120. (HE Zhijian, YE Feng. Flow analysis and efficiency estimation of lateral flap valve [J]. Shanxi Water Resources, 2013: 119-120. (in Chinese))
- [15] 朱红耕, 冯汉民. 拍门水头损失系数试验研究[J]. 排灌机械, 1994(3): 49-51. (ZHU Honggen, FENG Hanmin. Experimental study on hydraulic loss coefficient of flap valve [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1994(3): 49-51. (in Chinese))