

良乡地热田地热水化学特征及同位素分析

刘颖超, 刘凯, 孙颖, 刘久荣, 郭高轩

(北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195)

摘要: 通过对良乡地热田中地热地质条件、地热水化学资料及 δD 、 $\delta^{18}O$ 、 3H 、 ^{14}C 同位素的研究, 阐述了良乡地热田地热水的起源、地热水的变质与演化、同位素水文特征。研究表明: 良乡地热田中地热水化学类型以 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Ca \cdot Na \cdot Mg$ 型为主, 同时地热水中含有氟、偏硅酸等多种有医疗价值的特殊组分; 通过对地热水离子浓度分析, 良乡地热田中地热水具有入渗溶滤水特征, 为初期变质水。从水-岩平衡状态上看, 地热田中地热水为未成熟水; 依据主要离子浓度和同位素分析, 良乡地热田中地热水为地热热源水和来自北京迭断陷西南方向现代循环水补给的混合型; 依据放射性同位素 3H 与 ^{14}C 确定了良乡地热田中地热水年龄为 $38\ 960 \pm 630$ a; 依据氢氧稳定同位素计算了地热水补给高程为 620~730 m, 推断补给区来源于北京市西南房山区相对高程较小的中-低山区。

关键词: 地热水; 水化学特征; 同位素; 良乡地热田

中图分类号: P314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0963-05

Hydrochemical characteristics and isotope analysis of geothermal water in Liangxiang geothermal field

LIU Ying chao, LIU Kai, SUN Ying, LIU Jiurong, GUO Gaoxuan

(Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China)

Abstract: According to the geothermal settings, hydrochemical data, and research on the isotopes of δD , $\delta^{18}O$, 3H , ^{14}C in geothermal water in the Liangxiang geothermal field, the origin, metamorphism and evolution, and hydrological characteristics of isotopes of geothermal water were investigated. The results suggested that (1) the hydrochemistry type of geothermal water in the Liangxiang geothermal field is mainly $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Ca \cdot Na \cdot Mg$, and the geothermal water contains mineral components with medical benefits, especially chlorine and metasilicic acid; (2) according to the analysis of ion concentrations, the geothermal water is lixiviated and belongs to initially metamorphic water; (3) the geothermal water is immature based on the water rock balance status; (4) the geothermal water is mainly formed by the mixing of geothermal heat source water and modern circulating water supply from the southwest of Beijing multiphase fault subsidence; (5) the age of geothermal water is about $38\ 960 \pm 630$ years based on the isotope analysis of 3H and ^{14}C ; and (6) the recharge elevation of the geothermal water is about 620 to 730 m according to the stable isotope calculations of oxygen and hydrogen, and the recharge source is the mountain area with relatively lower elevations in the southwest of Beijing.

Key words: geothermal water; hydrochemical characteristics; isotope; Liangxiang geothermal field

良乡地热田是北京十大地热田之一, 其地热开发历史可追溯到 20 世纪 50 年代, 是北京地区最早人工凿井发现地下热水的地区之一。1959 年在良乡城东北关 70 余 m 深钻孔中获得 35 °C 热水, 揭示了良乡地区赋存有地热资源的地质条件^[1]。20 世纪 90 年代初在广阳城附近获得 55 °C 的地热水, 改变了良乡地区地热水温度较低的看法, 而后又在 2 800 m 钻井深度获得 72 °C 左右的地热水。目前良乡地热已广泛应用在地热供暖、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, 这与常温地下水贮存在普通含水层中具有决然不同地球化学环境, 特定的地球化学环境造就了特定的地下热水。地热水的水化学特征研究可以揭示地热流体的来源、成因、运移储存状态以及与地热地质条件相关的信息等。 δD 、 $\delta^{18}O$ 同位素是研究地热水来源及其成因的理想天然示踪剂, 通过测定地热水中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 同位素指标, 并与全球大气降水分馏线或地方分馏线进行对比,

收稿日期: 2014-10-31 修回日期: 2015-04-29 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2041.020.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

可判别地热水的补给来源、补给高程、补给区域等^[5-7]。良乡地热田地热水地球化学特征及同位素的研究,对良乡地区地热资源勘查评价和开发利用具有指导意义。

1 地热地质条件

1.1 地质构造特征

良乡地热田位于房山区和丰台区永定河以西地区,总面积约 475.77 km²,呈北东向展布,主要热储为蓟县系雾迷山组。在构造上处于北京迭断陷西南段的坨里-丰台迭凹陷和琉璃河-涿县迭凹陷。北京迭断陷西北侧为西山叠拗褶,东南侧为大兴隆起,形成了北京地区“两隆一凹”的构造格局。坨里-丰台迭凹陷和琉璃河-涿县迭凹陷都是北京迭断陷的中心组成部分(图 1)。由于受区域地质构造的影响,褶皱、断裂发育。地热田主要受黄庄-高丽营断裂、八宝山断裂、南苑-通县断裂、永定河断裂、琉璃河断裂和南公义断裂控制。南侧以南苑-通县断裂为界,东北以永定河断裂为界与东南城区地热田毗邻,西侧黄庄-高丽营断裂、八宝山断裂为界。这些断裂对地热资源及地层岩性的分布起到了控制作用。

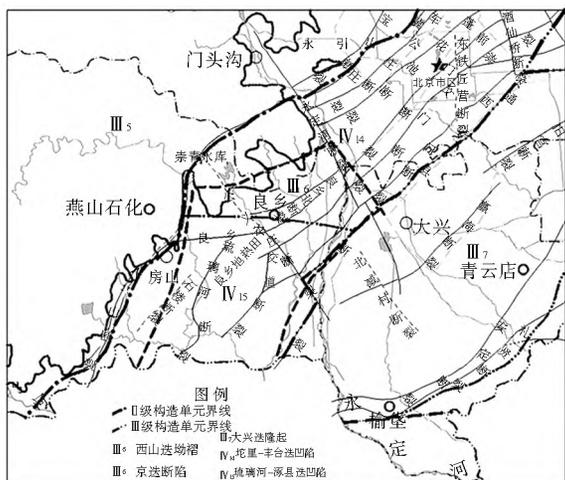


图 1 良乡地热田构造单元划分略图

Fig. 1 Classification of tectonic units in the Liangxiang Geothermal field

1.2 热储及盖层特征

良乡地热田主要热储为蓟县系雾迷山组,其顶板在热田

最大埋深约为 2 500 m,最浅在良乡镇昊天塔附近直接出露于地表,由此向四周热储顶板埋深由浅到深。地热田盖层为蓟县系雾迷山组之上的地层,主要由导水性及渗透性差的第四系、新近系及白垩系地层组成。第四系厚度较薄,新近系地层分布于热田东部边缘,白垩系基本分布于全区内,主要由泥岩、砂岩及含水性差的砂砾岩组成且厚度较大,为热田的主要盖层。地热田范围内盖层越厚,地热水的“性能”就越好,在“良乡凸起”顶部,盖层很薄,热储温度相对较低,向其四周尤其南北两侧,随着热储层埋深深度的增加,地热井的出水温度也随之升高,目前地热井井口水温在 36℃~69.5℃之间。

2 水化学及同位素化学特征

本文收集以往地热水、基岩水、第四系、冷泉水水文地球化学数据 34 组;氢氧稳定同位素资料 38 组;补充地热水样品 6 件、同位素样品 6 件。通过各水样的水文地球化学数据及同位素资料,分析良乡地热田地热水的水文地球化学特征、地热水的起源、地下热水的变质与演化、同位素特征,为良乡地热田的合理开发、利用提供可靠的依据。

2.1 水文地球化学特征

地热田为一个特定温度条件下形成的化学系统,其水文地球化学特征是该系统的热水-岩石达到平衡状态的反映^[8]。良乡地热田主要为蓟县系雾迷山组储层热水,属于碳酸盐岩岩溶裂隙水,热水多清澈透明,略带硫化氢气味,有良好的感观。地热水温 36℃~69.5℃,属于低温热水。地热水矿化度为 483~770 mg/L,属于低矿化度热水。pH 值 7.16~8.07,属于弱碱性水。从地热水化学特征(表 1)可以看出,地热水中阳离子以 Ca²⁺、Na⁺ 为主,其含量为 55.7~78.2 mg/L 和 61.4~74.9 mg/L;阴离子以 HCO₃⁻、SO₄²⁻ 为主,其含量为 213.6~293.0 mg/L 和 121~136 mg/L。地热水的水化学类型以 HCO₃·SO₄·Na·Ca·Mg、HCO₃·SO₄·Ca·Na·Mg 型为主。地热水中的 CO₂ 主要以水溶性 HCO₃⁻ 形式存在。同时地热水中含有氟、偏硅酸、偏硼酸等特殊组分,含量明显高于常温(冷)地下水,绝大部分水中氟含量(2.94~5.4 mg/L)、偏硅酸含量(2.94~5.4 mg/L)达到医疗价值浓度标准。

表 1 部分地热水样地球化学分析结果

Tab. 1 Geochemical characteristics of some geothermal water samples

| 井号 | 离子含量/(mg·L ⁻¹) | | | | | | | | | pH 值 | 温度(℃) | 水化学类型 |
|-----|----------------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|--|------|-------|---|
| | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | F ⁻ | H ₂ S ₂ O ₃ | | | |
| RS1 | 11.9 | 66.2 | 55.7 | 23.1 | 213.6 | 25.6 | 136 | 4.78 | 42.5 | 8.02 | 69.5 | HCO ₃ ·SO ₄ ·Na·Ca·Mg |
| RS2 | 12.1 | 61.4 | 73.7 | 27.3 | 247.7 | 40.1 | 128 | 2.94 | 30.4 | 8.07 | 40.5 | HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Na·Mg |
| RS3 | 10.3 | 63.8 | 78.2 | 26.1 | 293.0 | 47.7 | 133 | 5.00 | 39.0 | 7.44 | 36.0 | HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Na·Mg |
| RS4 | 11.6 | 62.1 | 64.5 | 26.4 | 242.9 | 29.6 | 128 | 4.05 | 30.2 | 8.07 | 38.7 | HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Na·Mg |
| RS5 | 10.8 | 61.5 | 65.5 | 24.9 | 266.0 | 30.2 | 127 | 3.99 | 30.6 | 7.72 | 39.2 | HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Na·Mg |
| RS6 | 11.8 | 57.9 | 70.1 | 25.5 | 270.9 | 27.7 | 132 | 4.68 | 34.3 | 7.92 | 42.0 | HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Na·Mg |
| RS7 | 9.4 | 70.8 | 56.1 | 22.5 | 255.0 | 29.9 | 123 | 5.40 | 36.7 | 7.43 | 50.0 | HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Na·Mg |
| RS8 | 10.0 | 74.9 | 66.1 | 27.6 | 287.0 | 49.2 | 122 | 5.00 | 19.5 | 7.40 | 48.0 | HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Na·Mg |
| RS9 | 11.1 | 64.2 | 58.5 | 22.8 | 252.6 | 24.8 | 121 | 4.89 | 33.0 | 7.92 | 45.7 | HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Na·Mg |

良乡地热田的西北山区冷泉水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 为主; 第四系水化学类型 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 为主; 基岩水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 为主, 部分 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$; 热田内部蓟县雾迷山组地热水以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型为主。在地热水化学成分三线图(图2)上, 山区冷泉水、第四系、基岩水都位于三线图的左侧, 良乡地热田地热水位于三线图的中央偏左上部位。从离子浓度上看, 山区冷泉水、地热水阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主, 沿着北京迭凹陷向东北方向阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 逐渐减少, Na^+ 离子浓度逐渐增加。

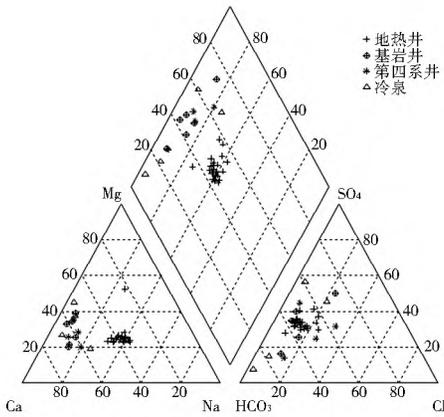


图2 良乡地热田水化学 Piper 图解
Fig. 2 Piper diagram of geothermal water in the Liangxiang Geothermal field

2.2 地热水的起源

兰格利尔-路德维奇图解常用来分析地热水的来源, 它是由水中常见的八种主要化学元素组合而成的图示, 简称八大元素图(钾、钠、钙、镁四种阳离子和重碳酸根、碳酸根、硫酸根及氯根四种阴离子的毫克当量百分数组成), 图中左上方反映较纯的地热水, 它们是很少被近代大气降雨混合的地热水; 图中右下方则反映主要受近代大气降雨而形成的地下水; 中间部分反映表示二者的混合, 越靠近左上角反映地热水占的比例越大, 反之靠近右下角表示大气降雨混入的较多^{[9][11]}。根据统计的山区基岩井、山区冷泉、山前第四系井、东南城区地热田和良乡地热田地热水水质结果, 良乡地热田各地热井分布在图中心偏右下方(图3), 在山区基岩井、山区冷泉、山前第四系井和东南城区地热田中间, 说明良乡地热田地热水混入了较多的近代大气降水, 是地热水源水和补给凉水的混合型, 比城区地热水更接近凉水补给区, 同时显示北京迭断陷内的良乡、东南城区地热田地热水接受近代大气降水的来源为西南方向。

水样中不同元素的比值也可以判断水的来源, 原水与后期混入的水混合后, 某些元素组分的比率不会受到干扰, 能够比较真实反映原水的化学特征。本文以规律比较明显的 Na/K 离子比来解释良乡地热田内地热水运动方向。 Na/K 比的低值反映水的高温条件, 根据地热水质结果, 良乡地热田 Na/K 比在 4.91~7.83 内, 从 Na/K 比等值图上(图4)可以看出, 西南低, 东北高, 东南城区地热田地热水 Na/K 比在 7.26~40.46 之间, 大于良乡地热田地热水比值, 表明热水源来自良乡地热田西南侧, 沿北京迭断陷向东北方向的东南城

区地热田补给。

2.3 地热水的变质与演化

地下水的变质是指水化学成分之间相互反应引起离子组合比例变化的过程, 可用强酸根与弱酸根的比例(K)和溶液的离子强度(I)定量表征水化学成分的变质程度。

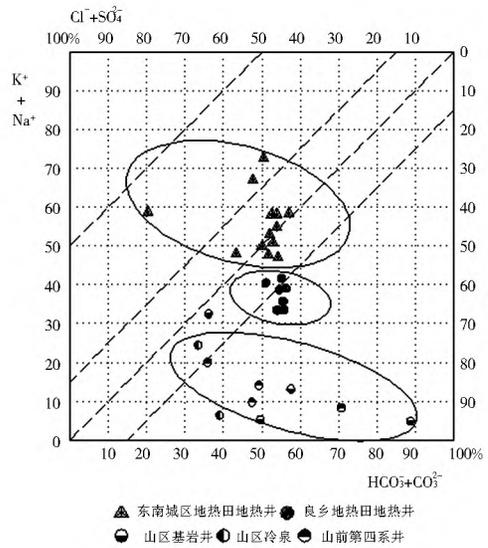


图3 兰格利尔-路德维奇图解

Fig. 3 Langelier-Ludwig diagram of geothermal water

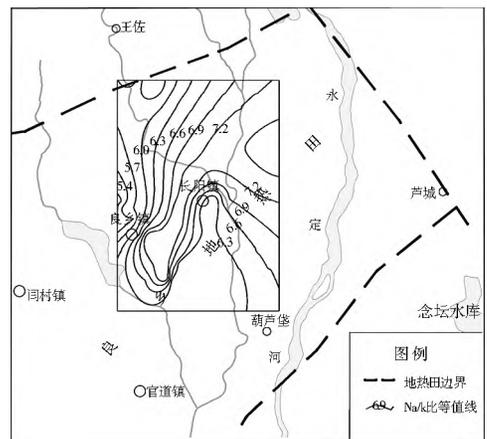


图4 良乡地热田 Na/K 等值线图

Fig. 4 Na/K diagram of geothermal water in the Liangxiang Geothermal field

$$K = \frac{C_{(\text{SO}_4^{2-})} + C_{(\text{Cl}^-)}}{C_{(\text{HCO}_3^-)} + C_{(\text{HSiO}_3^-)}} \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i Z_i^2 \quad (2)$$

式中: $C_{(\text{SO}_4^{2-})}$ 、 $C_{(\text{Cl}^-)}$ 、 $C_{(\text{HCO}_3^-)}$ 、 $C_{(\text{HSiO}_3^-)}$ 分别为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 HSiO_3^- 的浓度; C_i 为离子体积摩尔浓度; Z_i 为离子的电价。

由式(1)、式(2)计算良乡地热田地热水: $K = 0.5 \sim 0.6$, $I = 0.01 \sim 0.02$ 。根据别而亚柯夫 1970 年提出的按 K 及 I 分类水质变质程度分类方案^[12], ($K \leq 0.5$, $I < 0.006$, 为未变质水; $0.5 < K \leq 4.0$, $0.01 < I < 0.04$, 为初期变质水; $4.0 < K \leq 60.0$, $0.05 < I < 0.20$, 为中度变质水; $K \geq 60.0$, $I > 0.20$, 为高度变质水), 该地热田地热水应属于初期变质水。表明地下热水中化学成分之间已经发生了一些反应, 包括易溶盐的

溶解、难溶盐 CaCO₃ 的沉淀以及水中离子与含水介质离子的交换反应等。

地热水化学成分的形成和演化是含水层介质的化学成分、水化学作用、沉积环境及水循环等诸多因素共同作用的结果^[13]。良乡地热田地热水是在漫长的地质历史发展过程中各种自然因素综合作用的结果,水文地质条件对地热水的形成起了主要作用。地热水成因系数 $V_{Na}/V_{Cl} = 2.06 \sim 4.00$, $Ca/Sr = 30.00 \sim 51.94$, $V_{Ca}/V_{Mg} = 1.23 \sim 1.97$, $(V_{HCO_3} + V_{SO_4})/V_{Cl} = 1.82 \sim 9.52$, 除 Ca/Sr 个别小于海水系数外,其它均大于海水系数,反映该地热田地热水具有入渗溶滤水特征^[14]。地热水中含有丰富氟、偏硅酸等的微量元素,其含量受围岩性质、水动力条件及热水组分的影响。这也表明地下水经过漫长而复杂的地下溶滤作用和不断的循环径流交替形成的。这些作用的结果使地下水中的阴离子成分由第四系、基岩井 HCO₃⁻ 为主,由于白云岩地层中膏盐含量较大,在热储温度、压力和盐度长期作用下,膏盐逐渐溶解,导致地下热水中 Ca²⁺、SO₄²⁻ 浓度增大,地热水中阴离子转化为以 HCO₃⁻ 及 SO₄²⁻ 为主;山区冷泉以 SO₄²⁻ 及 HCO₃⁻ 为主;阳离子成分由第四系、基岩井 Ca²⁺、Mg²⁺ 为主,逐步转化为 Ca²⁺、Na⁺ 为主。此外地热水中的氟、偏硅酸等离子含量明显高于地下冷水,这些离子含量的特征表明它们来自地层深部,经过长时间的水-岩相互作用形成的。

1988 年, G iggerbach 首先提出了 Na-K-Mg 三角图解,用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的水样,在三角图中分为完全平衡、部分平衡和未成熟水三个区域^[15]。Na-K-Mg 三角图解可以应用于预测水-岩的平衡温度,也适用于地热水的离子溶质温标计算。将地热水化学数据结果标记在从 Na-K-Mg 三角图上,三角图代表了不同平衡状态,次生石英、长石、云母在不同温度下,Na、K、Mg 的相对分配状态^[15]。从图 5 上可以看出,良乡地热田内地热水的温度不高于 80 °C,且都为未成熟水。表明地热水中水-岩之间尚未达到离子平衡状态,溶解作用仍在进行,或热水受到了冷水的混合。

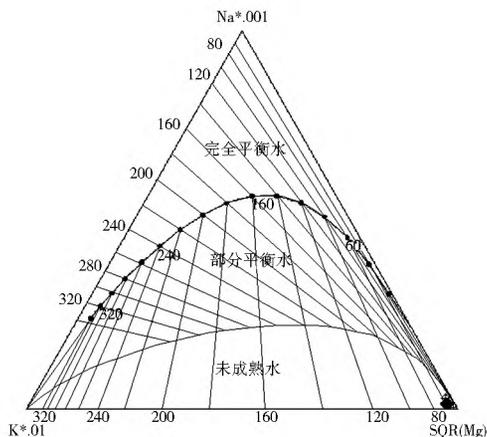


图 5 水样的 Na-K-Mg 三角图

Fig. 5 Na-K-Mg triangular diagram of geothermal water

2.4 同位素特征分析

在地下水研究中,同位素技术是研究地下水资源属性的重要有效工具^[16],通过测定地热水中的稳定同位素¹⁸O、²H

和放射性同位素³H、¹⁴C 研究地热水的成因、年龄以及补给来源等^[17]。

2.4.1 稳定性同位素特征

本次采用冷水、地热水的采样分析及资料收集,建立了良乡地热田大气降水与地热水 δD 和 δ¹⁸O 关系图(图 6)。从图上可以看出,良乡地热田地下热水中 δ¹⁸O 值介于 -9.47‰~ -10.22‰,δD 值介于 -73.30‰~ -76.10‰;第四系及基岩冷水的 δ¹⁸O 值-8.50‰~ 10.34‰,δD 值介于 -61.0‰~ -77.3‰之间;大气降水的 δD 值为-7.82‰,δ¹⁸O 值为-58.9‰。北京地区地热水、第四系地下水、基岩裂隙冷水、大气降水的 δD 和 δ¹⁸O 同位素数据基本上都落在北京大气降水线附近,这说明北京地区的地热水是大气起源,只是因降水补给的高程、径流途径不同而异。地热水 δ¹⁸O 表现出轻微的“氧漂移”,说明地热水与围岩之间反应不强烈。

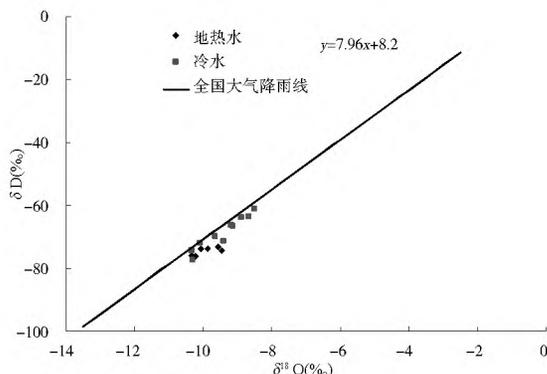


图 6 良乡地热田热水 δD 和 δ¹⁸O 关系

Fig. 6 Relationship between δD and δ¹⁸O of geothermal water in the Liangxiang geothermal field

2.4.2 放射性同位素特征

³H 为水中放射性同位素,依据其质量浓度可粗略确定地下热水的年龄^[18],指示意义在于可以区分识别现代溶滤水,提供有现代循环水混入的同位素证据。¹⁴C 测年的指示意义在于识别不同地质年代下热储流体的形成,将古地质环境下热储流体的滞留时间量化,为热储流体的起源成因及确定同位素水文地球化学演化所经历的地质年代提供依据^[19-21]。

根据对地热田中地热水³H 取样,分析结果为小于 6 Tu,与 20 世纪 50 年代相似纬度地区附近公布的氚值对比,经计算认为良乡地热田水中有 1954 年前后大气降雨的成分,即地热水循环时间超过 60 a。根据¹⁴C 测定结果良乡地热田地热水年龄为 38 960 ± 630 a,是在晚更新世期间形成的。放射性同位素³H 与¹⁴C 共存的事实表明良乡地热田的地热水中混入了现代循环水,为混合型热水。

2.4.3 补给高程的确定

大气降水的氢、氧同位素组成具有高度效应,δD 值随地下水补给高程的增大而减小,利用式(3)可计算地下热水的补给高程^[22]。

$$H = h + (\delta G - \delta P) / K \quad (3)$$

式中:H 为补给区标高(m);h 为取样地区标高(m);δG 为热水中的 δD 值(‰);δP 为取样点附近大气降水的 δD 值(‰);K 为同位素高度梯度(-δ/100 m)

其中北京市大气降水的 δD 为 -58.9% , K 为同位素高度梯度, 相应于海拔高度每变化 100 m 的 δ 值的变化, 其中 δD 取 -3% / 100 m , 经计算良乡地热田地热水的补给高程在 $620\sim 730\text{ m}$ 之间。

2.4.4 补给区的确定

依据氢氧同位素计算的补给高程, 结合地热水起源分析结果及当地地形、地貌, 补给区很可能在北京房山西南部相对高程大于 620 m 的山区。山区内有大面积蓟县系碳酸盐出露地表, 在漫长的地质历史时期它们长期裸露地表, 接受大气降水的补给, 区内断裂、裂隙较为发育, 山区的大气降水可从地表直接沿断裂、裂隙向地下深处渗流汇聚, 下降过程中不断对围岩进行溶滤, 使基岩冷水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子浓度增大, 水中 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度也增大, 水流在向下运移过程中, 经地壳深处上来的“热”逐渐加温成天然热水。由于白云石溶解度随着温度的增高而降低, 地热水中白云石可能达到过饱和状态而产生沉淀, 加上水中离子与含水离子的交换等, 使地热水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相对基岩减小, Na^+ 浓度逐渐增大。同时地热水对围岩进行不断的溶滤作用及发生各种物理、化学变化, 使地热水中富含氟、偏硅酸、锶等各种物质组分。

3 结论

良乡地热田地热水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型为主, 地热水中阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主。同时地热水中含有氟、偏硅酸等特殊成分, 其含量明显高于基岩冷水, 具有良好医疗价值。

良乡地热田中地热水混入了较多的近代大气降水, 是地热水源水和补给凉水的混合型, 其化学成分是在地下水长期径流及深循环过程中各种水化学作用的结果, 根据地热水中离子浓度分析了地热水属于入渗溶滤水、初期变质水。从水岩平衡状态上看, 地热田内地热水为未成熟水, 溶解作用仍在进行, 或热水受到了冷水的混合。

良乡地热田地热水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -9.47% ~ -10.22% 之间, δD 值介于 -73.30% ~ -76.10% 之间。依据主要离子浓度和氢氧稳定同位素分析, 地热水来源于北京叠断陷西南方向大气降水的补给; 依据放射性同位素 ^3H 与 ^{14}C 确定了良乡地热田地热水年龄为 38960 ± 630 年, 为地热水中混入了现代循环水, 为混合型热水; 依据氢氧稳定同位素计算了地热水补给高程为 $620\sim 730\text{ m}$, 推断补给区来源于北京市西南房山区相对高程较小的中-低山区。

参考文献(References):

[1] 潘小平, 郑克棣. 北京地热: 成就与展望[A]. 中国地热能: 成就与展望—李四光倡导中国地热能开发利用40周年纪念大会暨中国地热发展研讨会论文集[C]. 北京, 2010: 99-103. (PAN Xiaoping, PAN Xiaoping, ZHENG Kexian. Geothermal water in Beijing: Achievements and prospects[A]. Proceedings of the Development of Chinese Geothermal[C]. Beijing, 2010: 99-103. (in Chinese))

[2] 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))

- [3] 增瑞祥, 王治, 张进平, 等. 北京良乡地区地热资源及其开发利用现状[A]. 北京地热国际研讨会论文集[C]. 北京: 地质出版社, 2002: 169-177. (ZENG Ruixiang, WANG Zhi, ZHANG Jirping, et al. Geothermal resources and exploitation in the area of Liangxiang, Beijing[A]. Proceedings of Beijing 2002 International Symposium[C]. Geological Publishing House, Beijing: 2002: 169-177. (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] 张保健, 徐军祥, 马振民, 等. 运用 H、O 同位素资料分析地下热水的补给来源—以鲁西北阳谷—齐河凸起为例[J]. 地质通报, 2010, 29(4): 603-609. (ZHANG Baorjian, XU Junxiang, MA Zhengmin, et al. Analysis on groundwater supply sources using hydrogen and oxygen isotope data—a case study of Yanggu Qirhesalient, northwestern Shandong, China. Geological Bulletin of China, 2010, 29(4): 603-609. (in Chinese))
- [6] 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, 1999(4): 7-15. (in Chinese))
- [7] 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 Naiang, ZHU Xifan, et al. Hydrogeochemistry of geothermal water in Tianshui and its northern southern area. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(6): 668-673. (in Chinese))
- [8] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993. (SHEN Zhaoli. Introduction to Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. (in Chinese))
- [9] 增瑞祥, 柳志国, 王丹英, 等. 北京市房山区良乡地区地热资源综合评价报告[R]. 北京市地质工程勘察院, 2000. (ZENG Ruixiang, LIU Zhiguang, WANG Danying, et al. Comprehensive evaluation of geothermal resources in the Liangxiang district of Beijing[R]. Beijing Institute of Geological Engineering, 2000. (in Chinese))
- [10] 张勇, 邹登亮, 李宇, 等. 北京地热[M]. 北京: 中国大地出版社, 2010. (ZHANG Yong, ZOU Dongliang, LI Yu, et al. Beijing Geothermal Water[M]. Beijing: China Land Press, 2010. (in Chinese))
- [11] 刘宗明, 吴梦源, 刘颖超. 特定地热地质条件对地热资源富集研究实例—以北京市昌平区郑各庄地区为例[J]. 城市地质, 2014, 9(增刊): 30-34. (LIU Zongming, WU Mengyuan, LIU Yingchao. Case studies on the specific geothermal condition in the geothermal resources enrichment area—Take Zhenggezhuang region in the Changping District of Beijing as an example. Urban Geology, 2014, 9(Z1): 30-34. (in Chinese))

(下转第 994 页)

- Hydraulic Engineering, 1994, 25(2): 31-40. (in Chinese))
- [9] 王文川, 徐冬梅, 邱林. 水库正常蓄水位选取的多目标可变模糊优选方法[J]. 水电能源科学, 2012, 30(2): 53-55. (WANG Wen chuan, XU Dong mei, Qiu Lin. Multi objective variable fuzzy optimization method for selection of normal water level of reservoir[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(2): 53-55. (in Chinese))
- [10] 陈洁荣, 郭瑜. 区域水资源承载能力的模糊优选评判分析及其在张掖地区的应用[J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 1-5. (CHEN Jie rong, GUO Yu. Analysis on fuzzy optimized judgment of regional water resources carrying capacity and its application in Zhang ye District[J]. Water Resources and Hydro power Engineering, 2012, 43(3): 1-5. (in Chinese))
- [11] 崔荃, 曹海涛, 高媛媛. 南水北调西线调水对生态环境影响的宏观分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(5-6): 495-500. (CUI Quan, CAO Hai tao, GAO Yuan yuan. Macroscopic analysis on eco environmental impact of the western line of the South to North water transfer project[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2009, 45(5-6): 495-500. (in Chinese))
- [12] ZHAN Ran hang, CHEN Shou yu. Fuzzy pricing for urban water resources: Model construction and application[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(3): 458-466.
- [13] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2009. (CHEN Shou yu. Theory and model of variable fuzzy sets and its application[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [14] WANG Ling he, YAN Deng hua, WANG Hao, et al. Impact of the Yalong Yellow River water transfer project on the environment in Yalong River Basin[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(4): 831-842.
- [15] 金鑫, 严登华, 王浩, 等. 面向流域系统的生态需水整合研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(12): 1658-1667. (JIN Xin, YAN Deng hua, WANG Hao, et al. Study on integrated calculation of ecological water demand for basin system[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 41(12): 1658-1667. (in Chinese))
- [16] 陈守煜. 多目标决策系统模糊优选理论、模型与方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, 22(3): 136-140. (CHEN Shou yu. A fuzzy optimum theory, model and approach for multiobjective decision making systems[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2001, 22(3): 136-140. (in Chinese))

(上接第 967 页)

- [12] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993. (CHEN Jing sheng. Aquatic Environmental Chemistry[M]. Beijing: High Education Press, 1993. (in Chinese))
- [13] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1988. (CHEN Mo xiang. Huabei Geothermal[M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese))
- [14] 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1999. (SHEN Zhao li, ZHU Wan hua, ZHONG Zuo shen. Introduction to Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. (in Chinese))
- [15] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1988, 52: 2749-2765.
- [16] 文东光. 用环境同位素论区域地下水资源属性[J]. 地球科学, 中国地质大学学报, 2002, 27(2): 141-147. (WEN Dong guang. Groundwater resources attribute based on environmental isotopes[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 141-147. (in Chinese))
- [17] 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. (LYU Jin bo, CHE Yong tai, Wang Ji ming. 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))
- [18] 卫克勤, 林瑞芬. 氚在年代学研究中的应用[A]. 年轻地质体系的年代测定[C]. 北京: 地震出版社, 1991: 174-186. (WEI Ke qin, LIN Rui fen. Application of tritium on chronology research[A]. Chronological Dating on Young Geological System[C]. Seismological Press, Beijing, 1991: 174-186. (in Chinese))
- [19] 马致远, 钱会. 环境同位素地下水文学[M]. 西安: 陕西科技出版社, 2004. (MA Zhi yuan, QIAN Hui. Environmental Isotope and Geohydrology[M]. XIAN: Shanxi Science and Technology Press, 2004. (in Chinese))
- [20] 钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005. (QIAN Hui, MA Zhi yuan. Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [21] 马致远, 余娟, 李清, 等. 关中盆地地下水环境同位素分布特征及其水文地质意义[J]. 地球科学环境学报, 2008(6): 396-401. (MA Zhi yuan, YU Juan, LI Qing, et al. Environmental isotope distribution and hydrologic geologic sense of Guanzhong basin geothermal water. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008(6): 396-401. (in Chinese))
- [22] 李娟. 地下热水中 D、¹⁸O、³⁴S 和 ¹³C 稳定同位素特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2008. (LI Juan. A study of D, ¹⁸O, ³⁴S and ¹³C stable isotope in geothermal water[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese))