

北京城区地热田西北部地热地质特征

柯柏林^{1,2}

(1. 北京市地质勘察技术院, 北京 102218; 2. 北京市华清地热开发有限责任公司, 北京 102218)

摘要: 自2001年在北京大学成功打成地下热水井后, 北京西部隆起区的地热勘探开发受到重视。通过对区域地质背景条件的介绍, 根据地热井钻探揭露的地热地质成果, 对研究区的热储构造条件、地热地质特征及地下热水地球化学特征进行了分析研究。结果表明, 八宝山断裂的性质具有先逆断层后正断层的多期活动性特征; 研究区蓟县系雾迷山组白云岩为鼻状背斜凸起型热储构造; 深部热流主要沿着黄庄—高丽营断裂的上盘向上传导聚集; 浅部古生界碳酸盐岩地层富集强径流冷地下水的作用使青白口系的地温梯度高于北京平原区, 纵向地温场坡度较北京平原区大; 临近深大断裂构造带导致地下热水具有放射性镭含量高的特征; 地下热水的¹⁴C年龄特征反映城区地热田接受西部隆起区地下水的补给很少; 地热井水头分布趋势反映雾迷山组白云岩热储地下热水受黄庄—高丽营断裂阻隔后由南向北方向径流。

关键词: 地热; 热储构造; 蓟县系雾迷山组; 地下热水年龄; 北京

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2009)01-0049-08

Characteristics of Geothermal Geology in the Northwestern Part of the Urban Beijing Geothermal Field

KE Bai-lin^{1,2}

(1. Beijing Institute of Geo-exploration and Technology, Beijing 102218, China;

2. Beijing Huaqing Geothermal Exploitation Company Ltd, Beijing 102218, China)

Abstract: More attention has been paid to the investigation and development of geothermal resources in the northern uplift of the urban Beijing geothermal field since the geothermal well in Peking University was successfully drilled in 2001. Regional geological conditions of the study area are described in this paper. Based on geological survey of several geothermal wells, the structure of geothermal reservoirs, geothermal geological characteristics and hydrochemistry of thermal groundwater are also examined. The results show that the Babaoshan fault is characterized by multi-activity from a reverse fault to a normal fault and the geothermal reservoir consisting of dolomite of the Wumishan Group of the Jixian System is a nose-type-anticline uplift. Conductive heat flow from beneath mainly flows along the hanging wall of the Huangzhuang-Gaoliying fault. The cold groundwater in the shallow carbonate of Palaeozoic age causes the geothermal gradient of the Qingbaikou reservoir higher than that in the Beijing plain. Thermal groundwater near the deep and huge faults has high Ra contents. ¹⁴C age of the hot water indicates that little recharge occurred in the western uplifted mountain area. Hydraulic heads at the geothermal wells reflect a flow trend from south to north of thermal groundwater in the Wumishan Group due to the obstructing of the Huangzhuang-Gaoliying fault.

Key words: geothermal energy; geothermal reservoir; the Wumishan Group of the Jixian System; age of thermal groundwater; Beijing

收稿日期: 2008-12-16; 改回日期: 2009-01-18; 责任编辑: 楼亚儿。

作者简介: 柯柏林, 男, 高级工程师, 1965年出生, 地质学专业, 现从事水文地质及地热资源勘查和研究工作。

Email: kebailin@sina.com。

0 引言

2001 年在北京大学勘查钻探成功了京热-119 地热井^{[1]①}, 开始了北京西部隆起区地热资源勘探开发的历史。北京大学对地热的向往始于 20 世纪 70 年代初, 该校地热组曾设计了一眼 3 000 多米深的地热井, 但由于资金和施工技术方面的困难没有实施。研究区处于京西隆起的边缘地带, 传统上认为该区是北京凹陷地热田的冷水补给区, 加之浅部古生界奥陶系及寒武系碳酸盐岩中冷水资源非常丰富, 地热增温率很低, 按古生界地层的地热增温率推算, 深部蓟县系难以形成较高温度的地下水。为此, 京热-119 地热井的勘探难度和风险很大, 钻探施工过程困难, 对地层时代判别的认识差异较大, 受到了政府地热管理部门及北京大学地热专家的高度重视。近年来, 研究区先后钻探成功 7 眼地热井, 随着深部地热物探勘查及钻孔资料的增多, 逐步提高了对以北京大学为中心的北京城区西北部地热地质条件的认识。2007 年北京大学又钻探了第二眼地热井(京热-168), 利用温泉水解决了北京大学几万名学生的洗浴及部分生活热水问题, 特别是为 2008 奥运乒乓球馆提供了温泉热水。本文根据实际地热勘查资料对该地区地热地质特征进行分析和总结。

1 区域地热地质背景

1.1 研究区的地热资源分布位置

北京市分布有较为丰富的中低温地热资源, 分为 4 个地热异常带、10 个地热田, 在平原区基岩中地下热水的分布明显受断裂构造的控制^[2-6]。研究区东接北京叠陷构造单元内的城区地热田(V), 北邻西山叠拗褶构造单元内的沙河地热田(II)(图 1)。研究区浅部奥陶系和寒武系碳酸盐岩地层赋存有非常丰富的冷水资源, 地热增温率低, 蓟县系雾迷山组白云岩热储埋藏深度大, 岩溶发育具有不均一性^[7], 加之地质构造十分复杂, 地热地质研究程度较低。

1.2 地质构造概况

按地质构造单元理论划分, 北京地区处于中朝准地台(I级)的北部, 跨燕山台褶带(II₁)中西

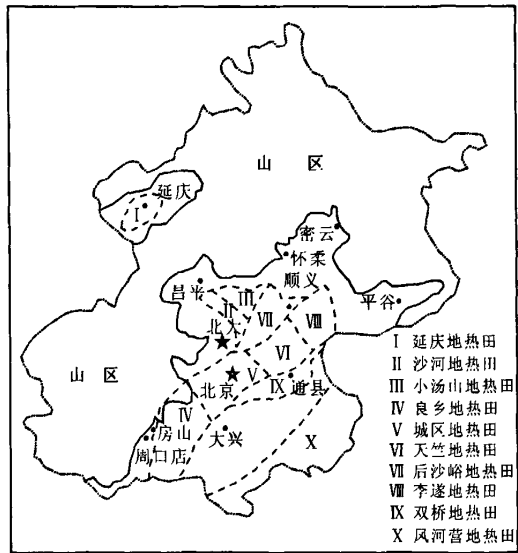


图 1 北京地热田分布图

Fig. 1 Distribution of geothermal fields in Beijing

段和华北断拗(II₂)西北隅 2 个 II 级构造单元。研究区处于燕山台褶带内西山叠拗褶(III级)门头沟叠陷褶(IV级)的东北部边缘地带。东以黄庄—高丽营断裂为界, 与华北断拗内北京叠陷(III级)坨里—丰台叠陷(IV级)相接^[8]。

黄庄—高丽营断裂(F2)是一条隐伏的深大断裂, 转换波法研究认为该断裂断至上地幔的第一个界面, 断深约 50 km。该断裂走向 NE, 倾向 SE, 倾角为 70°~80°, 性质为正断层。近年研究认为, 黄庄—高丽营断裂错断了全部第四系地层, 断裂面直达地表, 具有多期活动性, 是一条至今仍在活动的断裂构造^[9-10]。

八宝山断裂(F1)位于黄庄—高丽营断裂的西侧, 走向 NE, 倾向 SE, 浅部倾角 30°~50°, 性质为逆掩断层。断裂上盘中元古界蓟县系雾迷山组地层盖在下盘古生界—中生界各时代地层之上^{②-④}(图 2)。CSAMT 法物探勘查资料显示, 黄庄—高丽营断裂深部错断了八宝山断裂^[11]。

2 研究区地热地质条件

2.1 热储构造条件

2.1.1 基岩地层及构造

研究区地处北京西部山前缓倾斜平原地区,

① 柯柏林, 薛洪林, 赵连海, 等. 北京大学京热-119 地热井成井报告. 北京市地质勘察技术院, 2001.

② 北京市地震地质会战办公室. 北京市地质会战研究成果汇编(4): 北京八宝山断裂(带)调查报告资料汇编. 1979.

③ 杨平, 侯景岩, 王福满, 等. 北京市昆明湖—洼里地区基岩供水水文地质初步报告. 北京市地质局水文地质工程地质大队, 1980.

④ 金凤英. 北京八宝山断裂和黄庄—高丽营断裂(大灰厂段)活动性初析. 北京市地质会战研究成果汇编(5). 1983.

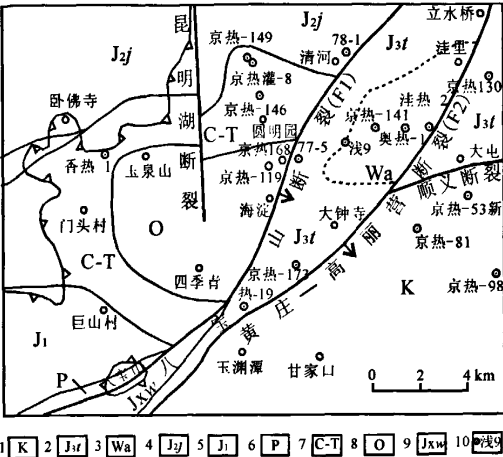


图2 研究区基岩地质构造

Fig.2 Geological map of the basement rocks in the study area

1. 白垩系; 2. 上侏罗统髫髻山组; 3. 上侏罗统洼里砾岩; 4. 中侏罗统九龙山组; 5. 下侏罗统; 6. 二叠系; 7. 石炭系—三叠系; 8. 奥陶系; 9. 蓟县系雾迷山组; 10. 钻孔位置及编号

地热井揭露的深部地层时代有第四系(Q)、新近系(N)、白垩系(K)、侏罗系(J)、石炭系—三叠系(C-T)、奥陶系(O)、寒武系(Є)、青白口系(Qn)及蓟县系(Jx)(表1)。第四系岩性为粘土、砂及卵砾石互层。新近系岩性为半胶结的泥岩、粉砂岩夹砂砾岩。白垩系岩性为泥岩、砂岩及砾岩。侏罗系揭露3个组: 髫髻山组(J_{3t})岩性为安山岩、安山质火山角砾岩及白云岩砾岩(Wa); 九龙山组(J_{2j})岩性为凝灰质砂岩、粉砂岩及砾岩; 南大岭组(J_{1n})岩性为钠黝帘石化玄武岩。石炭系—三叠系岩性为砂岩、页岩、板岩、红柱石角岩及煤层。奥陶系包括马家沟组(O_{2m})、亮甲山组(O_{1l})和冶里组(O_{1y}), 岩性为灰岩、白云质灰岩及

白云岩。寒武系包括4个组: 炒米店组(Є_{3cm})岩性为泥质条带灰岩、竹叶状灰岩及灰岩; 张夏组(Є_{2z})岩性为鲕粒灰岩、泥质粉砂岩及板岩; 馒头组(Є_{2m})岩性为页岩、板岩、红柱石角岩及白云岩; 昌平组(Є_{1c})岩性为豹斑状灰岩。青白口系包括3个组: 景儿峪组(Qn_j)为泥灰岩、斑点板岩及大理岩; 龙山组(Qn_l)岩性为石英砂岩、页岩及碳质板岩; 下马岭组(Qn_x)岩性为页岩、粉砂岩及碳质板岩。蓟县系钻孔揭露了3个组: 铁岭组(Jxt)岩性为白云岩夹页岩; 洪水庄组(Jxh)岩性为页岩、碳质板岩; 雾迷山组(Jxw)岩性为白云岩及大理岩化白云岩。上述地热井揭露的岩性特征表明, 本区深部岩石遭受一定的变质作用, 变质岩比较发育。

八宝山断裂下盘基岩构造为隐伏的昆明湖—海淀背斜, 为印支期褶皱。八宝山断裂与黄庄—高丽营断裂之间的断块, 根据目前钻孔揭露资料, 基岩构造大体为由侏罗系—石炭系地层构成的向南西倾斜的单斜构造^[12]。

2.1.2 热储构造

图3为东西向跨越研究区的地热地质剖面。八宝山断裂上盘, 侏罗系—石炭系地层呈向南西倾斜的单斜构造; 八宝山断裂下盘, 研究区处于昆明湖—海淀背斜的近核部, 从香热-1井至京热-168井表现为昆明湖—海淀背斜的仰起方向, 地层向香热-1井方向倾斜。北京大学区域蓟县系雾迷山组白云岩热储呈鼻状背斜凸起构造。鼻状背斜的凸起端有利于地热能的聚集, 是一种比较典型的热储构造。从地温等值线可以看出, 京热-168井至京热-141井之间的清华大学区域为雾迷山组白云岩热储的最高点, 地温等值线在该区

表1 地热井揭露地层特征对比表 (层底深度或孔深/m)

Table 1 Strata revealed by the geothermal wells (depth/m)

| 区块 | 井号 | 地点 | Q | N-E | K | J | C-T | O-Є | Qn | Jxt-Jxh | Jxw |
|-----|--------|---------|-----|-----|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|
| 研究区 | 京热-119 | 北京大学 | 217 | | | | | 1 754 | 2 359 | 2 725 | 3 168 |
| | 京热-168 | 北京大学 | 191 | | | | | 1 642 | 2 279 | 2 630 | 3 218 |
| | 京热-141 | 中国农业大学 | 76 | | | 2 415 | 2 608 | | | | 3 671 |
| | 奥热-1 | 海淀区北沙滩 | 115 | | | 2 367 | 2 974 | | | | 3 326 |
| | 京热-146 | 海淀区肖家河 | 200 | | | | 650 | 1 692 | 2 180 | 2 560 | 3 508 |
| | 京热-149 | 海淀区马连洼 | 185 | | | | 760 | 2 100 | 2 760 | 3 300 | 3 900 |
| | 京热-173 | 北京外国语大学 | 113 | | | 714 | Jxw/783 | 1 457 | 1 896 | 2 029 | 2 605 |
| | 香热-1 | 海淀区普安店 | 10 | | | | 95 | 2 991 | 3 636 | 3 840 | |
| 凹陷区 | 京热-130 | 朝阳区北苑 | 169 | 550 | | 2 705 | 3 133 | 3 255 | | 3 358 | 3 700 |
| | 京热-81 | 海淀区马甸 | 83 | 678 | 1 845 | 2 950 | | | | | 3 766 |

域向上凸起,是热流聚集的最佳热储构造部位。

2.1.3 八宝山断裂的多期活动性

长期以来,八宝山断裂的逆掩断层性质得到广大地质工作者的一致认同^②。近年来,断裂区域深层地热井的钻探结果显示,八宝山断裂又具有正断层的特征。图3中八宝山断裂上盘的侏罗系(J_1-J_3)地层分别盖在奥陶系、寒武系、青白口系及蓟县系地层之上,石炭系—三叠系盖在了蓟县系雾迷山组之上,显然在该剖面上显示八宝山断裂的性质是正断层。其形成的可能原因是:黄庄—高丽营断裂是在八宝山断裂的基础上形成的,黄庄—高丽营断裂在张裂正断层形成过程中,由于重力场的均衡调整,八宝山断裂上盘又继承或改造其原来的断裂面转化为正断层下掉。因此,八宝山断裂具有多期活动性特征,早期为逆掩断层性质,晚期又表现为正断层性质。

2.2 地热地质特征

2.2.1 黄庄—高丽营断裂的导热作用

黄庄—高丽营断裂断至上地幔热源,至今沿该断裂仍有地震活动,其张性断裂特性更有利于

深部热流的向上传导。从图3中的地温等值线可以看出,地温等值线从断裂下盘向断裂上盘骤然翘起,断裂上盘的地温场明显高于下盘,说明深部热流主要沿着断裂的上盘传导聚集,因为断裂上盘岩层相对比较破碎,有利于热流的传导和对流。黄庄—高丽营断裂是北京地区一条重要的导热构造,对研究区地温场的特征具有控制性作用。

2.2.2 地温场特征

根据研究区地热井的物探地温测井资料,统计计算各时代地层的地温梯度(表2)。第四系地温梯度八宝山断裂上盘高于下盘,并且越靠近黄庄—高丽营导热断裂地温梯度越高;研究区侏罗系、石炭系—二叠系、奥陶系及寒武系的地温梯度低于北京平原地温梯度平均值,青白口系和蓟县系的地温梯度高于北京平原地温梯度平均值。奥陶系和寒武系碳酸盐岩岩溶裂隙发育,冷水资源非常丰富,作为京西地区重要的饮用水源,开采量很大,地下水径流活动活跃,地热能散失量大,造成地温梯度很低。由于上部奥陶系和寒武系地温场比较低,相对增大了下部地层的地温场坡

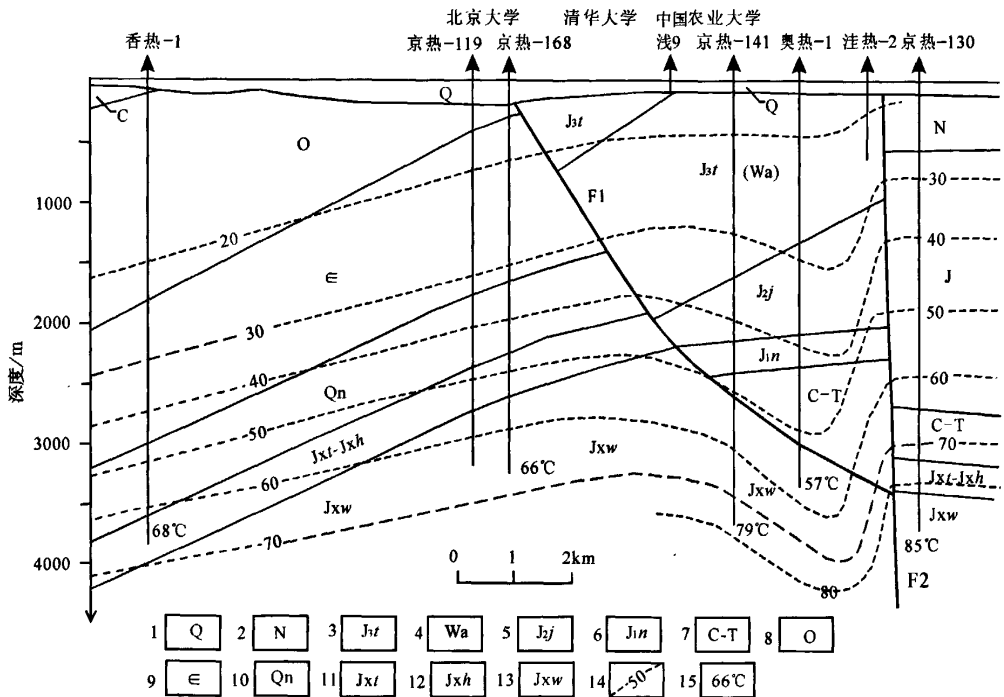


图3 研究区地热地质剖面图

Fig. 3 Geothermal geological profile of the study area

1. 第四系; 2. 新近系; 3. 上侏罗统髫髻山组; 4. 上侏罗统洼里砾岩; 5. 中侏罗统九龙山组; 6. 下侏罗统南大岭组;
7. 石炭系—三叠系; 8. 奥陶系; 9. 寒武系; 10. 青白口系; 11. 蓟县系铁岭组; 12. 蓟县系洪水庄组; 13. 蓟县系雾迷山组;
14. 地温等值线及温度, $^{\circ}\text{C}$; 15. 地热井底温度

表 2 研究区地温梯度对比表 (℃/hm)
Table 2 Comparison of geothermal gradient of the study area (℃/hm)

| 区块 | Q | J | C-P | O | Є | Qn | Jxt | Jxt | Jxw |
|---------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 八宝山断裂下盘 | 京热-119 | 2.00 | | 0.50 | 0.90 | 2.98 | | | 1.80 |
| | 京热-168 | 2.00 | | 0.50 | 1.00 | 2.61 | 2.01 | 4.17 | 1.55 |
| | 京热-149 | | | | | 1.90 | 2.15 | 4.10 | 1.63 |
| | 京热灌-8 | | 1.66 | 0.40 | 1.47 | | | | |
| 八宝山断裂上盘 | 奥热-1 | 5.40 | 1.09 | 1.52 | | | | | 1.33 |
| | 京热-141 | | 1.57 | 1.70 | | | | | 2.10 |
| | 洼热-2 | 6.00 | | | | | | | |
| 研究区平均 | | 1.33 | 1.63 | 0.47 | 1.12 | 2.50 | 2.08 | 4.14 | 1.68 |
| 北京平原区 | | 3.0 | 1.8 | 2.0 | 0.8 | 1.2 | 2.3 | 1.0 | 1.2 |

度降，因此，青白口系和蓟县系的地温梯度较北京平原区高一些。

从纵向地温梯度特征看，八宝山断裂下盘以京热-168 地热井为例，寒武系底界 1 642 m 深度温度为 31℃，奥陶系与寒武系平均地温梯度仅为 0.95℃/hm，地温等值线稀疏；青白口系底界 2 279 m 深度温度 48℃，平均地温梯度为 2.61℃/hm。地温等值线密集，地温增加快。青白口系下马岭组页岩厚度大，页岩的热导率低，该组是北京地区最重要的保温盖层；蓟县系洪水庄组底界 2 630 m 深度温度 56.6℃，铁岭组与洪水庄组地温梯度分别为 2.01℃/hm 和 4.17℃/hm，平均 2.45℃/hm。本段地层页岩相对含量较高，仍可保持较高的地温梯度，但地温等值线密度相对青白口系变稀；雾迷山组白云岩热储地温梯度下降为 1.55℃/hm，地层岩性为白云岩，热导率较高，相对不利于热流的聚集。

八宝山断裂上盘，洼里砾岩(Wa)的岩性为白云岩砾岩，溶洞和裂隙非常发育，地下水径流强烈^[12]。虽然临近黄庄—高丽营导热断裂，但地热能散失量大，地温梯度增加缓慢。石炭系—三叠系砂泥岩地层的热导率较高，也不利于地热能的聚集。八宝山断裂上盘处于雾迷山组白云岩热储构造相对低的部位，地热增温率总体较断裂下盘还要低，奥热-1 井和京热-141 井的地下热水温度较低。

2.2.3 热储特征

2.2.3.1 蓟县系雾迷山组白云岩热储

研究区以蓟县系雾迷山组白云岩为热储的地热井有京热-119、京热-168、京热-141、奥热-1、京热-146、京热-149 及京热-173(表 3)。雾迷山组白云岩热储的富水性较强，地热井涌水

量为 1 570~2 592 m³/d，平均 2 193 m³/d。单位涌水量为 20.62~108.00 m³/(d·m)，平均 48.17 m³/(d·m)，出水温度 53~72℃。雾迷山组白云岩主要热储地温 60~79℃，属于热水型低温地热资源(60℃≤t<90℃)。北京地区雾迷山组热储厚度达 2 000 余米，可利用地下热水中某些化学组分的含量与温度的关系，估算深部热储的温度^[13]。地热井的热水水头高出地面 4.41~26.00 m，说明研究区尚处于开采初期，地下热水资源丰富，热储压力比较大。如京热-173 井在气举反循环钻进过程中就自涌流水，京热-119 井和京热-168 井经空气压缩机气举洗井后就自涌流水。

奥热-1 井雾迷山组白云岩热储物探测井 3 022~3 268 m 解释一类、二类及三类含水层共 34 层，单层厚度 1.2~11.6 m，累计厚度 143 m，储集层系数 58.1%，声波孔隙度 0.3%~28.8%，平均孔隙度 8.7%。京热-119 井雾迷山组白云岩热储物探测井 2 725~3 168 m 解释含水层 20 层，单层厚度 2~37 m，累计厚度 155 m，储集层系数 35.0%。研究区地热井在雾迷山组白云岩热储钻进中，钻井液均出现了大量漏失的情况，反映热储的岩溶裂隙非常发育。以京热-119 井为例，2 734~2 735 m 漏失 48 m³，2 802~2 815 m 漏失 81 m³，2 946~2 948 m 漏失 78 m³，3 014~3 017 m 漏失 117 m³，3 106~3 109 m 漏失 87 m³，总漏失量 411 m³，漏失速率 3~30 m³/h。

由于蓟县系雾迷山组白云岩热储压力较大，岩溶裂隙非常发育，含水层富水性较强，因此地热井洗井工作比较容易。京热-173 井气举反循环钻进自涌流水，只采用了水泵抽水洗井。对于泥浆钻井液施工的地热井，将钻井液用清水替出后，一般使用化学药剂、空气压缩机及水泵抽水联合洗井即可，

表3 地热井部分观测数据
Table 3 Some measurements of the geothermal wells

| 井号 | 热储及岩性 | 热水水头/ m | 涌水量/ (m ³ /d) | 单位涌水量/ (m ³ /(d·m)) | 水温/℃ |
|--------|--------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------------|------|
| 京热-119 | Jxw | +26.00 | 2 232 | 29.82 | 59 |
| 京热-168 | | +4.41 | 2 555 | 35.89 | 63 |
| 京热-141 | | +10.00 | 2 410 | 33.50 | 53 |
| 奥热-1 | 白云岩 | +4.72 | 2 016 | 73.42 | 53 |
| 京热-146 | | +9.00 | 1 979 | 35.92 | 59 |
| 京热-149 | | -7.34 | 1 570 | 20.62 | 56 |
| 京热-173 | | +24.00 | 2 592 | 108.00 | 72 |
| 京热灌-8 | ∈ ₁ c灰岩 | -20.4 | 1 965 | 115.00 | 36 |

只有个别地热井还需要使用盐酸洗井方法^[14]。

2.2.3.2 蓟县系铁岭组白云岩热储

研究区尚未有在铁岭组白云岩热储成井的地热井,该套热储分布于八宝山断裂的下盘。北京大学京热-119井和京热-168井铁岭组白云岩热储地温44~54℃,视厚度279~296m。京热-149井铁岭组白云岩热储地温50~60℃,视厚度430m。铁岭组白云岩热储为温热水型低温地热资源(40℃≤t<60℃)。地热井在铁岭组钻进过程中均有钻井液的大量漏失。京热-119井在2 460m处漏失24m³,2 598~2 600m处漏失67m³,物探测井解释含水层26m,储集层系数9.3%,说明铁岭组白云岩热储岩溶裂隙比较发育,具有一定的富水能力。

2.2.3.3 寒武系昌平组灰岩热储

研究区京热灌-8井的热储层为昌平组灰岩,视厚度为68m,地温为36~38℃,出水温度36℃,涌水量为1 965m³/d,单位涌水量为115.00m³/(d·m),热水水头在地面以下20.4m。水化学类型为SO₄·HCO₃-Na·Ca·Mg,矿化度577mg/L,pH值7.72,总硬度239mg/L(以CaCO₃计),属于低矿化度、弱碱性微硬水。氟含量3.80mg/L,为氟型淡温泉水。

京热-119井和京热-168井昌平组灰岩热储视厚度63~79m,地温30~32℃。昌平组灰岩热储为温水型低温地热资源(25℃≤t<40℃)。由于昌平组与上覆馒头组为平行不整合接触,沉积间断有助于昌平组灰岩发育岩溶构造,溶洞和裂隙非常发育,该组在北京地区具有岩溶发育的普遍特征。京热-119井三段裂隙钻井液漏失145m³,京热-168井三段裂隙钻井液漏失90m³。京热灌-8井在昌平组钻进时钻井液返出了大量京热-149井堵漏用的锯末,锯末在溶洞裂隙中至少运移了200m,可见昌平组的溶洞和裂隙通道非常通畅。

2.3 地下热水地球化学特征

2.3.1 水质成分特征

表4为研究区蓟县系雾迷山组白云岩热储的地下热水特征化学成分含量。水化学类型主要为HCO₃-Ca·Mg,只有京热-149井水化学类型为HCO₃·SO₄-Ca·Na,可能是该井远离了昆明湖—海淀背斜热储构造,京热-149井处于九龙山向斜核部构造单元,分属不同的水文地质单元。热-19为雾迷山组的冷水井,其水化学类型也为HCO₃-Ca·Mg。深层热水与浅层冷水的水型一致,说明研究区雾迷山组白云岩地下水的径流条件相近。pH值7.5~7.7,为弱碱性水。矿化度366~424mg/L,属于低矿化度的淡水。总硬度177~203mg/L(以CaCO₃计),属于微硬水。

按医疗矿泉水分类标准^[15],研究区地下热水均达到氟型淡温泉水标准,有的地下热水几种成分达到了医疗矿泉水的标准。京热-119和奥热-1井为氟、镭型淡温泉水,京热-168井为氟、偏硅酸、镭型淡温泉水,地下热水放射性镭含量高是本区的显著特征。地下水的高放射性一般与断裂构造有关^[16],研究区临近黄庄—高丽营断裂和八宝山断裂,小断层和构造裂隙发育,岩石相对比较破碎,地下热水的运动易于将镭溶解析出和

表4 研究区地下热水的特征化学成分含量表(ρ_B/(mg/L),总硬度以CaCO₃计)
Table 4 Chemical compositions of the thermal groundwater in the study area(mg/L, total hardness of the CaCO₃)

| 井号 | ρ _B /(mg/L) | | | | | | | | ²²⁶ Ra/ (Bq/L) | 矿化度/ (mg/L) | 总硬度/ (mg/L) | pH值 | 水化学类型 |
|--------|---------------------------------|------------------|------------------|---|-----------------|-------------------------------|----------------|-----|------------------------------|----------------|----------------|-----|--|
| | Na ⁺ +K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | F ⁻ | 偏硅酸 | | | | | |
| 京热-119 | 41.7 | 44.7 | 16.0 | 226 | 10 | 50.9 | 5.7 | 49 | 0.39 | 396 | 178 | 7.5 | HCO ₃ -Ca·Na·Mg |
| 京热-168 | 31.2 | 44.9 | 15.7 | 217 | 11 | 38.8 | 6.4 | 53 | 0.54 | 366 | 177 | 7.5 | HCO ₃ -Ca·Mg |
| 京热-141 | 37.9 | 49.5 | 19.2 | 226 | 19 | 44.6 | 6.3 | 42 | 0.17 | 404 | 203 | 7.7 | HCO ₃ -Ca·Mg |
| 奥热-1 | 35.5 | 49.1 | 17.0 | 234 | 11 | 42.8 | 6.2 | 40 | 0.59 | 397 | 193 | 7.7 | HCO ₃ -Ca·Mg |
| 京热-149 | 50.5 | 45.1 | 17.0 | 201 | 19 | 85.3 | 5.3 | 45 | | 424 | 183 | 7.6 | HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Na |
| 热-19 | | | | | | | | | | 305 | | | HCO ₃ -Ca·Mg |

迁移，造成本区地下热水中的镭含量较高。

研究区地下热水的水化学类型介于基岩冷水与沙河地热田水化学类型之间(图4)。同位素研究表明，北京地区的地下热水为大气降水补给，凉水经过深循环，在地下深处受到加热后沿断裂构造上升，地下热水储集到热储中，或出露地表形成温泉^⑤。本区临近北京西山基岩裸露补给区，与基岩冷水的水型基本一致，较基岩冷水的Na⁺含量增高。随着地热田远离补给区，Na⁺和SO₄²⁻含量逐渐增高，Mg²⁺含量逐渐降低，说明研究区处于北京地下热水径流演化的上游。

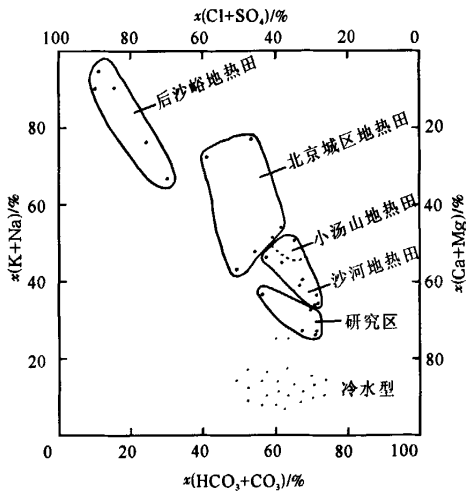


图4 北京地区地下热水的兰格利尔-路德维奇图解
Fig. 4 Langlier-Ludwig diagram of geothermal hot water in Beijing

2.3.2 地下热水年龄特征

研究区与北京城区地热田蓟县系雾迷山组白云岩热储地下热水的¹⁴C年龄见表5。研究区地下热水年龄为31 680~37 590 a，平均34 635 a。城区地热田地下热水年龄为20 000~21 830 a，平均20 410 a。京热-130井地下热水年龄34 020 a，该井处于北京叠断陷中的来广营凸起构造单元，与研究区相邻，地层结构相似。北京西山补给区冷水年龄12 760 a。传统上认为北京一般地下水的径流演化路径为大气降水→西山冷地下水→研究区→城区地热田，但城区地热田的水龄比研究区还年轻，显然不符合一般的传统认识规律，说明城区地热田基本没有接受西部隆起区地下水的补

给。从北京地质构造演化情况看，城区地热田大部分区域的蓟县系雾迷山组与侏罗系为不整合接触，表明侏罗纪前雾迷山组曾经历暴露地表风化剥蚀，接受了当时大气降水的补给，直到白垩纪开始逐渐断陷沉降。而研究区雾迷山组上覆洪水庄组、铁岭组、青白口系及古生界地层为连续接受沉积，雾迷山组至少大部分区域从晚元古代青白口纪就被上覆地层封闭了。从这一角度分析，城区地热田雾迷山组中的地下热水龄应该比研究区年轻。北京地下热水的年龄只有几万年，表明地下热水应是晚更新世补给的大气降水，地质历史时期中的地下水在不断的径流排泄更新。研究区东部以深大断裂与城区地热田隔开，雾迷山组白云岩热储层断裂两侧基本不连续，30多年来，城区地热田的水位持续以每年2.0 m的速率下降，而研究区的水头很高，可以推断研究区对城区地热田的地下水径流补给量很小。从研究区地热井的热水水头的分布规律看，2007年观测京热-173井热水水头高出地面24 m，京热-168井热水水头高出地面4.41 m，京热-119井热水水头高出地面5 m±。而2004年京热-146井热水水头高出地面9.00 m，京热-149井热水水头低于地面7.34 m。热水水头呈南高北低的趋势，可以得出研究区雾迷山组白云岩热储中的地下热水应该受黄庄—高丽营断裂的阻隔后由南向北方向径流。

表5 研究区地下热水¹⁴C年龄
Table 5 ¹⁴C age of the groundwater of the study area

| 区块 | 地热井 | ¹⁴ C年龄/a |
|--------------------|--------|---------------------|
| 研究区 | 京热-119 | 31 680 ± 670 |
| | 奥热-1 | 37 590 ± 880 |
| 来广营凸起 | 京热-130 | 34 020 ± 2 325 |
| 城区地热田 ^⑥ | 京热-81 | 21 830 ± 370 |
| | 京热-59 | 20 000 |
| | 京热-42 | 19 400 ± 330 |
| 西山补给区 ^⑥ | 冷水井 | 12 760 ± 570 |

3 结 论

北京城区地热田西北部的地热地质特征可以总结如下。

(1)研究区主体地质构造为昆明湖—海淀背斜，蓟县系雾迷山组为鼻状背斜凸起型热储构造。

⑤ 张道富，白铁珊，李心庚，等。北京市平原区地热普查地质报告。北京市水文地质工程地质公司，1990。
⑥ 刘久荣，潘小平，杨亚军，等。北京市城区热田地热资源综合研究报告。北京市地质工程勘察院，2001。

北京大学至清华大学之间为雾迷山组白云岩热储最高点,地温等值线在该区域向上凸起,是地热资源富集的最佳热储构造部位。

(2)八宝山断裂具有多期活动性特征,早期为逆掩断层性质,晚期又表现为正断层的性质。黄庄—高丽营断裂是一条沟通深部地幔热源的导热构造,深部热流主要沿着断裂的上盘向上传导聚集,该断裂对研究区的地温场特征具有控制性的作用。

(3)研究区地层平均地温梯度为:侏罗系($1.33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$)、石炭系—二叠系($1.63\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$)、奥陶系($0.47\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$)及寒武系($1.12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$),地温梯度低于北京平原区平均值;青白口系地温梯度($2.50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$)、蓟县系铁岭组地温梯度($2.08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$)、蓟县系洪水庄组地温梯度($4.14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$)及蓟县系雾迷山组地温梯度($1.68\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$)高于北京平原区平均值。

(4)研究区拥有寒武系昌平组、蓟县系铁岭组和蓟县系雾迷山组3套碳酸盐岩热储,分别属于温水、温热水及热水型低温地热资源。碳酸盐岩热储岩溶裂隙发育、富水性强,地热资源储量丰富。其中蓟县系雾迷山组白云岩热储:储集层系数58.1%,声波孔隙度0.3%~28.8%,平均孔隙度为8.7%,地热井涌水量为 $1\,570\sim2\,592\text{ m}^3/\text{d}$,平均为 $2\,193\text{ m}^3/\text{d}$,单位涌水量为 $20.62\sim108.00\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,平均为 $48.17\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 。寒武系昌平组灰岩热储地热井涌水量为 $1\,965\text{ m}^3/\text{d}$,单位涌水量为 $115.00\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 。

(5)蓟县系雾迷山组白云岩热储地下水类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 水型,属于弱碱性、微硬、低矿化度的淡水。医疗矿泉水类型有氟型淡温泉水,氟、镭型淡温泉水和氟、偏硅酸、镭型淡温泉水。深大断裂构造带的发育致使地下热水放射性镭含量高。

(6)蓟县系雾迷山组白云岩热储地下水年龄为 $31\,680\sim37\,590\text{ a}$,大于城区地热田地下水年龄($20\,000\sim21\,830\text{ a}$),表明城区地热田受西部隆起区地下水的补给很少。研究区雾迷山组白云岩

热储中的地下热水受黄庄—高丽营断裂阻隔后由南向北方向径流。

参考文献:

- [1] 何国琦,刘时彬,杨仲昭,等.北京大学校园内的温泉[M]//刘久荣,郑克棧,刘时彬,等.北京地热国际研讨会论文集.北京:地质出版社,2002:79-82.
- [2] 宾德志,刘久荣,王小玲.北京地热资源[M]//刘久荣,郑克棧,刘时彬,等.北京地热国际研讨会论文集.北京:地质出版社,2002:169-176.
- [3] 周训,周海燕,方斌,等.浅析开采条件下地下热水资源的演变[J].地质通报,2006,25(4):482-486.
- [4] Zhou Xun, Li Juan, Zhou Haiyan, et al. Increase in thermal groundwater due to a flowing well near the Songshan hot spring in Beijing, China [J]. Environmental Geology, 2008, 53(7): 1405-1411.
- [5] 柯柏林.北京市平原区北部孙河断裂及其地热地质特征[J].现代地质,2009,23(1):43-48.
- [6] 吕金波,吉勇,王泽龙,等.北京开凿出最热的地热井[J].中国区域地质,2001,20(2):221-223.
- [7] 林黎,赵苏民,阮侠侠,等.天津地区深部蓟县系雾迷山组热储岩溶非均一性特征研究[J].现代地质,2007,21(4):600-604.
- [8] 北京市地质矿产局.北京市区域地质志[M].北京:地质出版社,1991:470-478.
- [9] 马文涛,唐文榜,徐锡伟,等.北京黄庄—高丽营隐伏断裂立水桥段浅部活动特征的地震探测[J].物探与化探,2005,29(6):503-505.
- [10] 贾三满,郭萌.从高丽营探槽分析黄庄—高丽营断裂与地裂缝的关系[J].城市地质,2007,2(4):24-28.
- [11] 徐光辉.北京奥运公园地区地热地质条件的地球物理论证[M]//刘久荣,郑克棧,刘时彬,等.北京地热国际研讨会论文集.北京:地质出版社,2002:178-185.
- [12] 柯柏林.北京“洼里砾岩”地质特征及时代讨论[J].北京地质,2005,17(3):11-15.
- [13] 王莹,周训,于漫,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.
- [14] 柯柏林.地热井洗井及增产工艺技术探讨[J].城市地质,2008,3(1):5-10.
- [15] 国家技术监督局.天然矿泉水地质勘探规范(GB/T13727-92)[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [16] 丁绪荣.普通物探教程——电法及放射性[M].北京:地质出版社,1984:171-172.