

北京西山谷积山背斜地热系统成因模式及远景区预测

柯柏林, 林天懿, 李文, 杨淼, 刘庆, 刘爱华, 赵连海

KE Bailin, LIN Tianyi, LI Wen, YANG Miao, LIU Qing, LIU Aihua, ZHAO Lianhai

北京市地热研究院, 北京 102218

Beijing Geothermal Research Institute, Beijing 102218, China

摘要:北京西山隆起区没有天然温泉出露。近年来,在谷积山背斜相继钻井发现了40~49℃的地下热水,但对地热系统成因尚无研究。运用地质、水文地质、地球化学等方法开展研究,结果表明热储为蓟县系雾迷山组白云岩溶裂隙水,热水为 HCO_3^- -Ca·Mg型,为中-弱碱性、微硬度、氟水型淡水矿水,初步称为北京西山谷积山地热田。构建了地热系统成因模式,分析热源为谷积山背斜深部隐伏的燕山期酸性花岗岩体产生的放射性元素衰变生热,为隆起山地碳酸盐岩层状热储的地热系统类型,不同于一般隆起山地导热断裂对流地热系统类型。结合西山地区广泛发育的穹窿型构造与燕山期岩浆活动特征,初步预测西山卜苇甸穹窿等穹窿型构造具有形成地热系统的地热地质条件,有潜力成为地热资源的富集远景区。

关键词:地热系统;热穹窿;成因模式;放射性元素衰变生热;北京西山

中图分类号:P314.1 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2019)08-1378-08

Ke B L, Lin T Y, Li W, Yang M, Liu Q, Liu A H, Zhao L H. Genetic model of Gujishan anticline geothermal system and prediction of potential areas in Western Hills of Beijing. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(8):1378-1385

Abstract: There is no natural hot spring outcropped in the uplift area of Beijing Western Hills (Xishan). In the past several years, geothermal water temperatures ranging from 40℃ to 49℃ were discovered through drilling of thermal water boreholes one after another in Gujishan anticline. However, the research on geothermal origin has not been carried out yet. Geological, hydrogeological and geochemical studies show that hot rock reservoir is the karst fissure water developed in dolomite rock of Wumishan Group, Jixian System. The water geochemical type is HCO_3^- -Ca·Mg, neutral-to-weakly alkaline, micro hardness and fluorine fresh geothermal mineral water, which is named Xishan Gujishan geothermal field primarily. In this paper, the authors put forward the geothermal genetic model, and the analytical results show that the heat source is the radioactive element decay heat from the concealed acid granite pluton at the deep dome in Yanshanian period. It is of the layer carbonatite hot reservoir type located in uplifted mountain area different from the common geothermal systems of convective type developed in heat conducting faults. Based on dome structure and Yanshanian magma characteristics, the authors preliminarily predict that the domes like Xiaweidian dome in Beijing Western Hills have conditions for the formation of geothermal system, and they can be regarded as the advantage potential areas.

Key words: geothermal system; geothermal dome; genetic model; radioactive element decay heat; Beijing Western Hills

自20世纪50年代以来,北京经过60多年的地热资源勘查开发与研究,在北京平原中、新生代断陷盆地中划分了4条地热带、10个地热田,属盆地传

导型中低温地热田^{①[1]},并开展了较深入的地热研究工作^[2-9],地热研究程度较高。北京燕山隆起区天然温泉的形成分布与燕山期花岗岩体关系密切^[1,5]。然

收稿日期:2017-03-02;修订日期:2017-04-06

资助项目:中央引导地方科技发展专项课题《北京地区典型行业能源高效利用关键技术研究示范》(编号:Z161100004516016)

作者简介:柯柏林(1965-),男,教授级高级工程师,从事地热资源勘查和研究工作。E-mail:kebailin@sina.com

而,北京西山隆起区面积约3000km²,没有天然温泉分布,普遍认为该区是北京平原盆地热田的冷水补给区。虽然西山地质研究程度较高^[10-13],但地热资源研究几乎处于空白状态。2003—2005年,在西山山前平原地带的门头沟区冯村勘查钻探成功了永热-1和永热-2地热井,热储为蓟县系雾迷山组白云岩岩溶裂隙水,于井深3866m和3658m处获得46~49℃地下热水,涌水量1991~2409m³/d。虽然石炭系一二叠系有接触热变质红柱石角闪岩现象,但对该区地热系统的热源研究仍停留在一般地幔热流认识;2012—2014年,笔者在西山页岩气野外调查中,在谷积山背斜发现一口水井,出水温度40℃,热储为雾迷山组白云岩岩溶裂隙水。该区青白口系盖层仅500m,不具有隆起山地导热断裂对流型地热系统特征^[5,14-15],因此该地热系统难以用平原盆地传导型地热理论模式解释。谷积山背斜的地热成因引发笔者长期思考,试图建立该地热系统与燕山期岩浆活动的联系。本文在研究谷积山地热系统特征的基础上,结合北京西山燕山期强烈的变形变质作用与构造岩浆活动,受地幔热柱理论启发^[16],研究了谷积山地热系统与深部隐伏酸性花岗岩体放射性元素衰变生热的成因联系,探讨谷积山背斜地热系统的形成机理,建立西山隆起区地热成因理论模式。进一步结合西山地区广泛分布的穹窿型构造的地质背景,分析地热形成富集规律,对西山隆起区的地热资源富集远景区进行预测,有助于推动北京西山地热勘查空白区找矿突破和地热资源的开发利用。

1 地热地质背景

谷积山地区位于华北板块太行山隆起东北端北京西山隆起带的东缘,东以黄庄-高丽营断裂为界与华北断陷盆地西北缘的北京断陷盆地相邻,处于西山迭拗褶之十渡-房山中穹褶的东北端^[10,17]。北京西山地区在古元古代末的吕梁运动之后,经历了中元古代—古生代克拉通盖层稳定发展阶段。中生代燕山期克拉通活化,发育拗陷沉积盆地,期间的燕山运动使地层发生了较强烈的构造变形及变质作用,并伴有强烈的中酸性岩浆侵入活动^[18]。中生代晚期以来,北京西山抬升隆起,研究区遭受了强烈的剥蚀作用,使现今谷积山背斜核部青白口系及房山岩体出露地表。谷积山背斜周边分布有

石门营向斜、九龙山向斜及北岭向斜构造。背斜南翼及东南翼以八宝山断裂与黄庄-高丽营断裂组成的断裂带为边界,紧邻坨里-长辛店断陷盆地。坨里-长辛店断陷盆地与黄庄-高丽营断裂同期形成于早白垩世,地热钻井揭示盆地区白垩系最大沉积厚度约3000m。

谷积山背斜南部分布燕山期的房山岩体和北车营岩体。房山岩体侵入时代为晚侏罗世—早白垩世,岩性主要为花岗岩闪长岩及石英闪长岩^②。北车营岩体为钾长花岗岩(图1)。

研究区没有天然温泉分布,传统认识将该区作为北京平原盆地热田地下热水的大气降水补给区。

2 谷积山背斜地热系统特征

2.1 热储构造特征

谷积山地热系统的热储构造为谷积山背斜^[19]。基于谷积山背斜地层分布整体呈近圆形轮廓,加之笔者认为其成因与岩浆侵位上隆机制有关,从地热系统的成因联系出发,可称之为“谷积山穹窿”。

谷积山背斜核部区域由2个次级背斜和1个次级向斜组成,核部地层为青白口系,翼部地层为寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系及三叠系。背斜地层地表倾角北翼15°~18°、东北翼25°~32°、东翼30°左右、南翼35°~45°、西翼20°左右。谷积山背斜在平面上分布范围与奥陶系分布相当,直径约10km,面积约80km²(图1)。谷-1及永热-1井揭示,谷积山背斜东北翼地层产状具浅部较陡深部平缓的特征。地热系统的热储层为蓟县系雾迷山组白云岩岩溶裂隙水,热储盖层条件较差(图2)。

2.2 热储层特征

研究区雾迷山组的层位出露不全,区域上雾迷山组厚度约2700m,分4个岩性段,主要岩性为白云岩、叠层石白云岩、硅质条带白云岩、砂泥质白云岩等。地热钻井仅揭露雾迷山组四段地层,岩溶裂隙较发育,地下热水赋存富集能力较强。研究区地热井揭露地层特征见表1。

古-1井出水温度为40℃,涌水量为1346m³/d,单位涌水量为17.3m³/(d·m);永热-1和永热-2井出水温度为46~49℃,涌水量为1991~2409m³/d,单位涌水量为22.9~91m³/(d·m),热恢复水位高出地面3.28m。计算储层渗透系数为0.047~0.213m/d,反映

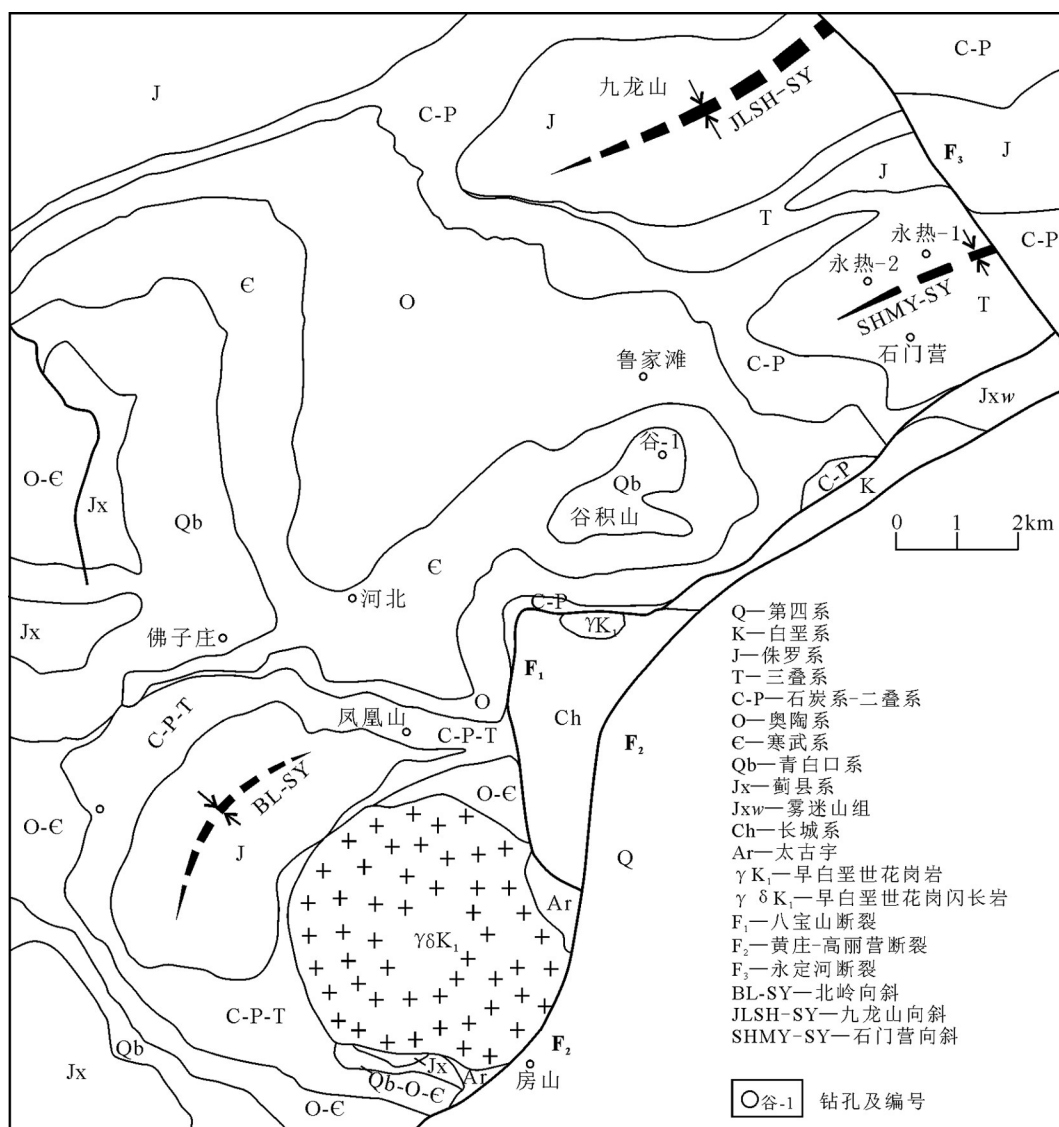


图1 研究区地质构造图

Fig. 1 Geological map of the study area

热储层岩溶裂隙发育具有不均一性。受勘查工作手段限制,缺乏热储层孔隙率、渗透率、热导率等储层物性资料。

2.3 地温场特征

北京西山雾迷山组大面积裸露,直接接受大气降水补给,传统认为该区为平原盆地地热田的冷水补给区。雾迷山组热储层向斜区埋深数千米,背斜区埋藏浅、盖层条件差,地温场一般较低,浅部岩溶水丰富,前人几乎没有进行过地热研究工作。

研究区地热钻孔地温梯度见表2。石炭系—三叠系砂泥岩地温梯度为 $0.59^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,奥陶系灰岩

地温梯度为 $0.06^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,均远低于平原盆地。其原因是本区奥陶系灰岩岩溶水较平原区径流活跃,岩溶水对流散热能力强,使奥陶系几乎不增温;寒武系地温梯度为 $1.68^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,地层中泥质灰岩、砂页岩占比高,同时由于奥陶系地温低,地温梯度较平原区高;青白口系泥灰岩、砂岩、页岩地温梯度为 $2.61^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,与平原区相近;蓟县系铁岭组和雾迷山组白云岩地温梯度与平原区相近,洪水庄组厚度小,存在一定的温度取值误差,但永热-1井洪水庄组地温梯度为 $3.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,也接近平原区。

研究区谷-1和永热-1井的地温剖面见图3。

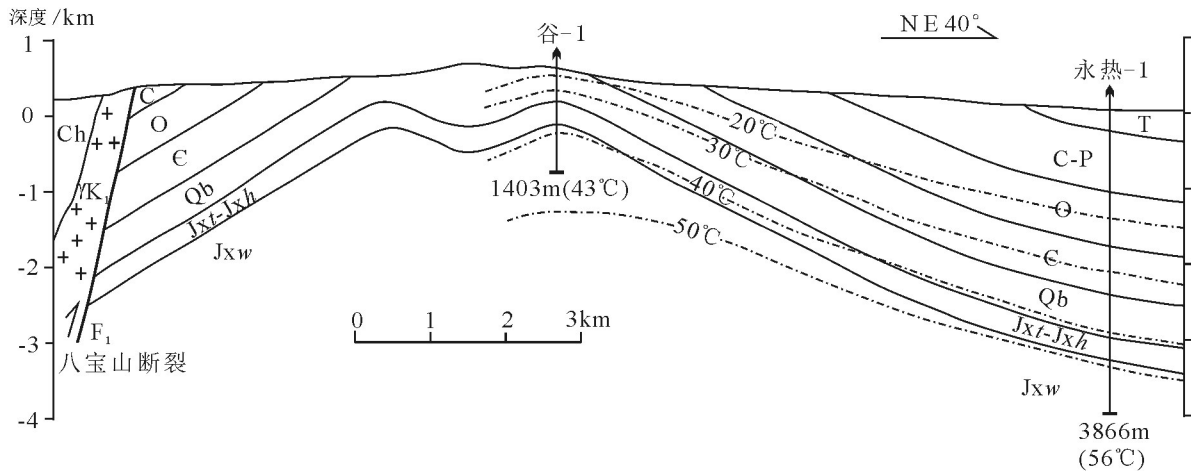


图 2 研究区地热地质剖面图(地层代号含义见图 1)

Fig. 2 Geothermal geological section of the study area

Jxt—铁岭组;Jxh—洪水庄组;Jxw—雾迷山组;50℃—地温等值线

图中显示谷积山地热系统具有以下特征:①三叠系—寒武系上部炒米店组泥灰岩段为地下凉水强对流弱增温段,平均地温梯度为0.37℃/100m;②寒武系中部张夏组—青白口系灰岩、砂页岩段为热传导强增温段,平均地温梯度约2.16℃/100m;③蓟县系白云岩为层内地下热水对流作用较强的中增温段,平均地温梯度约为1.12℃/100m。因此,青白口系低热导率砂页岩盖层对谷积山背斜地热系统保温起重要作用。依据地温梯度,推算背斜核部3000m深热储温度约为62℃。

分析图2中深部地温分布特征,地温等值线向谷积山背斜核部增高凸起,背斜翼部从浅向深地温逐渐降低,地温等值线最高点在谷-1井所处的背斜核部凸起区域。背斜核部高热导率的蓟县系雾迷山组白云岩埋藏浅,核部与翼部发育相对低热导率的青白口系及寒武系,深部热流在向浅部传导过程中,热流趋于向背斜核部凸起部位聚集。同时,谷积山背斜核部由于褶皱作用构造裂隙较发育,加之

雾迷山组厚度巨大,地下热水在雾迷山组白云岩岩溶含水层中对流循环作用较强,有利于深部地下热水向浅部运移。

以上地温场特征表明,谷积山背斜具有地热系统形成的地质条件,浅部地下热水资源丰富,深部地热资源潜力较大。因此,谷积山背斜是一个“热穹窿”型构造,可以初步称为“谷积山地热田”。

2.4 地下热水化学特征

谷积山地热系统的地下热水化学成分主要特征见表3。地下热水为HCO₃-Ca·Mg型,为中-弱碱性、微硬度的淡水。F⁻含量1.35~3.58mg/L,依据地热资源地质勘查规范(GB/T11615—2010),地下热水为氟水型热矿水。

研究区与北京平原盆地地热田的地下热水特征对比见图4。研究区地下热水类型与基岩冷水同为HCO₃-Ca·Mg型,表明该区地下热水的形成演

表 1 地热井揭露地层特征对比(层底深度或孔深)

Table 1 Strata revealed by geothermal wells

										m
井号	构造部位	Q	T	C-P	O	ε	Qb	Jxt	Jxh	Jxw
谷-1	核部	-	-	-	-	-	505	775	825	1403
永热-1	东北翼	105	248	930	1730	2417	2957	3172	3230	3866
永热-2	东北翼	104	230	871	1700	2302	2810	3060	3106	3658

注:地层代号注释同图1和图2

表 2 研究区地温梯度对比

Table 2 Comparison of geothermal gradients in the study area

								℃/100m	
井号	构造部位	Q	C-T	O	€	Qb	Jxt	Jxh	Jxw
谷-1	核部					3.0	0.74	2.0	0.9
永热-1	东北翼		0.59	0.06	1.68	2.22	1.6	3.2	1.23
研究区平均			0.59	0.06	1.68	2.61	1.17	2.6	1.07
北京平原盆地平均		3.0	2.0	0.8	1.2	2.3	1.0	4.0	1.2

注:地层代号注释同图1和图2

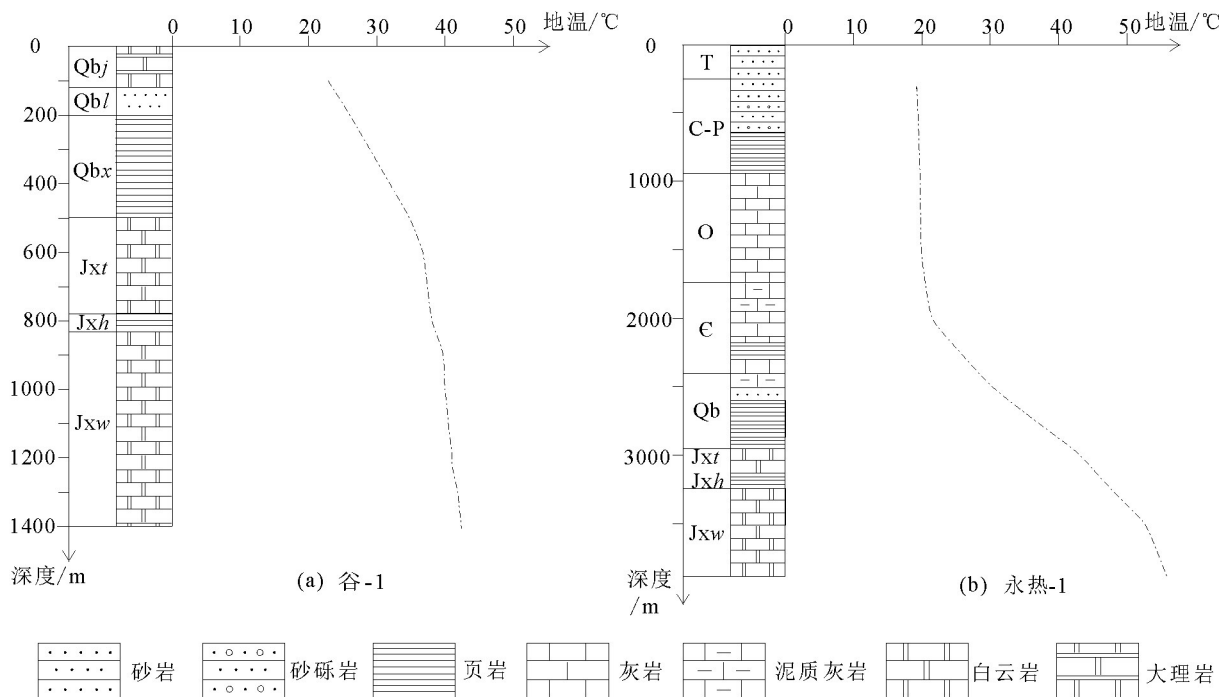


图3 研究区钻孔地温剖面(地层代号注释同图1和图2)

Fig. 3 Geothermal temperature profile of borehole in the study area

化与基岩冷水关系密切。前人研究确认,北京平原盆地地下热水起源于古大气降水^[6],谷积山背斜西南临近蓟县系白云岩大面积裸露降水补给区,山峰高程达800~1000m,与研究区形成数百米的压力差。应用K-Mg地热温标计算,永热-1井热储温度为33.2℃,谷-1井为39.1℃,明显低于地热井的实测热储温度,表明谷积山地热系统的地下热水与浅部冷水混合作用较强。

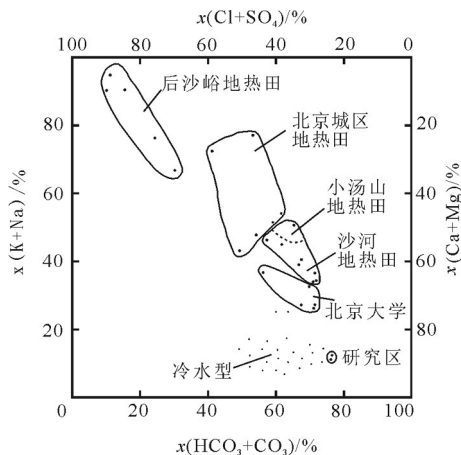


图4 北京地下水兰格利尔-路德维奇图解

Fig. 4 Langlier-Ludwig diagram of geothermal water in Beijing

2.5 地热系统的热源分析

地壳的热历史活动可以在岩石中以热变质特征矿物、有机质成熟度(R_o)等保留记忆。根据石景山幅和良乡幅1:5万区域地质调查报告^②,青白口系龙山组主要岩性为一套变质泥质粉砂岩及变质石英砂岩,典型变质岩有千枚岩、绿泥石化变质石英砂岩、含电气石黑云母变质粉砂岩;青白口系景儿峪组泥灰岩原岩变质为细晶大理岩,典型变质矿物有绿泥石、硬绿泥石、绿帘石;谷积山背斜东北部潭柘寺东山石炭系砂泥岩含煤系地层发育硬绿泥石绢云千枚岩、绢云千枚岩、板岩等;房山岩体边部的石炭系发育硬绿泥石角岩和红柱石角岩;谷积山背斜东北翼的永热-1井石炭系一二叠系发育硬绿泥石千枚岩、红柱石角岩、红柱石石英砂岩等。

从研究区变质作用特征分析,结合周口店地区的研究成果,变质作用具有以下特征:①既有区域变质作用,也有接触热变质作用。区域变质作用发生在印支期,燕山期接触热变质作用叠加在印支期区域变质作用之上;②变质岩类型有板岩、千枚岩、大理岩,特征变质矿物有硬绿泥石、绢云母、绿泥石、黑云母、绿帘石、红柱石;③硬绿泥石、黑云母反

表 3 研究区地下水主要特征化学成分含量

Table 3 Chemical compositions of geothermal water in the study area

井号	K ⁺ Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ /CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	偏硅酸	矿化度	总硬度	pH 值	mg/L
												水化学类型
永热-1	13.42	49.1	23.7	228	17.4	27.5	2.50	32.4	365	220	7.50	HCO ₃ -Ca·Mg
永热-2	11.40	42.1	20.0	226	3.0	26.2	1.35	28.6	332	188	7.81	HCO ₃ -Ca·Mg
谷-1	15.45	47.4	22.2	235	4.66	27.0	3.56	32.2	283	215	7.62	HCO ₃ -Ca·Mg

注:总硬度以 CaCO₃ 计

映区域变质作用的绿片岩相,形成温度分别为 350~450℃和 450~575℃;④角岩型红柱石和绿帘石是典型接触热变质作用矿物,红柱石反映低压相系,其形成温压条件为压力小于 0.25GPa,温度 450~575℃^[20]。

谷积山背斜临近房山花岗闪长岩体,且背斜南翼沿八宝山断裂带侵入北车营钾长花岗岩体,推测背斜深部可能有隐伏花岗岩体。景儿峪组绿泥石、绿帘石大理岩和永热-1 井石炭系一二叠系红柱石角岩应是隐伏岩浆岩体接触热变质作用的结果,深部隐伏的酸性花岗岩体应该是谷积山地热系统形成的热源。红柱石变质温度显示,谷积山背斜浅部地层遭受了 500℃左右的古地温。燕山南缘燕山期盘山花岗岩体穹窿与研究区处于相似的构造背景,岩体边部的长城系串岭沟组页岩也发育接触热变质作用形成的红柱石^[21]。热年代学确定盘山岩体侵位深度约为 10km,初始岩体温度约为 520℃^[22],换算的古地温梯度为 5.2℃/100m。

地层有机质成熟度能够反映古地温,镜质组反射率(R_o)是研究古地温的方法之一^[23]。谷-1 井下马岭组页岩的 R_o 为 5.17%^[24],永热-1 井石炭系一二叠系泥页岩的 R_o 为 4.29%~5.05%,平均 4.69%,均显示高成熟度。对永热-1 井古地温及生烃演化史模拟,晚侏罗世古地温梯度为 6.9℃/100m。用红柱石接触变质温度 500℃作为古地温,反算研究区石炭系一二叠系原始埋藏深度约为 7km。现今永热-1 井红柱石带埋藏深度约为 0.6km,说明谷积山背斜抬升剥蚀了约 6.4km,地层剥蚀厚度与红柱石带上覆三叠系一侏罗系约 7km 的原始沉积厚度基本一致,表明谷积山背斜深部隐伏的花岗岩体初始侵入深度大于 7km。

热传导计算表明,燕山期隐伏岩浆岩体的热量已冷却散失殆尽,不应作为热源考虑^[25]。但燕山期花

岗岩放射性元素衰变生热率高达 $4.81\mu\text{W}/\text{m}^3$,比其他时代岩石产热率高出 3 倍以上,京津冀平原花岗岩地壳放射性元素衰变产热量对大地热流的贡献高达 50%~62%^[26]。北京及周边的松山温泉、温泉村温泉、赤城温泉的成因与燕山期花岗岩体有关^[27]。因此,分析谷积山背斜深部隐伏花岗岩体的放射性元素衰变生热是谷积山地热系统形成的重要附加热源。

3 地热系统的成因模式

由上述分析可知,谷积山背斜南翼与东南翼以八宝山断裂与黄庄-高丽营断裂组成的断裂带为边界,与坨里-长辛店断陷盆地相接,为起阻水主导作用边界;东北部与九龙山向斜和石门营向斜过渡,为地下热水深部径流排泄边界;西部为地下冷水补给边界。

谷积山地热系统的热储层为蓟县系雾迷山组白云岩岩溶裂隙水。谷积山地热系统西南部的十渡-房山中穹褶蓟县系白云岩裸露区为本区地下热水来源的大气降水补给区,与本区形成数百米的地下水循环系统压力差。谷积山地热系统的热源为地幔热流与深部隐伏花岗岩体放射性衰变生热,且放射性生热量对地热系统的形成起主控作用。

基于以上分析,提出谷积山地热系统成因模式如图 5 所示。

谷积山地热系统西南部十渡-房山中穹褶雾迷山组白云岩接受大气降水入渗补给,产生与穹窿区数百米的地下水循环系统压力差。基于雾迷山组白云岩岩溶裂隙发育、渗透性强,地下水沿穹褶区的岩溶裂隙向东北部方向径流。地下冷水逐渐流入谷积山地热系统后,在高温流背景环境下,不断缓慢径流并与热岩层进行热量交换而升高温度,谷积山背斜区域形成地下热水资源富集区。同时,由

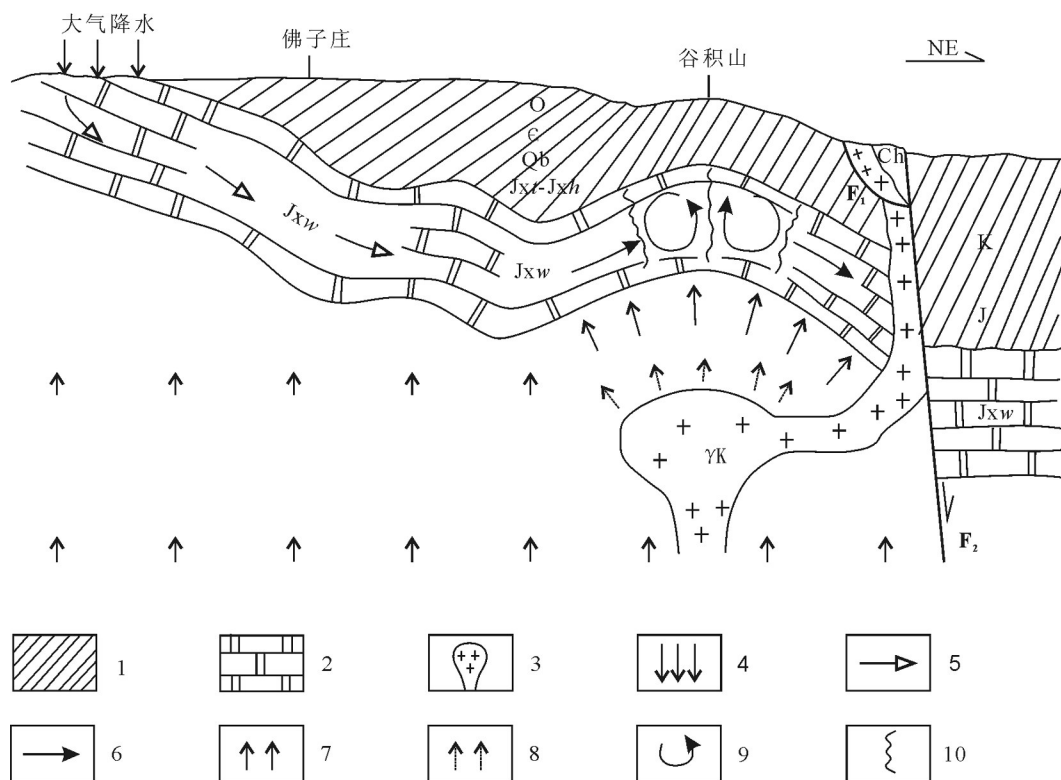


图5 谷积山地热系统成因模式示意图

Fig. 5 The genetic model of Gujishan geothermal system

1—热储盖层;2—雾迷山组白云岩热储层;3—白垩纪隐伏花岗岩体;4—大气降水;5—地下冷水流向;6—地下热水流向;7—大地热流;
8—岩体放射性热流;9—地下热水层内循环;10—岩溶裂隙;F₁—八宝山断裂;F₂—黄庄—高丽营断裂。地层代号注释同图1和图2

于谷积山背斜核部区域雾迷山组白云岩岩溶裂隙发育,热储厚度巨大,可能存在热储层内地下热水对流循环作用,深部高温热水沿裂隙向浅部运移,浅部低温热水向深部循环。

由于八宝山断裂与黄庄—高丽营断裂的阻水作用,地下热水继续向谷积山背斜东北翼方向径流,最终地下热水径流出谷积山地热系统。

4 西山地热资源远景预测

京津冀平原盆地地热田的热源为上地幔和地壳花岗岩放射性元素的热蜕变^[26]。北京西山地区燕山期花岗岩侵入活动强烈,山区发育八达岭岩浆岩带。山前平原区分布有房山岩体—昆明湖—阳坊岩体—小汤山花岗岩带,岩体主要分布于背斜(穹窿)区域,并且分布有小汤山背斜地热田、昆明湖背斜地热田及温泉村温泉,这些地热田与花岗岩体密切相关。西山地区穹窿型构造发育,如谷积山背斜、青白口穹窿、下苇甸穹窿、大白石尖短轴背斜、汉白

玉产地的高庄缓穹窿等。这些穹窿或短轴背斜区域几乎都分布有燕山期的小花岗岩体或岩脉,下苇甸穹窿东翼的军庄分布有水温50℃的京西热-3地热井。这些穹窿型构造与谷积山地热系统具有相似的地质构造背景,基于谷积山地热系统的成因模式,笔者预测,下苇甸穹窿、青白口穹窿、大白石尖短轴背斜、汉白玉产地的石门背斜^[28]等区域可能具有以深部隐伏酸性岩浆岩体放射性元素衰变生热为热源的地质条件,热储层主要为蓟县系雾迷山组、高于庄组等层位的白云岩岩溶裂隙热水,有成为西山地热资源富集远景区的潜力,未来有可能成为“北京西山地热田”。

5 结论

(1)北京西山谷积山背斜具有形成水热型地热系统的地质条件,热储为蓟县系雾迷山组白云岩岩溶裂隙水。3口地热井勘查深度为1403~3866m,出水温度为40~49℃,涌水量为1346~2409m³/d,单位涌

水量为 $17.3\sim 91\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,地下热水为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,呈中-弱碱性、微硬度,为氟水型淡热矿水。

(2)雾迷山组白云岩热储平均地温梯度为 $1.07^\circ\text{C}/100\text{m}$,热储盖层主要为寒武系与青白口系砂页岩,平均地温梯度为 $2.16^\circ\text{C}/100\text{m}$,推断谷积山背斜核部3000m深热储温度约 62°C ,地下热水资源富集,深部地热资源潜力较大,初步称为谷积山地热田,是北京西山隆起区新发现的地热田。

(3)构建了谷积山地热系统的成因模式,地热系统的热源为背斜深部隐伏的燕山期酸性花岗岩体放射性元素衰变生热量,确认北京西山隆起区存在热穹隆构造雾迷山组白云岩层状热储地热系统类型,不同于一般隆起山地断裂对流型地热系统。

(4)北京西山燕山期穹窿型构造发育,与谷积山地热系统地质构造背景相似,具有深部隐伏酸性花岗岩体放射性衰变生热为热源的地热条件,穹窿型构造有可能成为地热资源的富集区,地热资源潜力较大,有可能成为“北京西山地热田”。建议今后加强西山地区的地热勘查研究工作程度,采用深部地球物理勘查新技术识别隐伏岩浆岩体,重视穹窿型构造的成因机制研究,加强地热资源成矿规律、预测研究等,实现北京西山地热资源勘查研究与开发利用突破。

致谢:北京市地质调查研究院吕金波教授级高工对本文进行了审阅和修改,谨致谢忱。

参考文献

- [1] 宾德志,刘久荣.北京地热资源[C]//刘久荣,郑克桢,刘时彬,等.北京地热国际研讨会论文集.北京:地质出版社,2002:169-177.
- [2] 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.
- [3] 信永水.北京小汤山地热田成因的探讨[J].物探与化探,1989,13(6):473-475.
- [4] 刘久荣,郑克桢,刘时彬,等.北京地热国际研讨会论文集[M].北京:地质出版社,2002:145-264.
- [5] 吴璐苹,石昆法.松山地下热水勘探及成因模式探讨[J].物探与化探,1996,20(4):309-315.
- [6] 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.
- [7] 肖文进,路九如,刘清晓,等.北京奥林匹克公园—北苑家园地区地热水流体地球化学特征和形成时代分析[J].地学前缘,2009,16(2):384-395.
- [8] 柯柏林.北京市平原区北部孙河断裂带的地热地质特征[J].现代地质,2009,23(1):43-48.
- [9] 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.
- [10] 北京市地质矿产局.北京市区域地质志[M].北京:地质出版社,1991:389-466.
- [11] 吕金波,郑桂森,李安宁,等.北京百年地质调查的传承与发展——《北京市区域地质志》修编[J].地质通报,2016,35(11):1906-1917.
- [12] 郑桂森,徐吉祥,吕金波,等.北京西山大石河山峡阶地发育特征[J].地质通报,2017,36(7):1251-1258.
- [13] 吕金波.北京基础地质研究史[J].城市地质,2014,8(3):8-13.
- [14] 耿俊峰,刘广志.地热能源手册[M].北京:地质出版社,1987:1-6.
- [15] David R. B. Geologic Fundamentals Of Geothermal Energy[M]. USA: CRC Press, 2017:19-29.
- [16] 牛树银,孙爱群,王宝德.地幔热柱与资源环境[M].北京:地质出版社,2007:1-43.
- [17] 车自成,罗金海,刘良.中国及其邻区区域大地构造学[M].北京:科学出版社,2013:238-257.
- [18] 鲍亦冈,谢德源,陈正帮,等.论北京地区燕山运动[J].地质学报,2014,57(2):195-203.
- [19] 宋鸿林.北京西山谷积山箱形背斜倾伏端构造研究[J].地质学报,1966,46(1):29-38.
- [20] 赵温霞.周口店地质及野外地质工作方法与高新技术应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2012:28-37.
- [21] 赵丽君.华北克拉通北缘早中生代岩体侵位与地壳变形——以盘山岩体周缘变形及年代学分析为例[J].地质与勘探,2010,46(1):102-112.
- [22] 吴珍汉,崔盛芹,朱大岗,等.燕山南缘盘山岩体的热历史与构造—地貌演化过程[J].地质力学学报,1999,5(3):28-32.
- [23] 邱楠生,胡圣标,何丽娟.沉积盆地热体制研究的理论与应用[M].北京:石油工业出版社,2004:38-44.
- [24] 刘清俊,柯柏林,林海亮,等.北京地区中元古界下马岭组页岩气形成条件[J].地质科技情报,2014,33(2):92-96.
- [25] 张宏仁.地热资源评价中的热力学问题[J].水文地质工程地质,1982,(6):9-13,27.
- [26] 阎敦实,于英太.京津冀油区地热资源评价与利用[M].武汉:中国地质大学出版社,2000:52-56.
- [27] 周海燕,周训,方斌,等.北京及其西北邻区温泉[J].城市地质,2006,1(1):9-15.
- [28] 吕金波,郑桂森,王继明,等.北京市房山区石门花岗岩体特征[C]//陈安泽,等.中国地质学会旅游地质与国家地质公园研究分会成立大会暨第20届旅游地质与地质公园学术年会论文集.北京:林业出版社,2005:312-315.
- ① 北京市国土资源局.北京市地热资源2006—2020年可持续利用规划.北京市人民政府发布,2006.
- ② 北京市地质调查所.石景山幅、良乡幅区域地质调查报告.2006.