

环首都山区温泉发育特征与开发利用前景

刘伟朋^{1,2}, 贾小丰^{1,2}, 张子纯^{1,2}, 张秋霞^{1,2}, 马光伟⁴, 杨骊^{1,2}, 李胜涛^{1,2,3}

(1.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300304; 2.天津市地热资源勘查开发工程研究中心, 天津 300304; 3.自然资源部地质环境监测工程技术创新中心, 天津 300304; 4.河北省地质矿产勘查开发局第九地质大队, 邢台市 054000)

摘要:【研究目的】环首都山区属于京津冀生态涵养区, 包括集中连片特困区, 温泉资源较丰富, 但勘查开发程度较低, 开展温泉分布规律和发育特征研究, 对于山区地热资源的勘查开发具有一定的指导意义。【研究方法】本文在收集京津冀山区温泉和深部构造资料基础上, 叠加分析, 揭示了温泉分布与深部构造热背景的联系。结合补充调查、样品采集及综合研究, 总结温泉发育特征, 并深入探讨了温泉热源与成因, 因地制宜提出研究区温泉开发利用前景。【研究结果】结果表明: 温泉主要沿 NE、EW 向深大断裂呈带状或串珠状分布, 研究区 90%温泉分布在莫霍面深部构造变异带内。温泉温度与居里面埋深具有一定的相关性, 燕山北部高温温泉区居里面埋深 20 km 左右, 燕山与太行山交接带较高温温泉区居里面埋深 22~24 km, 太行山及燕山东南部低温温泉区居里面埋深 22~26 km; 温泉热源主要来自地幔热或“低速-高导层”, 上地幔底辟体和深大断裂为深部热源的上涌提供了良好的通道; 在区域尺度上, 温泉出露温度与循环深度不存在直接对应关系, 山间盆地沉积岩储层热储温度较低, 温泉流量较大, 最高可达约 120 m³/h; 变质岩热储温度一般大于 100℃, 流量较小。研究区温泉水普遍具有医疗开发利用价值, 其中, 燕山北部和山间盆地, 具有较好的供暖潜力, 承德七家-茅荆坝等地区可进一步向热电一体化方向发展。【结论】环首都山区温泉分布及发育特征受深部构造和区域地质结构影响明显, 在燕山北部和山间盆地地区具有较好的开发利用前景。

关键词: 环首都山区; 温泉; 深部构造; 地热地质; 热源; 地质调查工程; 开发利用前景

创新点: 首次从区域角度上利用叠加分析揭示了环首都山区温泉分布与深部构造热背景的联系; 系统总结了不同区域地质背景下的温泉发育特征, 探讨了温泉热源及成因模式, 因地制宜的提出了山区地热资源高效开发利用方向。

Formation characteristics of hot springs and its development prospects in mountain areas around the capital of China

LIU Weipeng^{1,2}, JIA Xiaofeng^{1,2}, ZHANG Zichun^{1,2}, ZHANG Qiuxia^{1,2}, MA Guangwei⁴, YANG Li^{1,2}, LI Shengtao^{1,2,3}

(1. Center For Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Tianjin 300304, China; 2. Tianjin Engineering Center of Geothermal Resources Exploration and Development, Tianjin 300304, China; 3. Technology Innovation Center for Geological Environment Monitoring Engineering, MNR, Tianjin 300304, China; 4. Ninth Geological Brigade, Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Xingtai, Hebei Province, 054000 China)

Abstract: The paper is the result of geothermal geology survey engineering.

[Objective] The mountainous areas surrounding the capital city belong to the ecological conservation area of Beijing-Tianjin-Hebei, including the contiguous areas of extreme poverty, and are rich in hot spring resources, but the degree of exploration and development is low. It is of certain guiding significance to carry out research on the distribution pattern and development characteristics of hot springs for the exploration and development of geothermal resources in mountainous areas. **[Methods]** In this paper, based on the collection of information on hot springs and deep tectonics in the mountainous areas of Beijing, Tianjin and Hebei, superimposed analysis reveals the connection between hot spring distribution and deep tectonic thermal background, and explores in depth the hot spring heat source and its formation. Combined with supplementary surveys, sample

collection and comprehensive research, the development characteristics of hot springs were summarized, and prospects for hot spring development and utilization in the study area were proposed according to local conditions. **[Results]**The results show that hot springs are mainly distributed along NE and EW deep major fractures in the form of bands or beads, 90% of the hot springs are distributed within the deep structural variation zone of the Moho surface in the study area. The temperature of hot springs has a certain negative correlation with the depth of dwelling, the depth of dwelling in the high hot spring area in the northern Yanshan being about 20km, the depth of dwelling in the relatively high hot spring area in the Yanshan-Taihang Mountains junction zone being about 22~24 km and the depth of dwelling in the low hot spring area in the southeast Yanshan being 22~26 km; the heat source of hot springs mainly comes from the mantle heat or "low-velocity-high-conductivity layer", and the upper mantle diapirs and deep large faults provide good channels for the upwelling of deep heat sources; On the regional scale, there is no direct correspondence between the hot spring outcrop temperature and the depth of circulation, and the thermal reservoir temperature of sedimentary rock reservoirs in the intermountain basin is low, with a large flow rate of hot springs, up to about 120 m³/h. The thermal reservoir temperature of metamorphic rocks is generally greater than 100°C, with a smaller flow rate. The hot spring water in the study area generally has medical development and utilization value, among which, the northern Yanshan and intermountain basins, have a better potential for space heating, and areas such as Qijia-Maojingba can be further developed in the direction of thermol-electric integration. **[Conclusions]**The distribution and development characteristics of hot springs in the mountains area around the capital city are influenced by the deep tectonic and regional geological structure. The northern Yanshan Mountains and intermountain basins have good development and utilization prospects.

Key words: Mountains surrounding the capital; hot springs; deep tectonic; geothermal geology; heat sources; geological survey engineering; development and utilization prospects

Highlights: For the first time, the connection between the distribution of hot springs in the mountainous areas around the capital and the deep tectonic thermal setting was revealed by overlapping analysis on a regional scale; the development characteristics of hot springs in different regional geological settings were systematically summarized, and hot spring heat sources and genesis models were investigated, and the direction of efficient development and utilization of geothermal resources in mountainous areas was proposed on local conditions.

About the first author: LIU Weipeng (1985-), male, senior engineer, mainly engaged in research on geothermal geology, hydrogeology, engineering geology and environmental geology; E-mail: liuweipeng@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: LI Shengtao (1982-), male, professor, mainly engaged in research on hydrogeology, engineering geology and environmental geology and geothermal reservoir engineering; E-mail: li.st@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20221680, No.DD20160232, No.12120114010802).

1 引言

温泉是隆起山地型(对流型)地热资源在地表的直接显示,也是确定地热田勘查区最好和最可靠的依据(阮克孝,2015)。邱楠生等(2022)对我国温泉统计中,小于75°C的中低温温泉占比达91.7%,且分布广泛,不论从地热能开发利用的角度,还是从地热研究为出发点,中低温温泉研究已经引起越来越多的关注。环首都山区温泉属于北方温泉区,主要出露于太行山及燕山山脉,一般温度40~60°C,最高温度98°C,以中低温温泉为主。以往学者对该区域部分温泉等地热异常区开展了一定的研究。刘峰等

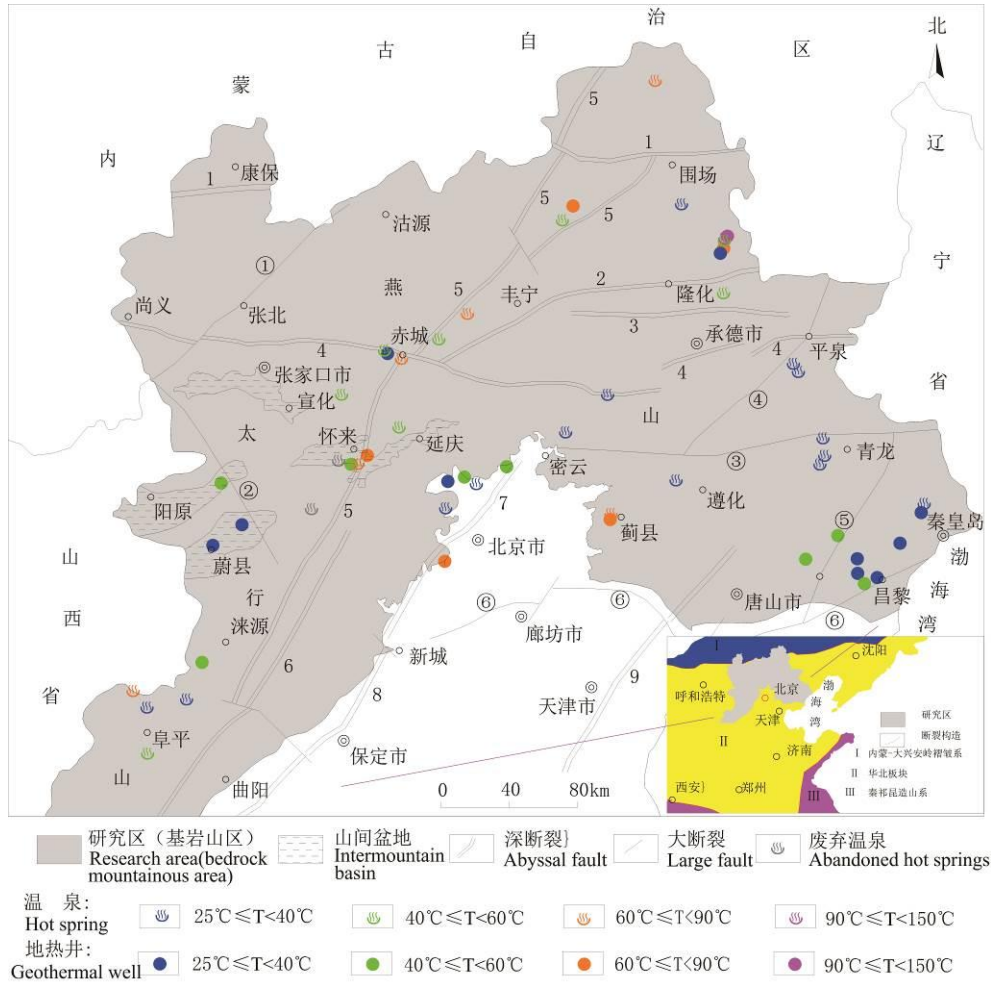
(2020) 计算燕山中部七家-茅荆坝地区大地热流值, 郭瑞林等(2015) 从水循环的角度分析七家温泉特征及成因, 张雪等(2012)、王艺璇等(2022) 从水化学的角度分析了承德地区温泉特征和成因, 王基华等(2000) 通过氢氧同位素分析了张家口、怀来等山间盆地温泉形成过程; 在成因分析中, 王基华、郭瑞林等认为温泉热源为燕山期岩浆储存热或残余热, 吕文斌等(2016) 认为山区地热热源主要来自上地幔和花岗岩壳的放射性元素衰变。本文在以往学者研究的基础上, 从区域角度分析了温泉分布与深大断裂、居里面及莫霍面等深部构造关系, 总结了不同地形地貌及地质构造单元温泉水温、水量及热储温度等发育特征, 探讨了温泉热源及成因模式, 结合当前社会需求因地制宜的提出了不同温泉区的开发利用前景, 为环首都山区地热资源的深入研究及勘查开发利用提供一定的理论基础与发展方向。

2 区域地热地质背景

环首都山区温泉主要分布在华北板块板内造山带燕山-太行山山脉(罗照华等,2006;邵济安,2020), 太古代-古元古代变质岩系构成研究区结晶基底, 广泛出露于太行山和燕山地区, 占基岩出露区总面积的1/4, 累计厚度达万米以上, 由一套麻粒岩相至角闪岩相的深变质岩石组成。其上不整合沉积中、新元古界、古生界沉积岩系, 主要分布在尚义-承德以南的广大地区; 中生界碎屑岩及火山沉积岩系主要分布在燕山中北部地区, 以上区域发育温泉以隆起山地型为主; 新生界地层在坝上及燕山—太行山山间盆地均有分布, 岩性以砾岩、砂岩、火山角砾岩、玄武岩为主, 地热资源以山间盆地型为主。除此之外, 据《河北省北京市天津市区域地质志》显示, 环首都山区地质构造复杂, 自太古代以来, 经历了多次构造运动, 尤其是中生代以来, 华北板块东部受燕山运动和西太平洋板块俯冲等作用影响(王瑜等,2018), 华北克拉通破坏, 上地幔熔融物质上涌, 形成酸性侵入体和玄武岩浆喷出, 大面积分布于燕山承德及太行山涞源等地区。

3 温泉分布规律

本研究共收集温泉及地热井等地热异常点 52 处, 位置距离相近的温泉群视为一处, 见图 1。在本次研究中由于大部分温泉点及其周边地热井, 热储类型一致, 因此, 本文将地热井与温泉等地热异常点统一以温泉地热资源表述, 为了清晰有效分析温泉分布规律, 根据《地热资源地质勘查规范(GB/T11615-2010)》, 统一将温泉温度划分为四类: 低温温泉($25^{\circ}\text{C}\leq T<40^{\circ}\text{C}$)、中温温泉($40^{\circ}\text{C}\leq T<60^{\circ}\text{C}$)、偏高温温泉($60^{\circ}\text{C}\leq T<90^{\circ}\text{C}$)、高温温泉($90^{\circ}\text{C}\leq T<150^{\circ}\text{C}$)。以往研究中, 部分学者分析了典型地热异常区温泉与一般断裂的位置关系, 本文在以往研究的基础上, 从区域角度分析了温泉发育与深大断裂、居里面、莫霍面等深部构造的相关性。



1.康保—围场深断裂；2.丰宁—隆化深断裂；3.大庙—娘娘庙深断裂；4.尚义—平泉深断裂；5.上黄旗—乌龙沟深断裂；6.紫荆关—灵山深断裂；7.怀柔—涞水深断裂；8.定兴—石家庄深断裂；9.沧州大名深断裂。①沽源—张北大断裂；②马市口—松枝口大断裂；③密云—喜峰口大断裂；④平坊—桑园大断裂；⑤青龙—滦县大断裂；⑥固安—昌黎隐伏大断裂

1. Kangbao-Weichang deep fault; 2. Fengning-Longhua deep fault; 3. Damiao-Niangniangmiao deep fault; 4. Shangyi-Pingquan deep fault; 5. Shanguangqi-Wulonggou deep fault; 6. Zijinguan-Lingshan deep fault; 7. Huairou-Laishui deep fault; 8. Dingxing-Shijiazhuang deep fault; 9. Cangzhou-Daming deep fault. ①Guyuan-Zhangbei fault; ②Makou-Songzhikou fault; ③Miyun-Xifengkou fault; ④Pingfang-Sangyuan fault; ⑤Qinglong-Luanxian fault; ⑥Gu'an-Changli concealed fault

图1 研究区温泉及深大断裂构造分布示意图 (据张德忠等, 2013修改)

Fig.1 Schematic diagram of distribution of hot springs and abyssal fault in research area (modified from Zhang Dezhong et al., 2013&)

3.1 温泉分布与断裂构造特征

研究区所处大地构造位置,大致以康保-围场断裂为界,以北属内蒙-大兴安岭褶皱系南缘,以南为中朝准地台构造单元。在中朝准地台上,分布有多条深断裂和大断裂。深断裂为切穿硅铝层,深入硅镁层或上地幔,空间延伸上百千米(张德忠等,2013)。大断裂为深断裂的次级断裂,一般未深入硅镁层,在平面上可延伸上百千米。深断裂与大断裂一起构成连通上地幔热源的断裂网,成为了深部地热向上传导的良好通道。深大断裂在长期发展过程中,具有多次继承性活动特点,断裂活动会引起深部高温流体或浅部低温流体的运移从而导致沿断裂附近的地温分布的局部异常(赵国瑞,2011)。由图1可知研究区温泉主要分布在深大断裂带交汇处及其影响带附近,总体呈NE向带状分布,尤其沿上黄旗-乌龙沟深断裂带,温泉呈串珠状分布;同时温泉温度受深断裂影响明显,在阳蔚盆地-怀来盆地一带,受深断裂构造影响,温泉温度具有从西南向东北方向逐渐增高的趋势,阳蔚盆地温泉温度为35°C左右,至东北部上黄旗-乌龙沟深断裂附近的后郝窑温泉温度达86°C。在燕山北部深断裂发育区,例如隆化-丰宁-赤城区域,温泉温度整体高于燕山南部青龙-遵化-秦皇岛等大断裂发育区。

3.2 温泉分布与居里面深度特征

居里面是地球岩石圈上部磁壳层的底界面，随着埋藏深度增加温度升高，当温度达到一定值时，磁性矿物将会失去铁磁性变为顺磁性，此时的温度为居里点（磁铁矿的消磁温度为 $580\sim 585^{\circ}\text{C}$ ），对应的埋藏深度界面为居里等温面，简称居里面（Spector A, et al.1970;侯重初,1989）。居里面是岩石圈热特征界面，能够表征地壳磁性层的分布特点、地壳热均衡状态和不同地区热结构特征，对于地热、矿产、岩浆研究具有重要意义（Tanaka A, et al.1999; 刘益中等,2012; Gao Guoming, et al.2015）。

由温泉分布与居里面埋深图(图 2)可知，环首都山区居里面埋深整体较平原区浅，主要在 $20\sim 28\text{km}$ 。温泉出露区主要在 $20\sim 26\text{km}$ ，其中，燕山北部高温泉区居里面深度 20km 左右，较高温泉区主要分布在燕山与太行山交接带，居里面深度 $22\sim 24\text{km}$ ，中低温泉区主要分布在太行山及燕山南部，居里面深度 $22\sim 26\text{km}$ 。因此，较浅的居里面利于温泉发育，温泉出露温度与居里面埋深具有一定的负相关性，居里面埋深是上地幔热和地壳深部热背景的综合反映，进一步说明深部热背景对山区温泉的发育具有一定的控制作用。

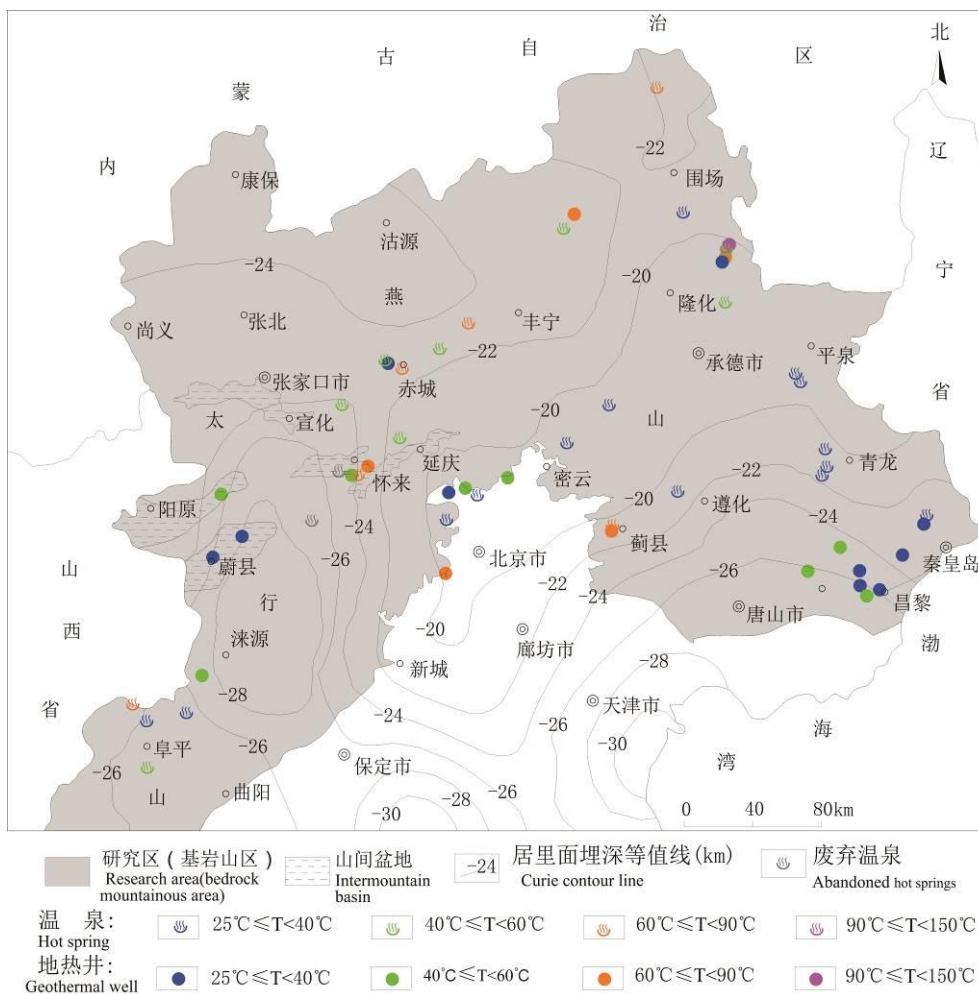


图2 温泉分布与居里面埋深等值线图

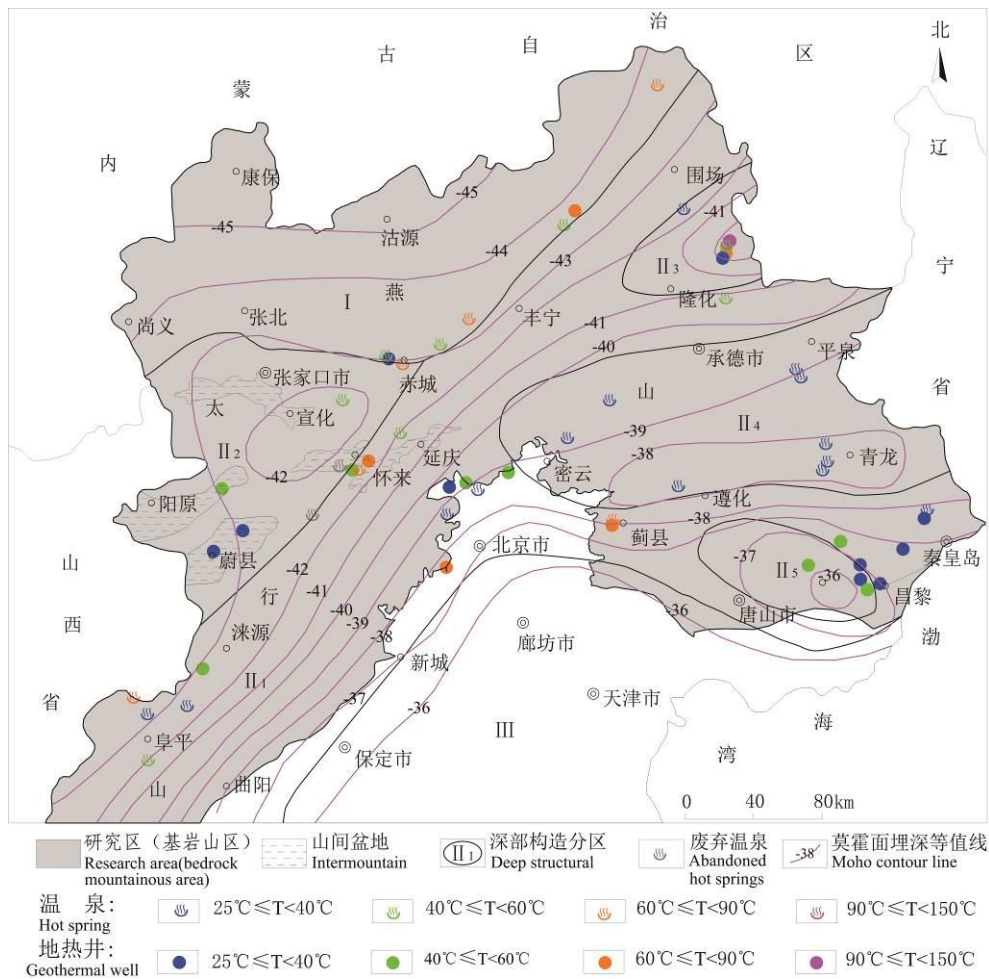
Fig.2 Distribution of hot springs and contour of Curie-point isotherm surface depth

3.3 温泉分布与莫霍面深度特征

莫霍面是地球内地壳和地幔的分界面（邱楠生,2022），其深度分布特征对于岩石圈热结构、深部动力学、地热资源潜力具有重要意义。根据莫霍面起伏形态与地形地貌的镜像式对称关系，可将研究区域划分为3个深部构造区：一是坝上高原上地幔拗陷区，分布在丰宁-张家口以北，浅层构造相对稳定，莫霍面埋深大于 43km ，基本无地热异常显示；二是燕山—太行山区上地幔坎（阶）带，位于华北克拉通东部破坏带（朱日祥等,2019），属于深部构造变异带，莫霍面埋深由 43km 减小到 36km ，变异带落差 $5\sim$

7km, 浅部反映为一系列宏伟的深断裂带(张德忠等,2013), 在构造盆地边缘和深大断裂附近有温泉出露(刘峰等,2019); 三是华北平原上地幔隆起区, 莫霍面埋深小于37km, 结晶基底埋深一般3~6km, 受新生界盖层影响, 无温泉出露, 但在基岩凸起部位均有地热异常显示。

将研究区温泉分布与莫霍面埋深分区叠加可知, 温泉主要分布在燕山-太行山深部构造变异带内, 见图 3, 沿变异带分界线附近, 即莫霍面变异落差较大区域, 形成了一个 NE 向沿围场、承德至丰宁、怀来、涞源、阜平的地热异常带, 该带莫霍面垂直变幅约 2km。另一个 EW 向延庆-遵化-青龙一带的地热异常带, 莫霍面垂直变幅约 1km。由图可知, NE 向地热异常带温泉温度整体较 EW 向温泉温度高, EW 向温泉涌出带水温一般小于 50℃, 初步认为 NE 向莫霍面变异落差较大, 深部断裂构造发育造成的。同时, 在燕山与太行山交汇的张家口、蔚县、怀来等山间盆地, 为张蔚上地幔凸起带, 在山间盆地边缘发育有中温温泉, 在山间盆地内部区域发育有盆地型地热田, 水温一般大于 40℃。



I: 坝上高原上地幔坳陷区; II: 太行山-燕山深部构造变异带(II₁ 构造变异带、II₂ 张蔚上地幔凸起、II₃ 张三营上地幔凸起、II₄ 兴隆青龙上地幔凹陷、II₅ 迁滦上地幔凸起); III: 华北平原上地幔隆起区。

I: Bashang Plateau upper mantle depression area; II: Taihang-Yanshan deep structural variation belt (II₁ Tectonic variation belt、II₂ Zhangwei upper mantle uplift、II₃ Zhangsanying upper mantle uplift、II₄ Xinglong-Qinglong upper mantle depression、II₅ Qianluan upper mantle uplift); III: Hebei basin upper mantle uplift area。

图3 温泉分布与莫霍面深部构造分区图(据张德忠等, 2013修改)

Fig.3 Distribution of hot springs and tectonic divisions of Moho (modified from Zhang Dezhong et al., 2013&)

4 温泉发育特征

4.1 温泉水温、水量特征

环首都山区温泉分布主要受断裂带、燕山-太行山深部构造变异带等因素控制。除此之外, 地热异常区的地质岩性及储盖组合等是温泉水温、水量等发育特征的直接影响因素。根据区域地质岩性和地形

地貌条件，将太行山-燕山深部构造变异带进一步划分为京北燕山、京西太行山和京西北山间盆地三个水热活动区见表 1。

4.1.1 京西太行山区

太行山山地属于山西断隆，因受燕山和造山运动的影响，发育了 NW 向和 NNE 向 2 组深断裂，沟通了深循环的地下热水。温泉多出露在古老的变质岩地层中，多以单泉的形式出现，以开放型热储为主，已有易县大地热流值 26 mW/m^2 。温泉水温 $27\sim 62^\circ\text{C}$ ，如阜平县变质岩区的城南庄温泉水温 47°C ，涌水量 $2.9 \text{ m}^3/\text{h}$ ；砂窝乡下堡温泉水温 39.5°C ，涌水量 $6.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ；吴王口乡温塘温泉水温 62°C ，涌水量 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 。涞源县沉积岩地层中龙门温泉水温 45°C ，涌水量约 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ；阜平县沉积岩地层中金龙洞温泉水温 27°C ，涌水量约 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

4.1.2 京西北山间盆地

位于燕山和太行山的交接区，主要包括蔚县—阳原、赵川—怀来—延庆等山间盆地隐伏型地下热水活动区，具有明显的储盖组合，大地热流（平均值 45.9 mW/m^2 ）相对京西太行山地区较高。蔚县-阳原盆地地层岩性以沉积岩为主，热储为层状碳酸盐岩热储，水温较低，一般小于 42°C ，水量较大，一般大于 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ，如阳原县三马坊乡澡洗塘地热异常区，水温 $37\sim 42^\circ\text{C}$ ，涌水量 $14\sim 122 \text{ m}^3/\text{h}$ ，蔚县卜南堡和南洗冀异常区，水温 $32\sim 38^\circ\text{C}$ ，自流量 $15\sim 37.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ；怀来盆地地层岩性以变质岩基底和上部的松散沉积层组成，具有双层热储结构，包括基岩热储和浅层孔隙型热储。其中，基岩热储受控于断裂构造，呈条带状分布；浅层孔隙型热储是位于基岩热储上部的次生热储，孔隙型热储中的热水来源于下部基岩构造破碎带上涌的地下热水，由上涌中心向四周扩散，与常温地下水混合，水温逐渐降低，热储范围常呈闭合的不规则圆形分布。水温一般大于 40°C ，最高水温 86°C 。如赤城县东万口乡塘子庙水温 $41\sim 72^\circ\text{C}$ ，涌水量 $0.23\sim 20 \text{ m}^3/\text{h}$ ；怀来盆地后郝窑温泉水温 $40\sim 86^\circ\text{C}$ ，涌水量 $7.56\sim 80 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

4.1.3 京北燕山区

位于燕山台褶带和内蒙地轴北东向地幔隆起带，地层岩性以火山岩、变质岩及侵入岩为主。温泉多以单泉或泉群的形式出现，主要分布在燕山期岩浆岩接触带和北东、北北东向活动断裂附近，以开放性热储为主，其中，承德地区大地热流平均值为 35 mW/m^2 ，最高值达 74.9 mW/m^2 （刘峰等,2020）。以赤城—滦平—平泉一线为界。界线以北属冀北东西向隆起带，地下热水活动与北西向、北东向、北北东向和东西向 4 组断裂构造交汇复合有关，温度一般大于 60°C ，最高温度达 98°C 。如承德七家地热异常区水温 $50\sim 98^\circ\text{C}$ ，涌水量 $8\sim 70 \text{ m}^3/\text{h}$ ；界线以南为东西向沉降带，水温均低于 60°C ，一般 $30^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$ ，如青龙县白家店乡汤杖子地热异常区水温 $29\sim 39.5^\circ\text{C}$ ，涌水量 $0.4\sim 7.3 \text{ m}^3/\text{h}$ ；昌黎县龙家店镇李念坨地热异常区水温 $27\sim 45^\circ\text{C}$ ，涌水量小于 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

表 1 温泉热背景与温度、水量一览表

Table 1 List of thermal background, temperature and water volume of hot springs

地理分布	温泉或地热异常区	出露点岩性	大地热流值 mW/m^2	温度区间 $^\circ\text{C}$	一般涌水量及最大值/ m^3/h^{-1}
太行山区	阜平、涞源	变质岩为主、沉积岩次之	26	$27\sim 62$	$<10, 40$
山间盆地	蔚县-阳原、赵川-怀来盆地	沉积岩、变质岩	$25.5\sim 61$	$25\sim 86$	$<80, 122$
燕山山区	赤城-滦平-平泉以北山区	岩浆岩为主	$44.8, 74.9$	$36\sim 98$	$<30, 100$
	赤城-滦平-平泉以南山区	变质岩、岩浆岩	$29.7, 30.1$	$30\sim 50$	$<50, 74$

4.2 温泉热储温度特征

深部热储温度是评价地热资源的重要参数，获取方法有钻井直接测量法和计算法。钻井直接测量法虽然相对精确，但是成本高，尤其在受断裂控制的条带状热储层，直接钻至热储层的可能性较小，因此在前期研究阶段，一般采用计算法（地热温标法）估算深部热储温度（柳春晖,2006）。以往学者通过地热温标法对研究区的部分温泉热储温度进行相关计算研究。张雪（2012）计算燕山山区温泉热储温度为 $40\sim 120^\circ\text{C}$ 之间，循环深度为 $1500\sim 3500 \text{ m}$ ；郭瑞林（2015）计算隆化七家温泉热储温度 174.96°C ，循环深度 3175 m ；王艺璇（2022）计算燕山北部温泉热储温度为 $85\sim 125^\circ\text{C}$ ；李泓泉等（2020）计算蔚县盆地热储温度平均值约 62°C 。目前，对于研究区太行山阜平温泉区域热储温度的研究较少，未查阅到相关数据，因此本次通过地热温标法估算阜平温泉区热储温度。目前，地热温标方法主要有 4 大类： SiO_2

地热温标、阳离子地热温标、同位素地热温标和气体温标（王莹等,2007）。鉴于阜平温泉出露温度 27~62℃，属低温地热资源，因此本文采用适用于低温热水的石英和玉髓温标（属 SiO₂ 地热温标）和 K-Mg 温标（属阳离子温标）进行计算，其中石英和玉髓温标计算公式（王莹等,2007）如下：

$$\text{石英温标公式: } T = \frac{1309}{5.19 - \lg(\rho(\text{SiO}_2))} - 273.15 \quad (1)$$

$$\text{玉髓温标公式: } T = \frac{1032}{4.68 - \lg(\rho(\text{SiO}_2))} - 273.15 \quad (2)$$

式中： $\rho(\text{SiO}_2)$ 代表水中 SiO₂ 离子的质量浓度，mg/L；T 为温度，℃。

阳离子温标计算公式是基于水-岩达到平衡状态下建立的，Giggenbach 于 1988 年提出 Na-K-Mg 三角图，被用来评价地下热水矿物平衡状态，将温泉水分为完全平衡水、部分平衡水和未成熟的水（张雪, 2012）。本文选用修正的 Na-K-Mg 三角图（王欣等,2019; 白博文等,2022）作为底图，进行温泉水的平衡判别及深部热储温度分析（图 4）。由图可知，下堡温泉、城南庄温泉和吴王口温泉属于部分平衡水，采用 Truesdell(1976) Na-K 温标和 K-Mg 温标计算公式（Tonani F B,1980）如下：

$$\text{Na-K 温标: } T = \frac{885.6}{\lg(c_{Na}/c_K) + 0.8573} - 273.15 \quad (3)$$

$$\text{K-Mg 温标: } T = \frac{4410}{13.95 - \lg((c_{Na} * c_{Mg})/c_K)} - 273.15 \quad (4)$$

式中： C_{Na} 、 C_K 分别代表热水中钠、钾离子的质量浓度，mg/L；T 为温度，℃。

法华地热井和金龙洞温泉属于未成熟水，因此法华地热井和金龙洞温泉采用玉髓温标计算，综合计算表，见表 2。由表可知研究区西侧太行山阜平温泉区热储温度 56~147℃。除下堡温泉热储温度较高外，整体太行山温泉区热储温度与燕山温泉区热储温度计算结果基本一致，见表 3。

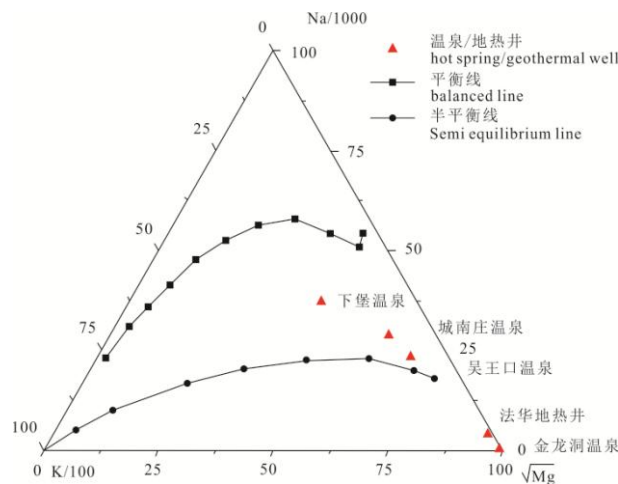


图4 阜平县温泉水Na-K-Mg平衡三角图
Fig.4 Na-K-Mg diagram of hot spring water in Fuping

表 2 阜平温泉区深部热储温度估算统计表

Table.2 Statistical Table for Estimation of Deep Thermal Storage Temperature in Fuping Hot Spring Area

泉/井名称	露头温度 /℃	SiO ₂ /mgL ⁻¹	石英温标 /℃	玉髓温标 /℃	Na-K 温标 /℃	K-Mg 温标 /℃
下堡温泉	39.5	89.09	130.84	104.85	147.40	144.50

吴王口温泉	62	90.47	131.68	105.77	114.22	102.19
城南庄温泉	47	93.91	133.71	108.04	111.20	111.04
法华地热井	26.5	42.31	94.18	64.81	—	—
金龙洞温泉	27	16.55	56.46	—	—	—

表 3 研究区温泉深部热储温度统计表

地理分布	代表温泉/地热异常区	出露温度区间/°C	热储温度区间/°C	数据来源
太行山区	阜平县温泉	27~62	56~147	本文计算值
山间盆地	蔚县盆地	32~38	62*	(李泓泉等,2020)
燕山山区	北部山区温泉	29~98	40~175	(张雪,2012) (郭瑞林,2015)
	南部青龙县异常区	39~46	90~110	(程立群等,2020)

注：带*数据为热储温度平均值

4.3 水化学及动态特征

4.3.1 水化学特征

研究区温泉热储层多为太古界变质岩、中元古界碳酸盐岩及燕山期花岗岩，温泉水一般无色、透明，水温 30~90°C，其化学成分比较单一，阴离子以 HCO₃⁻、SO₄²⁻ 为主，阳离子以 Na、Ca、Mg 为主。其中，出露于变质岩和花岗岩区温泉，pH 值 7.98~8.75，TDS 值 730~997mg/L，水化学类型以 SO₄-Na 型为主，例如，以变质岩构造裂隙为热储层的阜平县温泉、浑源汤头温泉以及以花岗岩构造裂隙为热储层的松山温泉和赤城汤泉；出露于碳酸盐岩地层的温泉，pH 值 7.55~8.30，TDS 值 401~488mg/L，水化学类型以 HCO₃-Ca Mg、HCO₃-Ca Na 型，例如，以蔚县系雾迷山组白云岩为热储层的蔚县盆地及延怀盆地地热异常区。由于温泉水形成经历了深部循环，与围岩长时间接触，加之热储层具有较高的温度，因此，导致研究区温泉中氟、偏硅酸、偏硼酸等离子含量普遍升高，基本达到医疗矿水浓度标准。

4.3.2 动态特征

山区温泉地热水动态受当地地质条件及开采程度的影响而变化。温度上，相对比较稳定，天然变化幅度一般小于 5°C，个别受人为影响大的地区，水温变化幅度较大。如保定阜平县大台乡金龙洞温泉，原水温 45°C，因 1964 年施工水利工程，河床抬高，河水下渗到泉口与泉水混合，使水温降低，2007 年调查水温为 30°C，2013 年调查水温为 28°C，2015、2022 年调查水温 27°C。水量上，在开采量较小或未开采地区，变化较小，在受地质因素影响明显或人工开采强烈的地区，水量呈现减小趋势，部分温泉已出现间歇性断流或干涸的情况，例如张家口涿鹿温泉屯乡温泉，自 1970 年受地面塌陷的影响后，泉水干涸；怀来县桑园镇暖泉村温泉，原泉流量为 11.59m³/h，受人为开采影响，2008 年后，出现季节性干涸。水质上，研究区温泉主要离子成分整体变化较小，个别温泉的个别离子浮动较大，例如保定阜平城南庄温泉的 HCO₃⁻ 离子 1990 年含量为 19.53mg/L，2013 年含量为 2.4mg/L，2022 年含量为 23.19mg/L；承德市滦平县巴克什营镇缸房村太子泉 2009 年 Cl⁻ 离子含量为 4.3mg/L，2013 年为 44 mg/L，但总水化学类型未变，水质动态基本稳定，见表 4。

表 4 典型温泉水化学组分对比表

Table.4 Comparison Table of Chemical Components of Typical Hot Spring Water

典型温泉	取样年份	主要离子含量 (mg/L)						矿化度 (mg/L)	水化学类型
		Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻		
太子泉	2009	10.4	54.5	21.4	4.3	283.1	12	277.9	HCO ₃ -Ca Mg
	2013	7.4	64.9	25.3	44	231.9	27.6	431.6	HCO ₃ -Ca Mg
城南庄温泉	1990	120.39	2.81	0.02	37.23	19.53	115.4	455.1	SO ₄ -Na
	2013	120.1	2.4	0.5	38.3	2.4	99.6	424.2	SO ₄ -Na
	2022	114.83	3.49	0.06	27.20	23.19	116.4	435.0	SO ₄ -Na

5 温泉热源及成因分析

水热型地热系统热源构成主要包括来自地壳深处和上地幔的热量，以及地壳浅部放射性元素 U、Th、K 衰变所释放的热量（王贵玲等,2020）。燕山-太行山深部构造变异带是一个复杂的构造-岩浆岩带（张尔匡,2000），太行山区基底以变质岩为主，地壳浅部岩层放射性生热率低，燕山山区基底以岩浆岩为主，具有相对较高的岩石生热率，但不属于高产热花岗岩体（刘峰等,2020），研究区整体与中国东部岩石圈

热结构相同，属于“热幔冷壳”型，温泉热源主要来自地壳深部和幔源热。例如研究区高温温泉出露区的七家-茅荆坝地热田，在叠加分析中，莫霍面埋深 35.5km，居里面埋深 20km 左右，在研究区域上属于抬升区，据刘峰等，(2020) 地热田区域上地壳及以上岩层放射性生热热流贡献率约 23%。除此之外，在张家口-蓬莱地学断面中，唐山至张北段的中、下地壳存在低速高导体(杨歧焱等,2018)，据 Ma Zongjin (1999)研究，燕山带 8km~20km 以下是伸展构造发育的“多震层”，而燕山带以北的内蒙地轴则“很少地震活动，深部结构单一，不含低速、高导层”（朱日祥等, 2019）。在太行山区的变质核杂岩研究中，在中、下地壳存在韧性剪切带，表现为低速-高导特性，虽然目前对低速-高导层的成因机制有多种解释，但它是与温度有关的壳内软弱层（赵俊猛等,1998;吴纪修等,2021），地壳通道流模型一般认为低速-高导层就是地壳内的部分熔融层，是水（干）热型地热资源的主要热源之一。例如，唐山一带中、下地壳低速体有沿张家口-蓬莱断裂带的中地壳经北京向张家口流动的趋势，该带与天津—北京—张家口的地热资源分布具有良好的对应关系（张保健,等.2020）。因此，研究区温泉热源以地壳深部的低速-高导层和幔源热为主，地壳浅部放射性元素释放热次之。

地壳深部和幔源热以热传导和热对流的方式传输，据中国科学院王均等（1990）编制的中国大陆的现代 3000m 深处地温分布图(阮克孝, 2015;王钧等,1990)，获得研究区 3000m 深的地温值介于 60~80℃，地温梯度介于 15~20℃/km 之间，属于中国东部的地温偏低地区，但是又夹杂着局部地热异常区，前文分析表明，研究区温泉（地热异常区）具有沿深大断层呈带状分布特征，金之钧等，（2002）认为深部高焓流体或其气体组分是地球内部热能向外散发的良好载体，深大断裂、地震、重熔及深熔作用、底侵通道等构造是促使深部流体向地球岩石圈浅部运移的主要通道（张保健,等.2020）。例如，张家口-蓬莱断裂带地壳内的低速高导层和延怀地区井泉水中的幔源氦说明沿断裂带发生了幔源物质的侵入(杨歧焱,等.2018;张保健,等.2020)。除山间盆地地热异常区外，研究区温泉均属于隆起山地深循环型水热系统，形成这种系统的先决条件是存在具有水发生循环的有一定渗透率的断层和破碎带（王贵玲等,2020;王龙平等, 2022），大气降水、地表水或浅部地下水在地形较高的补给区，通过断层或者断裂破碎带向下渗透后进行深循环，地下水在下渗等径流过程中与断层面接触或与深部高焓流体、气体等组分混合获得热量，水温不断升高，水所达到的温度主要取决于区域热流量的大小、断裂带对深部热源的导通性及水循环所及深度等，温度升高的深循环水在地质条件有利的部位（一般为两组断裂的交汇处），沿着构造断裂的高渗透率带上涌出露地表形成温泉。一般莫霍面、居里面埋深浅、深大断裂导通深部低速-高导层或幔源热源的区域，易形成高温温泉；而莫霍面、居里面埋深较深，地下水循环断裂未断遇异常热源或导通性较差的区域，一般形成中低温温泉，见图 5。

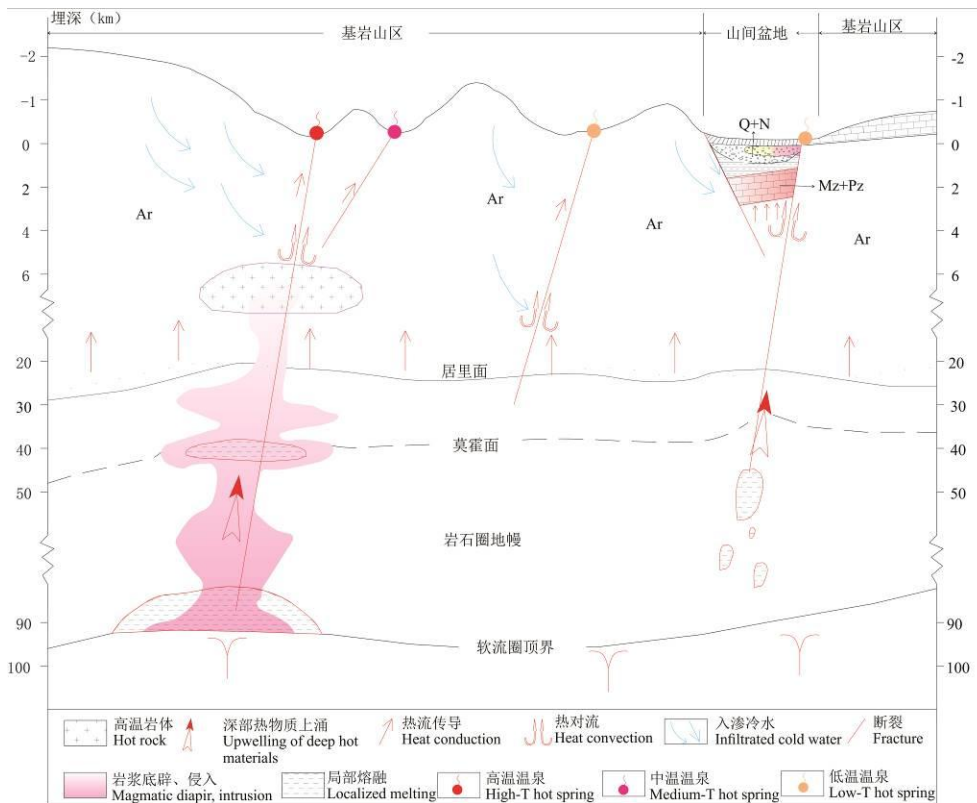


图5 研究区温泉热源及成因模式图 (改编自张保健等, 2020)
Fig.5 Thermal source and genetic model of hot springs in research area

6 开发利用前景

截至 2021 年, 全球地热利用国家已由 1995 年的 28 个增长到 88 个。全球地热产业迎来空前机遇。中国在积极稳妥推进碳达峰碳中和、坚定不移推进能源革命进程中, 地热作为新型、绿色、可再生能源的代表, 已成为应对气候变化、优化能源结构、促进发展方式绿色转型的重要力量。研究区温泉出露温度 25~98℃, 地热井最大流量达 120m³/h, 地热资源丰富, 据刘峰等计算研究区地热资源储量 6.37×10⁸m³, 可开采量热量 3.27×10¹²kJ/a, 相当于标准煤 1.11×10⁵吨 (刘峰等,2019)。环首都山区在京津冀协同发展新格局中, 作为西北部生态涵养区, 合理开发利用地热能对于推动生态文明建设和经济社会绿色发展具有重要意义。

6.1 供暖地热

当前, 我国已经成为世界上最大的能源生产和消费国 (《新时代的中国能源发展》白皮书,2020), 最大的碳排放国 (胡鞍钢,2021), 我国北方冬季采暖是能源消费的重要组成部分 (陈家玺,2022), 对于广大的环首都山区, 随着经济的发展, 清洁供暖需求日益剧增。根据《GB 11615-2010 地热资源地质勘查规范》(GB/T11615-2010), 大于 40℃ 的热水可用于采暖, 研究区的燕山北部和山间盆地等温泉区水温较高、水量较大, 具有较好的供暖潜力。随着中深层换热技术的发展和《河北省地热资源勘查开发“十四五”规划》的实施, 将逐步提高基岩山区温泉区地热资源勘查深度和精度, 切实解决回灌难等问题。

6.2 地热发电综合利用

我国地热供暖等直接利用量位居世界第一, 目前正转向热电一体化方向。当前, 国内外中低温发电的热源温度一般为 90℃~140℃, 采用 ORC 或闪蒸发电技术, 发电效率在 6.4%~12.9% (秦祥熙等,2019), 但是保证 8% 收益率的单独用中低温地热发电是不可行的 (陈宇等,2020)。秦祥熙等人采用 ORC 向心透平膨胀技术, 试运行平均发电效率 9.1%, 按照 90~95/25℃ 的地热水热能潜力, 综合发电供暖两级利用计算能源综合利用率将达 70%~76%。研究区温泉等地热资源以中低温为主, 其中大于 80℃ 的中温地热资源主要分布在承德茅荆坝-七家地区及后郝窑地热异常区, 见表 5。据齐晓飞等研究, 在以上区域深部

可能存在干热岩资源潜力。因此，依托地热供暖项目，以供热能力确定发电机组，开展中低温地热发电高新技术研发，建设试点工程，变地热为“余热”开展地热梯级综合利用发展潜力较大。加强研究区干热岩资源勘查研究，探获干热岩资源，将进一步提高地热发电、供暖等综合利用效率。

表 5 研究区水温大于 80℃ 温泉信息统计表

Table 5 Statistical table of hot spring information with water temperature greater than 80 °C in research area

地理分布	序号	地热异常区	位置	最高水温 (°C)	最大涌水量 (m ³ /h)
燕山北部	1	七家温泉	隆化县七家镇温泉村	98	70
	2	茅荆坝	隆化县茅荆坝枫水湾	98.7	100
山间盆地	3	后郝窑	怀来县桑园镇后郝窑	86	80

6.3 温泉旅游及其它产业

近年来，随着国家对房地产的宏观调控，集体休闲度假和健康养生于一体的温泉旅游早已成为资本发展热点（刘晓农,2019）。2021 年，国务院发布的“十四五”旅游业发展规划明确提出“建设一批温泉、康养旅游目的地”和“推进温泉旅游业态产品发展”的明确要求。研究区具有良好的温泉旅游开发条件。除秦皇岛部分温泉矿化度较高外，大部分温泉水矿化度普遍小于 1g/l，富含氟、偏硅酸、偏硼酸等对人体有益的多种矿物质，达到医疗矿水水质标准，例如，燕山地区承德七家-茅荆坝温泉水，太行山的阜平下堡、吴王口及城南庄温泉等，偏硅酸含量普遍大于 90mg/l，氟离子含量普遍大于 10mg/l。同时，研究区作为生态涵养区和革命老区，拥有丰富的自然资源和人文景观，具有良好的温泉康养、旅游、理疗及温泉渔业等多种产业开发潜力。

7 结论

(1) 环首都山区温泉受深部构造控制，主要分布在莫霍面埋深小于 44km 的燕山-太行山深部构造变异带上，沿深大断裂影响带呈 NE 向和近 EW 向带状分布，温泉分布和居里面埋深具有较好的相关性，大部分温泉分布在居里面深度小于 26km 的较浅地区，说明深部热背景对温泉的影响不可忽视。

(2) 温泉发育特征受储盖组合影响，温度一般为 40~60℃，最高温达 98℃，热储温度一般小于 150℃，太行山区的变质岩储层流量较小，一般小于 11m³/h；山间盆地的沉积岩储层流量较大，最高达 120 m³/h。

(3) 温泉热源主要来自地幔热和“低速-高导体”，上地幔底辟体和深大断裂为深部热源的上涌提供了良好的通道，受区域地质构造影响，温泉出露温度与循环深度不存在直接对应关系，初步认为出露温度大于 80℃ 的区域，可能存在深部高温岩体。

(4) 环首都山区温泉具有较好的开发利用前景，燕山北部和山间盆地，具有较好的供暖潜力，承德七家、茅荆坝等地区可进一步向热电一体化方向发展；研究区温泉水普遍具有医疗开发利用价值，在温泉旅游、温泉康养等方面具有独特优势。

References

- Bai Bowen, Ping Jianhua, Zhao Jichang, Yang Zhenwei, Ning Yiwu, Xiong Chaofan. Chemical characteristics and causes analysis of the geothermal fluid in Huaiyang County, Henan Province[J]. *Geology in China*, 2022, 49(3): 956-966(in Chinese with English abstract).
- Chen Yu, Liu Liangde, Chen Qinglai.2020.Technical economy analysis of power generation from mid-low temperature geothermal resources in oilfields[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 46(4): 11-14,20(in Chinese with English abstract).
- Chen Jiayi.2022.Research on the environmental benefits of heating by mid-deep geothermal resources[J]. *Natural Resources Information*,(4):41-45(in Chinese with English abstract).
- Cheng Liqun, Xu Yiming, Du Lixin, Hao Wenhui, Nie Chenguang, Xie Wu.2020. Analysis of geothermal conditions and resource potential in the middle segment of Yanshan Mountains, eastern Hebei Province[J]. *Mineral Exploration*. 11(12):2637-2646. (in Chinese with English abstract).
- Gao Guoming, Kang Guofa, Bai Chunhua, Wen Limin. 2015. Study on crustal magnetic anomalies and Curie surface in Southeast Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*,97:169-177.
- Guo Ruilin, Guo Shuai, Zhang Lijian.2015.Characteristics and forming analysis of the Qijia hot spring in Longhua county of Hebei province [J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 38(2):218-226(in Chinese with English abstract).
- Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration. 1982. *Regional Geological Records of Beijing, Tianjin, Hebei Province*[M].Beijing: Geological Publishing House.566-615.
- Hou Zhongchu.1989.Method for calculating and compiling the map of curie-point surface[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*,11(4):306-311 (in Chinese with English abstract).

- Hu Angang.2021.China's Goal of Achieving Carbon Peak by 2030 and Its Main Approaches[J].Journal of Beijing University of Technology(Social Sciences Edition),21(3):1-15(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhiyun, Zhang Liuping, Yang Lei, et al.2002.Primary Study of Geochemical Features of Deep Fluids and Their Effectiveness on Oil / Gas Reservoir Formation in Sedimentary Basin[J]. Journal of Earth Science,27(6):659-665(in Chinese with English abstract).
- Li Hongquan, Zhang Shusheng, Xie Mingzhong, et al.2020.The occurrence characteristics and exploration and development direction of geothermal resources in Yuxian Basin, northwest Hebei Province[J]. Geological Review,66(4):919-932 (in Chinese with English abstract).
- Li Gongke, Wang Weixing, Yang Fengtian,et al.2015.Genesis Model of the Tangquan Geothermal Field in Hebei Province[J]. Geoscience,29(1):220-228(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaonong.2019.The Path of the Development of Hot Spring Tourism in China[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Social Science Edition),22(6):179-184(in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Wang Guiling, Lu Chuan, et al.2019.Beijing Tianjin Shijiazhuang Geothermal[R].Shijiazhuang: The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences.
- Liu Feng, Wang Guiling, Zhang Wei,et al.2020.Terrestrial heat flow and lithospheric thermal structure in the middle Yanshan region—a case study from the Qijia-Maojinba geothermal field in Chengde[J]. Acta Geologica Sinica,94(7):1950-1959,(in Chinese).
- Liu Chunhui.2006.A Study of Hydrochemistry and Isotopes of Baimiao Hot Spring, Chicheng Hot Spring and Tangzímiao Hot Spring[D].Beijing: China University of Geosciences,CUGB,(in Chinese with English abstract).
- Liu Yizhong, Li Chengli, Zhuo Ximing, et al.2012.Application of regional aeromagnetic data in predicting the northern regional geothermal field in Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics,55(3):1063-1069(in Chinese with English abstract).
- Lv Wenbin, Kang Lin, Zhang Yang et al.2016.Formation mechanism of geothermal resources in mountainous areas of Hebei Province[J]. The Earth, (12):468.(in Chinese).
- Luo Zhaohua, Wei Yang, Xin Houtian,et al.2006.The Mesozoic intraplate orogeny of the Taihang Mountains and the thinning of the continental lithosphere in North China Earth Science Frontiers,13(6):52-63. (in Chinese with English abstract).
- Ma Zongjin, Zhao Junmeng.1999.Contrast research on Tianshan orogenic belt and Yinshan—Yanshan orogenic belt[J]. Earth Science- Frontiers,6(3):95-102 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiangxi, Zhang Meng, Ye Jia, et al.2019.ORC Power Generation and Integrated Cascade Utilization of Medium-low Temperature Geothermal Resources in Cangxian Bulge Region, Hebei Province[J]. Acta Geoscientica Sinica,40(2):307-313(in Chinese with English abstract).
- Qiu Nansheng, Tang Boning, Zhu Chuanqing.2022.Deep thermal background of hot spring distribution in the Chinese continent[J].Acta Geologica Sinica,96(1):195-207(in Chinese with English abstract).
- Ruan Kexiao.2015.The forming conditions and genetic model of medium and low temperature convection geothermal field in Chifeng-Chaoyang area[D].Fuxin: Liaoning Technical University (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an.2020.The dominant factors of the Yanshan intracontinental orogeny seen from its deep background[J]. Acta Geologica Sinica,94(8):2190~2199(in Chinese with English abstract).
- Spector A,1970.Grant F S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data[J]. Geophysics,35(2):293-302.
- Tanaka A, Okubo Y, Matsubayashi O.1999.Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia[J]. Tectonophysics,306(3):461-470.
- Tonani F B.1980.Some remarks on the application of geochemical techniques in geothermal exploration [M]. Berlin:Springer Netherlands.
- Wang Yixuan, Zhou Xun, Chen Mengying,et al.2022.Hydrochemical Characteristics and Formation of Four Hot Springs in Northern Hebei[J].Geoscience,36(2):494-506. (in Chinese with English abstract)]
- Wang Jihua, Lin Yanwu, Liu Chenglong,et al.2000.Hydrogen and oxygen Stable nuclide and gas composition evidence of hot springs in southern of Zhangjiakou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,(4):30-33.(in Chinese).
- Wang Yu, Sun Lixin, Zhou Liyun et al.2018.Discussion on the relationship between the Yanshanian Movement and cratonic destruction in North[J].China. Science,48(5):521-535(in Chinese with English abstract).
- Wang Ying, Zhou Xun, Yu Yuan,et al.2007.Application of Geothermometers to Calculation of Temperature of Geothermal Reservoirs[J]. Geoscience,21(4):605-612 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xin, Qi Jihong, Xu Mo, et al.2019.Modification of Na-K-Mg triangular diagram and selection of Na-K geothermometer[J]. Coal Geology &Exploration,47(2):121-128. (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling. Lin Wenjing.2020.Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China. Acta Geologica Sinica. 94(7):1923-1937.(in Chinese with English abstract).
- Wang Ju, Huang Shangyao, Huang Geshan, et al.1990.The Basic Characteristics of Ground Temperature Distribution in China[M].Beijing: Seismological Press,30-36 (in Chinese with English abstract).
- Wang Longping, Wei Yongxia, Cheng Hongchao, Kang Jia, Liao Anran. Characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1765-1777(in Chinese with English abstract).
- Wu Jixiu, Wang Wen, Huang Zengbao, Wang Xiaosai, Xue Qianbing, Su Xin. Zircon U-Pb age, Hf isotope composition, and magma source of Mo-bearing granite porphyry in the Wenquan Mo deposit from West Qinling[J]. Geology in China, 2021, 48(5): 1596-1608(in Chinese with English abstract).
- Yang Qiyang, Wu Qingju, Sheng Yanrui, Gao Jiayi, Song Jian, Di Long. 2018. Regional seismic body wave tomography and deep seismogenic environment beneath Zhangbo seismic belt and its adjacent area. Chinese Journal of Geophysics. 33(8):3251-3262 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xue.2012.A study of the characteristics of hot springs of low to moderate temperature in Chengde district of northern Hebei[D]. Beijing: China University of Geosciences,CUGB (in Chinese with English abstract).

- Zhang Dezhong, Liu Zhigang, Lu Hong, et al. 2013. Hebei geothermal energy[M]. Beijing: Geological Publishing House. 5-6
- Zhao Guorui. 2011. Geothermal resources potential research on western sag of Liaohe basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University. (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Xu Yigang. 2019. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North[J]. China Craton. Science, 49(9): 1346-1356
- Zhang Erkuang. 2000. Essential characteristics of geological conditions for geothermal resource in Heber and its development and utilization[J]. Geology of Chemical Minerals, 22(1): 23-25. (in Chinese with English abstract).
- Zhang Baojian, LI Yanyan, Gao Jun, et al. 2020. Genesis and indicative significance of hot dry rock in Matouying, Hebei Province. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2036~2051 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Junmeng, Lu Zaoxun. 1998. Deep structure of LiaoHe rift and eastward migration of rift activity[J]. Seismology and Egology. 20(3): 225-233 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 阮克孝. 2015. 赤峰—朝阳地区中低温对流型地热田形成条件及成因模式[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 邱楠生, 唐博宁, 朱传庆. 2022. 中国大陆地区温泉分布的深部热背景[J]. 地质学报, 96(1): 195-207.
- 刘峰, 王贵玲, 张薇, 岳晨, 陆川, 黄起伟, 欧小科. 2020. 燕山中部大地热流及岩石圈热结构特征——以承德市七家一茅荆坝地热田为例[J]. 地质学报, 94(7): 1950-1959.
- 刘峰, 王贵玲, 陆川等. 2019. 京津石地热报告[R]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所.
- 郭瑞林, 郭帅, 张立剑. 2015. 河北省隆化县七家温泉特征及成因分析[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 38(2): 218-226.
- 张雪. 2012. 河北省北部承德地区中低温温泉特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王艺璇, 周训, 陈梦颖, 马静茹, 海阔, 肖萌, 尚子琦, 张颖, 余鸣潇. 2022. 河北北部四处温泉的水化学特征及成因分析[J]. 现代地质, 36(2): 494-506.
- 王基华, 林元武, 刘成龙等. 2000. 张家口南部地区温泉形成的氢氧稳定同位素及气体组成证据[J]. 水文地质工程地质, (4): 30-33.
- 吕文斌, 康琳, 赵阳等. 2016. 河北省山区地热资源形成机制[J]. 地球, (12): 468.
- 程立群, 徐一鸣, 杜立新, 郝文辉, 聂晨光, 谢吾. 2020. 冀东燕山中段地热地质条件分析与资源潜力评价[J]. 矿产勘查, 11(12): 2637-2646.
- 罗照华, 魏阳, 辛后田等. 2006. 太行山中生代板内造山作用与华北大陆岩石圈巨大减薄[J]. 地学前缘, 13(6): 52-63.
- 邵济安. 2020. 从深部背景看燕山陆内造山作用的主因[J]. 地质学报, 94(8): 2190-2199.
- 河北省地质矿产局. 1982. 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 566-615.
- 王瑜, 孙立新, 周丽云, 谢玥婷. 2018. 燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论[J]. 中国科学, 48(5): 521-535.
- 张德忠, 刘志刚, 卢红等. 2013. 河北地热[M]. 北京: 地质出版社, 5-6.
- 赵国瑞. 2011. 辽河盆地西部凹陷地热资源潜力研究[D]. 大庆: 东北石油大学.
- 侯重初. 1989. 居里面深度图的计算与制作方法[J]. 物探化探计算技术, 11(4): 306-311.
- 刘益中, 李成立, 周锡明等. 2012. 区域航磁资料在预测松辽盆地北部区域地温场中的应用[J]. 地球物理学报, 55(3): 1063-1069.
- 朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. 中国科学, 49(9): 1346-1356.
- 柳春晖. 2006. 白庙温泉、赤城温泉及塘子庙温泉的水化学及同位素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李泓泉, 张树胜, 谢明忠等. 2020. 冀西北蔚县盆地地热资源赋存特征及勘查开发方向[J]. 地质评论, 66(4): 919-932.
- 王莹, 周训, 于媛等. 2007. 应用地热温标估算地下热储温度[J]. 现代地质, 21(4): 605-612.
- 王欣, 漆继红, 许模等. 2019. Na-K-Mg 三角图修正与 Na-K 温标选取[J]. 煤田地质与勘探, 47(2): 121-128.
- 王贵玲, 蔺文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 94(7): 1923-1937.
- 张尔匡. 2000. 河北省地热地质条件的基本特征与地热资源开发利用问题[J]. 化工矿产地质, 22(1): 23-25.
- 张保健, 李燕燕, 高俊等. 2020. 河北省马头营干热岩的成因机制及其示范意义[J]. 地质学报, 94(7): 2036-2051.
- 金之钧, 张刘平, 杨雷等. 2002. 沉积盆地深部流体的地球化学特征及油气成藏效应初探[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 27(6): 659-665.
- 马宗晋, 赵俊猛. 1999. 天山与阴山—燕山造山带的深部结构和地震[J]. 地学前缘, 6(3): 95-102.
- 王钧, 黄尚瑶, 黄歌山等. 1990. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京: 地震出版社, 30-36.
- 李攻科, 王卫星, 杨峰田等. 2015. 河北遵化汤泉地热田成因模式[J]. 现代地质, 29(1): 220-228.
- 国务院新闻办公室. 《新时代的中国能源发展》白皮书[R/OL]. (2020-12-21). http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm.
- 胡鞍钢. 2021. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 21(3): 1-15.
- 陈家玺. 2022. 中深层地热资源供暖的环保效益探究[J]. 自然资源情报, (4): 41-45.
- 秦祥熙, 张萌, 叶佳等. 2019. 河北沧县台拱带中、低温地热资源 ORC 发电与综合梯级利用[J]. 地球学报, 40(2): 307-313.
- 陈宇, 刘亮德, 陈情来. 2020. 油区中低温地热发电技术经济分析[J]. 石油工程建设, 46(4): 11-14, 20.
- 刘晓农. 2019. 我国温泉旅游的发展路径[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 22(6): 179-184
- 赵俊猛, 卢造勋. 1998. 辽河裂谷的深部构造与裂谷活动的侧向迁移[J]. 地震地质, 20(3): 225-233.
- 杨歧焱, 吴庆举, 盛艳蕊, 高家乙, 宋键, 邸龙. 2018. 张渤地震带及邻区近震体波成像及孕震环境分析[J]. 地球物理学报, 33(8): 3251-3262.

吴纪修,王文,黄增保,王晓赛,薛倩冰,苏新. 西秦岭温泉钼矿区含钼花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及岩浆物质来源讨论[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1596-1608.

白博文,平建华,赵继昌,杨振威,宁艺武,熊超凡. 河南淮阳县地热流体化学特征及其成因分析[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 956-966.

王龙平,魏永霞,程宏超,康佳,廖安然. 安徽长江经济带地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1765-1777.