

河南济源五龙口地热资源特征与产业化研究

崔占锋¹, 张 晗^{*1}, 白 晨¹, 万光南¹, 卢 玮²

(1. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450016; 2. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053)

摘要:以河南省济源市盘古寺—五龙口断裂带为研究对象,进行了五龙口镇一带地热资源特征研究,并对产业化提出了建议。研究表明,该区地热受盘古寺断裂带和五龙口断裂带控制,地热流体在研究区北部山区的盘古寺断裂带接受大气降水补给,地热类型为对流型中低温地热资源,热储类型为带状裂隙热储,主要利用的热储层有:第四系松散岩类热储层、寒武-奥陶系碳酸盐岩热储层、太古界片麻岩热储层。可用于地热清洁供暖、康养、温泉度假、温室大棚和矿泉水生产等产业。

关键词:地热资源;地热特征;对流型;产业化;五龙口

中图分类号:P314;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)02-0140-06

Study on the features and industrialization of geothermal resources in Wulongkou, Jiyuan, Henan Province

CUI Zhanfeng¹, ZHANG Han^{*1}, BAI Chen¹, WAN Guangnan¹, LU Wei²

(1. Henan Academy of Geology, Zhengzhou Henan 450016, China;

2. Henan Engineering Research Center of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China)

Abstract: Taking the Pangusi-Wulongkou fault zone in Jiyuan City, Henan Province as the research object, by analyzing the geothermal features in the Wulongkou Town, this paper put forward suggestions for the industrialization of geothermal resources. The research shows that the geothermal energy in the study area is controlled by the Pangusi and Wulongkou fault belt, and the geothermal fluid receives the recharge of atmospheric precipitation in the Pangusi Fault Belt in the northern mountainous area. The geothermal energy is the type of convective medium-low temperature, and the geothermal reservoirs is featured of zonal fissure. The main available thermal reservoirs are as follows: the Quaternary loose rock reservoir, the Cambrian-Ordovician carbonate reservoir and the Archaean gneiss reservoir. It can be used for geothermal heating, health and wellness, hot spring vacation, agricultural production and mineral water production and other industries.

Key words: geothermal resources; geothermal features; convective; industrialization; Wulongkou

0 引言

地热资源是重要的可再生能源,具有丰富的资源潜力,利用系数高,生命周期二氧化碳排放低,有潜在的低成本优势^[1-2]。具有“开发利用便利、可直

接利用、能效高、零污染排放、节能减排”等特点,积极推进地热资源的开发利用对我国能源资源保障和双碳目标实现具有重要意义。

研究区位于河南省济源市五龙口镇,面积10.9

收稿日期:2023-08-07;修回日期:2023-10-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.02.019

基金项目:河南省重点研发专项“河南省中深层地热清洁能源开发利用关键技术与示范”(编号:231111320800);河南省地质研究院2023年度院管财政科研类项目“深部煤系气、地热资源协同共采技术可行性研究”(编号:2023-331-XM026-KT03)、“豫东地区新生界砂岩热储地热钻井与回灌技术优化研究”(编号:2023-902-XM005-KT01)

第一作者:崔占锋,男,汉族,1981年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,现从事清洁能源勘查技术研究及管理工作,河南省郑州市金水路16号,109328968@qq.com。

通信作者:张晗,女,汉族,1981年生,正高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事地热勘查开发利用技术研究工作,河南省郑州市金水路16号,zhanghan1117@163.com。

引用格式:崔占锋,张晗,白晨,等.河南济源五龙口地热资源特征与产业化研究[J].钻探工程,2024,51(2):140-145.

CUI Zhanfeng, ZHANG Han, BAI Chen, et al. Study on the features and industrialization of geothermal resources in Wulongkou, Jiyuan, Henan Province[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 140-145.

km²,在太行山低山区剥蚀地带与山前平原的交接位置,东西向的太行山脉在研究区北部向南延伸2.5 km,经沈庄、五龙口后向西延,研究区地温异常,小麦成熟较早,冬季积雪早化^[3]。

研究区内的地热资源开发开始于1980年代,目前有10余口地热井在用,开采低温地热流体,主要用于洗浴和生活用水,开采方式简单粗放,资源浪费较为严重。

1 研究区地质背景

研究区地处中期准地台华北台坳济源—开封凹陷西北部,区内构造复杂,主要以燕山期以来的高角度正断层及平缓开阔褶皱为主要构造特征。

1.1 地层岩性

研究区区域地层属于华北地层区,豫西北地层分区太行山地层小区,主要出露新生界、古生界、元古界及太古界地层^[4-5],地层简介如下。

1.1.1 新生界

第四系岩性为上更新统与全新统的黄土状粉土、粉质粘土、粘土及砂砾卵石,主要分布于河谷两岸及山前倾斜平原,其成因为冲积、冲洪积和洪积^[6],钻孔揭露第四系厚约280 m;

古近系岩性主要为砾岩,钻孔揭露本系厚约293 m。

1.1.2 古生界

二叠系主要岩性为长石石英砂岩、碳质页岩,零星出露于盘古寺断裂带附近,厚度不详;石炭系,主要岩性为团块状石灰岩(含燧石)、粘土岩,零星分布于盘古寺断层附近,厚度不详;

奥陶系,岩性底部为页岩、泥灰岩,中下部为白云岩,上部为厚层状灰岩,主要发育奥陶系中统地层,分布于研究区北部,盘古寺断层带南部,五龙口断层带内,厚约300 m;

寒武系,岩性自下而上分别为页岩、白云岩,灰岩,白云岩,分布于沁河两岸及盘古寺断断裂带内,厚约660 m。

1.1.3 元古界

岩性主要为粉砂岩夹石英岩及砂岩、砾岩,底部为巨砾岩,分布于山口、白涧河沟口,厚0~40 m。

1.1.4 太古界

岩性为花岗岩、云母绿泥岩、角闪片岩等,分布于山口、白涧河沟口,呈条带状展布,厚约715 m。

1.2 地质构造

研究区处于新华夏系太行山隆起的南端与晋东南山字型构造东翼反射弧的前缘和东秦岭纬向构造带北缘相交联合弧地带,区内发育的构造形迹多为燕山运动以来形成^[5-6]。构造以高角度正断层为主,区域构造单元位置属于山西陆台东南部。主要构造有盘古寺、五龙口断裂带;位于研究区北部的盘古寺断裂带,是区域性大断层,为高角度的正断层,次级断裂发育,走向近EW,倾角50°~60°,断层带宽约600~900 m,断距550~800 m,上升盘地层有太古界、元古界、寒武系,下降盘底层为寒武系、奥陶系;五龙口断裂带位于研究区的南部,同样属于区域性大断裂^[3],正断层,次级断裂发育,走向NEE,倾向SSE,倾角50°~55°,断距>500 m(图1)。区内构造裂隙及岩溶发育,主要热储含水岩层为寒武—奥陶系碳酸盐岩类裂隙岩溶水,岩性为灰岩、碳酸盐岩。

2 地热地质条件

2.1 地热区边界条件

研究区南部边界五龙口断层带(F17)上盘上部为第四系松散层,下部为古近系、二叠系砂岩、泥岩等隔水地层,下盘上部为第四系松散层,下部为寒武、奥陶系灰岩及太古界片麻岩等含水岩层,由于断层上盘岩性阻水,导致断层两侧地下水无法发生水力联系,因此将南部F17断层概化为隔水边界;北部盘古寺断层(F3、F4)由于南北两盘岩性差异,是阻水性质的断层,属于地热区的隔水边界;地热流体从研究区西北向东南方向径流,至区内东部的白涧河作为排泄边界,将西部沁河概化为定水头边界(参见图1)。

2.2 热储埋藏条件及特征

根据地热形成的地热地质环境,我国地热类型一般可分为3大类,分别是:断裂深循环型(对流型)、沉积盆地型(传导型)和近现代火山—岩浆岩型^[1-4]。根据地热流体赋存空间的不同,地热热储层一般分为层状热储和带状热储。

由有效空隙度和渗透性的地层构成的热储是层状热储,主要赋存在沉积盆地,热量传递以传导型为主,具有地层或储层分布面积较大、产状倾角较缓、地层沉积厚度大等特点;带状热储一般是指具有有效空隙和渗透性的断裂带构成的热储,通过深大断裂沟通地壳浅部岩浆热源,分布于隆起山地或山前

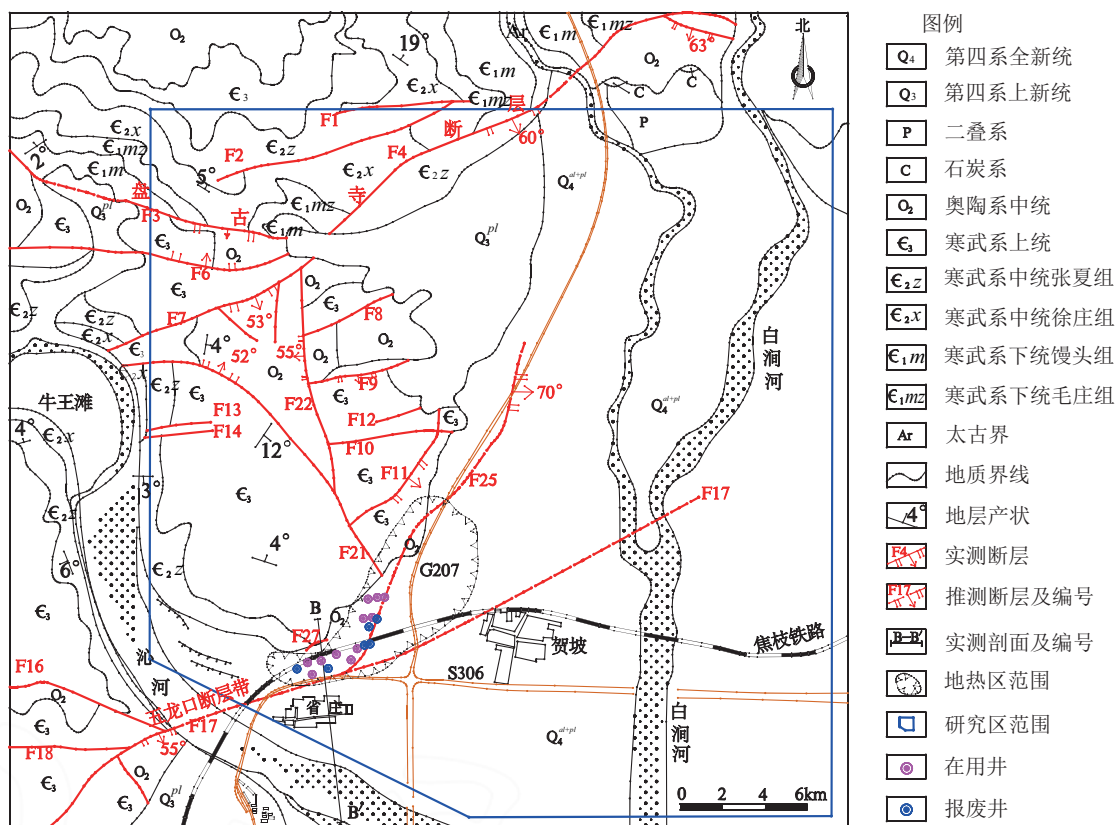


图1 研究区区域地质图

Fig.1 Regional geological map of the study area

地带,以对流方式传递热量,一般具有倾角大、空间上成条带状延伸的特点^[7-10]。本次工作区位于济源—开封沉积盆地地热田的西部,属于断裂深循环型(对流型)地热,具有明显带状裂隙热储特征^[3]。

2.2.1 盖层

根据已有地质资料及研究区地热开发现状,区内发育较厚的第四系粘土土和寒武系下统页岩等不透水或弱透水岩层,覆盖于主要热储层之上,形成良好的盖层,使地热流体在深部循环过程中获得的热量得以保存。

2.2.2 热源

使地热流体增温的来源,有现代岩浆活动形成的岩浆体,也有来自地壳深部的热传导或活动性深大断裂带沟通地球深部热源的热对流^[5]。盘古寺断裂带、五龙口断裂带是多期次活动的深大断裂带,延伸远,断距大,一般断达基岩底界。这些断裂一直在活动,据河南地震台资料显示,2012年9月12日在研究区附近(北纬35.16°,东经112.23°)发生2.9级地震^[11]。综上所述,推测盘古寺—五龙口断裂带热

储中岩石和地热流体热的来源为沟通深部热源的现代活动性断裂带的热对流。

2.2.3 储层划分

对研究区地热地质资料,及物化探和钻孔资料综合分析,区内热储层主要有3类,自下而上分别是太古界片麻岩裂隙热储层、寒武—奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶热储层、第四系松散岩类孔隙热储层。

2.2.3.1 第四系热储层

整个研究区内均分布有第四系松散岩类热储层,岩性为砂粘土互层和卵砾石,热储层在研究区北部埋深浅、厚度小,一般埋深在20 m左右,在白涧河冲洪积扇附近地带埋深最大,最深处达200 m。本层热储为混合热水,水温25~40℃^[5]。

2.2.3.2 寒武—奥陶系碳酸盐岩热储层

热储层位于第四系热储层之下,是研究区目前开发利用的主要热储层,主要分布于五龙口断裂带以北,F25断层以西的交汇处,热储层顶板埋深15~150 m,底板埋深280~300 m。受地质构造影响,热储层裂隙及岩溶发育程度不均一,富水性差距大,地

热水富集在断裂带附近和裂隙岩溶发育程度大的部位。地热流体以裂隙岩溶水为主,主要含水岩组为碳酸盐岩夹碎屑岩类和岩溶类含水岩组,地热流体温度 $60^{\circ}\text{C} \leq T < 90^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.3.3 太古界片麻岩热储层

该热储层地热井出水温度一般在 $90 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 之间,是研究区所有热储层中地热流体温度最高的,地热流体以裂隙水为主,含水岩组为碳酸盐岩夹碎屑岩类含水岩组、变质岩裂隙类含水岩组。分布范围与寒武-奥陶系碳酸盐岩热储层一致,位于五龙口断层(F17)以北、F25断层以西的山前地带,富水性随断裂的发育程度呈现较强的不均一性。热储顶板埋深在 300 m 左右,由于该热储层埋深较大,目前地热区内地热井与钻孔深度 < 500 m,均未揭穿该热储层。

2.2.4 热储及地热流体特征

2.2.4.1 热储模型

研究区裂隙岩溶水在接受大气降水入渗补给之后,沿盘古寺深大断裂深部径流,遇到深部热源或受热源影响的围岩被加热升温,沿 F21、F22 等断层向南径流。径流至 F17、F25 断层交汇处附近,由于断层面上盘岩性阻水,地热流体在静水压力作用下,沿断层迎水面上升与太古界片麻岩、寒武-奥陶系碳酸盐岩中冷水混合,形成中低温热储区;与第四系松散岩类中冷水混合形成低温热储区,总体属于受断裂构造控制呈带状分布的对流型中低温地热田(图2)。

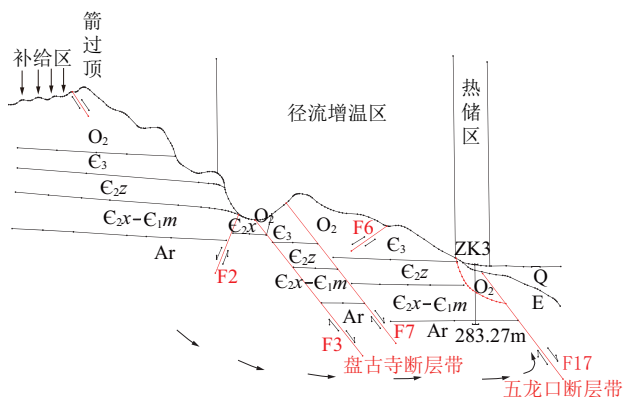


图2 研究区地热概念模型

Fig.2 Geothermal conceptual model of the study area

2.2.4.2 地热资源产能

研究区地热属于受断裂构造控制呈带状分布的对流型中低温地热田,地热资源是通过热水资源的

开发利用而实现的。利用“热储法”、“回采系数法”等方法计算地热资源储量、可采量。经计算,济源市盘古寺—五龙口断裂带地热资源可开采量为 4.8×10^{15} J,地热流体可开采热量为 8.6×10^{14} J/a,地热田产能为 27.5 MW,属中型地热田。

依据研究区地热井降压试验,第四系热储层地热流体单位产量为 $28.11 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$,寒武-奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶热储层为 $483.35 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$,太古界片麻岩裂隙热储层为 $445.68 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$,目前开采的井深基本在 200 m 以上,地热井流量均在 $50 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ 以上,根据《地热资源地质勘查规范》(GB 11615—2010)^[12],属于适宜开采区。

2.2.4.3 地热流体化学特征及质量评价

对研究区内 3 种热储层的地热流体分别取样化验,分述地热水化学类型及质量评价如下:

(1)第四系热储层,地热流体水化学类型 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,PH 值 7.7,溶解性总固体 569 mg/l;该热储层地热流体中锶含量为 0.61 mg/l,达到饮用天然矿泉水标准(国家标准 $\geq 0.2 \text{ mg/l}^{[12]}$),感官指标、限量指标与污染指标均满足标准要求。

(2)寒武-奥陶系碳酸盐岩热储层,地热流体水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型,PH 值 7.9,溶解性总固体 737.6 mg/l;该热储层地热流体中的氟含量为 4.5 mg/l,达到命名矿水浓度(国家标准 $\geq 2 \text{ mg/l}^{[12]}$),偏硅酸含量为 65 mg/l,达到命名矿水浓度(国家标准 $\geq 50 \text{ mg/l}^{[12]}$),为氟硅复合型理疗热矿水。

(3)太古界片麻岩热储层,地热流体水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型,PH 值 7.9,溶解性总固体 1617 mg/l;井中氟含量为 6.9 mg/l,与偏硅酸含量为 80 mg/l,两项均大于国家标准,均达到命名矿水浓度,为氟硅复合型理疗热矿水。

2.3 地热流体流场特征及动态

据以往资料,研究区地下水在北部山区的盘古寺断裂带接受大气降水、地表水补给,沿断裂带向东南径流,经深部循环遇热源加热,使地热流体水温变高,然后沿断裂等通道向南径流,在五龙口断层(F17)处的迎水面汇集,形成了地热区。

天然状态下,以侧向径流的方式向下排泄,遇地热井揭露并开发利用热储含水层,则受人为影响排出地表^[6]。根据区内地热井观测,水位埋深范围为 30.7~12.87 m,主要受大气降水量与地热流体开采量综合影响。

3 地热成因分析

为分析研究区地热成因,采集3种热储层地热流体测试样品各1组,做同位素化学特征分析,测试项目氘、¹⁸O。测试结果见表1。

表1 同位素测试结果
Table 1 Isotope test results

序号	采样地点	δD/‰	δ ¹⁸ O/‰	备注
1	B3地热井	-64.40	-9.22	第四系松散岩热储层
2	ZK03地 热井	-63.26	-8.40	寒武-奥陶系碳酸盐 岩热储层
3	B4地热井	-67.56	-9.39	太古界片麻岩热储层

注:δD为同位素氘的丰度;δ¹⁸O为同位素氧-18的丰度。

根据中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室的研究成果:中国东部季风区的大气降水线方程为:δD=7.46δ¹⁸O+9.0(R²=0.94,n=274),方程曲线见图3。研究区3种热储层的地热流体同位素的值投影于“大气降水线”上,位于曲线附近,说明研究区地热流体的来源是大气降水^[13-14]。

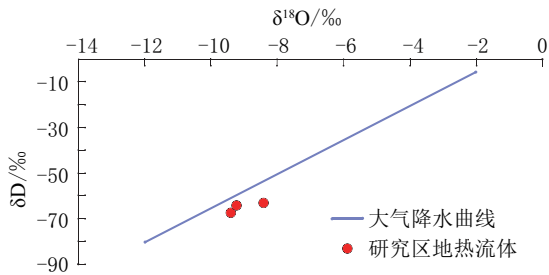


图3 研究区地热流体与大气降水同位素的关系

Fig.3 Relationship between the geothermal fluid and the isotope of precipitation in the study area

4 地热资源产业化研究及建议

地热资源产业化是指参与地热资源勘探、开发、应用等一系列过程活动的企事业单位集合体。地热产业主要由地热调查评价与监测、地热应用技术、地热人才培养体系、地热设备制造、地热工程设计施工以及地热环境管理等要素构成^[15]。

4.1 地热资源勘查

研究区地层、构造和热储埋深基本查清,下一步的地热资源勘查,根据地质条件选择不同的钻井工艺,实现高质量的快速钻井是关键。目前已知3种类型的热储埋深较浅(300~500 m),属于覆盖层薄,

地层坚硬、漏失的类型。

空气潜孔锤钻进技术是一种低钻压、低转速、高冲击破岩回转的钻进技术,与常规正循环泥浆钻进相比,空气潜孔锤钻进效率高10~20倍,而且地层硬度越大,钻效优势越明显;另外空气潜孔锤钻进采用气体作为钻井介质,钻井过程能始终保持井孔内负压状态,能减少对含水层的损害,同时破碎的岩屑会被空气由环空从井眼带出,相当于边钻进边洗井^[16]。

所以,在研究区采用空气潜孔锤钻进技术进行地热资源勘查开发,是最佳选择,可以解决钻井效率低、热储污染、洗井困难等问题,实现绿色高效勘查开发目的。

4.2 地热资源应用领域

第四系松散岩热储层地热流体可作为饮用天然矿泉水进行开发利用;寒武-奥陶系碳酸盐岩热储与太古界片麻岩热储层地热流体氟、偏硅酸含量均达到理疗热矿水指标,为氟硅复合型理疗热矿水,温度>60℃,可用于供暖、地热康养、温泉度假、观光农业等产业。

4.3 建议

(1)利用人工智能和深部钻探技术,进一步查明500~1500 m深部高温地热资源,扩大该区的地热资源量,当温度≥150℃时优先地热发电产业。

(2)编制研究区地热资源勘查开发利用规划,对优质地热资源实行统一规划、统一利用,实现资源的高效、持续、稳定利用。

(3)针对地热流体特点,采用供暖、康养、温泉度假、温室大棚梯级综合利用,避免资源浪费。

5 结论

(1)研究区地热属于受断裂构造控制呈带状分布的对流型中低温地热田。热储类型有3个,分别为第四系松散岩类孔隙热储、寒武-奥陶系裂隙岩溶热储和太古界片麻岩裂隙热储层。热储结构完整,控热导热断裂、热储及盖层齐全。

(2)经地热流体产能计算及开发经济性分析,研究区属中型地热田,为适宜开采区。

(3)不同热储层的地热流体,可用于饮用天然矿泉水、供暖、理疗康养、农业等,应开展综合梯级利用。

参考文献 (References):

- [1] 张薇,王贵玲,刘峰,等.中国沉积盆地型地热资源特征[J].中国地质,2019,46(2):255-268.
ZHANG Wei, WANG Guiling, LIU Feng, et al. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 255-268.
- [2] 王勇军,刘刚,佟铮,等.旋冲螺杆钻具在硬岩地热钻探中的应用研究[J].钻探工程,2023,50(5):146-152.
WANG Yongjun, LIU Gang, TONG Zheng, et al. Application study of rotary-percussive screw drilling tool in hard-rock geothermal drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 146-152.
- [3] 高晓,景金明,杨书民,等.济源市省庄地区地质条件及成因特征[J].地质找矿论丛,2007,87(3):228-231.
GAO Xiao, JING Jinming, YANG Shumin, et al. Geological conditions and genetic characteristics of Shengzhuang geothermal area in Jiyuan City[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2007, 87(3): 228-231.
- [4] 张晗,卢玮,黄烜,等.河南省水热型地热成因模式及钻探方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(9):8-14,20.
ZHANG Han, LU Wei, HUANG Xuan, et al. Generation model and drilling method of hydrothermal geothermal resources in Henan Province[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(9): 8-14, 20.
- [5] 余晨.对流型地热区地热资源评价及数值模拟研究——以济源市五龙口地热区为例[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
YU Chen. Geothermal resource evaluation and numerical simulation research of convective type geothermal area: The Jiyuan Wulongkou geothermal field, for example [J]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.
- [6] 沈照理.水文地质学[M].北京:科学出版社,1985.
SHEN Zhaoli. Hydrogeology[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [7] 王转转,欧成华,王红印,等.国内地热资源类型特征及其开发利用进展[J].水利水电技术,2019,50(6):187-195.
WANG Zhuanzhuan, OU Chenghua, WANG Hongyin, et al. Domestic geothermal resources type characteristics and development and utilization progress[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(6): 187-195.
- [8] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):449-450,134,451-459.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential of China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 449-450, 134, 451-459.
- [9] 卢予北,李艺,卢玮,等.新时代地热资源勘查开发问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):1-8.
LU Yubei, LI Yi, LU Wei, et al. Research on the exploration and development of geothermal resources in the New Era[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(3): 1-8.
- [10] 陈莹,王攀科,吴烨,等.河南兰考地区地热回灌影响因素分析及对策[J].钻探工程,2022,49(6):146-152.
CHEN Ying, WANG Panke, WU Ye, et al. Analysis and countermeasures on influencing factors of geothermal well reinjection in Lankao, Henan Province [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 146-152.
- [11] 姜宝良,余晨,张石磊,等.济源五龙口地热区热矿水化学特征及成因[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(5):14-17.
JIANG Baoliang, YU Chen, ZHANG Shilei, et al. Chemical characteristics and genesis of hot mineral water in Wulongkou geothermal area, Jiyuan[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015, 36(5): 14-17.
- [12] GB/T 11615—2010,地热资源地质勘查规范[S].
GB/T 11615—2010, Geologic exploration standard of geothermal resources[S].
- [13] 周称称,杨博,王丹.河南省驻马店-遂平地热田地球化学特征及指示意义[J].中国资源综合利用,2021,39(8):69-72.
ZHOU Chengcheng, YANG Bo, WANG Dan. Geochemical characteristics and indicative significance of Zhumadian-Suiping Geothermal Field in Henan Province [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(8): 69-72.
- [14] 顺慰祖,庞忠和,王全九,等.同位素水文学[M].北京:科学出版社,2011.
SHUN Weizu, PANG Zhonghe, WANG Quanjiu, et al. Isotopic Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [15] 赵小涛,付海英.地热能开发利用现状与前景分析[J].环境与发展,2019,31(5):233,235.
ZHAO Xiaotao, FU Haiying. Analysis of current status and prospects of geothermal energy development and utilization[J]. Environment and Development, 2019, 31(5): 233, 235.
- [16] 石荆京,张海林,苏园园,等.空气潜孔锤钻进技术在舜皇山基岩地热深井的应用[J].钻探工程,2021,48(10):36-42.
SHI Jingjing, ZHANG Hailin, SU Yuanyuan, et al. Application of air DTH hammer drilling technology in deep bedrock geothermal well in the Shunhuang Mountain[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 36-42.

(编辑 王文)