



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403301

引用格式:胡剑,王道成,徐凌,等.周口坳陷西南部地热资源赋存特征及开发前景[J].科学技术与工程,2025,25(9):3545-3554.

Hu Jian, Wang Daocheng, Xu Ling, et al. Occurrence characteristics and development prospect of geothermal resources in the southwest of Zhoukou Depression[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3545-3554.

天文学、地球科学

周口坳陷西南部地热资源赋存特征及开发前景

胡剑¹, 王道成¹, 徐凌¹, 刘蔷¹, 高阳^{2*}, 冷济高², 潘良云², 曹海丽²

(1. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司, 成都 610051; 2. 北京宝石花能源科技有限公司, 北京 100061)

摘要 地热资源赋存特征及成因模式是地热资源开发的重要依据。基于区内各类钻孔、地球物理及地球化学资料,在明确储盖、温度特征基础上,对热源、通道、补给要素开展研究,建立周口坳陷西南部地热系统成因模式,进而评价其开发前景。研究区赋存低温沉积盆地型地热资源,慢源热是主要热源,南冷北热,凸起区大地热流高于凹陷区,可达 70 mW/m² 以上。平均地温梯度为 2.8 °C/hm 左右,为传导型传热,断裂的发育也促进了深部热流的上涌,局部存在热对流增温作用。同位素分析显示补给来自西部低山丘陵的大气降水,在裸露区下渗后沿渗透地层、不整合面向东部运移并被加热增温。新近系、古近系砂岩孔隙、寒武-奥陶系碳酸盐岩岩溶孔隙是流体主要赋存空间。第四系与新近系上部发育的粉砂、黏土沉积构成了良好的隔水隔热盖层。目前新近系开发利用风险最小,热储底板埋深 400~1 400 m,向北埋深增大,砂地比平均 40.9%,水量 40~60 m³/h,井口水温 43~48 °C。最终落实 4 个孔隙型地热资源开发有利区,3 个岩溶型地热资源开发有利区。

关键词 地热资源; 赋存特征; 成因模式; 周口坳陷; 驻马店市

中图分类号 P314;

文献标志码 A

Occurrence Characteristics and Development Prospect of Geothermal Resources in the Southwest of Zhoukou Depression

HU Jian¹, WANG Dao-cheng¹, XU Ling¹, LIU Qiang¹, GAO Yang^{2*}, LENG Ji-gao², PAN Liang-yun², CAO Hai-li²

(1. Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610051, China;

2. Beijing GEM Flower Energy Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100061, China)

[Abstract] The occurrence characteristics and genetic models of geothermal resources is an important basis for the development of geothermal resources. Drilling data, geophysical and geochemical data was applied to analyze the thermal reservoir, cap rock, heat sources, channels and supply elements, and the genetic model of geothermal system in the southwest of Zhoukou Depression was established. The development prospect was also evaluated. The geothermal resources in study area can be divided into sedimentation basin type with low temperature. Mantle derived heat is the main heat source, and the geothermal flow in the north part is higher than that in the south part, also in the protruding area is higher than that in the depressed area, reaching over 70 mW/m². The average geothermal gradient is about 2.8 °C/hm, dominated by heat conduction system. Isotope analysis shows that the supply source comes from atmospheric precipitation in the western low mountains and hills, which infiltrates through the exposed area and moves along permeable strata and unconformity towards the east, and is heated and warmed up. The pores of the Neogene and Paleogene sandstones, as well as the karst pores of the Cambrian-Ordovician carbonate rocks, are the main storage spaces for fluids. The silt and clay deposits developed in the upper part of the Quaternary and Neogene systems form a good waterproof and thermal insulation cover layer. The development and utilization risk of the Neogene system is the lowest, with a floor depth of 400~1 400 m, increasing towards the north. The average sand to soil ratio is 40.9%, with a water flow between 40~60 m³/h and a wellhead temperature of 43~48 °C. The development of faults also promotes the upwelling of deep heat flow, and there is a local thermal convection warming effect. Finally, four favorable development area for porous geothermal resources and three favorable areas for karst resources were identified.

[Keywords] geothermal resource; occurrence characteristic; genetic mechanism; Zhoukou Depression; Zhumadian City

收稿日期: 2024-05-06 修订日期: 2024-12-23

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司科技项目(XNS-JS2023-83)

第一作者: 胡剑(1970—),男,汉族,四川双流人,高级工程师。研究方向: 新能源开发、清洁供能、地热资源评价及开发。E-mail: hujian@petrochina.com.cn。

* 通信作者: 高阳(1988—),男,汉族,辽宁朝阳人,博士,工程师。研究方向: 石油地质、地热资源评价及开发。E-mail: gaoyangdzlx@126.com。

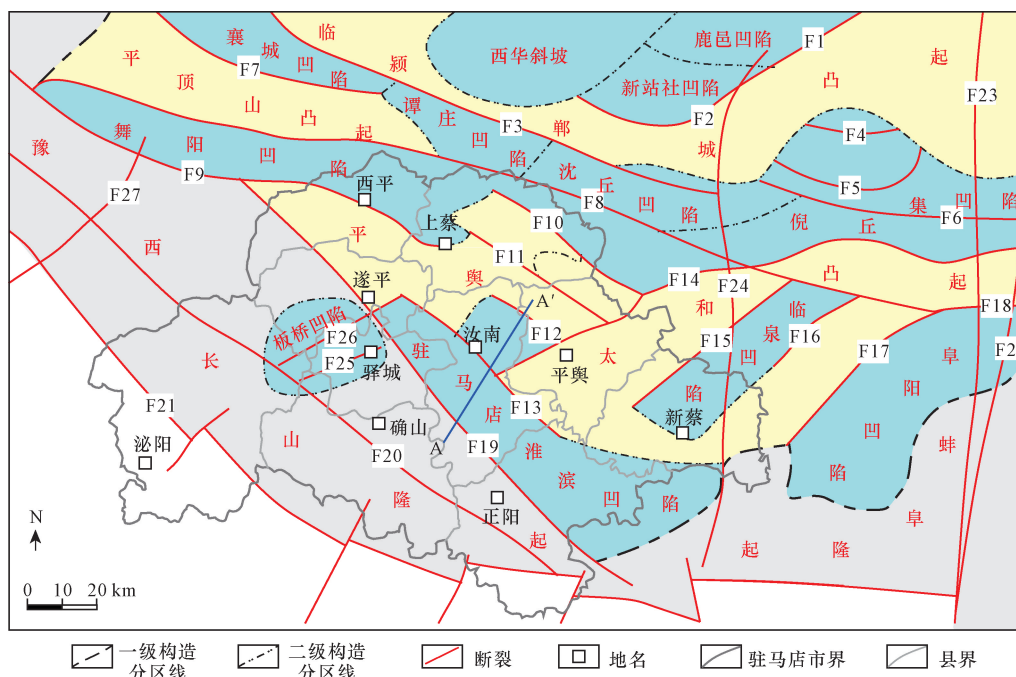
地热资源是一种清洁可再生资源,具有分布广、储量大、开发成本低等特点,对于节能减排、改善环境具有重要作用^[1-3]。地热资源的形成包括热源、热储、通道、盖层、流体等要素,对其赋存特征与成因模式的准确认识是高效勘探开发的重要前提^[4-5]。中国对于地热资源的系统研究始自20世纪90年代,已取得了丰硕的成果;在热源方面,学者针对不同地区提出了“三元聚热”“四元聚热”模式^[6-7],从岩石圈结构、岩石热导率、构造等方面探讨了地温场分布规律与主控因素^[8-9];在热储方面,对新近系、侏罗系-白垩系、寒武系-奥陶系、蓟县系-长城系等不同类型热储的发育特征、产水量等均有了一定认识^[10-12];建立了隆起山地型与沉积盆地型不同地热资源的成因模式^[13-15],为地热资源的勘探开发提供了宝贵的指导资料。

周口坳陷在地理上横跨河南、安徽两省,地热资源丰富,研究区在行政区域上主要覆盖了驻马店市除泌阳县以外的1区8县。勘探成果证实该区水热型地热资源丰富,为沉积盆地型低温地热资源。目前已开发地热田主要位于在上蔡、新蔡、平舆、遂平县城,地热水主要用于洗浴。2009年吴继新等^[16]对遂平地热田的地球化学、热储结构等进行了论述,随后刘华平等^[17-18]采用物探与地球化学调查方法,对遂平、驿城、新蔡的地热资源赋存特征分别开展了研究,陈志

华等^[19]则通过数值模拟方法,对上蔡地热田的开采潜力进行了分析。通过总结前人成果,发现对该区地热资源的研究还局限在局部地热田,且主要是对个别地热要素的单独描述,对于区域上的地热赋存规律、地热成因模式还缺乏探讨。因此,现以周口坳陷西南部作为研究对象而对整个地热系统开展研究,通过各类钻孔与地球物理资料明确各套热储空间展布与温度特征,通过地球化学分析等落实流体补给源及运移通道,进而通过“源、储、通、盖”的耦合研究,建立研究区地热系统成因模式,评价其开发潜力,以期为进一步勘探开发提供参考。

1 区域地热地质概况

周口坳陷位于南华北盆地中部,北临太康隆起,东与淮北隆起、蚌阜隆起相接,南以驻马店断裂与豫西-长山隆起相邻,为一中-新生代断陷盆地^[20]。坳陷现今表现为“三凹两凸”构造格局,研究区位于周口坳陷西南部,构造单元上主要包括舞阳凹陷、平舆-太和凸起、驻马店-淮滨凹陷、临泉凹陷及豫西-长山隆起部分地区(图1)。研究区基底主要为太古界变质岩,向上依次发育寒武系-奥陶系海相沉积、石炭系-二叠系海陆交互相含煤沉积、中生界山前粗碎屑沉积与滨浅湖沉积、新生界河湖相砂泥岩沉积(图2)。



F1 为郟亳断裂;F2 为新站社断裂;F3 为高水断裂;F4 为秋梁集断裂;F5 为倪秋集断裂;F6 为光双断裂;F7 为襄郟断裂;F8 为鲁山—舞阳—阜阳—淮南断裂;F9 为舞阳断裂;F10 为新桥断裂;F11 为射同断裂;F12 为殷湾断裂;F13 为三桥断裂;F14 为太和断裂;F15 为临泉断裂;F16 为杨桥断裂;F17 为阜阳断裂;F18 为太和南断裂;F19 为驻马店断裂;F20 为拐河—确山断裂;F21 为栾川—确山—固始—肥中断裂;F22 为夏邑—涡阳—麻城断裂;F23 为阜阳—固始断裂;F24 为新蔡东断裂;F25 为周楼断裂;F26 为遂平断裂;F27 为南阳—方城断裂

图1 周口坳陷构造划分及断裂分布图

Fig. 1 Division of tectonic units and fault distribution of Zhoukou Depression

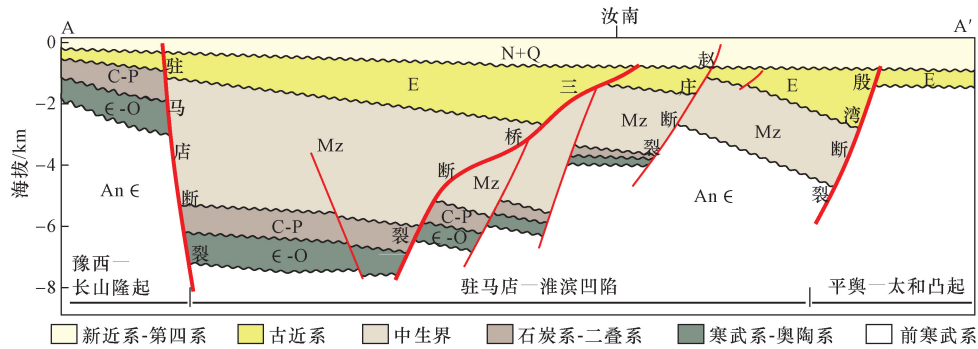


图2 周口坳陷西南部南西-北东向地质结构剖面图

Fig. 2 SW-NE trend geological structural profile in the southwest of Zhoukou Depression

研究区与华北地块南缘构造带构造演化基本一致,古生代以来相继经历了板块构造作用阶段(寒武纪-三叠纪)、陆内造山阶段(侏罗纪-白垩纪)、陆内裂陷-坳陷阶段(古近纪-第四纪)^[21]。长期复杂的演化历史形成了不同类型的地热流体储层与盖层,奠定了地热资源的赋存基础。此外研究区构造变形复杂,发育多期不同规模断裂,主要为NW走向,NE走向次之,其中NW走向断裂是主要的控凹断层,对研究区的水热活动有一定控制作用。

2 地热资源赋存特征

2.1 储盖特征

研究区发育两类热储:①砂岩孔隙型热储,主要为新近系与古近系砂岩热储;②碳酸盐岩岩溶型热储,主要为寒武系-奥陶系碳酸盐岩热储。目前新近系是地热开发主要层位,其次为古近系,寒武系-奥陶系地热田在邻区见有报道。区域盖层为新近

系与第四系沉积。

2.1.1 新近系砂岩热储

在南华北地区区域沉降背景下,周口坳陷在新近纪进入坳陷阶段^[22],形成了一套河湖相沉积,展布稳定,受断裂影响较小。地层整体向豫西—长山隆起方向尖灭,在遂平—正阳一带厚度一般不足500 m,向北东方向厚度逐渐增大,在上蔡、新蔡一带可达800 m以上,在周口市则可达1 600 m以上(图3)。显然随着厚度增大,热储底板埋深也由南向北逐渐增大,在驻马店市新近系底界埋深最大可达1 400 m。

河道砂体的发育为热储的形成奠定了良好的物质基础。根据实钻数据统计,新近系热储岩性主要为细砂岩、中细砂岩及砂砾岩,尤其是下部底砾岩普遍发育。砂地比一般分布在29.1%~53.8%,平均40.9%,单层砂岩厚度一般9.0~16.4 m,平均11.6 m。砂岩孔隙度平均22%。根据上蔡、平舆、新

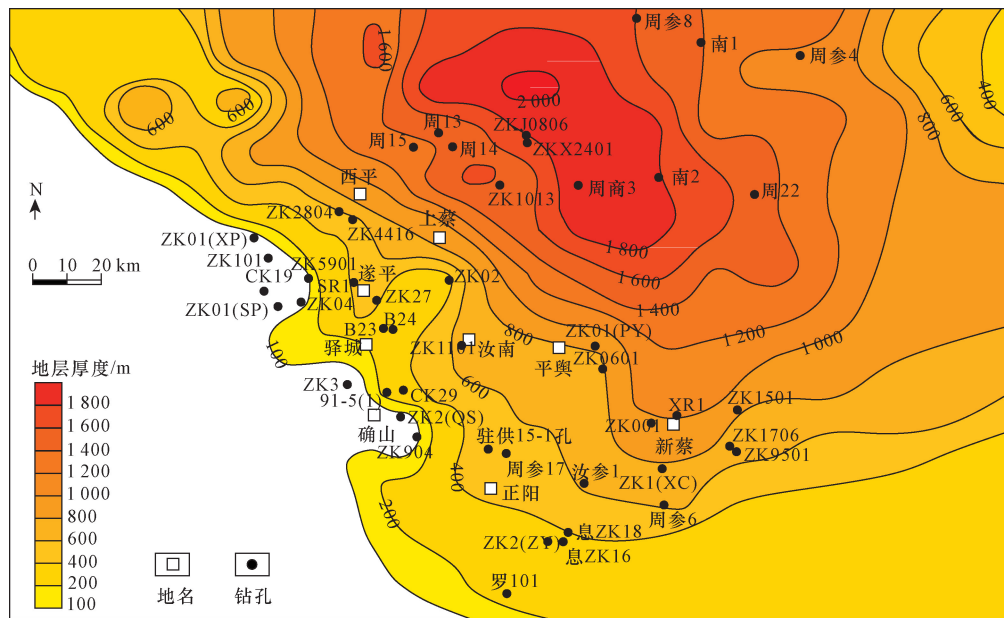


图3 周口坳陷西南部新近系-第四系地层厚度平面分布图

Fig. 3 Contour map of formation thickness for Neogene-Quaternary in the southwest of Zhoukou Depression

蔡城区地热井产水情况,新近系产水量在 40 ~ 60 m³/h,最大可达 95.9 m³/h,井口温度 38 ~ 45 ℃。

2.1.2 古近系砂岩热储

古近纪周口坳陷分隔强烈,形成了多沉积中心的箕状断陷格局^[21],在凹陷内沉积了巨厚的砂泥岩地层。驻马店—淮滨凹陷地层厚度较大,一般500 ~ 1 500 m,而在北部的舞阳凹陷,地层厚度可达 2 000 m以上。在平輿-太和凸起区厚度整体较薄,一般 500 m 左右(图 4)。

目前钻遇古近系钻孔较少,所揭示古近系沉积粒度较细,砂岩发育程度也较差。位于遂平县城的 SR1 井古近系顶部为一套棕红色、紫红色黏土岩、砂质黏土岩夹泥质粉细砂岩,下部为深灰色、灰褐色黏土岩夹浅灰色粉细砂岩及钙质砂岩,为一套还原环境下的浅湖-深湖相沉积^[16]。整体砂地比一般 16%左右,单层砂岩厚度一般 1.5 ~ 15.1 m,平均 3.9 m。由于泥质含量较大、成岩程度高,古近系热储富水性较差,SR1 井在降深 124.8 m 情况下,涌水量仅 14.02 m³/h,渗透系数 0.028 m/d^[17]。

需要注意的是,由于不同凹陷的构造演化并不同步,在不同凹陷所沉积的地层(包括时代与沉积相等)也不尽相同^[21,23],因此古近系热储在横向上的差异可能较大,对其认识还有待更详尽的资料来论证。

2.1.3 寒武系-奥陶系碳酸盐岩热储

早古生代,南华北地区沉积了巨厚的碳酸盐岩地层,而后期的表生岩溶改造作用则促成了岩溶热储的形成。根据区域构造演化,周口坳陷在寒武系-奥陶系沉积后至少经历 2 次抬升剥蚀:加里东运动

使南华北地区整体抬升,寒武系-奥陶系地层遭受了 1.4 亿年的风化剥蚀,形成了与上古生界的不整合^[24];印支运动时期,地层再次抬升受到不同程度的剥蚀,部分地区三叠系、二叠系已被剥蚀殆尽,形成了寒武系-奥陶系与新近系的不整合^[24-25]。

残余地层厚度图显示,研究区寒武系-奥陶系主要分布在遂平—正阳—新蔡一带,即主要在驻马店-淮滨凹陷,临泉凹陷展布,厚度最大 1 000 m 左右,自新蔡向东北方向厚度有所增大,可达 1 600 m。在平輿—太和凸起的西部,即上蔡—平輿一带不发育该套地层,而西平北部的舞阳凹陷残余厚度可达 600 m(图 5)。

目前钻遇寒武系-奥陶系的钻孔主要位于驿城、确山一带,地层向南西方向尖灭,顶面埋深较浅,一般 210 ~ 500 m,向北东埋深逐渐增大。岩性主要为灰色、深灰色灰岩、白云质灰岩,局部见角砾状灰岩。在多口钻孔中均发现了碳酸盐岩溶蚀现象,可见蜂窝状溶蚀,溶洞 1 ~ 2 cm,部分被泥质充填。目前关于寒武系-奥陶系热储富水性报道仅见于研究区北部舞阳凹陷,该区发育以寒武系为主要产水层的地热田,顶面埋深 1 000 ~ 2 100 m,水量在 60 ~ 75 m³/h,井口水温 60 ~ 85 ℃^[26]。

2.1.4 盖层

对地热系统来说,盖层要起到隔水隔热的作用。研究区地热系统的盖层主要由第四系与新近系上部发育的粉砂质黏土、黏土、粉细砂岩组成,一方面其粒度细、物性差,可作为一套良好的隔水层。另一方面其泥质含量较高、热导率低,具有较好的隔热性能。钻孔揭露研究区第四系松散层厚度基本

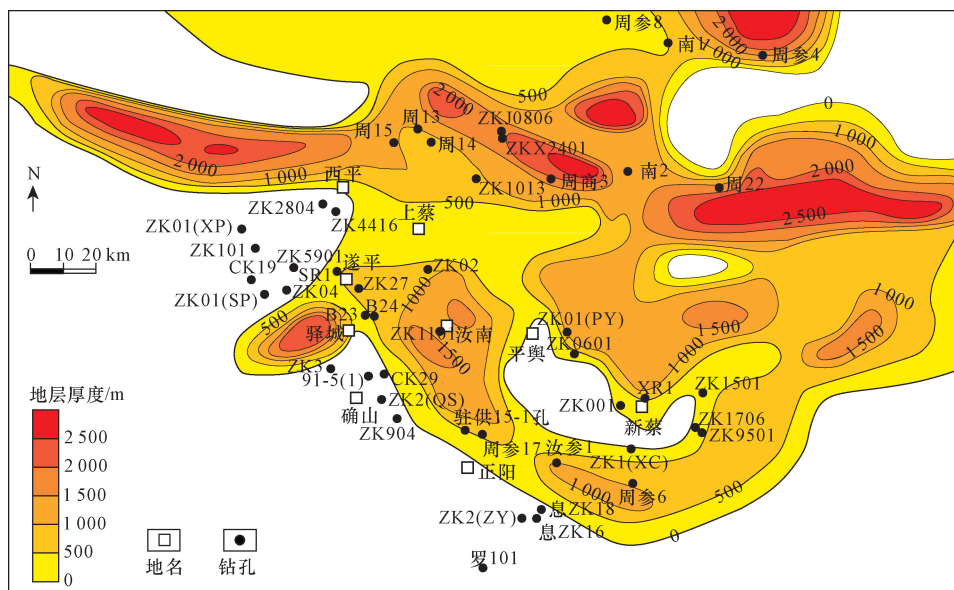


图 4 周口坳陷西南部古近系残余地层厚度平面分布图

Fig. 4 Contour map of residual formation thickness for Paleogene in the southwest of Zhoukou Depression

元素衰变生热及岩浆余热^[27]。研究区火山活动主要发生于燕山期,与陆内造山阶段相对应,岩浆岩主要分布在驻马店—淮滨凹陷,大体沿驻马店断裂分布,岩性主要为花岗岩、安山岩、玄武岩,K-Ar 同位素测年显示,区内玄武岩年龄为 135 Ma^[21,23]。而花岗岩冷却时间一般 5~8 Ma^[28],即研究区晚侏罗世-早白垩世花岗岩余热供热能力已微乎其微。而根据放射性测试结果,研究区放射性整体处于低水平,深部地幔热应是主要热源。

莫霍面的起伏直接影响着地幔的供热量^[11]。周口坳陷莫霍面深度具有南高北低的特点,在驻马店—淮滨凹陷区以北深度较小,多小于 34 km,有利于热流向地表传导,向南东方向则逐渐加大,埋深可达 37 km。相应地,大地热流具有北高南低的特点,在北部的临颖-郸城凸起,热流值可高达 80 mW/m² 以上,平舆-太和凸起区热流值为 74.7~84.0 mW/m²,均高于中国大地热流均值 63 mW/m² (图 7)。向南至驻马店—淮滨凹陷,热流值基本小于 40 mW/m²。可以看出凸起区热流要高于凹陷区,这也正是是热流在传导过程中趋于向热阻小、热导率高部位偏移而产生“热折射”的结果^[13],即研究区凹凸相间的格局使得凸起区更易形成地热异常区。

3.2 补给来源

采用氢氧稳定同位素与¹⁴C 来分析研究区地热水补给源。不同来源的水在氢、氧同位素上会有所不同^[3]。根据地热水同位素分析结果, δD 一般为

-82‰~-65‰, $\delta^{18}O$ 主要为 -10.1‰~-8.7‰,基本分布在全球大气降水线附近(图 8),说明地热水主要源于大气降水的补给。依据区域地质条件,地热水补给区可能位于西部、西南部遂平、确山一带低山丘陵区。部分样品点落在大气降水线下方,存在一定的氧同位素正漂移现象,说明地热水循环过程中通过水岩反应而发生了同位素交换,水中¹⁸O 增高^[29]。

对比来看,汝南、平舆、新蔡及上蔡部分样品点的偏移较为明显。而从地热流体¹⁴C 年龄分析结果可知,遂平城区为 26.4~30.3 ka,汝南城区为 29.3~33.5 ka,上蔡城区为 34.9~39.2 ka。即地热水距离补给区越远,地热水年龄越大,运移时间越长,水岩反应也更为充分,这也进一步佐证了研究区地热水是由南西向东、北东方向运移。

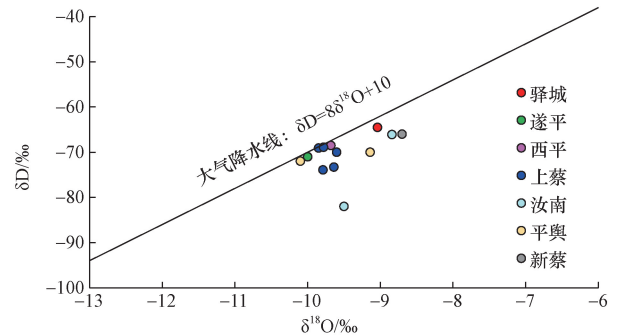


图 8 周口坳陷西南部地热水 $\delta^{18}O$ 与 δD 的关系图
Fig. 8 Relationship between $\delta^{18}O$ and δD of geothermal water samples in the southwest of Zhoukou Depression

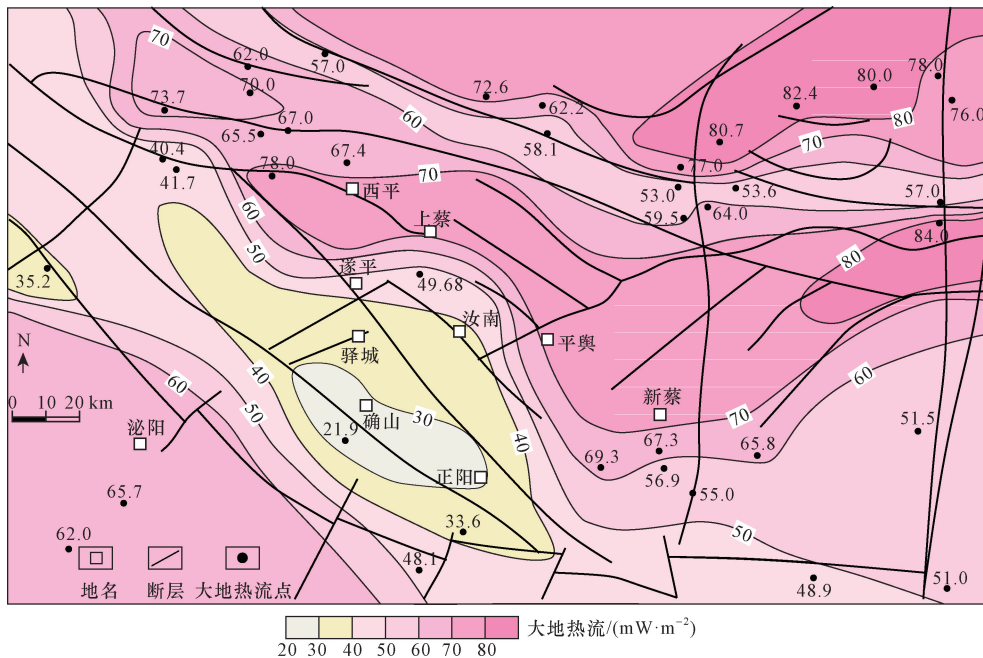


图 7 周口坳陷西南部大地热流平面分布图
Fig. 7 Contour map of geothermal flow in the southwest of Zhoukou Depression

3.3 通道

地热系统的导热、导水通道主要包括渗透性岩层与断裂两种^[5]。新生界较为连续的渗透性砂层、构造运动形成的不整合面均可作为研究区流体运移通道。此外,新生代以来的拉张背景使得研究区发育一系列张性断层,也有利于流体的对流活动。

水分析结果显示,驻马店断裂以东地区浅层各化学组分的平均值可高出断裂以西两倍之多,可能正是深部流体通过断裂上涌至浅部,进而影响了浅层地下水的化学组分所致。深部热量也会随着流体介质向上运移。前人研究表明周口坳陷西南部地温梯度平均为 2.25 °C/100 m^[30-31],而该区域的大地热流也基本在 50 mW/m² 以下,基本为低温异常。但从驿城、遂平地热钻井测温结果看,地温梯度为 2.9 °C/100 m,其中驿城区处于驻马店断裂带上,而遂平城区位于驻马店断裂与遂平断裂交汇部位,即断裂破碎带的存在可能形成了热水上涌通道,并在断层附近形成了一定的地热异常区。吴继新等在遂平城区断裂附近检测到了汞的高异常分布,也进一步证明了深部热流活动的存在^[16]。

3.4 成因模式

综上,周口坳陷西南部发育低温地热资源,新近系、古近系砂岩热储、寒武系-奥陶系岩溶热储是流体主要赋存空间。地热系统在遂平西部的低山丘陵区接受大气降水补给,沿着渗透性岩层、寒武系-奥陶系岩溶裂隙及地层不整合面等向东、北东方

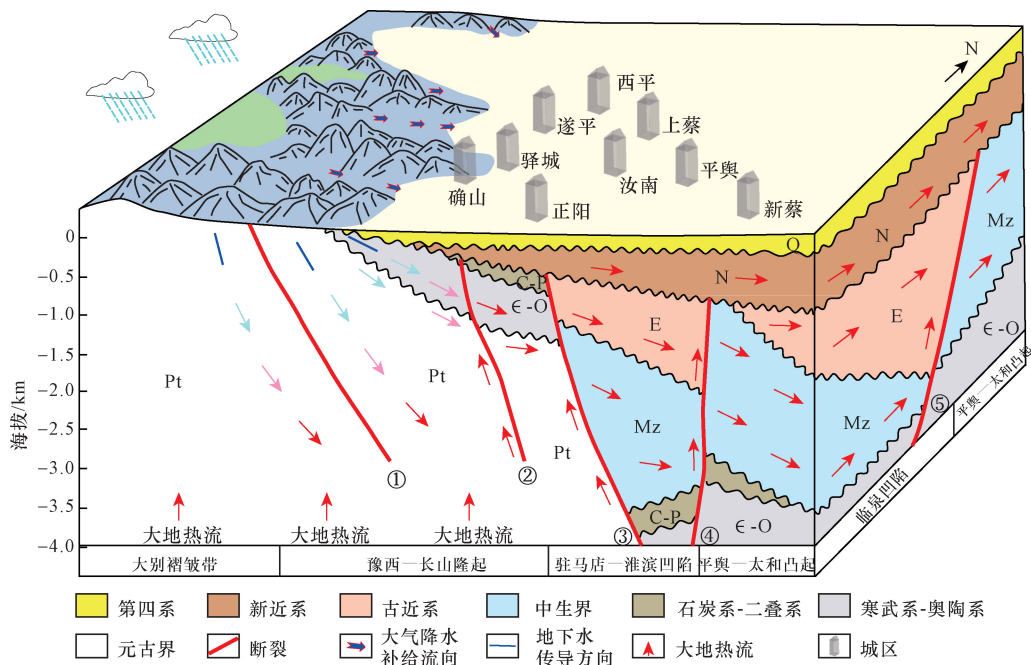
向运移富集。地幔热是主要热源,通过热传导方式为地热系统加热增温,而受控于大地热流“南冷北热”特点,研究区地温梯度整体偏低,其中凸起区可能相对要高于凹陷区。同时张性断裂的发育促成了局部的热对流活动,对地下水也起到了一定的加热作用,在断裂附近,尤其是不同断裂交汇部位也可形成地热异常区。第四系与新近系上部的黏土沉积起到了良好的隔水、保温作用,最终在研究区形成了以层状热储为主的地热系统(图9)。

4 开发前景

基于埋深、热储温度、富水性、热储空间连续性 & 资料落实程度等因素,对 3 套热储开发前景开展评价。

新近系展布受断裂影响较小,地层对比也显示热储展布相对稳定,热储物性、富水性落实程度较高,在 3 套热储中开发利用风险最小,埋深是决定其水温、水量的主要因素。若以热储温度 > 35 °C (对应埋深 700 m) 作为有利区优选原则,则新近系有利区带主要位于驻马店市东北部(图 10),尤其是在西平、上蔡、平舆及新蔡城区,新近系底界埋深可在 900 m 以上,是地热资源开发的有利靶区。

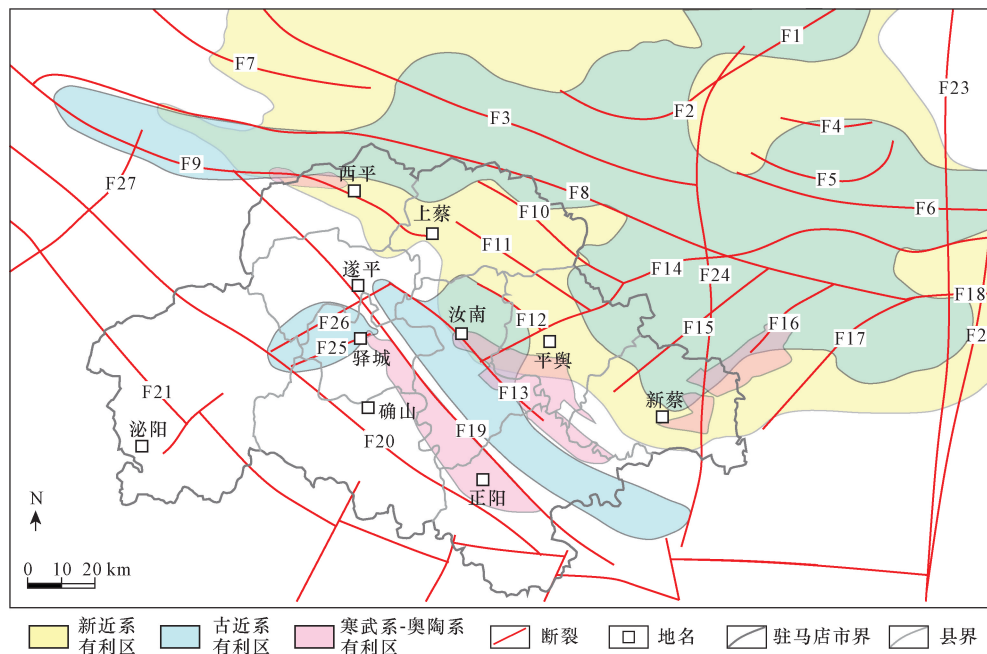
对于古近系热储,目前在研究区内暂未见其富水性较好的直接证据,但驻马店—淮滨凹陷与板桥凹陷均沉积了较厚的古近系,经历了较为完整的湖盆构造-沉积演化,在这一过程中所发育的盆缘河流-三



①为栾川—确山—固始—肥中断裂;②为拐河—确山断裂;③为驻马店断裂;④为三桥断裂;⑤为临泉断裂

图9 周口坳陷西南部地热系统成因模式

Fig. 9 Genetic mechanism of geothermal system in the southwest of Zhoukou Depression



F1 为郟亳断裂;F2 为新站社断裂;F3 为商水断裂;F4 为梁秋集断裂;F5 为倪秋集断裂;F6 为光双断裂;F7 为襄郑断裂;F8 为鲁山—舞阳—阜阳—淮南断裂;F9 为舞阳断裂;F10 为新桥断裂;F11 为射同断裂;F12 为殷湾断裂;F13 为三桥断裂;F14 为太和断裂;F15 为临泉断裂;F16 为杨桥断裂;F17 为阜阳断裂;F18 为太和南断裂;F19 为驻马店断裂;F20 为拐河—确山断裂;F21 为栾川—确山—固始—肥中断裂;F22 为夏邑—涡阳—麻城断裂;F23 为阜阳—固始断裂;F24 为新蔡东断裂;F25 为周楼断裂;F26 为遂平断裂;F27 为南阳—方集断裂

图 10 周口坳陷西南部地热资源有利区块分布图

Fig. 10 Distribution map of favorable districts for the geothermal resources in the southwest of Zhoukou Depression

角洲沉积可形成优质的地热流体储集空间。此外在该区域也有控凹断裂的发育,因此,若要尝试打开古近系热储开发的局面,可优先在汝南城区、驿城区西南部开展进一步的勘探、钻探工作。

寒武系-奥陶系热储的发育已在西平西部的舞阳凹陷得到证实。而在驿城区东南部至正阳一带,即驻马店断裂下盘,寒武系-奥陶系顶面埋深可达 500 m 以上,其上与石炭系-二叠系或新近系直接接触,具有岩溶发育基础,另外也叠加了一定断裂热对流作用,具备一定资源潜力。此外在汝南城区东南部、新蔡城区东部及东北部,寒武系-奥陶系顶面埋深在 1 000 ~ 3 500 m,若岩溶热储发育其出水温度可达 50 °C 以上,甚至可超过 100 °C,也有望成为研究区岩溶热储开发的有利区块。

5 结论

(1) 周口坳陷西南部赋存低温地热资源,由西部低山丘陵接受大气降水补给,沿渗透性地层、不整合面向东、北东运移富集,现存为距今 26 ~ 40 ka 的次现代水。

(2) 大地热流北高南低、凸起区高于凹陷区,由热传导为流体加热,新生代以来张性断裂的发育也促成了局部的热对流作用,平均地温梯度 2.8 °C/100 m,新生界上部的松散黏土沉积起到了保温阻水

作用。

(3) 新近系是目前揭示主要富水层系,砂地比平均 40.9%,单层砂岩厚度平均 11.6 m,孔隙度平均 22%,在西平—上蔡—平舆—新蔡一线及以北区域埋深适中,可获得较好的地热开发效果。

(4) 寒武系-奥陶系岩溶型热储在汝南城区东南部、驿城区东南部及新蔡城区东北部可具有一定勘探开发潜力。目前揭示古近系砂岩热储富水性较差,但其横向变化较大,还有待更详尽资料去论证。

参考文献

- [1] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
Wang Guiling, Liu Yanguang, Zhu Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [2] 何胜,汪万录,赵文强,等. 综合地球物理方法在 II 合地型地热勘查中的应用: 青海同仁盆地为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(9): 3567-3575.
He Sheng, Wang Wanlu, Zhao Wenqiang, et al. Application of comprehensive geophysical methods in geothermal exploration of type II geothermal resources: a case study of Tongren Basin in Qinghai Province[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(9): 3567-3575.
- [3] 张焱焱,刘凯,童珏,等. 江西吉安钱山地区地热资源特征及

- 热源机制[J]. 地球学报, 2024, 45(1): 39-52.
- Zhang Yaoyao, Liu Kai, Tong Jue, et al. Characteristics and heat source mechanism of geothermal resources in Qianshan area of Jire, Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2024, 45(1): 39-52.
- [4] 霍超, 林倚天, 李刚, 等. 碳中和背景下中国地热资源勘查技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 4917-4927.
- Huo Chao, Lin Yitian, Li Gang, et al. China's geothermal resource exploration technology research progress under the background of carbon neutrality[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(12): 4917-4927.
- [5] 郭飒飒, 朱传庆, 邱楠生, 等. 雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2026-2035.
- Guo Sasa, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, et al. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 94(7): 2026-2035.
- [6] 马峰, 王贵玲, 张薇, 等. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1981-1990.
- Ma Feng, Wang Guiling, Zhang Wei, et al. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 94(7): 1981-1990.
- [7] 康凤新, 史启朋, 马哲民, 等. 盆地潜凸起岩溶热储地热田成因机理: 以菏泽潜凸起为例[J]. 地质学报, 2023, 97(1): 221-237.
- Kang Fengxin, Shi Qipeng, Ma Zhemin, et al. Genetic mechanism of the karst geothermal reservoir in buried uplifts of basins: a case study of Heze[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 97(1): 221-237.
- [8] 任战利, 刘润川, 任文波, 等. 渭河盆地地温场分布规律及其控制因素[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1938-1949.
- Ren Zhanli, Liu Runchuan, Ren Wenbo, et al. Distribution of geothermal field and its controlling factors in the Weihe Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 94(7): 1938-1949.
- [9] 兰镭, 左银辉, 冯仁朋, 等. 川东地区大地热流及其对地热资源评价的启示[J]. 地球学报, 2023, 44(1): 169-179.
- Lan Lei, Zuo Yinhui, Feng Rengpeng, et al. Terrestrial heat flow in eastern Sichuan Basin and its revelation to geothermal resource evaluation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(1): 169-179.
- [10] 安百州, 曾昭发, 闫照涛, 等. 鄂尔多斯盆地西缘热储构造模式及地热资源分布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1286-1301.
- An Baizhou, Zeng Zhaofa, Yan Zhaotao, et al. Thermal reservoir construction mode and distribution characteristics of geothermal resources in western margin of Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1286-1301.
- [11] 马永法, 周学军, 詹涛, 等. 黑龙江省林甸地热田成因分析及资源评价[J]. 地质通报, 2022, 41(12): 2244-2255.
- Ma Yongfa, Zhou Xuejun, Zhan Tao, et al. Genesis and resource assessment of Lindian geothermal field, Heilongjiang Province[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(12): 2244-2255.
- [12] 汪浩, 黄少鹏. 冀中坳陷雄县地热开采区地热资源的成因机制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7203-7211.
- Wang Hao, Huang Shaopeng. Genesis mechanism of the Xiongqian geothermal field in the Jizhong Depression, North China[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(17): 7203-7211.
- [13] 黄旭, 章惠, 汪新伟, 等. 渤海湾盆地南乐地热田特征及其成因分析[J]. 地质科技通报, 2021, 40(5): 71-82.
- Huang Xu, Zhang Hui, Wang Xinwei, et al. Characteristics and mechanism analysis of geothermal field in Nanle Sub-uplift, Bohai Bay Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(5): 71-82.
- [14] 汪新伟, 王婷灏, 李海泉, 等. 太原盆地岩溶地热系统的形成演化及其地热资源潜力[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 716-731.
- Wang Xinwei, Wang Tinghao, Li Haiquan, et al. Evolution of karst geothermal system and its geothermal resource potential in Taiyuan Basin[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 716-731.
- [15] 潘良云, 孟令箭, 孙福利, 等. 山西大同盆地北部地热地质特征及资源潜力[J]. 中国地质, 2023, 50(6): 1632-1645.
- Pan Liangyun, Meng Lingjian, Sun Fuli, et al. Geothermal geological characteristics and resource potential in the north of Datong Basin, Shanxi Province[J]. Geology in China, 2023, 50(6): 1632-1645.
- [16] 吴继新, 王娟, 刘华平, 等. 河南省遂平县城地热田地质特征[J]. 地下水, 2009, 31(6): 146-149.
- Wu Jixin, Wang Juan, Liu Huaping, et al. Geothermal geological characteristics of geothermal field in Suiping County, Henan Province[J]. Groundwater, 2009, 31(6): 146-149.
- [17] 刘华平, 彭森博, 李扬. 驻马店-遂平一带地热资源赋存规律研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 37-41.
- Liu Huaping, Peng Senbo, Li Yang. Research on the occurrence regularities of geothermal resources in the area of Zhumadian to Suiping[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2014, 35(6): 37-41.
- [18] 刘华平, 段志纲, 吴继新, 等. 河南省新蔡县地热资源及其开发利用前景[C]//河南地球科学通报2016年卷. 郑州: 河南省地质矿产勘查开发局第五地质勘查院, 2016: 100-105.
- Liu Huaping, Duan Zhigang, Wu Jixin, et al. Characteristics and development prospect in Henan Xincai county town of geothermal resources[C]//Henan Earth Science Bulletin, Volume 2016. Zhengzhou: Fifth Geological Exploration Institute of Henan Provincial Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, 2016: 100-105.
- [19] 陈志华, 刘运涛, 周称称, 等. 上蔡地热田地热开发利用潜力分析[J]. 中原工学院学报, 2021, 32(2): 48-52.
- Chen Zhihua, Liu Yuntao, Zhou Chenchen, et al. Analysis of development and utilization potentiality of Shangcai geothermal field resources[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2021, 32(2): 48-52.
- [20] 刘恩然, 刘成林, 石砥石, 等. 南华北盆地周口坳陷东北部上古生界泥岩孔隙非均质性及其主控因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3773-3790.
- Liu Enran, Liu Chenglin, Shi Dishishi, et al. Characterization and controlling factors of pore structural heterogeneity of mudstone: a case of upper Paleozoic in northeast Zhoukou Depression, southern North China Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3773-3790.

- [21] 王定一, 刘池洋, 张国伟. 周口坳陷构造特征与油气远景[J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(1): 10-21.
Wang Dingyi, Liu Chiyang, Zhang Guowei. Structural feature and hydrocarbon potential of Zhoukou Depression [J]. Oil & Gas Geology, 1991, 12(1): 10-21.
- [22] 孙自明. 周口坳陷的反转构造与构造演化[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(2): 251-257.
Sun Ziming. Inversion structure and structural evolution in Zhoukou Depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998, 33(2): 251-257.
- [23] 孙家振, 韦必则, 熊保贤, 等. 周口坳陷形成机制及其与大别造山带的辐合关系[J]. 地质前缘, 1995, 2(3/4): 248-251.
Sun Jiazhen, Wei Bize, Xiong Baoxian, et al. The formation mechanism of Zhoukou Depression and its convergence relationship with the Dabie orogenic belt [J]. Earth Scienc Frontiers, 1995, 2(3/4): 248-251.
- [24] 刘志武, 周立发, 何明喜. 周口坳陷石炭-二叠纪残留盆地煤成油气勘探前景[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(6): 699-702.
Liu Zhiwu, Zhou Lifa, He Mingxi. Prospects for coal formed oil and gas exploration of Carboniferous-Permian residual basins in Zhoukou Depression [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(6): 699-702.
- [25] 魏思宇, 周志, 李世臻, 等. 南华北盆地亳州凸起寒武系碳酸盐岩储层特征及主控因素[J]. 天然气勘探与开发, 2022, 45(4): 10-19.
Wei Siyu, Zhou Zhi, Li Shizhen, et al. Characteristics and main influential factors of the Cambrian carbonate reservoirs in Bozhou Uplift, southern North China Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2022, 45(4): 10-19.
- [26] 周颖, 杜利, 魏广仁, 等. 南华北南缘长山隆起斜坡带寒武系岩溶地热资源特征[J]. 石化技术, 2023(9): 184-186.
Zhou Ying, Du Li, Wei Guangren, et al. Characteristics of Cambrian karst geothermal resources in the slope zone of Changshan uplift in the southern margin of southern North China Basin [J]. Petrochemical Technology, 2023(9): 184-186.
- [27] 陆金波, 王丹丹, 丁郑军. 广东省花岗岩地区水热型地热成藏要素及探测实例分析[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(3): 67-71.
Lu Jinbo, Wang Dandan, Ding Zhengjun. Analysis of hydrothermal geothermal reservoir forming and survey case for granite areas in Guangdong [J]. Coal Geology of China, 2023, 35(3): 67-71.
- [28] 唐显春, 王贵玲, 马岩. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2052-2064.
Tang Xianchun, Wang Guiling, Ma Yan. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe Basin, northeastern Tibetan Plateau [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 94(7): 2052-2064.
- [29] 王龙平, 魏永霞, 程宏超, 等. 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.
Wang Longping, Wei Yongxia, Cheng Hongchao, et al. Characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone [J]. Geoscience, 2022, 49(6): 1765-1777.
- [30] 张鹏, 王良书, 刘绍文, 等. 南华北盆地群地温场研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 604-608.
Zhang Peng, Wang Liangshu, Liu Shaowen, et al. Geothermal field in the South Huabei Basins [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 604-608.
- [31] 何争光, 刘池洋, 赵俊峰, 等. 华北克拉通南部地区现今地温场特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2009, 55(3): 428-434.
He Zhengguang, Liu Chiyang, Zhao Junfeng, et al. A study on geothermal field and its geological significance in southern area of the North China Craton [J]. Geological Review, 2009, 55(3): 428-434.