

# 河南省上蔡县地热系统成因模式及开发潜力

赵雅静, 孙福利, 冷济高, 潘良云, 曹海丽, 高 阳

(北京宝石花能源科技有限责任公司, 北京 100088)

**摘 要:**河南省上蔡县地热系统是典型的水热型地热系统。根据地质调查、地震、钻测井资料及地球化学数据, 研究上蔡县地热系统地质特征, 建立地热系统成因模式, 评价地热资源开发潜力, 明确地热勘探开发有利区。结果表明: 上蔡县地热系统是典型的中—低温传导型地热系统, 局部断裂发育, 大地热流和地温梯度高于区域背景; 发育新近系、古近系和寒武系—奥陶系三套热储层, 第四系厚层泥岩为区域性盖层; 地热水来源为遂平一带低山丘陵地区的大气降水, 沿不整合面入渗, 在循环过程中, 经深部地幔热传导增温在热储层中富集; 热储层总静态资源量约为  $3.77 \times 10^{13}$  kJ, 水量为  $6.42 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 折合标准煤为  $1.29 \times 10^8$  t, 可满足  $6.71 \times 10^5$  m<sup>2</sup> 的供暖面积需求, 上蔡县城区为勘探开发有利区。该结果为河南省上蔡县及邻区的地热资源开发提供指导。

**关键词:** 地热系统; 成因模式; 开发潜力; 资源量评价; 上蔡县

**中图分类号:** P641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2025)05-0012-12

## 0 引言

作为一种绿色清洁矿产资源, 地热资源的有效开发需要对地热系统进行研究和评价<sup>[1-4]</sup>。地热系统是一个以热源为基础相对独立的地质单元, 包含热生成—运移—聚集—保持所需地质要素和地质作用<sup>[5]</sup>。近年来, 人们研究不同地热系统成因机制, 尤其是地热系统各项地质要素及其内部地质作用之间的联系<sup>[6-11]</sup>, 认为热源是所有地热系统形成的必要条件, 其他主控因素受地热系统类型而发生地改变。河南省驻马店市对地热资源进行地质勘查, 发现上蔡县地热资源条件良好, 是典型的沉积盆地水热型地热系统<sup>[12]</sup>。沉积盆地水热型地热系统储层厚度大、分布稳定, 温度一般随埋深增大而增大, 受储层埋深控制<sup>[11-13]</sup>。

河南省上蔡县已钻地热井水温普遍在 40 °C 以上, 水量介于 30~50 m<sup>3</sup>/h, 目前地热水应用模式较为单一, 主要用于洗浴, 利用率较低<sup>[14]</sup>。地热系统主要热储层为新近系、古近系厚层砂岩和寒武系—奥陶系碳酸盐岩, 寒武系—奥陶系碳酸盐岩储层埋深较大, 目前主要的开采层系为新近系和古近系砂岩热储层<sup>[14-15]</sup>。张天增等利用<sup>14</sup>C 放射性同位素估算驻马店地区地热流体年龄, 发现自西向东地热流体年龄是逐渐增大的<sup>[16]</sup>。陈志华等利用已钻地热井建立地质模型, 采用 Feflow 软件计算上蔡县新近系和古近系地热资源量与可开采量, 认为上蔡县城区需要考虑多功能互补供暖<sup>[14]</sup>。白博文利用钻井及地球化学数据建立相应的数学模型, 对上蔡县新近系和古近系地温场及成因进行分析, 认为上蔡县地热系统属于传导—对流复合型<sup>[15]</sup>。

对于上蔡县地热系统研究, 主要利用钻井及地球化学数据对新近系和古近系地温场和地热流体化学等方面进行, 受制于沉积盆地水热型地热系统的特性, 利用地震数据研究三套热储层埋深及分布, 从地质要素和地质作用方面分析上蔡县地热系统成因模式, 划定上蔡县开发有利区。笔者综合地震、钻测井资料及地球化学数据, 研究上蔡县地热系统地质特征, 建立地热系统成因模式, 评价地热资源潜力, 明确勘探开发有利区, 为河南省上蔡县及邻区的地热资源开发提供指导。

## 1 地质概况

河南省上蔡县大地构造位于周口坳陷(见图 1(a)), 上蔡县北部处于舞阳凹陷, 南部与平舆—太和凸起接壤(见图 1(b))。舞阳凹陷与周口坳陷主体构造走向基本一致, 呈 NWW 向长条状展布, 是北断南超

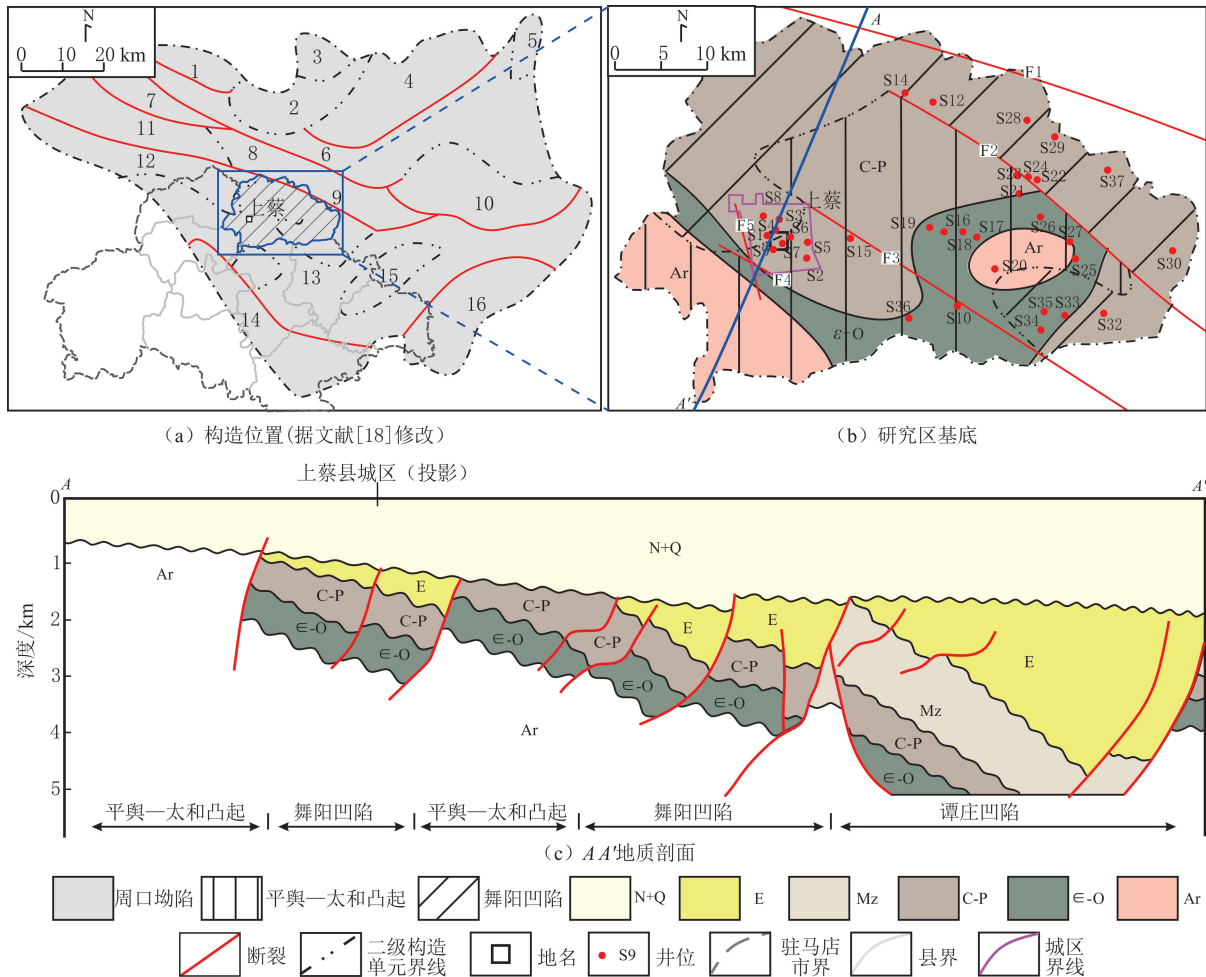
收稿日期: 2024-10-25; 编辑: 陆雅玲

基金项目: 中国石油西南油气田分公司项目(XNS-JS2024-02)

作者简介: 赵雅静(1998—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事地热地质评价方面的研究。

的箕状断陷盆地<sup>[17]</sup>。平舆—太和凸起形成于印支—燕山运动早期,受构造活动影响强烈,在上蔡县形成以太古界为核心的穹隆状构造<sup>[18]</sup>。研究区基底为太古界变质岩,向上依次发育寒武系—奥陶系碳酸盐岩、石炭系—二叠系海陆过渡相碎屑岩夹煤层、古近系—新近系河湖相砂泥岩沉积(见图 1(c))。

研究区构造复杂,受印支—燕山构造活动影响,形成切割深且不同规模的断裂,主要发育北西向的控凹断裂,如新桥断裂(F<sub>2</sub>)、射桐断裂(F<sub>3</sub>)、任庄断裂(F<sub>4</sub>)及北北西向的上蔡断裂(F<sub>5</sub>)。上蔡断裂(F<sub>5</sub>)和任庄断裂(F<sub>4</sub>)在城区发育。



1. 巨陵凹陷; 2. 西华斜坡; 3. 逊母口凹陷; 4. 鹿邑凹陷; 5. 颜集凸起; 6. 临颍—郾城凸起; 7. 襄城凹陷; 8. 谭庄凹陷; 9. 沈丘凹陷; 10. 倪丘集凹陷; 11. 平顶山凸起; 12. 舞阳凹陷; 13. 平舆—太和凸起; 14. 驻马店—淮滨凹陷; 15. 临泉凹陷; 16. 阜阳凹陷; F1. 鲁阳—舞阳—阜阳—淮南断裂; F2. 新桥断裂; F3. 射桐断裂; F4. 任庄断裂; F5. 上蔡断裂

图 1 河南省上蔡县构造位置及地震剖面解释  
Fig. 1 Structural location and Seismic section interpretation in Shangcai County, Henan Province

## 2 地热地质特征

### 2.1 热源分析

地幔热、地壳岩石圈放射性元素铀(U)、钍(Th)、钾(K)的衰变生热及岩浆余热是地热系统热的主要来源<sup>[19-22]</sup>。周口坳陷在燕山运动期发生火山活动,测定岩浆岩年龄生成于 133 Ma,属于早白垩世,生成的岩浆岩沿驻马店—息县断裂(F11)呈条带状展布;花岗岩一般在 5~8 Ma 内冷却,相对于地质演化时间,不足以作为热源<sup>[22-24]</sup>。根据 JAUPART C 等<sup>[12]</sup>、刘超等<sup>[25]</sup>测得上蔡县放射性元素数据,放射性处于极低水平,元素衰变供热能力较弱,上蔡县主要热源为地幔热。地幔供热能力受莫霍面起伏的直接影响,上蔡县莫霍面埋深较浅,在 33~34 km 之间,有利于深部向浅部传热<sup>[26]</sup>。

可以用大地热流和地温梯度表征上蔡县热源<sup>[25-27]</sup>。大地热流是由地球内部热流向地表进行传输单位面积上散发的热量,反映岩石圈的热状态和能量平衡,大地热流与基底起伏、断裂有关<sup>[28]</sup>;地温梯度是温度随地球内部深度增加而变化的速率<sup>[29-30]</sup>。根据《中国大陆地区大地热流数据汇编》热流点<sup>[31]</sup>及钻(测)井数据,上蔡县具有高的大地热流背景,热流在 50~70 mW/m<sup>2</sup> 之间,整体由南西向北东向增大(见图 2(a))。高热流区域集中于中部平奥—太和凸起区,尤其是新桥断裂和射垌断裂附近,热流大于 70 mW/m<sup>2</sup>,高于周口坳陷平均热流(55 mW/m<sup>2</sup>)<sup>[32]</sup>。由于热流在传导过程中更倾向于向热阻小、热导率高的部位流动<sup>[23]</sup>,热流向凹陷单元方向降低,介于 50~60 mW/m<sup>2</sup>。

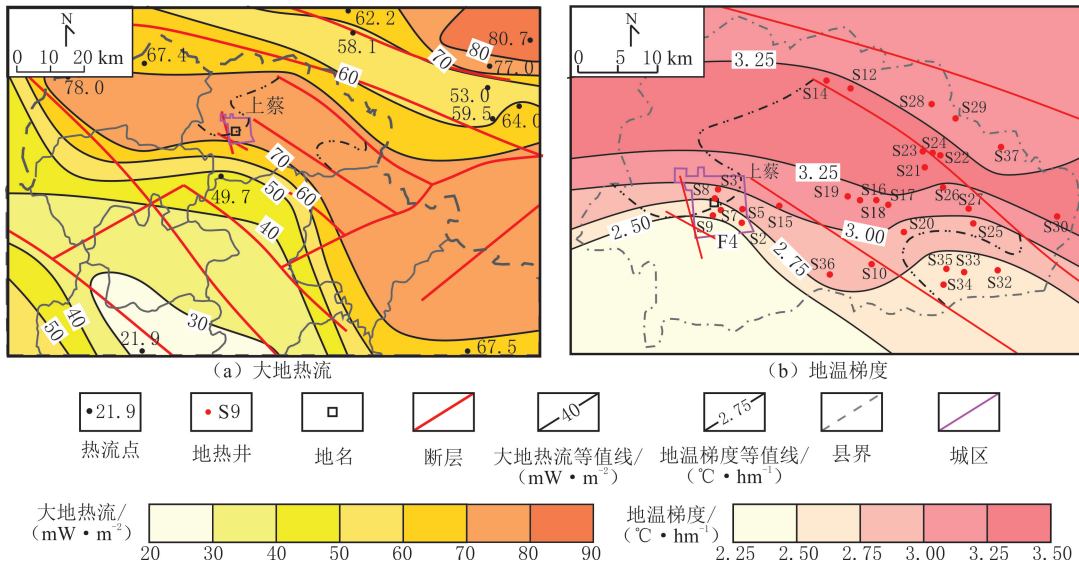


图 2 上蔡县大地热流和地温梯度等值线分布

Fig. 2 Distribution of Geothermal Flow and Geothermal Gradient in the Area of Shangcai County

地温梯度分布是由地温梯度数据和上蔡县地热井水温数据得到的<sup>[16]</sup>。上蔡县地温梯度介于 2.30~3.50 °C·hm<sup>-1</sup>,平均地温梯度为 3.00 °C·hm<sup>-1</sup>,高于区域背景值,城区地温梯度在 2.30~3.20 °C·hm<sup>-1</sup>之间(见图 2(b))。平面上,地温梯度的变化与大地热流的变化趋势大体一致,由南西至北东向增大,高值位于凸起构造单元和断裂发育区,地温梯度一般大于 3.00 °C·hm<sup>-1</sup>,凹陷单元地温梯度较低,一般在 2.50~3.00 °C·hm<sup>-1</sup>之间。

单井温深曲线反映“折线式”增温现象,表明地温梯度受自身岩石热导率影响<sup>[26]</sup>,是典型的传导增温方式。第四系盖层岩石结构疏松,泥岩发育,热导率小,能够有效阻止热能扩散,热能富集在底部,地温梯度高,为 3.97 °C·hm<sup>-1</sup>。新近系、古近系岩石较为致密,热导率大,地温梯度较低,分别为 2.98、2.31 °C·hm<sup>-1</sup>(见图 3)。

## 2.2 储盖特征

### 2.2.1 热储特征

在周口坳陷沉降的地质背景下,研究区在新近纪形成一套稳定的河湖相沉积。根据地震解释数据,新近系砂岩热储展布稳定,底界埋深主要受盆地基底影响,受断裂影响较小,地层厚度整体呈北东向逐渐增大的规律,底板埋深在 400~1 800 m 之间(见图 4(a))。舞阳凹陷埋深较大,在 1 500 m 以上;平奥—太和凸起埋深较浅,在 400~1 000 m 之间;上蔡县城区埋深在 800~1 200 m 之间。

发育良好的河道砂体为热储的形成奠定良好的基础。新近系热储层岩性主要由细砂岩、中—细砂岩及底部砂砾岩构成,砂岩较为发育,尤其是底砾岩在全区对比性较强。砂岩累计厚度一般为 380.0~430.0 m,砂地比为 30%~40%,平均为 39%,单层砂岩最小厚度为 1.5 m,最大为 46.4 m,平均单层砂岩厚度在 10.0~16.0 m 之间。砂岩储层物性条件较好,平均孔隙度为 22%,富水性较好。根据上蔡县钻孔数据统计(见图 5),纵向上,新近系热储层有显著的分层性,发育三个热储层段,横向对比性强,第一层段埋深在 150~550 m 之间,岩性为厚层砂岩夹薄层泥岩,砂岩厚度大,一般在 20.0 m 以上,储层温度较低,

在 25~32 °C 之间。第二层段埋深在 550~750 m 之间,岩性为厚层泥岩夹砂岩,泥岩厚度在 20.0 m 以上,第一层段温度过低和第二层段泥岩层较厚而不能作为储层。第三层段埋深在 800~1 050 m 之间,是目前主要的取水层段,主要为细砂岩和底砾岩,孔隙度高于 22%,热储层砂岩厚度为 140.0 m,水量为 35~50 m<sup>3</sup>/h,温度在 40 °C 以上。

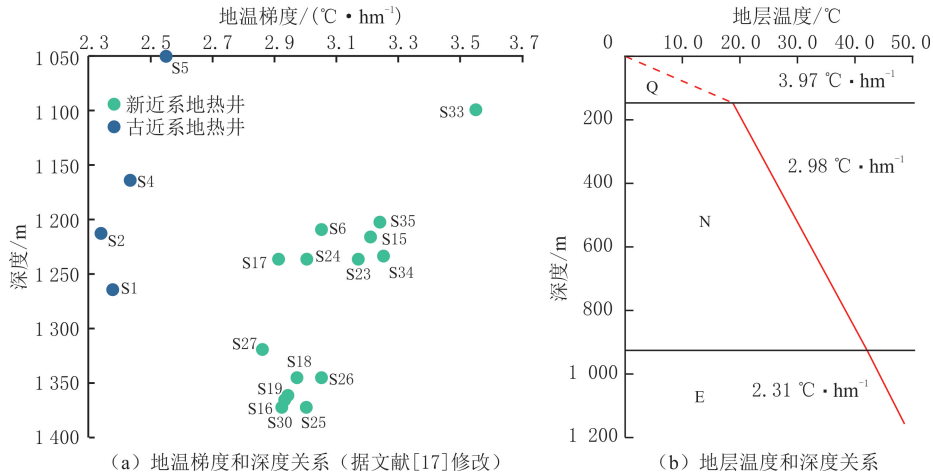


图 3 上蔡县地热井地温梯度、地层温度随深度变化关系

Fig. 3 Relationship between geothermal gradient and temperature variation with depth in geothermal wells in Shangcai County

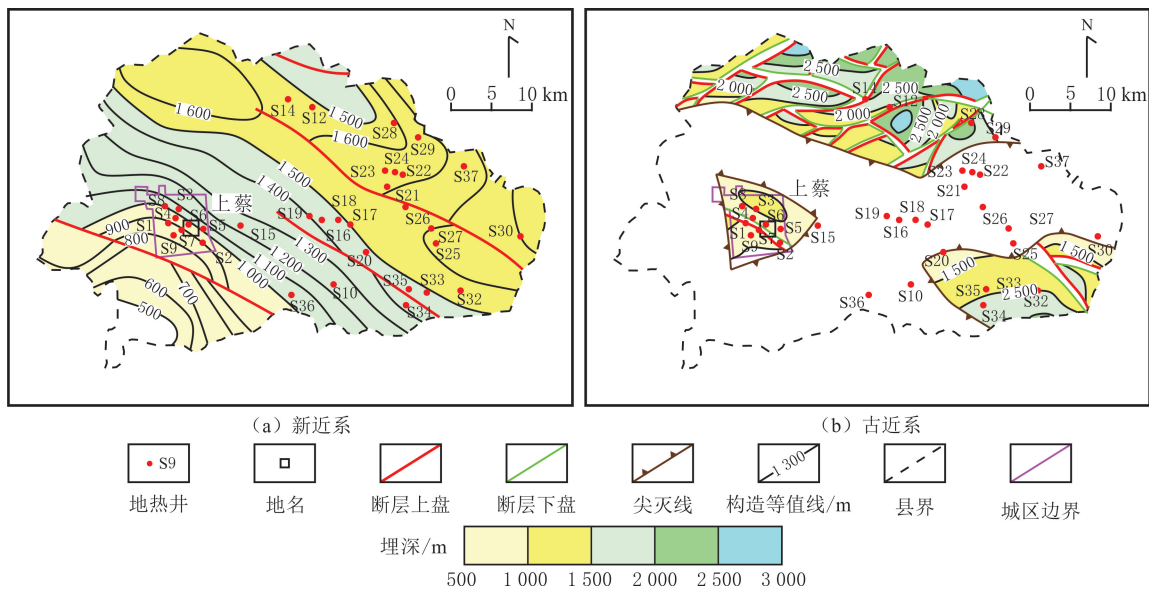


图 4 上蔡县新近系、古近系底界构造埋深等值线

Fig. 4 Depth map of the Neogene and Paleogene basement structure in Shangcai County

古近纪,在燕山构造活动的影响下,周口坳陷形成多沉积中心的箕状断陷格局,各构造单元分割强烈;新生代,周口坳陷在凹陷单元内沉积巨厚的滨湖相碎屑岩,凸起单元古近系沉积较薄,部分地区受喜马拉雅构造抬升活动影响,古近系沉积被剥蚀<sup>[33]</sup>。横向上,上蔡县古近系沉积差异较大,整体向北东向有增大趋势,县城区内、北部及东部沉积,县城区古近系底界埋深在 1 000~1 600 m 之间,沉积厚度在 300.0~400.0 m 之间;北部底界埋深在 1 600~2 400 m 之间,沉积厚度在 600.0 m 左右(见图 4(b))。

钻遇古近系的地热井较少,古近系上部岩性以粉—细砂岩为主,下部岩性为紫红色泥岩、灰绿色粉砂岩与中—细砂岩互层,底部为一套砂砾岩。S1 井钻测井数据显示,古近系砂岩发育较差,整体砂地比在 10%左右,单层砂岩厚度在 5.0~8.0 m 之间,平均为 6.0 m,主要取水层位为古近系顶部细砂岩和上部粉砂岩,取水层段厚度约为 50.0 m,水温在 49 °C 左右,水量为 20 m<sup>3</sup>/h。

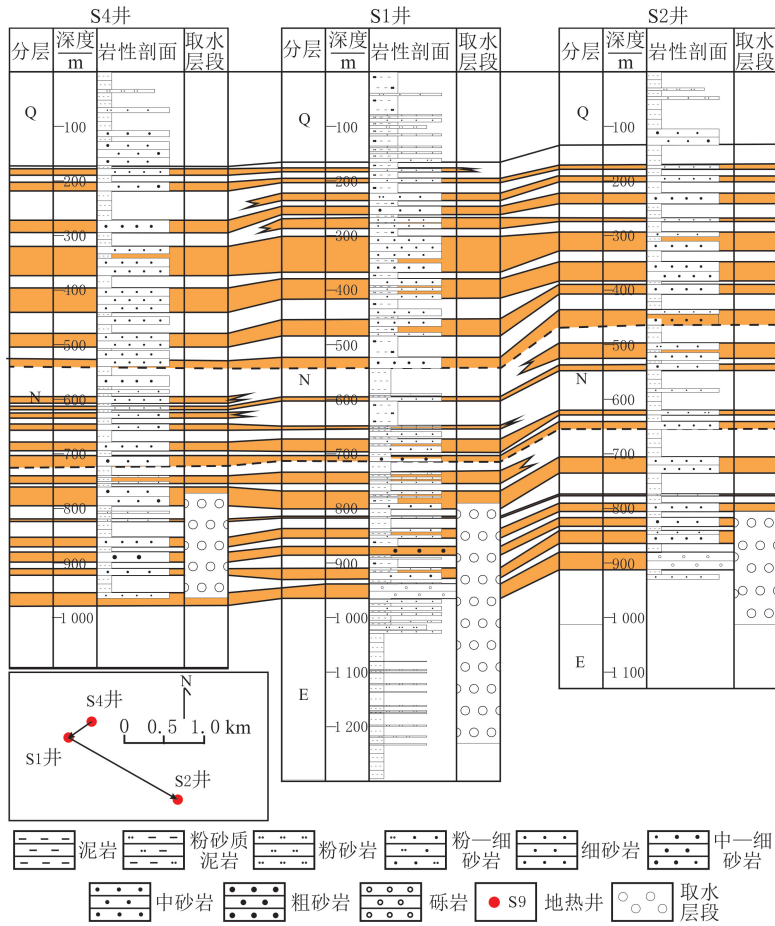


图 5 上蔡县新近系热储地热井连井剖面  
Fig. 5 Stratigraphic correlation of the Neogene reservoir in Shangcai County

寒武系—奥陶系沉积时期,研究区主要经历加里东和印支两期构造抬升剥蚀事件,早期受加里东构造活动影响,随华北板块整体隆升,发生海退现象,遭受 140 Ga 的风化剥蚀,缺失下奥陶统一上石炭统沉积,沉积岩性为白云岩、膏质白云岩及石灰岩,构造活动晚期海平面上升,岩溶裂隙和缝洞被充填,物性变差<sup>[34-35]</sup>。受印支期运动影响,南华北盆地部分地区隆升剥蚀导致三叠系沉积间断,寒武系—奥陶系碳酸盐岩热储层受地质演化过程中大气降水淋滤作用、构造应力作用和溶蚀作用的影响,发育大量溶蚀孔洞和岩溶裂隙<sup>[36]</sup>,是目前主要的储集空间。

寒武系—奥陶系碳酸盐岩主要在上蔡县北部发育,埋深在 1 600~3 600 m 之间,向北埋深增大,按照地温梯度  $3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ ,预测寒武

系—奥陶系热储层温度在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上(见图 6)。目前,上蔡县无地热井钻遇寒武系—奥陶系碳酸盐岩,缺乏钻井数据,在邻区西平县北部舞阳凹陷有寒武系—奥陶系碳酸盐岩地热田资料,热储层岩性以灰色、深灰色石灰岩和白云质灰岩为主,局部可见碳酸盐岩溶蚀现象,溶洞孔径为  $1\sim 2\text{ cm}$ ,部分被泥质充填,顶面

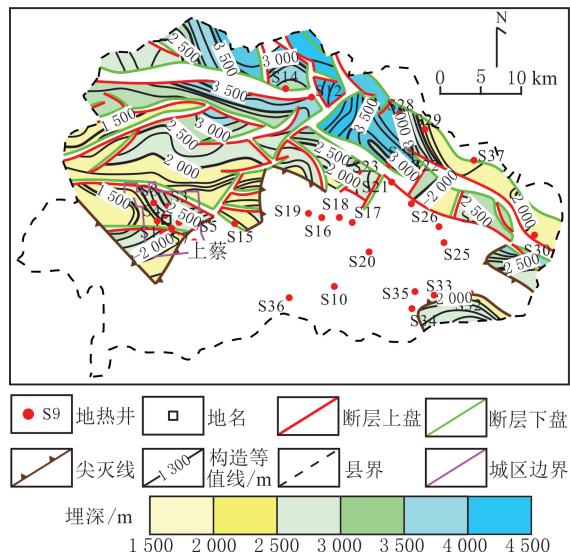


图 6 上蔡县下古生界顶界构造埋深  
Fig. 6 Structural burial depth of the top of Lower Paleozoic in Shangcai County

埋深在 1 000~2 100 m 之间,水量在 60~75 m<sup>3</sup>/h 之间,井口温度在 60~85 °C 之间<sup>[36]</sup>。

### 2.2.2 盖层特征

在地热系统中,盖层起阻止热逸散及隔水的作用。上蔡县地热系统的区域盖层为第四系厚层泥岩,古近系砂岩热储层与寒武系—奥陶系碳酸盐岩热储层的上覆新近系厚层泥岩、石炭系—二叠系碎屑岩可以作为盖层。

第四系发育泥岩、粉砂质泥岩等粒径较小的沉积物,热导率小,为 0.8 W/(m·°C),是良好的隔水隔热层。上蔡县第四系在全区分布,厚度稳定,在 150.0~200.0 m 之间,根据钻孔数据,第四系上部和下部以泥岩为主,泥岩层最大厚度为 74.0 m,可对下部热储层资源进行有效保护(见图 7)。新近系上部、中部和下部厚层泥岩发育,厚度在 15.0~60.0 m 之间,中部泥岩层厚度较大;上部和下部泥岩层厚度相对较薄,厚度在 15.0~30.0 m 之间,保温性能较差。新近系在全区厚度分布稳定,中部厚层泥岩埋深在 550~600 m 之间,与上部第四系厚层泥岩共同构成古近系的盖层。上蔡县无钻遇石炭系—二叠系的地热井,根据地震数据,石炭系—二叠系底界埋深在 1 600~3 600 m 之间,厚度约为 400.0 m,向北埋深增大。

## 2.3 水源分析

### 2.3.1 水化学及氢氧同位素特征

大气降水和各种地表水的渗入补给是地下水的主要来源<sup>[37]</sup>。根据上蔡县地热井水化学成分分析结果识别水化学类型,根据舒卡列夫分类法进行分类<sup>[16,36]</sup>。SYD4 井样品为第四系样品,取样点距离地表 280 m,埋藏相对 Q2、Q13 井的取样点深,水化学类型为 HCO<sub>3</sub>-Na,与大气降水水化学类型一致;Q2、Q13 井取样点距离地表 8 m,水化学类型为 HCO<sub>3</sub>-Ca,与大气降水的水化学类型不一致(见图 8(a))。上蔡县地势较低,推测为寒武系—奥陶系地表裸露区在接受大气降水后,碳酸钙被溶蚀,Ca<sup>2+</sup> 随地表水以径流的方式汇聚至上蔡县。

新近系地热水总矿化度(TDS)较低,在 500~1 000 mg/L 之间,属于淡水;阳离子以 Na<sup>+</sup> 为主,阴离子以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为主,Cl<sup>-</sup> 次之,属于 HCO<sub>3</sub>-Na 类型,pH 在 7.6~8.6 之间,为弱碱性。古近系地热水总矿化度(TDS)较新近系的高,在 1 000~1 500 mg/L 之间;阳离子有 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>,以 Na<sup>+</sup> 为主,阴离子以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup> 为主,水化学类型为 HCO<sub>3</sub>·Cl-Na,pH 在 7.2~8.3 之间,为弱碱性。

根据上蔡县和河南省新蔡县、遂平县、汝南县地地质勘察结果和氢氧同位素数据,利用中国大气降水线方程拟合的 δD—δ<sup>18</sup>O 关系进行分析<sup>[12-16]</sup>。δD—δ<sup>18</sup>O 同位素可以用来判断地热水的补给来源,结合全球大气降水线(GMEL)绘制地热水 δD—δ<sup>18</sup>O 关系(见图 8(b))。由图 8(b)可以看出,δD 在 -82.0‰~-70.0‰ 之间,δ<sup>18</sup>O 主要在 -10.0‰~-9.5‰ 之间,地热流体氢氧同位素数据分布在全球大气降水线的下方,地下水流体来源于大气降水;有轻微的 δ<sup>18</sup>O 漂移,指示大气降水与热储层发生水—岩反应。

地热水地球化学分析和水化学类型结果表明,上蔡县地下水补给源为遂平县低山丘陵地带近现代的大气降水,在地热流体运移过程中,<sup>14</sup>C 年龄逐渐增大。上蔡县城区<sup>14</sup>C 年龄为(34.9~39.2)×10<sup>3</sup> a,为 1952 年以前补给的近现代水<sup>[12]</sup>。

### 2.3.2 地热水循环深度

根据地热温标可以估算深部热储层的温度,常用方法有阳离子、二氧化硅和同位素等温标<sup>[36-39]</sup>。其中,

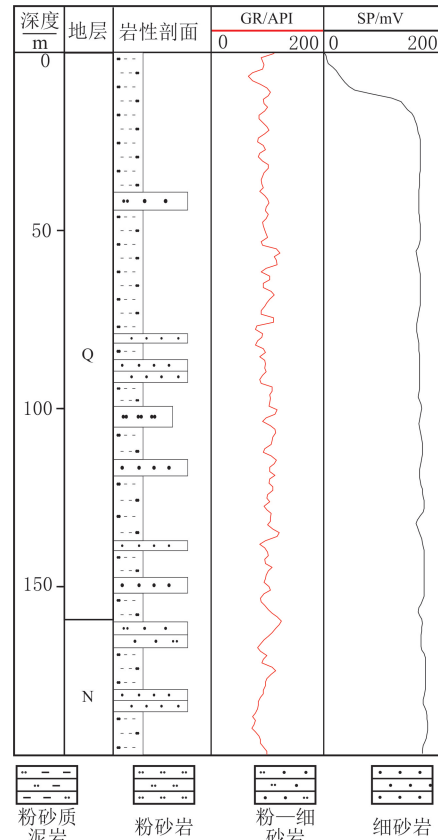


图 7 上蔡县 S1 井测井曲线  
Fig. 7 Log curve of S1 Well in Shangcai County

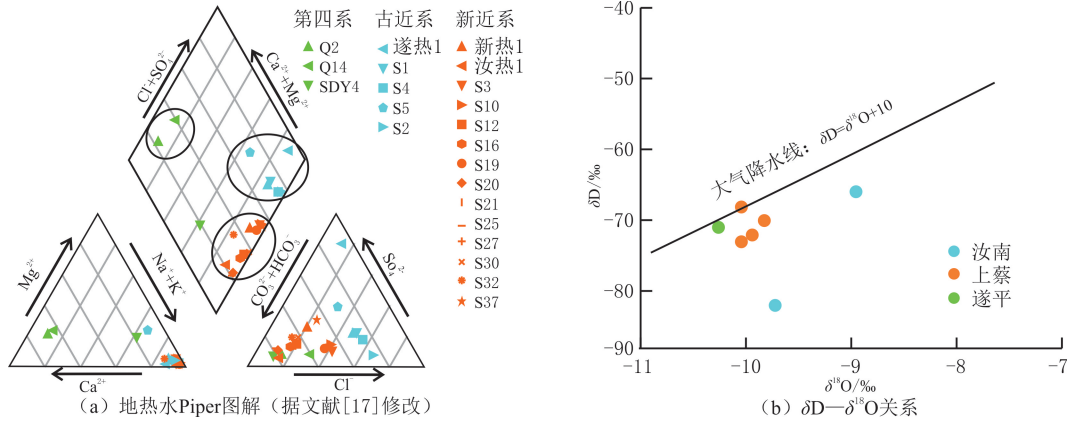


图 8 上蔡县热流体 Piper 三端元图解和  $\delta D-\delta^{18}O$  关系  
Fig. 8 Piper diagram and relationship between  $\delta D-\delta^{18}O$  of thermal fluid in Shangcai County

采用阳离子温标时,地热水的离子应处于平衡状态,利用 Na—K—Mg 三端元图解判断地热系统中的流体是否处于平衡状态。由 Na—K—Mg 三端元图解(见图 9(a))可以看出,地热水的水样离子未达到平衡状态,采用阳离子温标效果较差,采用石英温标和玉髓温标估算深部热储层温度,由  $SiO_2$  溶解度曲线法判断溶液中的  $SiO_2$  与玉髓温标关系密切。石英温标所得深部热储层温度在  $67\sim 91\text{ }^\circ\text{C}$  之间,由玉髓温标所得深部热储层温度在  $45\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$  之间。在温度低于  $180\text{ }^\circ\text{C}$  的情况下, $SiO_2$  溶解度易受玉髓温标控制,相比于石英温标,所得温度与实际井口温度更符合(见表 1),可以利用玉髓温标计算上蔡县地热水循环深度范围为  $1\ 000\sim 1\ 600\text{ m}$ ,与井身基本吻合。

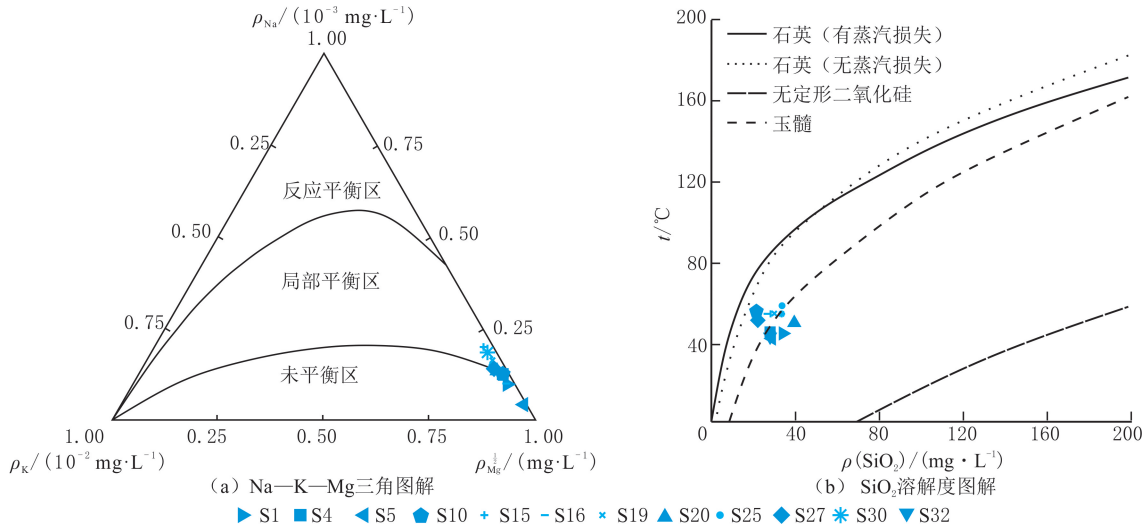


图 9 上蔡县地下水样品 Na—K—Mg 三端元图解和  $SiO_2$  溶解度图解

Fig. 9 Triangular diagram of Na-K-Mg and solubility diagram of  $SiO_2$  in groundwater samples from Shangcai County

### 2.4 通道条件

上蔡县断裂、不整合面和高渗储层共同构成地热水流动通道。研究区现今最大主应力方向为 NW 向<sup>[40]</sup>, $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  断层走向与其一致,断层处于开启状态,可以促进局部对流活动。S2 井位于任庄断层  $F_4$  附近,断层自生成后一直处于开启状态,古近系和新近系地下水形成局部对流,导致古近系 TDS 较低,为  $538\text{ mg/L}$ ,周边同等深度地热井 TDS 较高,一般为  $1\ 200\text{ mg/L}$ ,且井底温度为  $42\text{ }^\circ\text{C}$ ,略低于周边同等深度地热井井底温度。补给水源从不整合面渗入,部分大气降水流经地表,导致浅层地表水含  $Ca^{2+}$ 。流体以压力水头为动力,沿骨架砂体以径流的方式为地热田提供水量,不整合面和高渗储层也是流体运移的重要途径。

表 1 地热温标法热估算储层温度和循环深度

Table 1 Estimation of thermal storage temperature and circulation depth using geothermal temperature scale method

井名	石英温标/ °C	玉髓温标/ °C	实际水温/ °C	循环深度/ m	井名	石英温标/ °C	玉髓温标/ °C	实际水温/ °C	循环深度/ m
S1	84.77	53.72	43	1 601	S4	77.45	46.00	44	1 171
S5	77.30	45.85	41	1 147	S15	79.27	47.91	52	986
S16	75.56	44.01	52	944	S19	80.09	48.78	52	1 102
S20	91.28	60.63	49	1 519	S25	80.09	48.78	53	1 081
S30	84.39	53.32	52	1 205	S32	77.45	46.00	41	1 208

### 3 地热系统成因模式

根据“源(热源及水源)、储层、盖层、通道”地质要素和地热特征,建立上蔡县地热系统成因模式,上蔡县为典型的中—低温层状传导型地热系统(见图 10)。热源为深部地幔的热传导,大地热流和地温梯度受基底和断裂影响,高于周口坳陷平均值。遂平低山丘陵地带的大气降水作为补给源,沿裸露区不整合面渗入,顺渗透性高的岩层及地层不整合面,以径流的方式进行水平运移,运移过程中矿化度、<sup>18</sup>O、<sup>14</sup>C 同位素年龄逐渐升高。热量传递以传导方式为主,但断裂促进浅部地层水和深部地热水发生局部对流活动,TDS 降低。地热水循环深度在 1 000~1 600 m 之间,在循环过程中受深部地热水加热,热储层温度为 45~60 °C,流体在新近系、古近系和寒武系—奥陶系热储层中富集,上层分布广泛的第四系为区域盖层,为下部的热储层进行有效保护。

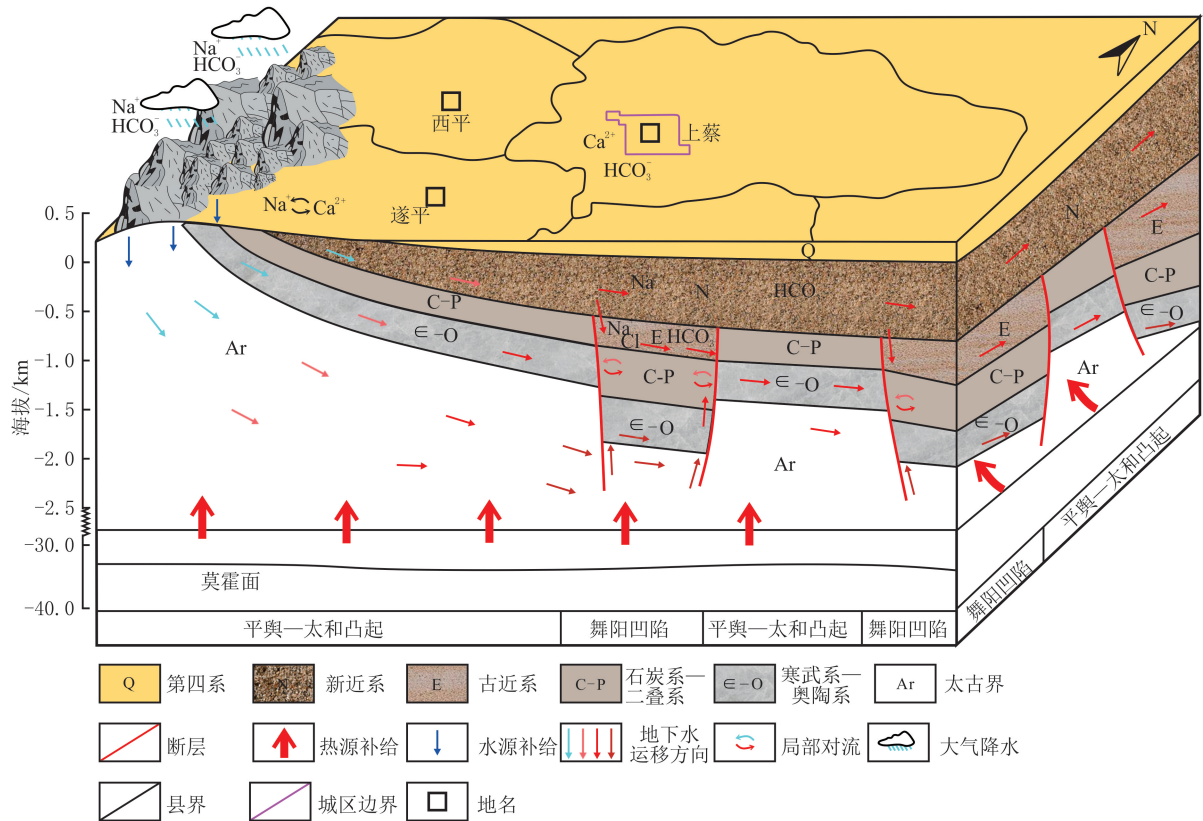


图 10 上蔡县地热系统成因模式  
Fig. 10 Geothermal genesis model map of Shangcai County

## 4 开发潜力

### 4.1 有利目标区

分析新近系、古近系砂岩热储层和寒武系—奥陶系碳酸盐岩热储层的分布、埋深、厚度、孔渗条件和富水性等资料,新近系砂岩热储层埋藏浅且砂体发育较好,连通性好,资源量大,是目前开发利用前景最好、风险最小的层系。考虑水温对地热开发利用的影响,将 900 m(热储层温度为 35 ℃)作为地热资源开采深度,地热开发有利靶区在上蔡县城区及城区北部(见图 11)。

古近系砂岩热储层受构造活动影响较大,部分地区热储层缺失,经历较为完整的湖盆构造—沉积演化,发育的河流—三角洲沉积为优质热储层奠定基础。综合埋深、厚度和温度等指标,若埋深在 1 500~2 000 m 之间,热储层温度大于 50 ℃,单层砂岩厚度大于 3 m 以上,可成为古近系砂岩热储层有利区块,地热开发有利区主要集中在城区(见图 11)。

寒武系—奥陶系碳酸盐岩顶面埋深达 1 500 m,其上被石炭系—二叠系覆盖,多期构造抬升导致岩溶发育,具备一定地热资源潜力。若寒武系—奥陶系碳酸盐岩热储层埋深在 1 500~2 000 m 之间,井口温度在 60 ℃ 以上,则可成为有利区块。综合三套热储层有利目标区,上蔡县城区为开发有利靶区(见图 11)。

### 4.2 地热资源量

研究区为典型的沉积盆地型地热系统,利用热储层体积法计算上蔡县地热资源量,计算参考 NB/T 10263—2019《地热储层评价方法》。根据上蔡县地热资源特征,确定有效热储层取值标准:有效孔隙度 >15%、渗透率 >30×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>、单砂岩层厚度 >3 m、不包括孤立砂体、热储温度 >35℃,满足取值标准设定为热储层。其他热储层物理参数:基准温度为 14 ℃;砂岩岩石密度为 2 600 kg/m<sup>3</sup>,岩石比热容为 878 J/(kg·℃),石灰岩岩石密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>,比热容为 920 J/(kg·℃);水密度为 1 000 kg/m<sup>3</sup>,比热容为 4 180 J/(kg·℃)。上蔡县地热资源三套热储层总静态资源量约为 3.77×10<sup>13</sup> kJ,折合标准煤为 1.29×10<sup>6</sup> t(1 t 标准煤可产出 29.30 GJ 的热量),水量为 6.42×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,按可采因数 15% 计算,可采资源量为 5.66×10<sup>12</sup> kJ,折合标准煤为 1.9×10<sup>5</sup> t(见表 2)。

表 2 上蔡县地热静态资源量

Table 2 Estimation parameters of geothermal static resources in Shangcai County

层位	热储层 平均厚度/m	面积/ km <sup>2</sup>	平均孔隙度/ %	平均埋深/ m	平均温度/ ℃	资源量/ 10 <sup>13</sup> J	水量/ 10 <sup>8</sup>
新近系	150	1 475.22	22	1 100	43	1.73	4.87
古近系	100	554.23	16	1 600	56	0.62	0.89
寒武系—奥陶系	100	830.60	8	2 500	80	1.44	0.67
合计						3.79	6.43

注:寒武系—奥陶系数据来源于邻区舞阳凹陷钻井数据<sup>[34]</sup>。

上蔡县地热资源开发利用时间短,绝大部分用于洗浴,利用模式较为单一。上蔡县三套热储层中,新近系热储层温度在 40 ℃ 以上,古近系热储层温度在 50 ℃ 以上,寒武系—奥陶系碳酸盐岩热储层井口温度在 60 ℃ 以上,可根据需求进行三层合采或单采。对于地热水,可先用于地热供暖,然后尾水再利用与温室种植等。若按照 100 a 开采,每个采暖季每平方米消耗 2.83×10<sup>-2</sup> t 标准煤,则可满足 6.71×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup> 的供

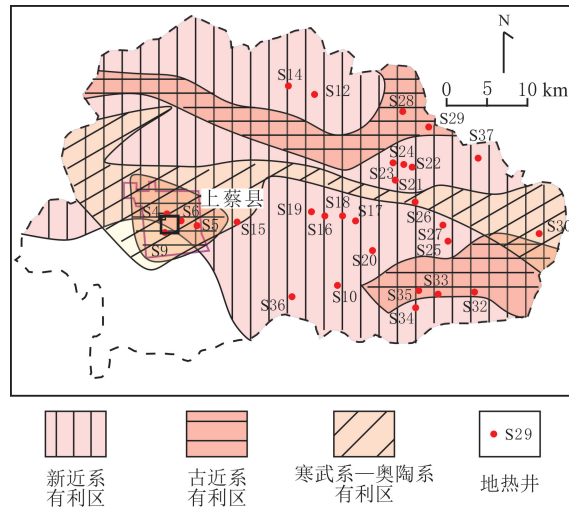


图 11 上蔡县地热有利目标区分布

Fig. 11 Distribution of prospective geothermal targets in Shangcai County

暖面积;其余 35 °C 的尾水进入温室大棚,如果开采流体总量不变,则可采资源量为  $5.63 \times 10^8$  GJ,按温室大棚热指标 150 W/m<sup>2</sup> 计算,每年可供  $1.19 \times 10^6$  m<sup>2</sup> 的大棚温室种植,可实现地热资源的梯级利用。

## 5 结论

(1)河南省上蔡县大地热流和地温梯度较高,受盆地基底和断裂影响较大,高于区域平均值,由南西向东北方向增大。热量主要以传导的形式传递,发育的断层也促进局部热对流活动。

(2)上蔡县新近系水质类型为 HCO<sub>3</sub>-Na,古近系为 HCO<sub>3</sub>·Cl-Na,地热系统成因模式热源为地幔热,遂平低山丘陵地带的大气降水作为补给源,沿不整合面下渗,在上蔡县新近系、古近系和寒武系—奥陶系三套热储层内富集,是典型的中—低温传导型地热系统。

(3)上蔡县地热系统发育新近系、古近系和寒武系—奥陶系三套热储层,热储层分布稳定,其中新近系是主要的富水层系,底界埋深介于 400~1 800 m,单井产水量为 40 m<sup>3</sup>/h,温度在 40 °C 以上。三套热储层地热资源总量为  $3.77 \times 10^{13}$  kJ,折合标准煤为  $1.29 \times 10^6$  t,可用于地热供暖、温室种植等,可采资源量满足  $67.1 \times 10^4$  m<sup>2</sup> 的供暖面积,开发有利靶区为上蔡县城区,开发潜力巨大。

## 参考文献(References):

- [1] 王贵玲,陆川.碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术进展[J].地质与资源,2022,31(3):412-425.  
WANG Guiling, LU Chuan. Progress of geothermal resources exploitation and utilization technology driven by carbon neutralization target[J]. Geology and Resources, 2022,31(3):412-425.
- [2] 庞忠和,黄少鹏,胡圣标,等.中国地热研究的进展与展望(1995~2014)[J].地质科学,2014,49(3):719-727.  
PANG Zhonghe, HUANG Shaopeng, HU Shengbiao, et al. Geothermal studies in China: progress and prospects(1995-2014)[J]. Chinese Journal of Geology, 2014,49(3):719-727.
- [3] 刘德民,张昌生,陆婉玲,等.汾渭地堑中、深层地热资源富集背景与形成机制[J].地学前缘,2025,32(1):367-379.  
LIU Demin, ZHANG Changsheng, LU Wanling, et al. Enrichment background and formation mechanism of middle and deep geothermal resources in Fenwei Graben[J]. Earth Science Frontiers, 2025,32(1):367-379.
- [4] 汪新伟,王婷灏,张瑄,等.太原盆地西温庄地热田的成因机制[J].地球科学,2019,44(3):1042-1056.  
WANG Xinwei, WANG Tinghao, ZHANG Xuan, et al. Genetic mechanism of Xiwenzhuang geothermal field in Taiyuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2019,44(3):1042-1056.
- [5] RYBACH L, MUFFLER L J P. 地热系统:原理和典型地热系统分析[M].佟伟,译.北京:地质出版社,1981:1-6.  
RYBACH L, MUFFLER L J P. Geothermal systems: Principles and case histories[M]. TONG Wei, trans. Beijing: Geology Press, 1981:1-6.
- [6] 刘常源,赵增新,亢品,等.砂岩热储层回灌条件对储层孔渗物性的影响[J/OL].特种油气藏,1-13[2025-01-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1357.TE.20241127.1352.002.html>.  
LIU Changyuan, ZHAO Zengxin, KANG Pin, et al. The influence of reinjection conditions on reservoir porosity and permeability properties in sandstone thermal reservoirs[J/OL]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1-13[2025-01-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1357.TE.20241127.1352.002.html>.
- [7] 何治亮,冯建赞,张英,等.试论中国地热单元分级分类评价体系[J].地学前缘,2017,24(3):168-179.  
HE Zhiliang, FENG Jianzan, ZHANG Ying, et al. A tentative discussion on an evaluation system of geothermal unit ranking and classification in China[J]. Earth Science Frontiers, 2017,24(3):168-179.
- [8] 王迪,汪新伟,毛翔,等.河北武城凸起地热田地热地质特征[J].地学前缘,2020,27(3):269-280.  
WANG Di, WANG Xinwei, MAO Xiang, et al. Characteristics of geothermal geology of the Wucheng Uplift Geothermal field[J]. Earth Science Frontiers, 2020,27(3):269-280.
- [9] 曹瑛倬,鲍志东,鲁锴,等.冀中拗陷雄县地热田主控因素及成因模式[J].沉积学报,2021,39(4):863-872.  
CAO Yingzhuo, BAO Zhidong, LU Kai, et al. Genetic model and main controlling factors of the Xiongan geothermal field[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021,39(4):863-872.
- [10] 张英,冯建赞,何治亮,等.地热系统类型划分与主控因素分析[J].地学前缘,2017,24(3):190-198.  
ZHANG Ying, FENG Jianzan, HE Zhiliang, et al. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. Earth Science Frontiers, 2017,24(3):190-198.
- [11] 周总瑛,刘世良,刘金侠.中国地热资源特点与发展对策[J].自然资源学报,2015,30(7):1210-1221.

- ZHOU Zongying, LIU Shiliang, LIU Jinxia. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015,30(7):1210-1221.
- [12] JAUPART C, LABROSSE S, LUCAZEAU F, et al. Temperatures, heat, and energy in the mantle of the Earth[J]. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 2015,7:223-270.
- [13] 王贵玲, 蒯文静. 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*, 2020,94(7):1923-1937.  
WANG Guiling, LIN Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7):1923-1937.
- [14] 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 Chengcheng, 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.
- [15] 白博文. 上蔡县地热资源成因分析及数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021:33-50.  
BAI Bowen. Genesis and numerical simulation of geothermal resources in Shangcai County[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021:33-50.
- [16] 张天增, 刘运涛, 赵海军, 等. 驻马店市地热流体年龄研究[J]. *西部资源*, 2013(3):155-158.  
ZHANG Tianzeng, LIU Yuntao, ZHAO Haijun, et al. A study on the geothermal fluid age of Zhumadian City[J]. *Western Resources*, 2013(3):155-158.
- [17] 赵鹏飞, 严永新, 杨香华, 等. 舞阳凹陷始新统桃园组物源示踪与砂体展布模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012,32(3):37-44.  
ZHAO Pengfei, YAN Yongxin, YANG Xianghua, et al. Provenance and distribution pattern of the sandbody of Eocene Hetaoyuan Formation in Wuyang Depression[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012,32(3):37-44.
- [18] 黄光寿, 郭丽丽, 黄凯. 河南省沉积盆地五大构造单元地热地质特征[J]. *地质与资源*, 2020,29(2):172-179.  
HUANG Guangshou, GUO Lili, HUANG Kai. Geothermal geological characteristics of five tectonic units in the sedimentary basins of Henan Province[J]. *Geology and Resources*, 2020,29(2):172-179.
- [19] 何争光. 周口坳陷古生界热演化史分析及其油气地质意义[D]. 西安: 西北大学, 2009:10-12.  
HE Zhengguang. The research of Palaeozoic thermal history and its oil-gas geological significance in Zhoukou Depression[D]. Xi'an: Northwest University, 2009:10-12.
- [20] 李杰, 张志强, 付越, 等. 不同热导率下 MIL-101(Cr) 储氢过程的数值模拟研究[J]. *石油化工高等学校学报*, 2023,36(3):31-36.  
LI Jie, ZHANG Zhiqiang, FU Yue, et al. Numerical simulation of hydrogen storage process in MIL-101(Cr) with different thermal conductivity[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2023,36(3):31-36.
- [21] 于喜洹, 崔锡彪, 陆胜, 等. 早侏罗世粗中粒黑云母二长花岗岩岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学特征及成因: 以大兴安岭北段潮满林场地区为例[J]. *东北石油大学学报*, 2024,48(2):27-41.  
YU Xihuan, CUI Xibiao, LU Sheng, et al. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and genetic mechanism of the Early Jurassic coarse to medium grained biotite monzogranite: a case study of the Chaoman Forest Farm area in the Northern Great Xing'an Range[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(2):27-41.
- [22] 王定一, 刘池洋, 张国伟, 等. 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, et al. Structural feature and hydrocarbon potential of Zhoukou Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 1991,12(1):10-21.
- [23] 罗官辛, 潘虹, 李世宏, 等. 准噶尔盆地北三台凸起南斜坡石炭系火山岩储层特征及成藏模式[J]. *东北石油大学学报*, 2024,48(5):27-47.  
LUO Guanxing, PAN Hong, LI Shihong, et al. Reservoir characteristic sand reservoir forming model of Carboniferous volcanic rocks on the southern slope of Beisantai Uplift, Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(5):27-47.
- [24] 佟子达, 张静, 周振菊, 等. 河南舞阳凹陷底部火山岩的发现及其锆石年代学和 Hf 同位素地球化学研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2016,40(3):574-586.  
TONG Zida, ZHANG Jing, ZHOU Zhenju, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotope compositions of the volcanic rocks from the bottom of the Wuyang Sag, Henan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016,40(3):574-586.
- [25] 刘超, 付晓飞, 李扬成, 等. 烃源岩作为铀源岩的可能性: 研究现状与展望[J]. *地学前缘*, 2024,31(2):284-298.  
LIU Chao, FU Xiaofei, LI Yangcheng, et al. Can hydrocarbon source rock be uranium source rock: a review and prospectives[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024,31(2):284-298.
- [26] 邬雪雁, 李进先. 河南省地壳结构和深断裂简述[J]. *河南地质*, 1995,13(2):126-131.  
WU Xueyan, LI Jinxian. Discussing on crustal structure and deep faults of Henan Province[J]. *Resources Guide*, 1995,13(2):126-131.
- [27] 朱士波. 济阳坳陷热液流体活动特征及其油气地质意义[J]. *非常规油气*, 2024,11(2):21-28.

- ZHU Shibo. Characteristics of hydrothermal fluid activity and its petroleum geological significance in Jiyang Depression[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024,11(2):21-28.
- [28] 汪新伟,高楠安,王婷灏,等.河北献县地热田地热异常的分布特征及成因机制[J].*地质学报*,2022,96(7):2611-2625.  
WANG Xinwei, GAO Nanan, WANG Tinghao, et al. Distribution characteristics and genetic mechanism of the geothermal abnormality in the Xianxian geothermal field, Hebei Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022,96(7):2611-2625.
- [29] 江晓雪,朱传庆.复杂热传递作用下冀中坳陷深、浅部地热资源差异分布[J/OL].*地球科学*,1-19[2024-07-18].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240408.1659.025.html>.  
JIANG Xiaoxue, ZHU Chuangqing. Different distribution of deep and shallow geothermal resources in Jizhong Depression under complex heat transfer[J/OL]. *Earth Science*, 1-19[2024-07-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240408.1659.025.html>.
- [30] 王迪,国殿斌,汪新伟,等.河南清丰地区岩溶热储地热地质特征[J].*东北石油大学学报*,2020,44(1):32-43.  
WANG Di, GUO Dianbin, WANG Xinwei, et al. Characteristics of geothermal geology of karst geothermal reservoir in Qingfeng Area, Henan[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020,44(1):32-43.
- [31] 姜光政,高翔,饶松,等.中国大陆地区大地热流数据汇编:第四版[J].*地球物理学报*,2016,59(8):2892-2910.  
JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China: 4th edition[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016,59(8):2892-2910.
- [32] 杨义栋,刘彦兵,赵盼,等.周口凹陷区地温场特征及影响因素分析[J].*中国矿业*,2021,30(3):231-236.  
YANG Yidong, LIU Yanbing, ZHAO Pan, et al. Analysis of geothermal field characteristics and influencing factors in Zhoukou Depression area[J]. *China Mining Magazine*, 2021,30(3):231-236.
- [33] 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].*地学前缘*,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 Science Frontiers*, 1995,2(3/4):248-251.
- [34] 张英杰,王龙.显生宙一级层序的银河年旋回响应:重要的进展与争论[J].*地球科学进展*,2020,35(3):275-285.  
ZHANG Yingjie, WANG Long. Response of first-order sequence to the galactic year cycle in the Phanerozoic: an important progress and topic[J]. *Advances in Earth Science*, 2020,35(3):275-285.
- [35] 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.
- [36] 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*,2023,30(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*, 2023,30(9):184-186.
- [37] 田禹.鲁东地热区氢氧同位素特征及地热水补给来源[J].*地质科技情报*,2015,34(6):182-185.  
TIAN Yu. Features of hydrogen and oxygen isotopes and the make-up source for geothermal water in East Shandong geothermal area[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015,34(6):182-185.
- [38] 赵晨旭,李忠诚,郭世超,等.松辽盆地南部长岭断陷青一段陆相页岩地球化学和沉积环境特征[J].*特种油气藏*,2023,30(6):55-61.  
ZHAO Chenxu, LI Zhongcheng, GUO Shichao, et al. Characteristics of geochemistry and depositional environment of terrestrial shales in the first member of Qingshankou Formation of Changling Fault Depression in the Southern Songliao Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023,30(6):55-61.
- [39] 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 Chuangqing, QIU Nansheng, et al. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in the Xiongan Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020,94(7):2026-2035.
- [40] 黄禄渊,杨树新,崔效锋,等.华北地区实测应力特征与断层稳定性分析[J].*岩土力学*,2013,34(增刊1):204-213.  
HUANG Luyuan, YANG Shuxin, CUI Xiaofeng, et al. Analysis of characteristics of measured stress and stability of faults in North China[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013,34(Supp.1):204-213.