文章编号：1004-4051(2024)S1-0484-08 DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240968

河南省濮阳市中深层地热地质特征、资源储量及开发利用适宜性评价

李亚辉[1,2]，宋仲科[2,3]，张艳林[4,5]，郑 琳[4,5]，徐 影[2,3]

（1. 河南省地质研究院，河南 郑州 450016；
2. 河南省能源钻井工程技术研究中心，河南 郑州 450016；
3. 河南豫中地质勘查工程有限公司，河南 郑州 450016；
4. 河南省地质局生态环境地质服务中心，河南 郑州 450000；
5. 河南省地热能开发工程技术研究中心，河南 郑州 450000）

摘 要：濮阳市中深层地热资源丰富，但地热资源综合利用程度和综合经济效益有待进一步提升。通过收集和分析濮阳市已有 76 个中深层地热孔钻探资料和近年的勘查研究成果，对研究区地层分布、地质构造、水文地质条件、热储特征等进行分析，采用体积法对研究区中深层地热资源进行定量计算，并开展地热资源开发利用有利区评价。研究结果表明，濮阳市适宜开发利用的热储层主要是馆陶组砂岩热储层、奥陶系灰岩热储层，赋存其中的地热资源丰富，其中，馆陶组热储层地热资源总量为 8.67×10^{10} GJ、可采资源量为 2.17×10^{10} GJ，奥陶系热储层地热资源总量为 9.68×10^{10} GJ、可采资源量为 1.45×10^{10} GJ。研究评价结果为进一步摸清濮阳市中深层地热资源家底、科学编制地热资源开发利用规划、推动地热资源高效开发利用提供了一定的理论依据。

关键词：濮阳市；中深层地热；地质特征；资源量；有利区评价
中图分类号：TD989; P314 **文献标识码：**A

Geological characteristics, resource reserves, and suitability evaluation for development and utilization of geothermal resources in the middle and deep layers of Puyang City, Henan Province

LI Yahui[1,2]，SONG Zhongke[2,3]，ZHANG Yanlin[4,5]，ZHENG Lin[4,5]，XU Ying[2,3]

（1. *Henan Academy of Geology*，*Zhengzhou* 450016，*China*；
2. *Henan Engineering Technology Research Center of Energy Drilling*，*Zhengzhou* 450016，*China*；
3. *Henan Yuzhong Geological Exploration Engineering Co.*，*Ltd.*，*Zhengzhou* 450016，*China*；
4. *Ecological Environment Geo-Service Center of Henan Geological Bureau*，*Zhengzhou* 450000，*China*；
5. *Henan Geothermal Energy Development Engineering Research Center*，*Zhengzhou* 450000，*China*）

收稿日期：2024-05-25 **责任编辑：**聂虹
基金项目：河南省自然资源厅科技攻关项目资助（编号：2021-1）
第一作者简介：李亚辉（1988—），男，汉族，河南商丘人，硕士，工程师，主要从事地质矿产勘查、水工环地质、新能源开发利用等方面的研究工作，E-mail: 13643868830@163.com。
通讯作者简介：宋仲科（1979—），男，汉族，河南濮阳人，高级工程师，主要从事煤层气、地热能等清洁能源开发方面的工作，E-mail: 715777782@qq.com。
引用格式：李亚辉，宋仲科，张艳林，等. 河南省濮阳市中深层地热地质特征、资源储量及开发利用适宜性评价[J]. 中国矿业，2024，33(S1)：484-491.
LI Yahui, SONG Zhongke, ZHANG Yanlin, et al. Geological characteristics, resource reserves, and suitability evaluation for development and utilization of geothermal resources in the middle and deep layers of Puyang City, Henan Province[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S1): 484-491.

Abstract：Puyang City has abundant geothermal resources in the middle and deep layers, but the comprehensive utilization and economic benefits of geothermal resources need to be further improved. By collecting and analyzing drilling data from 76 middle and deep geothermal holes and recent exploration and research achievements in Puyang City, the geological distribution, geological structure, hydrogeological conditions, and thermal storage characteristics of the study area are analyzed. The volume method is used to quantitatively calculate the mid to deep geothermal resources in the study area, and an evaluation of favorable areas for geothermal resource development and utilization is carried out. The results show that the suitable thermal reservoirs for development and utilization in Puyang City are mainly the sandstone thermal reservoirs of the Guantao Formation and the Ordovician limestone thermal reservoirs, which contain abundant geothermal resources. Among them, the total geothermal resources of the Guantao Formation thermal storage are 8.67×10^{10} GJ and the recoverable resources quantity is 2.17×10^{10} GJ, and the total geothermal resources of the Ordovician thermal storage are 9.68×10^{10} GJ and the recoverable resources quantity is 1.45×10^{10} GJ. The research evaluation results provide a certain theoretical basis for further understanding the background of deep geothermal resources in Puyang City, scientifically formulating geothermal resource development and utilization plans, and promoting efficient development and utilization of geothermal resources.

Keywords：Puyang City；middle and deep geothermal energy；geological characteristics；resource quantity；optimal selection of advantageous area

0　引　言

地热资源具有储量大、分布广、稳定可靠、利用效率高、节能环保等优点，是实现碳达峰、碳中和目标不可或缺的能源[1-3]。根据赋存特征、埋藏深度和温度条件的不同，分为浅层地热（200 m 以浅）、中深层地热（200～300 m）、深层地热（3 000 m 以下）[4-5]。我国地热资源储量丰富，约占全球地热资源的六分之一，根据估算，我国中低温地热资源量折合标准煤 1.23×10^{12} t，每年地热资源可采量折合标准煤 18.5×10^{8} t[6-7]。河南省中深层地热资源蕴藏丰富、分布面积广，主要分隆起山地对流型和沉积盆地传导型两大类型，多以地热水的形式被开发利用，在供暖、洗浴、生态种养殖等方面被广泛应用[8]。位于河南省东北部的濮阳市，地热资源丰富，是较早开发利用中深层地热资源的地区之一，但地热资源总量掌握不清，开发利用模式较为粗放，地热资源综合利用程度和综合经济效益有待进一步提升。本次研究将整个濮阳市作为研究区，以研究区 76 个中深层地热孔的钻探成果和勘查研究成果为支撑，通过认真整理和分析研究区地质资料，对研究区地层分布、地质构造、水文地质条件、热储特征等进行研究总结，采用体积法定量估算出研究区地热资源总量，开展了开发利用适宜性评价，不仅摸清了濮阳市中深层地热资源家底，还可以为濮阳市科学编制地热资源开发利用规划、推动地热资源高效开发利用提供一定的理论依据。

1　区域地质背景

1.1　地层分布

研究区位于中朝准地台华北坳陷南部，基底由太古界泰山群花岗、片麻岩组成[9]。地层由老到新主要有古生界寒武系∈（白云质灰岩、灰岩等）、奥陶系 O（致密灰岩、泥灰岩等）、石炭系 C（铝土页岩、砂质页岩、泥质页岩、砂岩等）、二叠系 P（泥岩、砂质泥岩、砂岩等），中生界三叠系 T（石英砂岩、长石砂岩、砂质泥岩、泥灰岩等）、侏罗系 J（砂岩、钙质泥岩、长石石英砂岩等）、白垩系 K（泥质粉砂岩、安山玢岩、玄武安山岩、火山角砾岩等），新生界古近系 E（砂岩等）、新近系馆陶组 N_1g（砾岩、砂砾岩、细砂岩、粉砂岩等）、明化镇组 N_2m（粉砂岩、黏土岩等），第四系 Q 松散堆积物。其中，区域内古生界、新生界沉积层与热储关系密切。

1.2　地质构造

研究区构造上横跨内黄凸（隆）起、东濮凹陷、菏泽凸起、临清凹陷四个构造单元（图 1），其中，濮阳市区及濮阳县西部属内黄隆起，东部属东濮凹陷，南乐县、清丰县位于内黄隆起东北部，范县位于东濮凹陷及菏泽凸起的结合部位，台前县处于菏泽凸起。本区有影响的构造均为隐伏构造，以断裂为主，主要分为深大断裂和局部断裂两种类型，其中，深大断裂主要有磁县-大名断裂、安阳-清丰断裂、长垣断裂、聊兰断裂，控制着内黄隆起、东濮凹陷、菏泽凸起构造单元划分；各构造单元内局部断裂也十分发育，内黄隆起内发育有南乐-龙王庙断裂和张果屯-孟轲集断裂，东濮凹陷内发育有黄河断裂等。

1.3　水文地质条件

研究区地下含水层主要有六套，分别为第四系浅层孔隙含水层系统、第四系深层孔隙含水层系统、

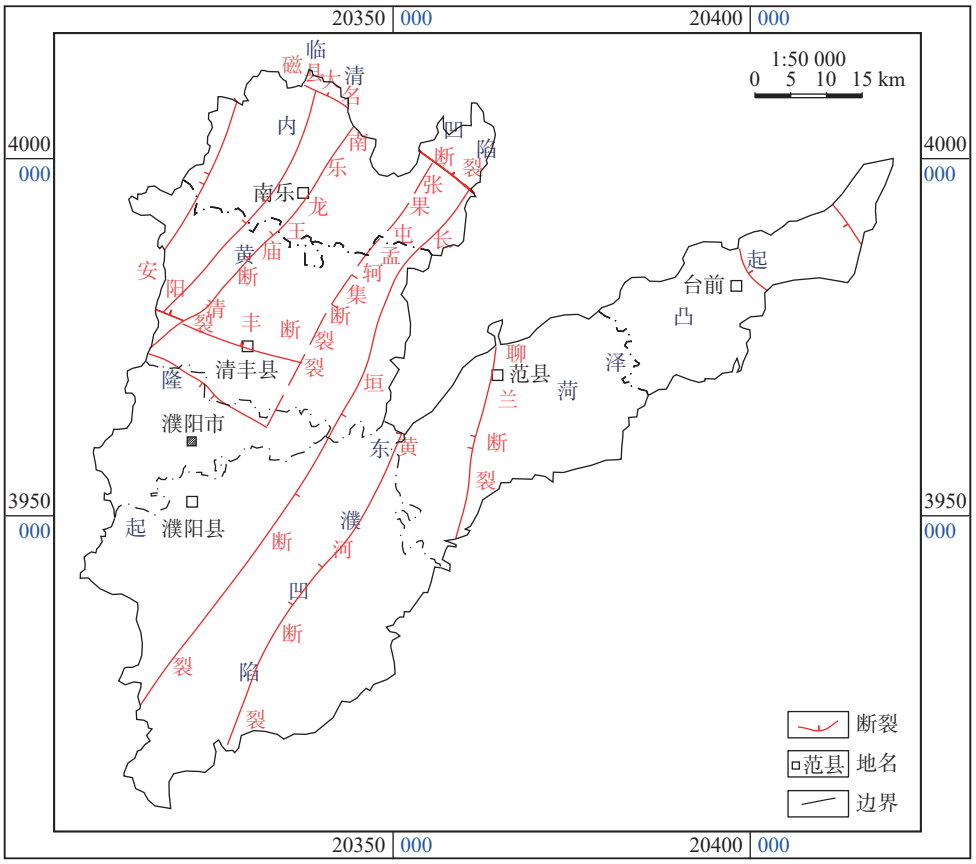


图 1 研究区地质构造

Fig. 1 Geological structure of the research area

新近系明化镇组砂岩孔隙裂隙含水层系统、新近系馆陶组砂岩孔隙裂隙含水层系统、古近系东营组砂岩孔隙裂隙含水层系统和奥陶系灰岩缝洞含水层系统。目前，研究区中深层地热资源开发利用的主要是新近系馆陶组砂岩孔隙裂隙含水层系统、奥陶系灰岩缝洞含水层系统，其中，馆陶组含水层层数 10～40 层，厚度 150～400 m，补给主要为侧向径流补给；奥陶系含水层深度变化较大，内黄隆起、菏泽凸起等构造凸起区热储埋藏深度适中，东濮凹陷热储埋藏深度偏大，储层岩溶裂隙发育，地热水的补给来源有所差异，菏泽凸起区奥陶系地热水来源主要为鲁中山区自东南向西北径流，内黄隆起的岩溶地热水主要来自太行山区自西向东的径流补给。

2 地热热储特征

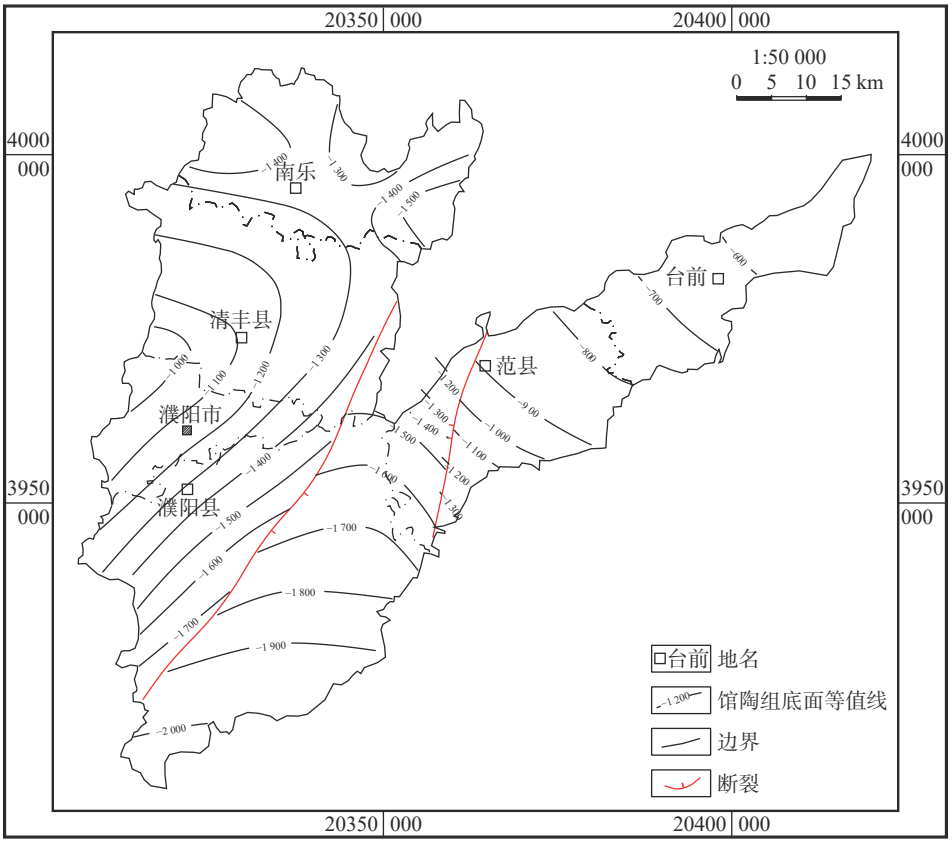
2.1 热储层特征

研究区中深层地热热储类型主要为层状兼带状热储。根据研究区热储结构认识、区域构造和地层沉积特征，馆陶组热储顶面埋深差别不大，在 1 000 m 左右，新近系馆陶组底面、奥陶系顶面构造如图 2 所示。由图 2 可知，馆陶组热储底面埋深受构造控制明显，其中，清丰-濮阳-南乐以西，内黄隆起核部埋深 1 000 m 左右，聊兰断裂以东埋藏 1 200 m 左右，呈现凹陷中心向斜坡带逐步变浅的趋势。奥陶系热储埋藏深度变化范围较大，顶面埋深 800～7 000 m，内黄凸起、菏泽凸起热储顶面埋藏深度一般在2 000 m 以浅，清丰县西部埋藏最浅，濮阳市南部与开封市交界处埋藏最深，总体规律是越靠近隆起、凸起核部埋藏越浅，越靠近凹陷中心越深。

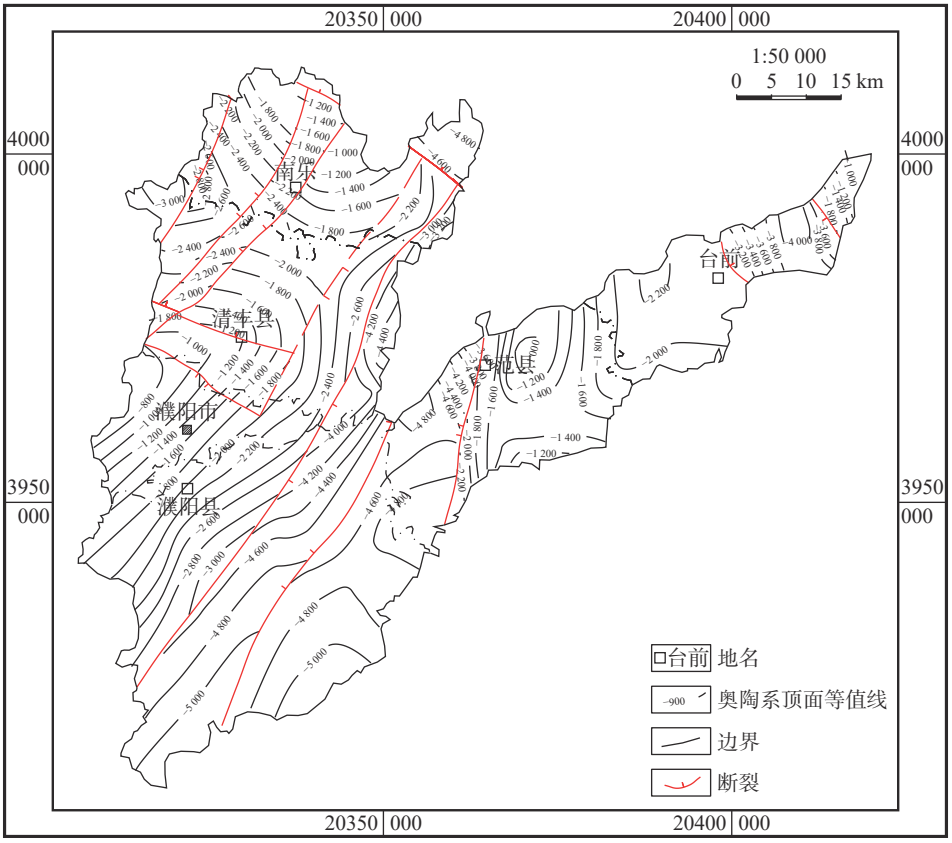
2.2 热储温度特征

研究区馆陶组热储层主要是由中、细砂岩组成，现有地热井开采层 775～945 m 以下至 1 300～1 450 m；奥陶系热储层主要由奥陶系中统马家沟组灰岩、白云质灰岩组成，现有地热井开采层为 1 200～2 458 m。根据区内钻孔测温和恒温带地温资料计算结果，见表 1，馆陶组热储层、奥陶系热储层的地温梯度分别为 3.14 ℃/100 m、2.67 ℃/100 m。纵向上看，地温梯度受地层岩性影响较大，奥陶系热储的增温率低于新近系砂岩的增温率；平面上看，地温梯度变化与地热井所处构造位置关系密切，靠近深大断裂-聊兰断裂区域的范县地热井地温梯度普遍偏高。

根据研究区热储埋深、地温梯度，对研究区新近系馆陶组热储温度和奥陶系顶部热储温度进行分析。



（a）馆陶组热储底面等值线



（b）奥陶系热储顶面等值线

图 2　研究区馆陶组热储底面、奥陶系热储顶面构造

Fig. 2　Structure of the bottom surface of the Guantao Formation and the top surface of the Ordovician thermal

表 1 研究区馆陶组热储层和奥陶系热储层地温梯度

Table 1 Geothermal gradient of the Guantao Formation and the Ordovician thermal reservoir in the research area

热储层	序号	井位	井深/m	钻孔取水段顶板埋深/m	钻孔取水段底板埋深/m	水温/℃	地温梯度/(℃/100 m)
馆陶组热储	PC05	濮阳市区	1 104.24	865.20	1 008.4	45.8	3.19
	PC06		1 007.43	847.30	1 007.24	44.0	3.02
	PZ01		1 201.00	901.90	1 179.00	48.5	3.14
	DZ01		1 260.00	957.00	1 260.00	48.0	2.96
	NLH01	南乐县	1 427.00	985.12	1.425.00	50.0	2.88
	LX01	范县	1 600.00	1 160.00	1.420.00	58.0	3.62
	PC09	濮阳县	1 007.50	812.20	1 003.00	44.0	3.09
	PW01		2 030.00	1 234.00	1 467.00	58.0	3.13
	WTCO1		1 537.00	1 100.00	1 425.00	56.0	3.23
				平均值			3.14
奥陶系热储	XB01	清丰县	1 824.00	1 334.00	1 824.00	55.5	2.48
	XS01		1 818.00	1 457.00	1 818.00	60.0	2.67
	TYL01		1 820.00	1 334.76	1 820.00	53.0	2.43
	JY02(移)		1 801.00	1 227.00	1 801.00	58.0	2.17
	FQD05	南乐县	2 005.00	1 523.00	2 005.00	65.0	2.82
	NLTC02		2 281.00	1 766.00	2 281.00	68.0	2.79
	WCYTC01		2 158.00	1 601.00	2 158.00	63.0	2.48
	LD02	范县	1 708.00	1 240.00	1 708.00	63.0	3.18
	FD03		1 635.00	1 080.00	1 635.00	60.0	3.02
	FDXZ01		2 485.00	1 977.00	2 485.00	70.0	3.15
				平均值			2.67

其中，新近系馆陶组热储底面温度 45～70 ℃，濮阳主城区至清丰一线热储温度 45 ℃ 左右，南乐县热储温度 50 ℃ 左右，范县、台前区域热储温度 40～45 ℃。奥陶系岩溶热储顶面温度跨度较大，主要受埋藏深度的影响，濮阳-清丰主城区因所处构造位置、热储埋藏深度相当，热储顶面温度 50～60 ℃；濮阳县东濮凹陷区域温度大于 70 ℃；南乐县热储温度 60～70 ℃；范县聊兰断裂以西，热储温度大于 120 ℃；聊兰断裂以东范县区域热储温度 60～70 ℃；台前区域热储顶面温度 60～90 ℃。

2.3 地热流体特征

根据研究区收集到的已有钻孔水质分析资料，新生界砂岩热储层地热流体水化学类型为 SO_4•Cl-Na，pH 值为 7.9，属弱碱性水；矿化度为 2 274.68 mg/L 左右，属微咸水；总硬度（以 $CaCO_3$ 计）为 353.5 mg/L，属硬水；总溶解性固体一般在 2 357.97 mg/L 左右，H_2SiO_3 含量一般在 31 mg/L 左右；矿化度、总溶解度大小随深度的增加呈明显的变化，在 2 000 m 左右矿化度达 6 000 mg/L，水化学类型基本保持不变。古生界碳酸盐岩热储层地热流体水化学类型主要为 SO_4•Cl-Ca•Na、SO_4•Cl-Na•Ca 型，pH 一般 7.1～7.6，属弱碱性水；总硬度（以 $CaCO_3$ 计）在 1 108～1 594 mg/L 之间，属特硬水；矿化度一般在 2 714.82～3 560.00 mg/L，属咸水；H_2SiO_3 含量一般在 32.5～46.3 mg/L 之间。研究区地热流体水化学成分见表 2，奥陶系岩溶地热水与新近系馆陶组砂岩地热水主要阴阳离子含量表现出一定的差异性，新近系馆陶组地热水 Na^+离子含量明显高于奥陶系岩溶热储，K^+离子和 Mg^+离子含量相对低。

3 地热资源储量估算

3.1 参数确定

研究区馆陶组热储及奥陶系热储全区均有分布，热储面积按照研究区的面积进行计算，合计为 4 272.7 km^2。结合收集到的现有钻孔资料、物探资料和岩石物性测试结果，以及地层划分及各热储层段特征的平均值，确定研究区内热储层主要物性参数，其中，馆陶组热储的岩石密度为 2 600 kg/m^3、地热流体密度为 1 000 kg/m^3、岩石比热容为 878 J/kg·℃、水比热容为 4 180 J/kg·℃、热储平均温度为 55 ℃、有效厚度为 200 m、孔隙度为 25%，奥陶系热储的岩石密度为 2 700 kg/m^3、地热流体密度为 1 000 kg/m^3、岩石比热容为 920 J/kg·℃、水比热容为 4 180 J/kg·℃、热储平均温度为 50 ℃、有效厚度为 150 m、孔隙度为 7%。根据收集到的浅层地热井测温数据，研究区恒温层温度为 13.5 ℃。

3.2 资源量计算

表 2　研究区地热流体水化学成分统计

Table 2　Statistical analysis of hydrochemical composition of geothermal fluids in the research area

项目	新生界砂岩热储	古生界碳酸盐岩热储	项目	新生界砂岩热储	古生界碳酸盐岩热储
	范围值	范围值		范围值	范围值
pH 值	7.9	7.1～7.6	CO_3^{2-}	0	0
总硬度	353.5 mg/L	1 108～1 594 mg/L	HCO_3^-	166.58 mg/L	129.00～279.78 mg/L
溶解总固体	2 357.97 mg/L	2 714.82～3 560 mg/L	F^-	0.84 mg/L	2.52～3.50 mg/L
K^+	7.84 mg/L	2.88～51.44 mg/L	Sr	3.53 mg/L	8.0～14.4 mg/L
Na^+	621.96 mg/L	287.00～423.24 mg/L	Li	0.22 mg/L	0.62～1.42 mg/L
Ca^{2+}	101.9 mg/L	332.36～486.00 mg/L	As	<0.000 1 mg/L	<0.000 2～0.008 mg/L
Mg^{2+}	24.2 mg/L	34.4～139.0 mg/L	Hg	<0.000 1 mg/L	<0.000 05～<0.000 1 mg/L
Cl^-	460.85 mg/L	518.28～592.00 mg/L	H_2SiO_3	31.2 mg/L	32.5～46.3 mg/L
SO_4^{2-}	948.11 mg/L	1 051.86～1 248.4 mg/L	Fe	0.04 mg/L	0.29～1.42 mg/L

研究区的地热资源量计算采用热储体积法，计算公式见式(1)。

$$Q=\bar{C}\cdot A\cdot H(T_r-T_j) \tag{1}$$

式中：Q 为热储中储存的热量总量，J；A 为研究区热储面积，m²；H 为热储厚度，m；T_r 为热储平均温度，℃；T_j 为恒温层温度，℃；$\bar{C}$为热储岩石和水的平均比热容，J/m³·℃。

研究区热储岩石和水的平均比热容$\bar{C}$的计算公式见式(2)。

$$\bar{C}=\rho_c\bar{C}_c(1-\varphi)+\rho_w\cdot\bar{C}_w\cdot\varphi \tag{2}$$

式中：ρ_c、ρ_w 分别为岩石和水的密度，kg/m³；C_c、C_w 分别为岩石和水的比热容，J/kg·℃；φ 为岩石孔隙度。

研究区地热资源可采量的计算公式见式(3)。

$$Q_{WH}=R_E\cdot Q \tag{3}$$

式中：Q_{WH} 为地热资源可采量，即可回收的地热资源量(从井口得到的热)，J；R_E 为热储回收率，根据《地热资源评价方法及估算规程》(DZ/T 0331—2020)中 B.2.3 条中推荐参数，研究区内馆陶组热储回收率取 25%、奥陶系热储回收率取 15%。

根据上述确定的参数，利用式(1)～式(3)可以计算得出，研究区内馆陶组热储地热资源总量为 8.67×10^{10} GJ，折合标准煤 2.96×10^9 t，可采资源量为 2.17×10^{10} GJ，折合标准煤 7.40×10^8 t；奥陶系热储地热资源总量为 9.68×10^{10} GJ，折合标准煤 3.30×10^9 t，可采资源量为 1.45×10^{10} GJ，折合标准煤 4.95×10^8 t，开发利用前景广阔。

4　适宜性评价

研究区主要地处内黄隆起-东濮凹陷-菏泽凸起三大构造单元内，还有局部地区处于临清凹陷。其中，内黄隆起区主要包括濮阳市区、濮阳县、清丰县和南乐县大部分地区，区内奥陶系碳酸盐岩地层溶蚀发育、水量充沛，可开发利用价值较高；菏泽凸起区主要包括范县东段和台前县，区内奥陶系在该区域溶蚀孔洞发育、富水性强，为主要利用热储层；东濮凹陷区主要包括范县县城西部、文留镇、濮城镇等区域，临清凹陷主要包括南乐县北部局部地区，区内奥陶系岩溶热储埋藏深度多超过 4 000 m，且富水性差，馆陶组砂岩热储水量丰富。结合研究区所处地热地质条件和已开展的地热工作成果，将研究区划分为四大地热资源分区和 10 个次级分区见表 3、

表 3　研究区地热资源分区

Table 3　Geothermal resource zoning in the research area

地热区带	单元名	次级分区	地理区域	开发最有利热储利用类型
内黄隆起地热区	I	I-1	南乐县西段及清丰县西段	新近系砂岩热储
		I-2	南乐县县城及清丰县县城	古生界岩溶热储
		I-3	南乐县东段及清丰县东段	新近系、古生界两套热储
		I-4	清丰县南段、濮阳市区及濮阳县	新近系砂岩热储
菏泽凸起地热区	II	II-1	范县东段	古生界岩溶热储
		II-2	台前西段	新近系、古生界两套热储
		II-3	台前东段	新近系、古生界两套热储
东濮凹陷地热区	III	III	范县西段及濮阳市局部乡镇	新近系砂岩热储
临清凹陷地热区	IV	IV-1	南乐县北局部地区	新近系砂岩热储

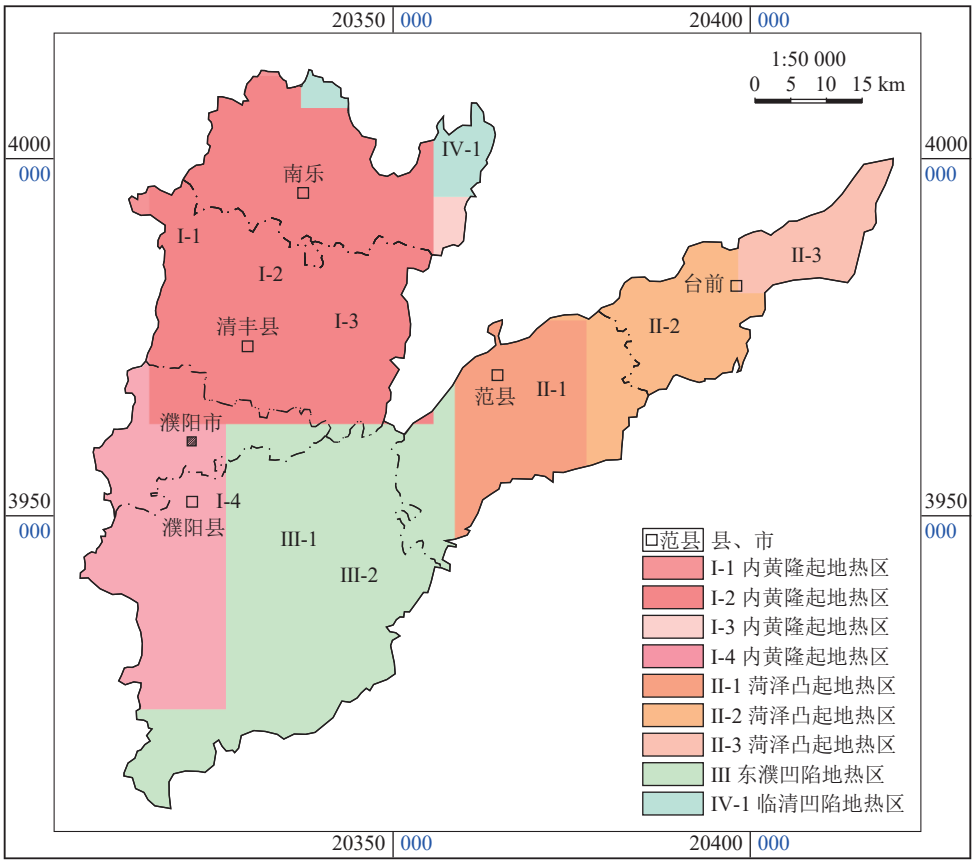


图 3 研究区地热资源分区

Fig. 3 Geothermal resource zoning in the research area

图 3。结合上述认识，认为研究区内凸起区热储顶面埋深 2 000 m 以浅的奥陶系岩溶热储地热水富水性强，更具开发利用价值；凹陷及斜坡带底面埋深大于 1 400 m 的新近系馆陶组砂岩热储地热水水温一般大于 50 ℃，且下部含有富水的底砾石岩，地热井不易出砂，开发利用条件更有利。

综上所述，按行政区划对研究区进行总结。其中，濮阳市区及濮阳县处于横跨东濮凹陷及内黄隆起构造带，平均地温梯度为 3.2～3.5 ℃/100 m，为研究区地温梯度最大的区块，在新近系明化镇组砂岩和馆陶组中细砂岩层中储存有 30～60 ℃ 的地热水；在古生界奥陶系灰岩层储存有 60 ℃ 的地热水，埋深在 1 500 m 左右。清丰县处于内黄凸起地热田东北部，热储类型主要为层状热储，热储结构完整，热储盖层、热储层齐全，新生界砂岩热储层遍布整个区域，热储层厚 646～900 m、热储温度 30～50 ℃；古生界碳酸盐岩热储层为该区主要利用热储层，顶板埋深 1 100～1 800 m，西部埋深较东部浅，裂隙及溶隙发育、富水性好，单井涌水量大于 100 m^3/h，井口水温 52～60 ℃。南乐县处于内黄隆起东斜坡处，热储类型主要为新近系馆陶组层状热储及奥陶系灰岩热储，热储结构完整，热储层、盖层齐全。由图 3 可知，Ⅰ区的南乐断裂以西地区利用热储层主要为馆陶组热储，热储平均温度为 54 ℃；Ⅱ区的南乐断裂以东地区主要利用热储层段为奥陶系热储，热储平均温度为 70 ℃，单井水量大于 100 m^3/h。范县横跨东濮凹陷及菏泽凸起两个构造单元，热储类型主要为层状兼带状热储，可供利用的热储层有两个：聊兰断裂西部为新近系砂岩热储、聊兰断裂东部为奥陶系灰岩热储，新近系砂岩热储遍布全区，热储温度 50 ℃ 以上；奥陶系热储分布在聊兰断裂东部，储层厚度一般在 600～1 000 m 左右，单井涌水量 68～120 m^3/h，井口水温 60 ℃ 左右。台前县处于菏泽凸起上，初步评价认为奥陶系岩溶热储具备一定的利用潜力。因此，本次评价认为，濮阳市区及濮阳县馆陶组砂岩热储、奥陶系灰岩热储都是开发利用有利区，清丰县优先利用奥陶系灰岩热储，南乐县的南乐断裂以西地区以利用馆陶组砂岩热储为主，南乐断裂以东地区以利用奥陶系灰岩热储为主，范县优先利用新近系砂岩热储，台前县东部以利用奥陶系灰岩热储为主。

5 结 论

1）研究区中深层地热热储类型主要为层状兼带

状热储，主要开发利用的热储层为孔隙型砂岩和岩溶型碳酸盐岩两套热储，通过采用体积法计算，馆陶组热储地热资源总量为 8.67×10^{10} GJ、可采资源量为 2.17×10^{10} GJ，奥陶系热储地热资源总量为 9.68×10^{10} GJ、可采资源量为 1.45×10^{10} GJ，综合开发利用潜力巨大，对调整能源结构、节能减排、改善环境具有重要意义。

2）研究区内凸起区热储顶面埋深 2 000 m 以浅的奥陶系岩溶热储地热水富水性强、地热水温度高，凹陷及斜坡带底面埋深大于 1 400 m 的新近系馆陶组砂岩热储地热水水温一般大于 50 ℃，相比于砂岩热储，浅埋藏奥陶系热储的岩溶裂缝发育程度高、地热水循环和补给强、矿化度低、易回灌，更适宜开发利用。

参考文献（References）：

[1] 孙焕泉，毛翔，吴陈冰洁，等. 地热资源勘探开发技术与发展方向[J]. 地学前缘，2024，31(1)：400-411.
SUN Huanquan, MAO Xiang, WU Chenbingjie, et al. Geothermal resources exploration and development technology: current status and development directions[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(1): 400-411.

[2] 曹锐，多吉，李玉彬，等. 我国中深层地热资源赋存特征、发展现状及展望[J]. 工程科学学报，2022，44(10)：1623-1631.
CAO Rui, DUO Ji, LI Yubin, et al. Occurrence characteristics, development status, and prospect of deep high-temperature geothermal resources in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1623-1631.

[3] 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)：412-425，341.
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, 341.

[4] 庞忠和，罗霁，程远志，等. 中国深层地热能开采的地质条件评价[J]. 地学前缘，2020，21(1)：134-151.
PANG Zhonghe, LUO Ji, CHENG Yuanzhi, et al. Evaluation of geological conditions for the development of deep geothermal energy in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 21(1): 134-151.

[5] 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)：448-459.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 448-459.

[6] 蔺文静，刘志明，王婉丽，等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质，2013，40(1)：312-321.
LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312-321.

[7] 任虎俊. 中深层地热能开发利用技术进展及展望[J]. 中国煤炭地质，2020，31(S1)：9-11，60.
REN Hujun. Progress and prospect of medium deep geothermal energy exploitation and utilization technologies[J]. Coal Geology of China, 2020, 31(S1): 9-11, 60.

[8] 董寒杰，孙健，王冠华，等. 河南省中深层地热资源勘查开发潜力与模式研究[J]. 矿产勘查，2022，13(8)：1158-1165.
DONG Hanjie, SUN Jian, WANG Guanhua, et al. Study on exploration and development potential and model of middle and deep geothermal resources in Henan Province[J]. Mineral Exploration, 2022, 13(8): 1158-1165.

[9] 河南省地质调查院. 河南省地热资源现状调查评价与区划[R]. 2015.

****

（上接第 483 页）

[3] 董雁南，赵雷，张超. 高精度重磁剖面测量在莱芜石家泉-柳行沟地区矽卡岩型铁矿找矿中的应用[J]. 山西冶金，2023，46(2)：165-167.
DONG Yannan, ZHAO Lei, ZHANG Chao. Application of high-precision heavy magnetic profile measurement in the prospecting of sicca-type iron ore in the Shijiaquan-Liuhanggou Area of Laiwu[J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(2): 165-167.

[4] 方昭平，赵映普. 山东淄博金岭铁矿区王旺庄矿床地质特征及控矿因素简析[J]. 能源研究与管理，2017(1)：57-61.
FANG Zhaoping, ZHAO Yingpu. Shandong Zibo Area of Wangwangzhuang Ore in Jinling Iron Mine geological features and ore controling factors analysis[J]. Energy Research and Management, 2017(1): 57-61.

[5] 李兆令，王石. 井中三分量磁测在旧县铁矿普查中的应用[J]. 山东国土资源，2019，35(10)：45-50.
LI Zhaoling, WANG Shi. Application of three-component borehole magnetometry in general survey of Jiuxian Iron Deposit[J]. Shandong Land and Resources, 2019, 35(10): 45-50.

[6] 李令斌. 井中三分量磁法测量在深部找矿中的应用-以金岭铁矿区磁异常解析为例[J]. 有色金属(矿山部分)，2021，73(1)：86-91.
LI Lingbin. Application of three-component magnetic survey method in drill for deep ore exploration: A case study of magnetic anomalies in the Jinling iron mining area[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(1): 86-91.

[7] 贺春艳，郭秋峰，张超，等. 综合物探在寻找矽卡岩型矿床中的应用[J]. 山东国土资源，2012，28(1)：27-30.
HE Chunyan, GUO Qiufeng, ZHANG Chao, et al. Application of integrated geophysical method in surving skarn mineral deposit[J]. Shandong Land and Resources, 2012, 28(1): 27-30.

[8] 刘永龙，马健，王金鑫，等. 综合物探方法在安徽霍邱南部地区铁矿勘查中的应用[J]. 资源信息与工程，2022，37(3)：54-56，60.
LIU Yonglong, MA Jian, WANG Jinxin, et al. Application of integrated geophysical prospecting method in iron ore exploration in southern Huoqiu Area, Anhui Province[J]. Resource Information and Engineering, 2022, 37(3): 54-56, 60.