

南华北盆地东部下古生界碳酸盐岩热储特征 及有利区预测*

章 惠^{1,2} 王延欣^{1,2} 毛 翔^{1,2} 邢 倩^{1,2} 罗 璐^{1,2} 贺婷婷^{1,2}

1 深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206

2 中国石化集团新星新能源公司, 北京 100083

摘 要 南华北盆地东部下古生界寒武系和奥陶系碳酸盐岩热储勘探程度低, 开展寒武系和奥陶系热储特征研究对认识下古生界碳酸盐岩地热资源潜力具有重要的指导意义。本研究基于前人研究成果, 利用最新的钻井、岩心、露头、分析测试等资料, 系统研究了寒武系和奥陶系热储特征, 分析了热储展布规律和地温场特征, 并预测了有利区。结果表明: (1) 南华北盆地东部下古生界碳酸盐岩热储主要分布于张夏组及其上覆地层, 储集层类型为鲕粒滩储集层、白云岩储集层和风化壳岩溶储集层。鲕粒滩储集层和白云岩储集层受后期构造运动影响, 易形成风化壳岩溶储集层。研究区风化壳岩溶储集层发育广泛, 以Ⅱ类和Ⅲ类裂缝储集层为主。(2) 研究区岩溶热储受构造影响, 呈北西和北东走向, 浅埋区寒武系热储顶面埋深 500~2500 m, 奥陶系热储顶面埋深 100~2000 m; 热储顶面温度 30~90 °C。(3) 基于热储顶面埋深、盖层地温梯度和岩溶发育程度建立了研究区岩溶热储选区评价标准, 经评价认为太康隆起商丘地区西部为岩溶热储勘探的最有利地区; 研究为南华北盆地东部下一步地热勘探开发指明了方向。

关键词 南华北盆地 寒武系 奥陶系 碳酸盐岩热储 有利区预测

第一作者简介 章惠, 女, 1987 年生, 硕士、高级工程师, 主要从事非震地球物理勘探与地热地质相关工作。E-mail: zhanghui714@126.com。

中图分类号: P314 文献标志码: A

Geothermal reservoir characteristics and favorable zone prediction of the Lower Paleozoic carbonate rocks in eastern margin of Southern North China Basin

ZHANG Hui^{1,2} WANG Yanxin^{1,2} MAO Xiang^{1,2} XING Qian^{1,2} LUO Lu^{1,2} HE Tingting^{1,2}

1 State Key Laboratory of Deep Geothermal Resources, Beijing 102206, China

2 SINOPEC Star New Energy Co. Ltd., Beijing 100083, China

Abstract Characterizing Lower Paleozoic carbonate thermal reservoirs is essential for evaluating the geothermal resource potential of the eastern margin of the South North China Basin. Integrating findings from prior studies with newly acquired drilling, core, outcrop, and geochemical analytical data, this study systematically characterizes Cambrian and Ordovician thermal reservoirs, delineates their spatial

* 中国石油化工股份有限公司科技项目 (编号: KLJP25012, KLJP23008) 资助。[Financially supported by the Science and Technology Project of China Petroleum & Chemical Corporation (Nos. KLJP25012, KLJP23008)]

收稿日期: 2025-04-30 改回日期: 2025-08-15

distribution patterns and associated geothermal field attributes, and identifies prospective exploration targets. Key findings are as follows: (1) Lower Paleozoic carbonate thermal reservoirs in the study area are predominantly hosted in the Zhangxia Formation and overlying strata. Reservoir types include oolitic shoal, dolomitic, and karst reservoirs. Late-stage tectonic activity has significantly influenced the oolitic shoal and dolomitic reservoirs, promoting secondary karstification; consequently, well-developed karst reservoirs—predominantly Class II and III fractured systems—are widespread across the region. (2) Karst reservoir distribution exhibits clear structural control, with dominant NW- and NE-trending orientations. In shallow-buried settings, the top of the Cambrian reservoir ranges from 500 to 2500 m depth, whereas the Ordovician reservoir top lies between 100 and 2000 m. Corresponding top-reservoir temperatures range from 30 to 90 °C. (3) A quantitative evaluation framework for karst reservoir favorability was established, incorporating three key parameters: burial depth, caprock geothermal gradient, and degree of karst development. Application of this framework identifies the western Shangqiu area of the Taikang Uplift as the most prospective zone for karst-hosted geothermal resources—providing a robust scientific basis for prioritizing future geothermal exploration and development efforts in the basin.

Key words Southern North China Basin, Cambrian, Ordovician, geothermal reservoir of carbonate rocks, favorable zone prediction

About the first author ZHANG Hui, born in 1987, Master, a senior engineer, is engaged in non-seismic geophysical exploration and geothermal geology-related work. E-mail: zhanghui714@126.com.

0 前言

南华北盆地下古生界仅包括寒武系和奥陶系,由分布稳定的海相碳酸盐岩组成。目前,该层系是中国渤海湾盆地和汾渭地堑系地热勘探开发的主战场。例如,在内黄隆起东斜坡(图 1-a),已有几十口地热井在奥陶系获得成功,单井产热量超 120 m³/h (王迪等, 2020; 黄旭等, 2021; 章惠等, 2024); 在太原盆地西温庄隆起地热田(图 1-a),奥陶系—寒武系岩溶热储单井水温普遍达 60 °C 以上(汪新伟等, 2019, 2022; 戴明刚等, 2020; 王婷灏等, 2020),显示出水量大、水温高、分布广的显著特征,展现了海相碳酸盐岩良好的开发前景。然而,南华北盆地下古生界的勘探程度却较低,是否发育优质碳酸盐岩热储尚待进一步深入研究。

前人从地热勘探角度对南华北盆地下古生界地热地质研究做了大量工作,包括利用非震勘探和钻井数据分析南华北盆地太康隆起不同次级构造单元内下古生界岩溶热储结构、厚度和水化学等特征及评价地热资源潜力(任鸿飞等, 2019; 胥博文等, 2019; 刘志龙等, 2020; 闫晋龙等, 2020; 任静等, 2023; 邵炳松等, 2023),依据实钻资料阐述南华北盆地长山隆起寒武系岩溶热储资源特征

(周颖等, 2023),结合区域地质构造、热异常显示、地热成因机理等圈定盆地内地热资源远景区(黄光寿等, 2020; 齐玉峰等, 2020; 喻广建等, 2023),利用钻孔测温数据分析盆地及其东部淮北、淮南地区现今地温场和大地热流特征(张鹏等, 2007; 徐胜平, 2014; 彭涛等, 2018),表明了南华北盆地典型构造单元具备较好的地热资源赋存条件。然而,前人仅从油气勘探角度对南华北盆地下古生界碳酸盐岩地层局部构造中的寒武系储集层和奥陶系古岩溶特征等方面进行过解剖(时国, 2010; 凌帆等, 2017; 姬玉平等, 2021; 魏思宇等, 2022),而未针对热储特征进行研究,尤其是对南华北盆地东部寒武系和奥陶系的热储类型、分布规律和地温场特征等缺乏系统的研究,一定程度影响了该区地热资源的高效勘探开发和规模化利用。

本研究在前人认识的基础上,根据南华北盆地以往多年油气勘探积累的大量钻孔、地质和物探资料,利用最新的钻井数据、岩心露头、分析测试等资料,对研究区寒武系和奥陶系热储特征进行系统研究,分析热储展布规律及其地温场特征,并结合地热系统成藏因素,预测下古生界碳酸盐岩热储有利区,以期对南华北盆地地热资源下一步勘探开发

提供科学依据和指导。

1 区域地质背景

1.1 南华北盆地构造特征与演化

南华北盆地属于华北板块东南缘，东以郯庐断裂为界与扬子板块相邻，北以焦作—商丘断裂为界与渤海湾盆地相接，南以栾川—固始—肥中断裂为界与秦岭—大别造山带毗邻，西与豫西隆起相邻（图 1）。研究区以北东向兰聊断裂南延为西边界，位于南华北盆地东部，呈现“三拗三隆”的构造格局，由北往南依次为开封拗陷、太康隆起、周口拗陷、长山隆起、徐淮—蚌埠隆起和合肥拗陷，区内以北西向、北西西向断裂为主，发育次级北东向断裂。

自太古代以来，研究区经历了前寒武纪基底形成、早古生代克拉通化和晚古生代—新生代构造叠加改造三大阶段。早古生代寒武纪—奥陶纪是碳酸盐岩形成主要时期，构成了碳酸盐岩储集层形成的物质基础；早奥陶世—中奥陶世发生的怀远运动，造成了南华北地区古地势南高北低，形成了发育于中、下奥陶统之间的平行不整合面；晚奥陶世以来

华北板块受南部扬子板块俯冲影响，发生加里东运动，整个华北地区抬升为陆，遭受了长达 150 Ma 沉积间断，该时期是碳酸盐岩储集层岩溶作用发育的主要时期。晚古生代以来经历的印支—燕山—喜山多期次构造活动，对地热储集层的差异改造和分布有重要的控制作用（徐汉林等，2003；余和中，2005）。

1.2 南华北盆地地下古生界寒武系—奥陶系沉积演化

南华北盆地地下古生界寒武系—奥陶系受构造运动和海平面升降影响，主要发育台地边缘礁滩、开阔台地和局限台地相，局部发育蒸发台地、台地边缘斜坡和深海陆棚相（图 2）。寒武纪早期古地势北高南低，海水由东或东南侵袭，水体较浅，以局限台地沉积为主，陆源碎屑占优势，碳酸盐岩发育不是很充分；后期随着海平面上升，水体加深；至中晚期受怀远运动抬升的影响，古地势发生反转，海水由东北向西南侵入，依次发育台地边缘斜坡、台地边缘礁滩和开阔台地相。奥陶系继承了寒武纪末期南高北低的古地势格局，海水由北往南侵袭，伴随着海平面的升降，形成了局限台地—开阔台地的

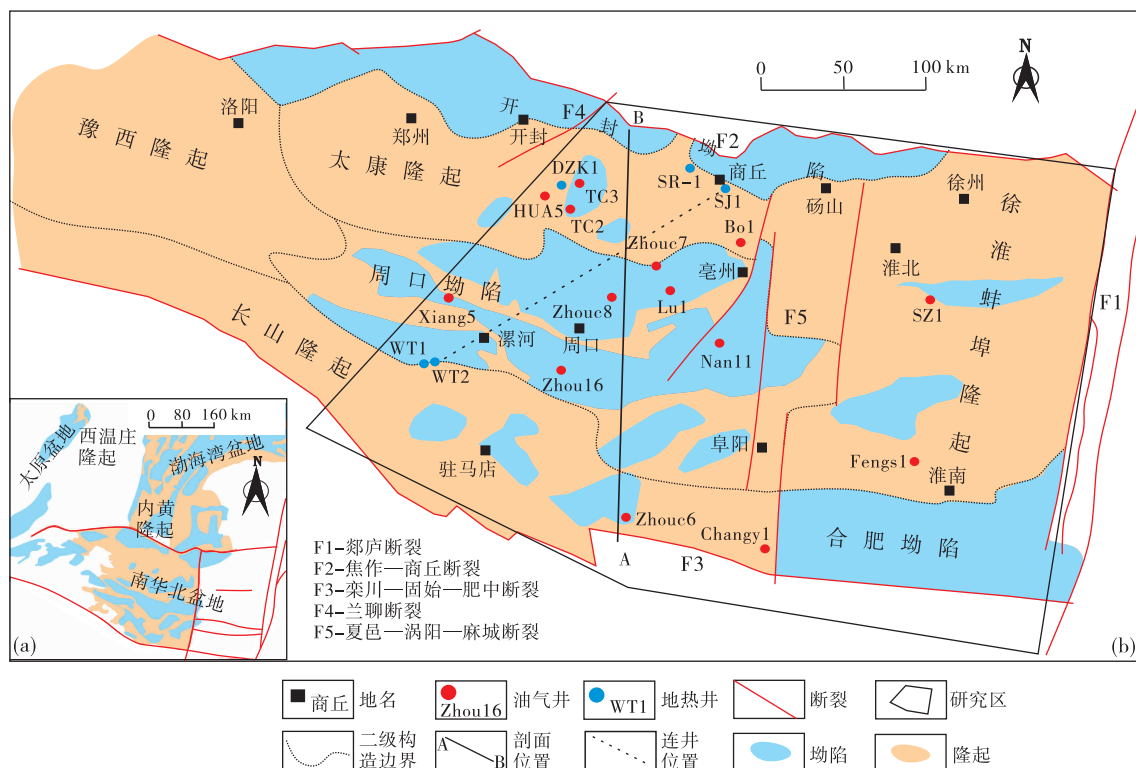


图 1 南华北盆地构造位置图

Fig. 1 Structural location map of the Southern North China Basin

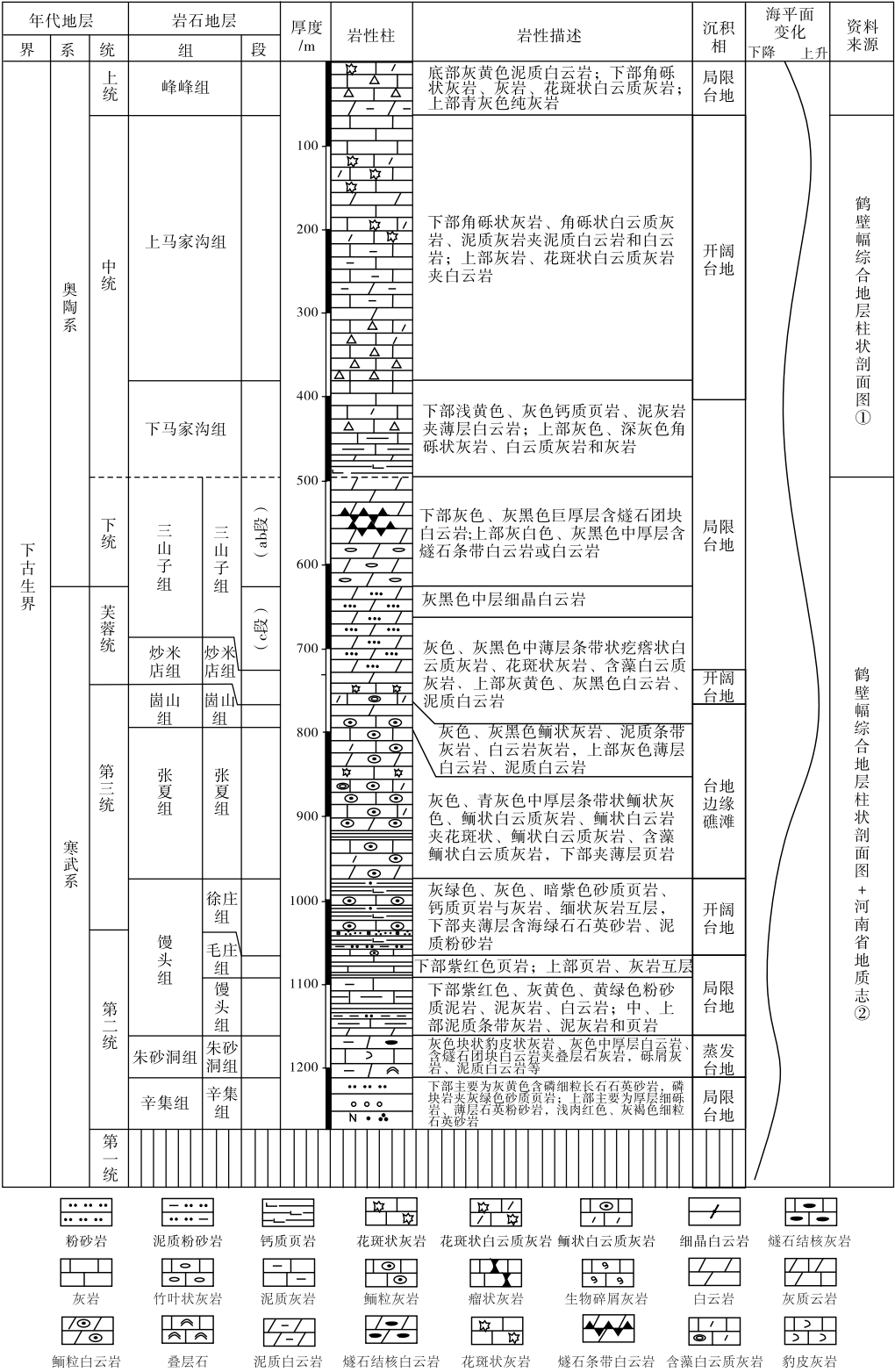


图 2 南华北盆地寒武系—奥陶系地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the Cambrian-Ordovician in Southern China North Basin

① 全国地质资料馆. 1979. 鹤壁幅 I-50-1 1/20 万区域地质调查报告.

② 河南省地质调查院. 2019. 河南省地质志.

多期变化（刘波等，1999；时国，2010；王建坡和汪啸风，2025）。

1.3 南华北盆地寒武系—奥陶系碳酸盐岩地层发育特征

实钻数据和地质资料显示，该区地层发育较为齐全，由老到新依次有元古界、下古生界寒武系—奥陶系、上古生界石炭系—二叠系、中生界、古近系和新近系—第四系，缺失志留纪和泥盆纪地层。受多期构造活动影响，不同空间部位地层分布及残存厚度有较大差异。南部长山隆起地层埋藏浅、剥蚀作用强，地层序列残存少，如 Zhouc6 井揭示地层序列中缺少奥陶系和石炭系—二叠系；往北至开封坳陷，地层埋藏深度增加，地层序列残存多且厚度分布稳定（图 3）。

文中研究对象为下古生界寒武系—奥陶系碳酸盐岩，是南华北盆地主要的岩溶热储集层。其中寒武系缺失第一统，由下往上包括辛集组、朱砂洞组、馒头组、张夏组、崮山组、炒米店组和三山子组（c 段）（章森桂等，2015；朱茂炎等，2021），实钻资料揭示残存厚度 303~1250 m；奥陶系包括三山子组（a、b 段）、下马家沟组、上马家沟组和峰峰组，研究区南部秦岭—大别造山带和东部郯庐断裂带附近剥蚀殆尽，残存厚度为 82~516 m（图 3）。

2 研究方法

为更好表征下古生界碳酸盐岩热储特征，明确优势地热资源分布靶区，本研究分别从储集层和地温场两方面展开详细研究，进而在“源、储、通、盖”地热系统成因模式指导下，制定地热资源选区评价标准，实现有利靶区预测。

对于储集层特征研究，主要从碳酸盐岩岩性、储集空间、储集层类型及物性特征和分布规律 4 个方面展开。其中岩性识别是基础，通过野外露头、岩心和薄片鉴定结果，识别寒武系和奥陶系岩性特征，明确碳酸盐岩分布层位。在沉积—成岩作用背景下，结合原始储集层的储集空间类型和物性特征，对寒武系—奥陶系碳酸盐岩储集层类型进行划分（陈霞和徐辉，1994；刘波等，1999；赵宗举，2008；黄擎宇等，2015），明确有利的储集层类型及其分布特征。最后以基岩地质图为依据，以钻井资料为控制点，利用地震测线和地质剖面分别开展寒武系和奥陶系储集层顶面埋深图和残厚图的编制，明确储集层空间分布特征。

对于地温场特征研究，主要从大地热流、盖层地温梯度和热储温度 3 个方面展开。大地热流反映了地球内部热状态，本研究主要结合中国大地热流数据库及调研文献资料（胡圣标等，2001；张鹏等，2007；徐胜平，2014；彭涛等，2018），整理得到研究区大地热流分布趋势。地温梯度直接反映了岩石热传递特征，可以较好地突出浅部地温场，间接反应地热储集层的温度。本研究结合实钻资料及文献数据（张鹏等，2007；徐胜平，2014；彭涛等，2018），依据公式（1）计算热储集层上覆的盖层平均地温梯度，进而编制盖层平均地温梯度图。

$$\frac{T - T_0}{H - H_0} \times 100\% = \Delta T \quad (1)$$

公式（1）中， T 和 H 分别为测井实测的温度和对应的深度值， T_0 和 H_0 为该区域恒温带的温度和深度，本研究取 T_0 为 14.5℃， H_0 为 20 m（张鹏等，2007）。基于盖层平均地温梯度，利用公式（1）可推算出热储集层顶面温度。

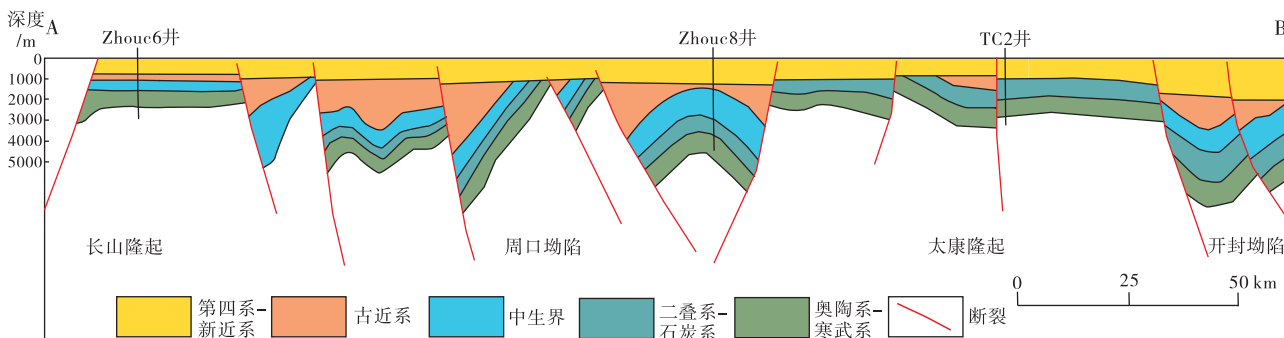


图 3 南华北盆地南北向剖面图（剖面位置见图 1）

Fig. 3 North-south profile of Southern North China Basin (profile location in Fig. 1)

综合储集层特征和地温场特征研究结果, 基于地热开采的经济效益性, 考虑热储顶面埋深、盖层地温梯度和岩溶发育程度, 建立选区评价标准, 利用叠合分析方法进行有利区预测, 为下一步地热勘探指明方向。

3 碳酸盐岩储集层特征

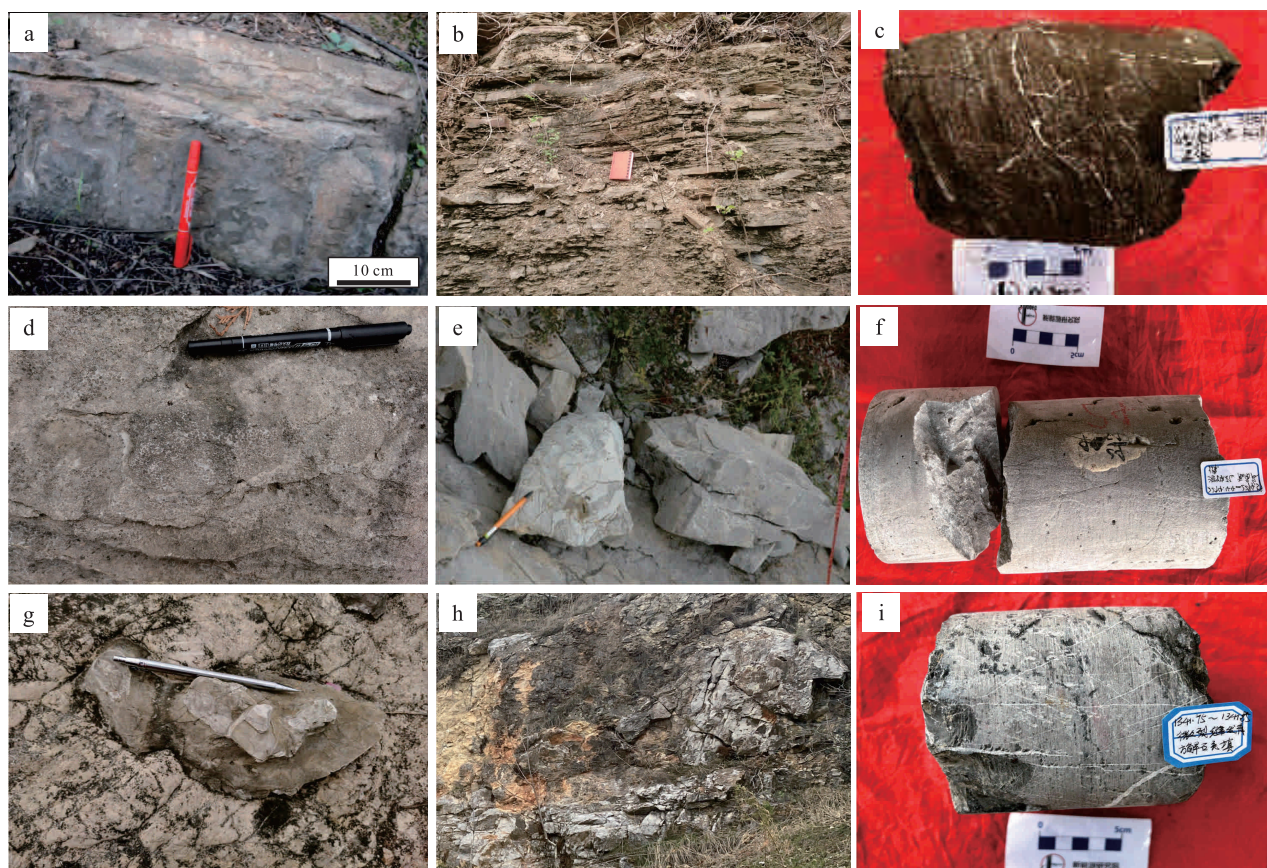
3.1 岩性特征

研究区寒武纪早期岩石类型多样, 底部辛集组以碎屑岩沉积为主, 岩性为石英砂岩、灰质粉砂岩和泥页岩(白万备等, 2018; 郑德顺等, 2019; 图 4-a); 朱砂洞组和馒头组为碳酸盐岩和碎屑岩的交替沉积, 岩性有细砂岩、页岩、泥晶灰岩和生屑灰岩, 其中紫红色泥岩层为馒头组典型标志层(图 4-b, 4-c); 寒武纪中晚期其他各组均以碳酸盐岩

沉积为主, 岩石类型为灰白色灰质白云岩、鲕粒灰岩、白云质灰岩(图 4-d 至 4-f), 其中大套厚层的鲕粒灰岩是张夏组典型标志层。奥陶系岩石类型较为单一, 以深灰色灰岩、角砾灰岩、颗粒灰岩、灰质白云岩和灰白色块状白云岩为主(图 4-g 至 4-i)。

3.2 储集空间类型

寒武系—奥陶系储集层空间类型主要为溶蚀孔洞和裂缝(图 4-f, 4-i)。其中溶蚀孔洞主要形成于表生岩溶作用时期, 受怀远运动和加里东运动影响, 寒武系—奥陶系整体抬升接受风化剥蚀淋滤, 形成了大小不一的溶蚀孔洞, 直径 0.1~10 cm, 少数被方解石充填, 大部分孔隙未充填(图 4-f)。研究区裂缝主要形成于表生岩溶期和埋藏岩溶期, 以构造缝为主, 部分为压溶缝、节理缝等, 缝宽多小于 0.1 mm, 岩心显示高角度缝居多, 且多被方解



a—含砾粗砂岩, 鲁山石门沟, 辛集组; b—薄层细砂岩夹薄层粉砂岩, 枣庄薛城区, 馒头组; c—紫红色泥岩, Xiang5 井, 3600 m, 馒头组; d—鲕粒灰岩, 枣庄薛城区, 张夏组; e—鲕粒白云质灰岩, 安徽宿州夹沟剖面, 崮山组; f—灰白色灰质白云岩, 溶蚀孔洞, TC3 井, 2294 m, 三山子组 c 段; g—薄层状、凝块和叠层石白云岩, 枣庄薛城区, 三山子组 a 段; h—岩溶角砾岩, 枣庄市中区富山东村, 下马家沟组; i—深灰色灰岩, TC4 井, 1341 m, 下马家沟组

图 4 南华北盆地寒武系—奥陶系岩性特征

Fig. 4 Cambrian-Ordovician lithologic characteristics in Southern North China Basin

石充填(图 4-i)。伴随着溶蚀孔洞缝的发育, 钻井过程中会发生放空、井漏的现象, 据统计在太康隆起区溶孔、溶洞钻遇率达 33.5% (时国, 2010), 主要发生在寒武系中上部张夏组及其上覆地层、奥陶系下马家沟组和上马家沟组中(杨婷婷等, 2024)。

3.3 储集层类型及物性特征

研究区共识别出 3 类储集层, 包括原始储集物性较好的鲕粒滩储集层、与白云岩化有关的白云岩储集层和受古地貌控制的风化壳岩溶储集层(表 1)。

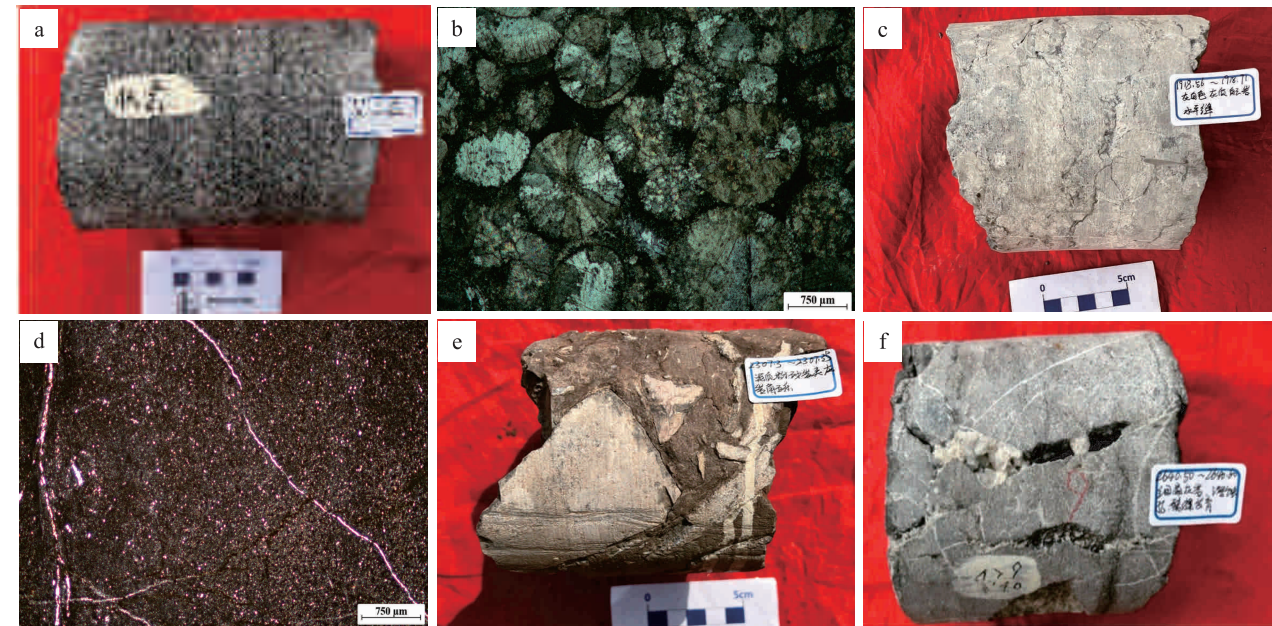
鲕粒滩储集层的储集空间类型主要为残余粒间孔和粒内溶孔, 以颗粒支撑为主, 泥质含量少, 胶结物多为易溶蚀的亮晶方解石, 原生孔隙发育, 但

地层相对较老, 原生孔隙多被后期充填, 广泛分布于寒武系张夏组(图 5-a, 5-b)。该时期南华北地区水体较深, 主要为台地边缘礁滩相沉积, 鲕粒滩相对发育, 岩性为浅灰色鲕粒灰岩和鲕粒白云岩, 钻井岩心及露头的薄片资料显示面孔率在 0.625%~4.0%之间, 渗透率 $(0.2 \sim 2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。大部分样点显示孔隙度和渗透率具有一定的正相关关系, 个别样点物性显示当孔隙度为 2.7%时, 对应渗透率为 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 当孔隙度为 4%时, 对应渗透率为 $0.202 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 表明鲕粒滩储集层的原生孔隙连通性较低, 缺乏断裂、裂缝的改造。

白云岩储集层的储集空间类型为晶间孔、粒间孔和缝-洞, 硬度较高, 抗压实能力强, 易形成松散的砂糖状储集层(图 5-c, 5-d); 且白云岩储集

表 1 南华北盆地东部碳酸盐岩储集层类型及发育层位

Table 1 Reservoir type and stratigraphy of the Cambrian-Ordovician carbonate rocks in eastern Southern North China Basin			
储集层类型	岩性	储集空间类型	主要发育层位
鲕粒滩储集层	亮晶鲕粒灰岩、鲕粒白云岩	残余粒间孔、粒内溶孔	寒武系张夏组
白云岩储集层	泥-粉晶白云岩、晶粒白云岩	晶间孔、粒间孔、粒内溶孔和缝-洞	寒武系崮山组及上覆地层 奥陶系下马家沟组和上马家沟组
风化壳岩溶储集层	灰岩、白云岩、角砾岩	溶孔、缝-洞	寒武系张夏组—三山子组 c 段 奥陶系下马家沟组和上马家沟组



a—鲕粒灰岩, TC3 井, 2440 m, 张夏组; b—鲕粒灰岩, 粒间孔, 枣庄薛城区, 张夏组; c—灰白色灰质白云岩, TC3 井, 1918 m, 上马家沟组; d—白云岩裂缝和粒间孔, 枣庄薛城区, 上马家沟组; e—风化壳角砾岩, Zhou25 井, 2307 m, 寒武系顶部; f—深灰色灰岩, 溶蚀孔洞、高角度裂缝, TC3 井, 2240.8 m, 下马家沟组

图 5 南华北盆地寒武系—奥陶系储集层类型

Fig. 5 Cambrian-Ordovician reservoir types in Southern North China Basin

层多发育在浅水区,常与膏岩、不整合面等伴生出现形成复合型溶蚀空间(陈霞和徐辉,1994;黄擎宇等,2015),主要分布于寒武系崮山组及其上覆地层和奥陶系下马家沟组、上马家沟组。早奥陶世沉积后受多期构造运动影响,研究区碳酸盐岩地层抬升,整体处于中—浅层的埋藏环境,有利于白云化作用,且在古地势南高北低的背景下,其白云化作用层位呈现由南往北逐渐变浅的规律,南部较北部白云岩更为发育,周口坳陷以南白云化作用可深至张夏组,而到北部太康隆起区白云化作用主要发生于崮山组及上覆炒米店组和三山子组c段以及奥陶系上马家沟组。钻井岩心及露头的薄片资料显示寒武系白云岩储集层孔隙度为0.91%~9.32%,渗透率为 $(0.03 \sim 2.42) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;奥陶系白云岩储集层孔隙度为1.3%~4.4%,渗透率为 $(0.04 \sim 5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度和渗透率基本呈线性关系,整体渗透性较低,个别样点表现为高渗透性,薄片资料显示储集空间类型为晶间孔和岩溶缝。

风化壳岩溶储集层则是在怀远运动和加里东运动抬升下,先期形成的碳酸盐岩出露地表经风化剥蚀和大气淡水淋滤改造,于近地表形成的裂缝—溶蚀孔洞型白云岩、灰岩以及裂缝型角砾岩储集层,属于由裂缝和溶蚀孔洞组成的复合型储集类型(图5-e, 5-f)。该类储集层除了受到沉积相带和岩石类型控制,还受构造运动、古隆起等因素影响,尤其与古地貌息息相关(李定龙等,1997),普遍认为岩溶斜坡和岩溶高地是古风化壳发育的有利区

域。研究中利用“填平补齐”的原理,采用残厚法分别获取了怀远运动和加里东运动时期的古地貌特征(图6)。怀远运动时期,早奥陶世古地势呈南高北低的特征,南部周口—太康一带为岩溶高地,东部徐州—枣庄周缘为岩溶斜坡,往北至菏泽地区为洼地(图6-a);加里东运动时期继承了早期构造格局,具有西南往东北倾斜的趋势,太康及其以南地区均为岩溶高地,砀山—淮北地区为斜坡带,枣庄以北为岩溶洼地(图6-b)。研究表明,寒武纪和奥陶纪风化壳岩溶储集层主要受控于较长时期的大气淡水淋滤与溶蚀作用,尤其是加里东运动时期,沉积间断时间长,奥陶系顶部的风化壳储集层相对更为发育,广泛分布于太康—周口以南和淮北—徐州地区。

实钻测井资料揭示,纵向上,风化壳岩溶储集层主要分布于寒武系中上部和奥陶系顶部,以裂缝型储集层为主,储集层厚度为15.8~216.4 m,平均孔隙度为3.82%~11.39%,平均渗透率为 $(0.006 \sim 34.52) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。根据测井曲线中自然伽马、声波时差和孔隙度值,将裂缝型储集层分为I类、II类和III类,其中I类储集层自然伽马低于40 API,声波时差大于250 $\mu\text{s}/\text{m}$,孔隙度大于10%,属于最优质储集层。表2和图7显示,I类裂缝仅分布于寒武系和奥陶系上部,受后期抬升剥蚀影响,在靠近南部造山带和东部郯庐断裂带地区,地层剥蚀强度大,寒武系和奥陶系中上部残存厚度小,最优质储集层仅0.9~6.2 m,孔隙度平均

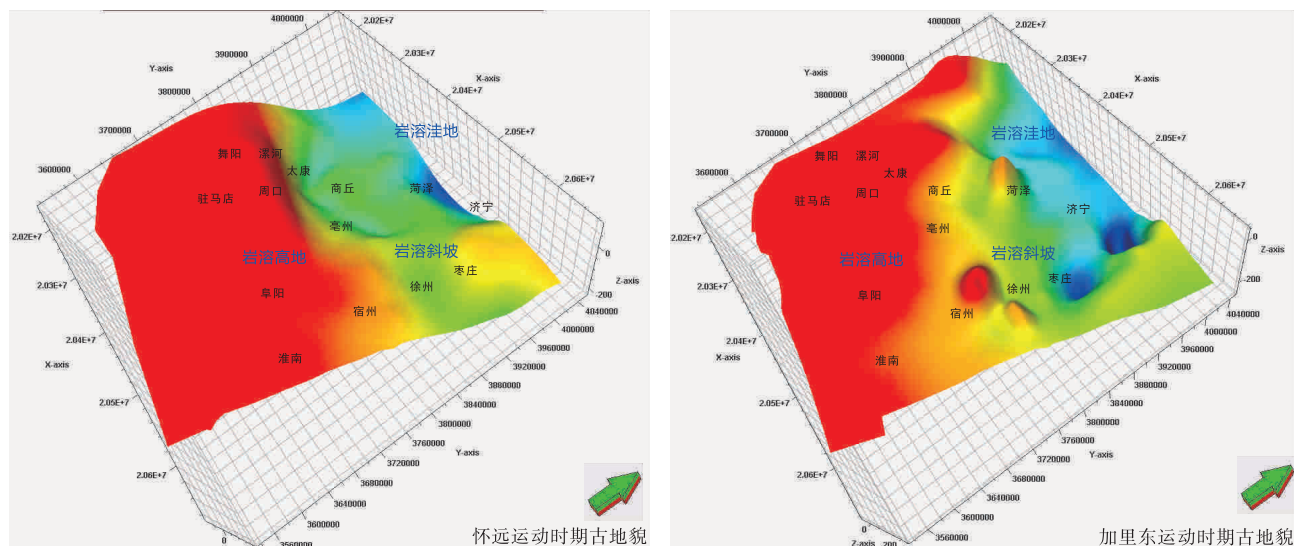


图6 南华北盆地东部怀远运动和加里东运动时期古地貌图

Fig.6 Palaeogeomorphologic map of eastern Southern North China Basin during the Huaiyuan and Caledonian movements

表 2 南华北盆地东部地热井测井解释结果统计

Table 2 Statistics of logging interpretation results for geothermal wells in eastern Southern North China Basin

井号	地层	I 类裂缝层			II 类裂缝层			III 类裂缝层		
		厚度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	厚度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	厚度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
WT1	寒武系	0.9	10.83	28.57	23.3	5.34	1.73	17.2	2.56	0.24
WT2	寒武系	6.2	10.98	18.76	9.6	6.09	1.91	30.2	4.86	0.90
SJ1	奥陶系	4.6	12.09	24.50	0.9	9.09	6.24	2.4	5.53	1.29
	寒武系	2.0	16.10	76.70	16.3	8.84	8.72	8.3	7.49	5.88

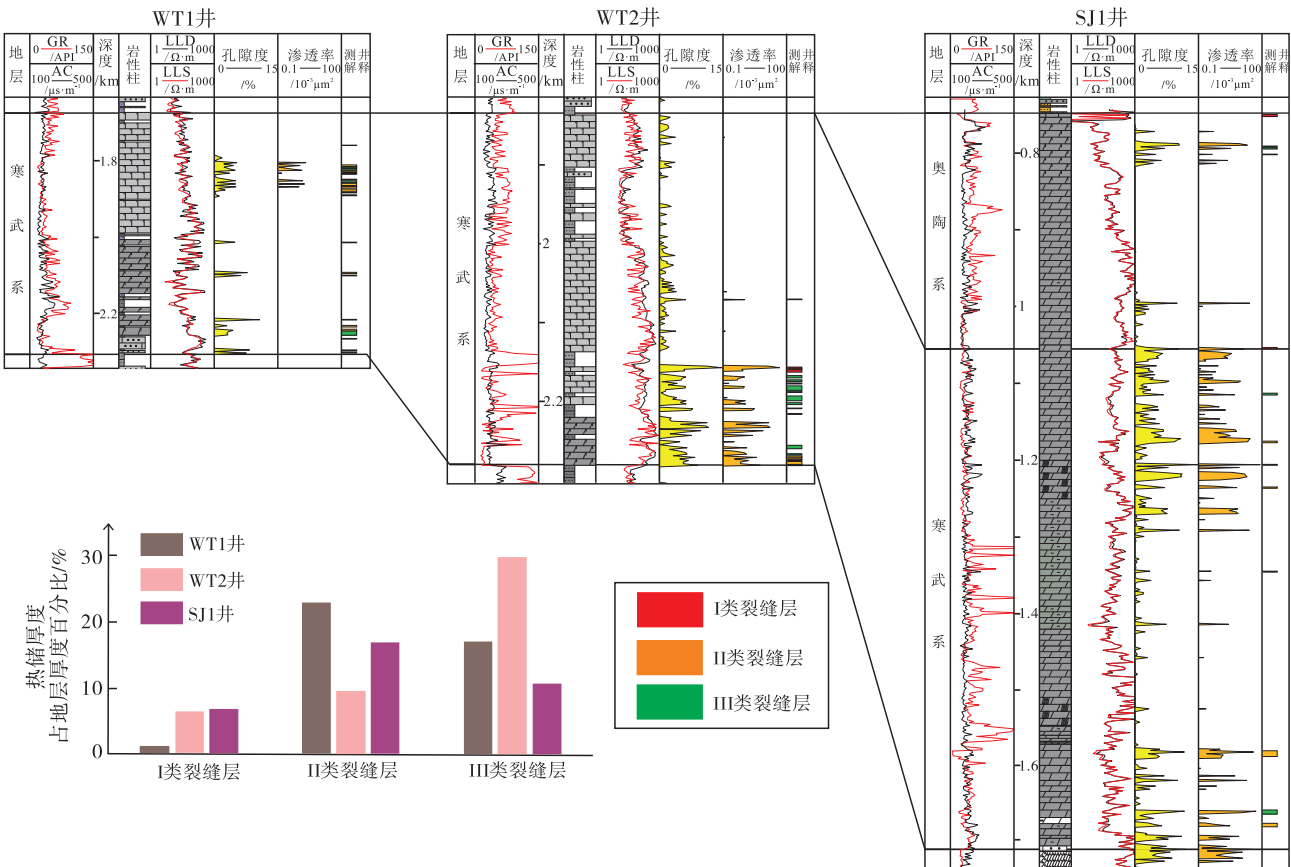


图 7 南华北盆地东部寒武系—奥陶系测井解释连井图

Fig. 7 Well logging interpretation profile of the Cambrian-Ordovician in eastern Southern North China Basin

为 12.50%，渗透率平均为 $37.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；II 类裂缝主要分布于寒武系中上部和奥陶系上部，平均厚度约为 12.5 m，孔隙度平均为 7.34%，渗透率平均为 $4.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；III 类裂缝主要分布于寒武系中下部，平均厚度约为 14.5 m，孔隙度平均为 5.11%，渗透率平均为 $2.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；结合热储集层厚度占比统计可知，该区以 II 类和 III 类裂缝层为主，其测井解释孔隙度和渗透率整体较高且相关性较好，显示该类储集层以溶蚀孔洞为主要储集空间，裂缝为通道，可沟通部分洞穴。

3.4 储集层分布规律

图 8-a 和 8-b 分别为寒武系和奥陶系热储顶面埋深图，该图显示寒武系—奥陶系构造具有较好的继承性。早期受大别造山带影响，构造等值线以北西走向为主，晚期受北东向郯庐断裂带影响，构造等值线在北西走向基础上叠加了北东走向，尤其在靠近郯庐断裂带区域，以北东走向等值线为主。图 8 显示寒武系和奥陶系热储存在不同程度的剥蚀，呈现东部和南部埋藏浅、中部埋藏深的特征。在东部郯庐断裂带附近，寒武系—奥陶系剥蚀殆

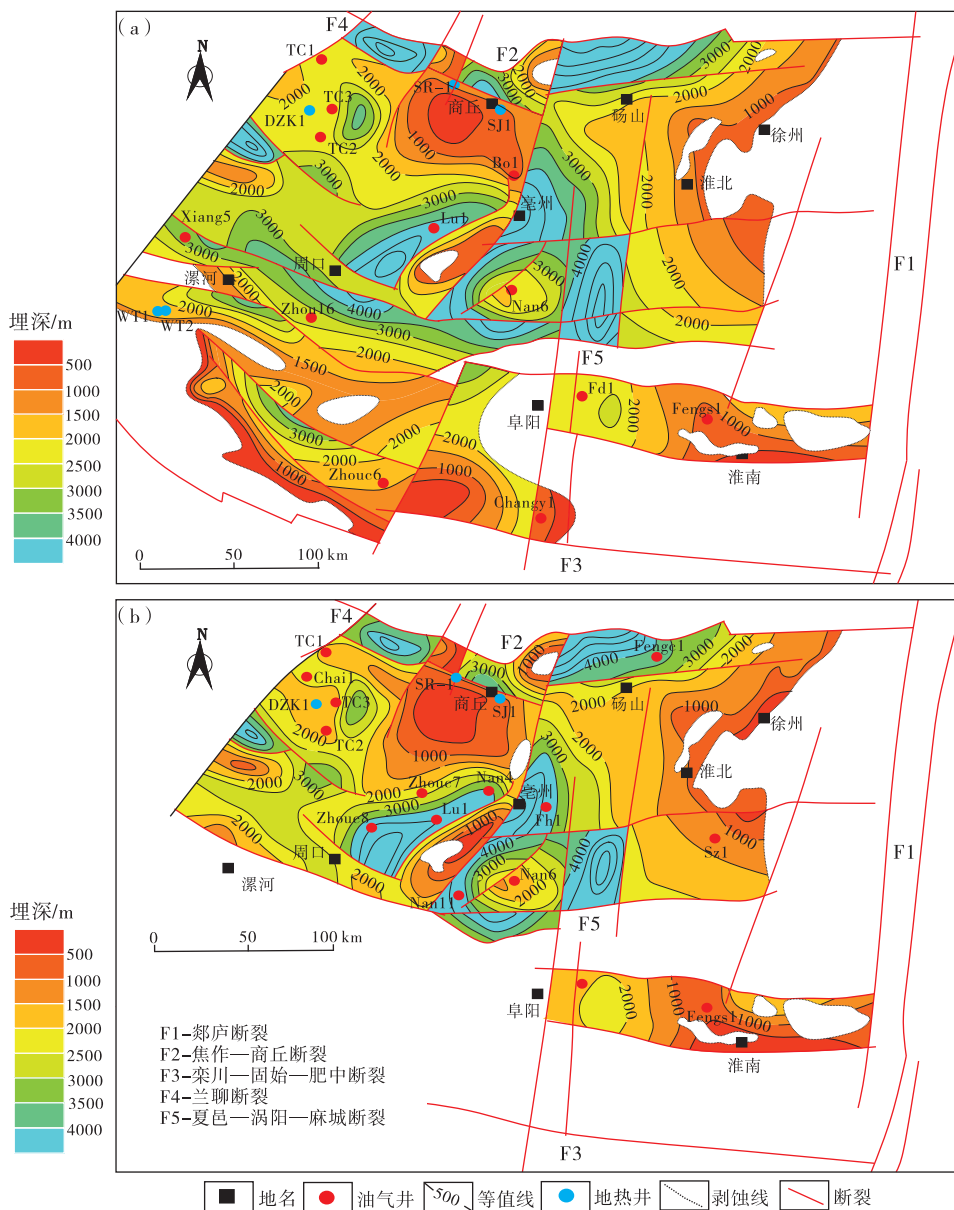


图 8 南华北盆地东部下古生界寒武系和奥陶系顶面埋深图

Fig. 8 Burial depth map of top surface of the Lower Paleozoic Cambrian and Ordovician in eastern Southern North China Basin

尽；在南部长山隆起区域寒武系局部剥蚀强烈，而奥陶系剥蚀殆尽。北部太康隆起区、南部的长山隆起区、东部徐淮隆起区和周口坳陷局部凸起为浅埋区，寒武系热储顶面埋深为 500~2500 m，奥陶系热储顶面埋深为 100~2000 m；中部周口坳陷和北部开封坳陷以深埋区为主，寒武系和奥陶系热储顶面埋深为 2000~6000 m。

寒武系和奥陶系残存厚度受构造影响，分布范围及残厚不一。寒武系残厚分布广、厚度大，仅在长山隆起以南和徐淮隆起以东厚度小，小于 500 m；局部地区厚度大，大于 600 m；尤其在徐

州、亳州、淮南等地寒武系保存较完整，厚度近 1000 m 以上，呈现“南厚北薄，东厚西薄”的特点。奥陶系残厚分布局限、厚度小，仅在周口坳陷以北和徐淮隆起以西有分布，太康隆起厚度较为稳定，约 400 m；太康隆起南部和东部厚度小于 200 m，呈现“南薄北厚、东薄西厚”的特点。

4 地温场特征

4.1 大地热流

南华北盆地东部现今大地热流值为 45.5~

71.2 mW/m²，平均为 56.54 mW/m²，低于渤海湾盆地大地热流值 69 mW/m²（胡圣标等，2001），主体呈 NWW 向分布。在长山隆起南部和徐淮隆起北部为大地热流低值区，小于 50 mW/m²，太康隆起及周口凹陷局部凸起为大地热流高值区，最高可达 71.16 mW/m²，呈现东高西低、北高南低特征。

4.2 盖层地温梯度

研究区盖层地温梯度为 1.8~3.5 °C/100 m，平均为 2.69 °C/100 m，低于渤海湾盆地平均地温梯度 3.47 °C/100 m（龚育龄，2003），具有中等地温梯度的特征，与大地热流变化趋势一致（图 9）。在隆起部位地温梯度较高，坳陷部位地温梯度较低，如太康隆起和周口凹陷局部凸起区，地温梯度大于 3.0 °C/100 m，甚至达到了 3.4 °C/100 m 以上；而周口凹陷内部地温梯度为 2.6~3.0 °C/100 m，体现了平均地温梯度的变化和基底凹凸具有较好相关性。在郯庐断裂和夏邑—涡阳—麻城断裂附近，平均盖层地温梯度可达 3.0 °C/100 m，且深大断裂走向与等值线具有较好的一致性，表明了深大断裂具有一定的控热性。此外在长山隆起南部和徐淮隆起区域，地温梯度小于 2.6 °C/100 m，结合构造特征可知，该区剥蚀强度大、盖层厚度小，随着盖层的减薄，保温性变差，地温梯度也逐渐下降。

4.3 热储温度特征

结合热储顶面埋深和盖层平均地温梯度，计算

得到研究区寒武系和奥陶系热储顶面温度图。寒武系和奥陶系热储顶面温度在浅埋区为 30~90 °C，在深埋区热储温度大于 70 °C，均与热储埋深变化趋势一致。太康隆起现今地温梯度高，热储顶面埋深差异大，多为 500~3000 m，热储温度一般为 30~100 °C；长山隆起和徐淮隆起靠近山区，地温梯度较低，热储埋深浅，热储温度一般小于 70 °C。

5 勘探有利区预测

5.1 选区评价标准

从储集层特征分析可知，南华北盆地东部寒武系和奥陶系热储发育受岩性、沉积相和岩溶古地貌等影响，发育不同热储类型且物性差异大。研究表明，鲕粒滩储集层和白云岩储集层原生孔隙发育，易形成岩溶型储集层；岩溶高地和岩溶斜坡是碳酸盐岩储集层发育的有利古地貌，而岩溶洼地属于岩溶发育程度较差区域；为更好表征储集层物性分布特征，考虑用碳酸盐岩储集层类型和古地貌因素来识别和定性描述碳酸盐岩储集层的发育程度。研究区热储顶面埋深受构造影响，各构造单元差异大，其中凸起区埋深浅；盖层地温梯度受基岩凸起、盖层厚度和深大断裂影响，局部存在热异常。一般而言，热储顶面埋藏越浅，越有利于开采；盖层地温梯度越高，则热储温度越高、经济效益越好；岩溶热储越发育，则热储物性越好，回灌也越有利。因

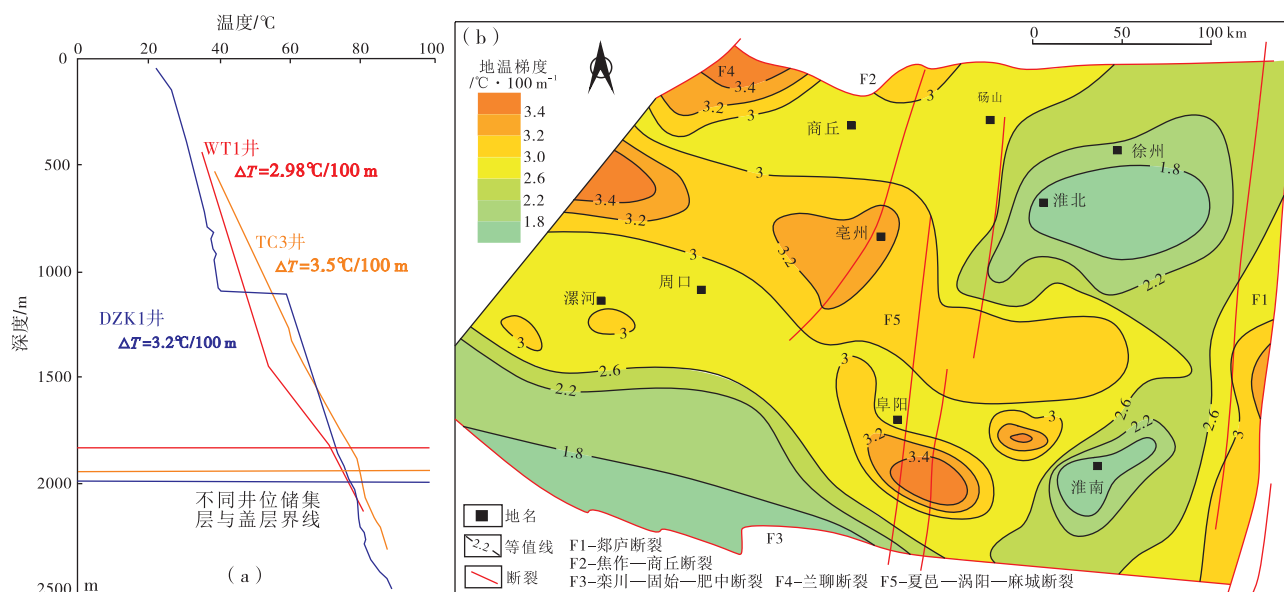


图 9 南华北盆地东部盖层平均地温梯度

Fig. 9 Average geothermal gradient map of eastern Southern North China Basin

此，本次综合岩溶热储顶面埋深、盖层地温梯度和岩溶热储发育程度确定有利目标优选原则。Ⅰ类区为浅埋藏（热储顶面埋深 1500~2500 m）、高地温（盖层地温梯度 $\geq 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ）、强岩溶发育带；Ⅱ类区为中埋藏（热储顶面埋深 2500~3000 m）、中地温（盖层地温梯度 $2.5\sim 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ），或热储顶面埋深 1000~1500 m 且盖层地温梯度 $\geq 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、中等岩溶发育带；Ⅲ类区为深埋藏（热储顶面埋深大于 3000 m）、低地温（盖层地温梯度小于 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ），或热储顶面埋深 1000~1500 m 且盖层地温梯度小于 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、弱岩溶发育带（表 3）。

5.2 有利区带优选

基于岩溶热储选区评价标准，利用多因素叠合分析得到寒武系和奥陶系有利碳酸盐岩热储发育区（图 10-a，10-b）。图 10 显示寒武系和奥陶系Ⅰ类区主要集中在太康隆起商丘地区西部，呈北西向条带状展布，此外在亳州、淮北南部，淮南、漯河西部零星分布；该区域内热储顶面埋藏深度适中，为 1500~2500 m，热储温度可达 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，且位

于岩溶古地貌高地或斜坡区域，岩溶作用强烈，是热储发育的最有利区。Ⅱ类区主要集中在周口坳陷周口及其周缘、徐淮隆起西部北东向夏邑—涡阳—麻城断裂两侧及长山隆起北部；该区域热储顶面埋深 2500~3000 m 或 1000~1500 m，热储温度 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，处于岩溶作用较为强烈区域，是热储发育的较有利区。Ⅲ类区主要分布于太康隆起东部、徐淮隆起西部和长山隆起南部的浅埋区，周口坳陷和开封坳陷内的深凹区；该区域热储顶面埋深 1000~1500 m，热储温度低于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或热储顶面埋深大于 3000 m，很难达到经济开采的条件，属于热储发育的不利区域。

结合地热资源选区评价标准，本研究得到了 3 类有利区带，表明南华北盆地东部具有一定的地热勘探开发潜力。但与规模开发的渤海湾盆地和太原盆地相比（黄旭等，2021；汪新伟等，2022；章惠等，2024），二者热储集层发育特征还存在一定差异。一是渤海湾盆地和太原盆地寒武系和奥陶系发育较为完整，主力热储集层为奥陶系碳酸盐岩热储，厚度可达 700 m 以上，产层为Ⅰ类和Ⅱ类裂缝

表 3 南华北盆地东部岩溶热储选区评价标准

Table 3 Evaluation criteria for selection of karst geothermal reservoirs in eastern Southern North China Basin					
评价指标	Ⅰ类区		Ⅱ类区		Ⅲ类区
顶面埋深/m	1500~2500	2500~3000	1000~1500	≥ 3000	1000~1500
盖层地温梯度/ $^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$	≥ 3.0	$2.5\sim 3.0$	≥ 3.0	< 2.5	< 3.0
岩溶发育程度	良好		一般		较差

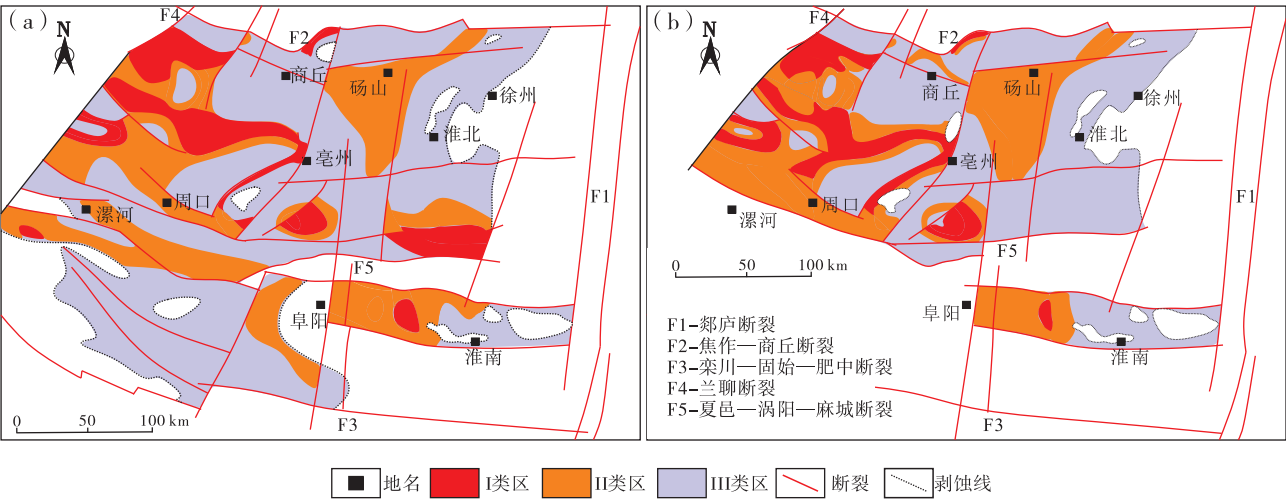


图 10 南华北盆地东部寒武系和奥陶系热储综合评价图

Fig. 10 Comprehensive evaluation map of the Cambrian and Ordovician geothermal reservoirs in eastern South North China Basin

层; 而南华北盆地东部寒武系和奥陶系热储分布范围局限且残存厚度差异大, 奥陶系最薄仅为 82 m, 寒武系在研究区南部剥蚀强烈, 部分地区缺失张夏组及其上覆地层, 测井显示发育 II 类和 III 类裂缝层。二是渤海湾盆地和太原盆地均为新生代裂谷作用盆地, 整体大地热流值较高, 平均值均大于 60 mW/m^2 ; 而南华北盆地东部大地热流值整体较低, 平均值小于 60 mW/m^2 , 高值区仅在局部隆起地区分布。

6 结论

综合分析南华北盆地东部下古生界碳酸盐岩储集层特征和地温场分布特征, 认为该区下古生界寒武系和奥陶系具备一定的地热资源形成潜力, 并利用多因素叠合分析优选有利靶区, 为下一步地热勘探提供重要参考。

1) 南华北盆地东部寒武系和奥陶系热储发育受岩性、沉积相和岩溶古地貌等影响, 其碳酸盐岩储集层主要分布于张夏组及其上覆地层。储集层类型包括鲕粒滩储集层、白云岩储集层和风化壳岩溶储集层, 其中鲕粒滩储集层和白云岩储集层受后期构造运动影响, 易形成风化壳岩溶储集层。该区以风化壳岩溶裂缝型储集层为主, 发育 II 类和 III 类裂缝。浅埋区寒武系热储顶面埋深 500~2500 m, 奥陶系热储顶面埋深 100~2000 m, 呈北西和北东向展布。

2) 南华北盆地东部地热田大地热流平均值为 56.54 mW/m^2 , 盖层地温梯度的平均值为 $2.69 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$; 浅埋区寒武系和奥陶系热储顶面温度为 $30\sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$, 深埋区热储温度大于 $70 \text{ }^\circ\text{C}$, 显示出一定的地热资源潜力。

3) 基于热储顶面埋深、盖层地温梯度和岩溶发育程度, 确立了研究区碳酸盐岩热储选区评价标准, 划分为 3 类区: I 类区为岩溶热储发育最有利区, II 类区为岩溶热储发育较有利区, III 类区为岩溶热储发育不利区。根据地热资源评价标准, 认为太康隆起南丘地区西部为南华北盆地东部岩溶热储勘探的最有利地区。该区域内热储顶面埋深小于 2500 m, 热储温度大于 $70 \text{ }^\circ\text{C}$, 且钻井揭示岩溶作用发育, 满足地热资源开发利用的条件, 是研究区地热开发利用的最有利区。

参考文献 (References)

- 白万备, 齐永安, 郭英海, 王敏, 庆国帅. 2018. 河南鲁山寒武系第二统辛集组风暴沉积及其相关的遗迹化石. 古地理学报, 20(3): 365-376. [Bai W B, Qi Y A, Guo Y H, Wang M, Qing G S. 2018. Storm deposits and relevant trace fossils from the Cambrian Series 2 Xinji Formation in Lushan area, Henan Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 20(3): 365-376]
- 陈霞, 徐辉. 1994. 华北地台奥陶系碳酸盐岩储集岩成因类型与展布. 沉积学报, 12(3): 47-55. [Chen X, Xu H. 1994. The origin and occurrence of Ordovician carbonate rock reservoir of North China platform. Acta Sedimentologica Sinica, 12(3): 47-55]
- 戴明刚, 雷海飞, 凌安航, 毛翔, 王嗣敏, 向才富. 2020. 太原地区奥陶系碳酸盐岩热储特征及勘探有利区. 天然气工业, 40(4): 143-155. [Dai M G, Lei H F, Ling A H, Mao X, Wang S M, Xiang C F. 2020. Thermal reservoir characteristics and favorable targets of Ordovician carbonate rocks in the Taiyuan area. Natural Gas Industry, 40(4): 143-155]
- 龚育龄. 2003. 中国东部渤海湾盆地热结构和热演化. 南京大学博士学位论文: 29-30. [Gong Y L. 2003. The thermal structure and evolution of the Bohai Bay Basin, Eastern China. Doctoral dissertation of Nanjing University: 29-30]
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第三版). 地球物理学报, 44(5): 611-626. [Hu S B, He L J, Wang J. 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition). Chinese Journal of Geophysics, 44(5): 611-626]
- 黄光寿, 郭丽丽, 黄凯. 2020. 河南省沉积盆地五大构造单元地热地质特征. 地质与资源, 29(2): 172-179. [Huang G S, Guo L L, Huang K. 2020. Geothermal geological characteristics of five tectonic units in the sedimentary basins of Henan Province. Geology and Resources, 29(2): 172-179]
- 黄擎宇, 刘伟, 张艳秋, 石书缘, 王坤. 2015. 白云石化作用及白云岩储层研究进展. 地球科学进展, 30(5): 539-551. [Huang Q Y, Liu W, Zhang Y Q, Shi S Y, Wang K. 2015. Progress of research on dolomitization and dolomite reservoir. Advances in Earth Science, 30(5): 539-551]
- 黄旭, 章惠, 汪新伟, 李清瑶. 2021. 渤海湾盆地南乐地热田特征及其成因分析. 地质科技通报, 40(5): 71-82. [Huang X, Zhang H, Wang X W, Li Q Y. 2021. Characteristics and mechanism analysis of geothermal field in Nanle Sub-uplift, Bohai Bay Basin. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(5): 71-82]
- 姬玉平, 魏思宇, 韩龙恺, 齐治虎. 2021. 南华北盆地亳州凸起寒武系划分及储层物性分析. 中国煤炭地质, 33(12): 20-25. [Ji Y P, Wei S Y, Han L K, Qi Z H. 2021. Cambrian system partitioning and reservoir physical property analysis in Bozhou doming, southern North China Basin. Coal Geology of China, 33(12): 20-25]
- 李定龙, 周治安, 王才会, 王桂梁. 1997. 华北地区奥陶系灰岩岩溶研究的几点思考. 世界地质, 16(1): 60-65, 100. [Li D L, Zhou Z A, Wang C H, Wang G L. 1997. Several thinkings on Ordovician limestone karst study in area of North China. World Geology,

- 16(1): 60–65, 100]
- 凌帆, 朱裕振, 周明磊, 田红军. 2017. 广域电磁法在南华北盆地长山隆起页岩气资源潜力评价中的应用. 物探与化探, 41(2): 369–376. [Ling F, Zhu Y Z, Zhou M L, Tian H J. 2017. Shale gas potential assessment of Changshan uplift area in southern North China basin by using wide field electromagnetic method. Geophysical and Geochemical Exploration, 41(2): 369–376]
- 刘波, 钱祥麟, 王英华. 1999. 华北板块早古生代构造-沉积演化. 地质科学, 34(3): 347–356. [Liu B, Qian X L, Wang Y H. 1999. Tectono-sedimentary evolution of North China plate in Early Paleozoic. Chinese Journal of Geology, 34(3): 347–356]
- 刘志龙, 朱怀亮, 胥博文, 叶高峰, 胡志明, 李文龙, 王兴元. 2020. 河南尉氏县西部地质地球物理综合解译及地热资源远景区预测. 地质论评, 66(5): 1446–1456. [Liu Z L, Zhu H L, Xu B W, Ye G F, Hu Z M, Li W L, Wang X Y. 2020. Comprehensive geological and geophysical interpretation and geothermal resources prospection of western Weishi County, Henan Province. Geological Review, 66(5): 1446–1456]
- 彭涛, 孙建锋, 刘凯祥, 吴基文. 2018. 淮南煤田现今地温场特征及热储分析. 安徽理工大学学报(自然科学版), 38(2): 16–21. [Peng T, Sun J F, Liu K X, Wu J W. 2018. Analysis of the characteristics of current geothermal field and geothermal bearing in Huainan Coalfield. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 38(2): 16–21]
- 齐玉峰, 王文娟, 李尧. 2020. 地质构造对黄河下游(河南段)地热分布的影响分析. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 41(5): 67–72. [Qi Y F, Wang W J, Li Y. 2020. Analysis of the influence of geological structure on geothermal distribution in lower reaches of the Yellow River in Henan Province. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 41(5): 67–72]
- 任鸿飞, 朱怀亮, 闫晋龙, 王少辉. 2019. 太康隆起尉氏段地热资源勘探远景分析. 矿产与地质, 33(3): 502–507. [Ren H F, Zhu H L, Yan J L, Wang S H. 2019. Analysis on exploration prospect of geothermal resources in Weishi section of Taikang uplift. Mineral Resources and Geology, 33(3): 502–507]
- 任静, 申鹏凯, 王广华, 石兰君, 孟冲. 2023. 河南通许凸起(通许段)岩溶热储特征及开发利用潜力评价. 矿产勘查, 14(2): 190–203. [Ren J, Shen P K, Wang G H, Shi L J, Meng C. 2023. Study on Karst geothermal resources in middle part of the Tongxu uplift (Tongxu section) in Henan Province. Mineral Exploration, 14(2): 190–203]
- 邵炳松, 石峰, 刘志龙, 阮传侠, 朱怀亮, 邱京卫, 辛玉齐, 李鹏. 2023. 大地电磁测深法在太康隆起西部地热资源勘查中的应用研究. 物探化探计算技术, 45(3): 379–388. [Shao B S, Shi F, Liu Z L, Ruan C X, Zhu H L, Qiu J W, Xin Y Q, Li P. 2023. Application of the magnetotelluric sounding method in the exploration of geothermal resources in the West of the Taikang uplift. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 45(3): 379–388]
- 时国. 2010. 南华北地区奥陶系层序地层与层序格架内古岩溶研究. 成都理工大学博士学位论文: 32–91. [Shi G. 2010. Study on sequence stratigraphy and Palaeokarst characteristics within sequence stratigraphic framework of Ordovician around southern North China. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology: 32–91]
- 汪新伟, 王婷灏, 张瑄, 毛翔, 罗璐, 王迪, 武明辉. 2019. 太原盆地西温庄地热田的成因机制. 地球科学, 44(3): 1042–1056. [Wang X W, Wang T H, Zhang X, Mao X, Luo L, Wang D, Wu M H. 2019. Genetic mechanism of Xiwenzhuang geothermal field in Taiyuan Basin. Earth Science, 44(3): 1042–1056]
- 汪新伟, 王婷灏, 李海泉, 张瑄, 罗璐, 刘慧盈, 王嗣敏, 向才富. 2022. 太原盆地岩溶地热系统的形成演化及其地热资源潜力. 中国地质, 49(3): 716–731. [Wang X W, Wang T H, Li H Q, Zhang X, Luo L, Liu H Y, Wang S M, Xiang C F. 2022. Evolution of karst geothermal system and its geothermal resource potential in Taiyuan Basin. Geology in China, 49(3): 716–731]
- 王迪, 国殿斌, 汪新伟, 毛翔, 罗璐. 2020. 河南清丰地区岩溶热储地地质特征. 东北石油大学学报, 44(1): 32–43, 7. [Wang D, Guo D B, Wang X W, Mao X, Luo L. 2020. Characteristics of geothermal geology of karst geothermal reservoir in Qingfeng Area, Henan. Journal of Northeast Petroleum University, 44(1): 32–43, 7]
- 王建坡, 汪啸风. 2025. 中国奥陶纪地理分区的再认识. 古地理学报, 27(1): 16–31. [Wang J P, Wang X F. 2025. Re-understanding of the Ordovician geographical division in China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27(1): 16–31]
- 王婷灏, 汪新伟, 张瑄, 毛翔, 王迪, 武明辉. 2020. 太原盆地岩溶热储地热资源评价. 现代地质, 34(2): 297–308. [Wang T H, Wang X W, Zhang X, Mao X, Wang D, Wu M H. 2020. Geothermal resources evaluation of karst thermal reservoir in Taiyuan Basin. Geoscience, 34(2): 297–308]
- 魏思宇, 周志, 李世臻, 石砥石, 徐秋晨. 2022. 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. 天然气勘探与开发, 45(4): 10–19. [Wei S Y, Zhou Z, Li S Z, Shi D S, Xu Q C. 2022. Characteristics and main influential factors of the Cambrian carbonate reservoirs in Bozhou Uplift, southern North China Basin. Natural Gas Exploration and Development, 45(4): 10–19]
- 胥博文, 朱怀亮, 石峰, 刘志龙, 王少辉, 王兴元, 辛玉齐. 2019. 太康隆起东段地热资源远景区调查评价与研究. 物探化探计算技术, 41(4): 476–484. [Xu B W, Zhu H L, Shi F, Liu Z L, Wang S H, Wang X Y, Xin Y Q. 2019. Investigation and evaluation of the geothermal resources prospective areas in Eastern region of Taikang uplift. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 41(4): 476–484]
- 徐汉林, 赵宗举, 杨以宁, 汤祖伟. 2003. 南华北盆地构造格局及构造样式. 地球学报, 24(1): 27–33. [Xu H L, Zhao Z J, Yang Y N, Tang Z W. 2003. Structural pattern and structural style of the southern North China Basin. Acta Geoscientia Sinica, 24(1): 27–33]
- 徐胜平. 2014. 两淮煤田地温场分布规律及其控制模式研究. 安徽理工大学博士学位论文: 57–108. [Xu S P. 2014. Study on the distribution law and control mode of geothermal field in Huainan-Huai-

- bei coalfield. Doctoral dissertation of Anhui University of Science & Technology: 57–108]
- 闫晋龙,孙健,王少辉,郑家富. 2020. 河南通许凸起东部(睢县—商丘段)地热田热储特征及资源评价. 矿产勘查,11(4): 804–810. [Yan J L, Sun J, Wang S H, Zheng J F. 2020. Characteristics and evaluation of geothermal resources in the east of Tongxu uplift (Suixian-Shangqiu division) geothermal field, Henan. Mineral Exploration, 11(4): 804–810]
- 杨婷婷,许光泉,何玉鹏,王凯,张著. 2024. 安徽淮南舜耕山奥陶系古溶洞发育特征及成因. 古地理学报,26(3): 620–631. [Yang T T, Xu G Q, He Y P, Wang K, Zhang Z. 2024. Developmental characteristics and formation of the Ordovician paleocaves in Shungeng mountain, Huainan of Anhui Province, China. Journal of Palaeogeography, 26(3): 620–631]
- 余和中. 2005. 华北板块东南缘油气成藏条件分析. 中国地质大学(北京)博士论文: 12–48. [Yu H Z. 2005. Analyzing on conditions of oil and gas accumulation in the Southern-East of North China Plate. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing): 12–48]
- 喻广建,任鸿飞,孙健,张宁. 2023. 河南省含煤地层区中深层地热资源潜力研究. 矿产勘查,14(2): 183–189. [Yu G J, Ren H F, Sun J, Zhang N. 2023. Study on geothermal resource potential in middle and deep strata of coal-bearing strata in Henan Province. Mineral Exploration, 14(2): 183–189]
- 张鹏,王良书,刘绍文,李成,丁增勇. 2007. 南华北盆地群地温场研究. 地球物理学进展,22(2): 604–608. [Zhang P, Wang L S, Liu S W, Li C, Ding Z Y. 2007. Geothermal field in the south Huabei basins. Progress in Geophysics, 22(2): 604–608]
- 章惠,汪新伟,周总瑛,贺婷婷,刘晓红,黄旭,高楠安. 2024. 渤海湾盆地内黄隆起东斜坡奥陶系岩溶热储地热资源评价. 现代地质,38(2): 398–408. [Zhang H, Wang X W, Zhou Z Y, He T T, Liu X H, Huang X, Gao N A. 2024. Geothermal resource evaluation of the Ordovician karst reservoir in the east slope of Neihuang uplift, Bohai bay basin. Geoscience, 38(2): 398–408]
- 章森桂,张允白,严惠君. 2015. 《中国地层表》(2014)正式使用. 地层学杂志,39(4): 359–366. [Zhang S G, Zhang Y B, Yan H J. 2015. Introduction to the Stratigraphic Chart of China(2014). Journal of Stratigraphy, 39(4): 359–366]
- 赵宗举. 2008. 海相碳酸盐岩储集层类型、成藏模式及勘探思路. 石油勘探与开发,35(6): 692–703. [Zhao Z J. 2008. Types, accumulation models and exploration concepts of marine carbonate reservoirs. Petroleum Exploration and Development, 35(6): 692–703]
- 郑德顺,杨东亮,杨文涛,李雨. 2019. 豫西鲁山地区寒武系辛集组沉积环境及其控制因素. 现代地质,33(3): 604–614. [Zheng D S, Yang D L, Yang W T, Li Y. 2019. Sedimentary environment and controlling factors of the Cambrian Xinji Formation, Lushan area, western Henan. Geoscience, 33(3): 604–614]
- 周颖,杜利,魏广仁,商敬超. 2023. 南华北南缘长山隆起斜坡带寒武系岩溶地热资源特征. 石化技术,30(9): 184–186. [Zhou Y, Du L, Wei G R, Shang J C. 2023. Geothermal Resource Characteristics of Cambrian Karst in the Slope Zone of Changshan Uplift, Southern Margin of South North China. Petrochemical Industry Technology, 30(9): 184–186]
- 朱茂炎,孙智新,杨爱华,袁金良,李国祥,周志强,张俊明. 2021. 中国寒武纪岩石地层划分和对比. 地层学杂志,45(3): 223–249. [Zhu M Y, Sun Z X, Yang A H, Yuan J L, Li G X, Zhou Z Q, Zhang J M. 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Cambrian in China. Journal of Stratigraphy, 45(3): 223–249]

(责任编辑 李新坡)