



## 菏泽凸起北部兰聊断裂分段特征及其对岩溶热储的控制

章 惠<sup>1</sup>, 汪新伟<sup>1</sup>, 钱恪然<sup>2</sup>, 隋少强<sup>1</sup>, 唐 果<sup>1</sup>, 贺婷婷<sup>1</sup>, 乔 勇<sup>3</sup>

1. 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;  
3. 水电水利规划设计总院, 北京 100120

**摘要:** 基于地震、钻测录井及其他生产测试资料, 采用定性分析和定量研究相结合的方式对菏泽凸起北部兰聊断裂生长过程进行反演, 并探讨其对岩溶热储的控制作用。研究表明, 菏泽凸起北部兰聊断裂在演化过程中呈现三段式结构, 具有早期分段-晚期连锁的特征。沙河街组沉积初期, 断层分段特征初见雏形; 到沙三段沉积期, 各个断层分段明显, 具有独立正断层位移分布特征; 至沙二段-东营组沉积期, 各个断层侧向生长最终连接为一条大断裂。断层分段特征的差异性对研究区岩溶热储的空间展布、热传递差异和产能具有重要的控制作用。断层演化过程中, 中部 2 号断裂系总垂直位移相对于南部 1 号断裂系和北部 3 号断裂系更大, 剖面上为顺向排列的滚动半地堑构造组合样式, 菏泽凸起隆升更明显, 局部基岩剥蚀严重。该部位岩溶热储具有埋藏浅、岩溶裂缝发育、盖层平均地温梯度高、产能较好的特点, 是地热勘探开发的最有利区域。

**关键词:** 岩溶热储; 地热勘探; 断层分段; 兰聊断裂; 菏泽凸起

## SEGMENTATION CHARACTERISTICS OF LANLIAO FAULT IN NORTHERN HEZE UPLIFT AND ITS CONTROL ON KARST GEOTHERMAL RESERVOIR

ZHANG Hui<sup>1</sup>, WANG Xin-wei<sup>1</sup>, QIAN Ke-ran<sup>2</sup>, SUI Shao-qiang<sup>1</sup>, TANG Guo<sup>1</sup>, HE Ting-ting<sup>1</sup>, QIAO Yong<sup>3</sup>

1. Sinopec Star Co., Ltd., Beijing 100083, China; 2. Petroleum Exploration and Development Institute, Sinopec, Beijing 100083, China;  
3. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China

**Abstract:** Based on the seismic, drill logging and other production test data, the qualitative analysis and quantitative study are used for inversion of the growth process of Lanliao fault in northern Heze uplift, as well as its control effect on karst geothermal reservoir. The results show that the evolution of Lanliao fault can be divided into three stages, characterized by segmentation in early stage and linkage in late stage. In the early sedimentary stage of Shahejie Formation, the fault segmentation began to appear. Through the depositional stage of Sha-3 Member, each fault segmentation was obvious with the displacement characteristics of independent normal fault. To the depositional stage of Sha-2 Member-Dongying Formation, the fault segmentations grew laterally and eventually connected as a large fault. The difference of fault segmentation characteristics is significant to control the spatial distribution, heat transfer and productivity of karst geothermal reservoir in the study area. During the evolution of the faults, the total vertical displacement of No. 2 fault system in the middle is larger than that of No. 1 fault system in the south and No. 3 fault system in the north, showing a rolling half-graben structure association pattern in a forward arrangement in the profile,

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-06-27. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国石化集团科技部项目“河南沿黄地区‘地热+’洁净能源开发技术研究”(JKL21003); “鲁豫苏皖结合部碳酸盐岩热储选区评价研究”(KLJP23008); “缝洞型岩溶热储传热与热被偿机理研究”(GKL20002).

作者简介: 章惠(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事地热地质与地球物理勘探相关工作, 通信地址 北京市海淀区北四环中路 263 号, E-mail//zhanghui714@126.com.

and the rise of Heze uplift is more obvious with serious bedrock denudation partially. The karst geothermal reservoir in the area is characterized by shallow burial, developed karst fracture, high average geothermal gradient of cap rock and good productivity, which is the most favorable for geothermal exploration and development.

**Key words:** karst geothermal reservoir; geothermal exploration; fault segmentation; Lanliao fault; Heze uplift

## 0 引言

国内外对于断裂生长特征的研究已经十分丰富,断层分段被认为是一种常见的构造现象<sup>[1-5]</sup>。目前,相关学者对断层分段特征的研究主要采用定性分析和量化研究两种手段,其具体的方法包括基于构造变形和运动引起的断裂平面展布特征和剖面特征的定性分析、野外露头观察、断裂生长指数、垂直位移分析、断层活动速率、断层位移-长度关系、断面埋深等值线、“四图一剥”等<sup>[6-11]</sup>。兰聊断裂作为东濮凹陷和菏泽凸起的边界断裂,前人主要采用垂直位移分析法和断层活动速率法对其生长演化进行了定量研究<sup>[12-15]</sup>,认为兰聊断裂是由北部的临清段、中部的东濮段和南部的中牟段3条大断裂组成的。同时指出<sup>[16-19]</sup>兰聊断裂中部东濮段以毛岗和白庙为界,分为北段、中段和南段3条断裂,而前人对北段断裂生长演化并未开展系统的定性分析和量化研究。

菏泽凸起北部受北段断裂控制,已有钻井揭示该区以奥陶系岩溶裂隙型热储为主,井深1 600~2 500 m,井口水温59~70℃,单井水量114~180 m<sup>3</sup>/h,展现了良好的地热资源潜力。前人研究表明,断裂具有较好的导热导水作用,断裂发育对产能有重要影响,是岩溶热储成功勘探的关键因素<sup>[20-23]</sup>。而断裂分段对岩溶热储的形成和改造作用鲜有相关的研究<sup>[24-28]</sup>,很大程度上制约了研究区地热勘探开发工作。

鉴于上述原因,笔者基于前人的研究成果,利用钻测井、地震、生产测试等基础地质和物探资料,采用定性分析和定量研究相结合的方式,对菏泽凸起北部兰聊断裂的生长过程进行反演,进而探讨断层分段对岩溶热储的改造、热传导的差异及其产能方面的控制,以期更好地了解岩溶热储的分布规律,为该区地热资源的高效勘探开发提供依据。

## 1 区域地质特征

菏泽凸起位于鲁西隆起西南部,西与东濮凹陷相

邻,北与阳谷凸起-寿张凹陷接壤,东与成武凹陷相连。整体为北东条带状的低缓凸起,南北长约110 km,东西宽约40 km(图1)。兰聊断裂作为菏泽凸起西边界的主控断层,对凸起的形成与演化具有重要的控制作用。该断裂为区域性正断层,走向北东-北北东,倾向北西,倾角约40~70°,断距约1 000~6 000 m,形成于燕山期;古近纪活动强烈,是兰聊断裂的主要活动时期,由沙河街组四段(沙四段)沉积期、沙三段沉积期和沙二段-东营组沉积期3个裂陷幕组成<sup>[12,15]</sup>。其中,沙四段沉积期是裂陷初始阶段,断层活动弱,对菏泽凸起控制作用不明显;沙三段沉积期是裂陷强烈阶段,断裂下降盘沉降量很大,菏泽凸起隆升明显;沙二段-东营组沉积期是裂陷萎缩阶段,对菏泽凸起形成具有积极的改造作用。到东营组沉积末期受华北运动影响,菏泽凸起区地层整体抬升,局部剥蚀严重,形成了下覆地层与新近系间的不整合接触。

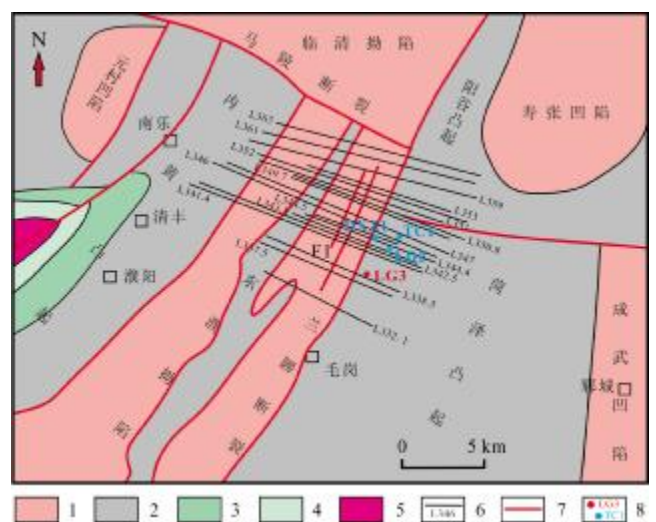


图1 研究区构造位置和测线分布图

Fig. 1 Tectonic location and survey line distribution in the study area

1—中生界(Mesozoic); 2—二叠系(Permian); 3—奥陶系(Ordovician); 4—寒武系(Cambrian); 5—太古宇(Archean); 6—地震测线(seismic line); 7—断裂(fault); 8—油井/地热井(oil well/ geothermal well)

研究区地层展布受兰聊断裂控制存在较大的差异<sup>[12-13, 29-30]</sup>。西部为兰聊断裂下降盘,属于东濮凹陷区,地层沉积厚度较大,发育的地层序列较为齐全,包括古生界、中生界和新生界;东部为兰聊断裂上升盘,属于菏泽凸起区,地层存在不同程度的剥蚀,主要发育寒武—奥陶系、石炭—二叠系及新近系和第四系,局部地区缺失石炭—二叠系(图2)。

## 2 兰聊断裂北段分段特征

### 2.1 断裂特征定性分析

菏泽凸起北部兰聊断裂受新生代强烈构造运动影响,断裂走向及其两盘变形样式均存在一定差异,可将其分为北、中、南3段(图3)。北部为多米诺式半地堑,兰聊断层断面较为陡倾,呈平面式,上盘新生代沉积厚度较小,下盘菏泽凸起地层抬升,遭受剥蚀。中部为滚动半地堑,兰聊断层断面为铲式,上盘发生滚动掀斜运动,地层呈滚动挠曲状沉积,新生代沉积厚度大;下盘菏泽凸起地层呈背斜状隆升,剥蚀强烈,石炭—二叠系几乎剥蚀殆尽。南部为箕状断陷结构,兰聊断裂上陡下缓,上盘新生代楔形状沉积,下盘菏泽凸起地层遭受不同程度剥蚀,石炭—二叠系残存厚度不等。兰聊断裂分段特征直接影响了菏泽凸起地层样式及残存厚度的变化,中部地区地层呈背斜状沉积,剥蚀严重,而北部和南部地区地层相对较为平缓,残留石炭—二叠系。

### 2.2 断层特征定量研究

作为控盆的边界断裂,发育规模较大,延伸距离较远,一般由多个断层段组成,其演化过程具有早期分段,晚期连锁的特征。在断裂活动早期,沿走向上表现为独立的断层段,各个断层具有独立的位移分布特征,到断裂活动晚期,独立的断层段开始侧向生长,逐渐连锁为一条断裂,表现为中央位移大,两边位移小的统一断裂系统<sup>[31-34]</sup>。由于正断层沿走向上存在位移的变化,可利用垂直位移分析方法对不同时期的断层生长过程进行反演。

垂直位移分析法是断裂定量研究中运用最为广泛的方法,该方法分析生长断层更为直观,尤其是对上升盘地层缺失的生长断层研究具有明显的优势。其计算公式为<sup>[35]</sup>:

$$D_v = H_d - H_u$$

其中  $D_v$  为断层沿走向上某一处的垂直位移(m);  $H_d$  为断层下降盘地层的垂直厚度(m);  $H_u$  为断层上升盘地层的垂直厚度(m)。

为精确计算兰聊断裂北段断层沿走向上的垂直位移,以区域地质演化阶段为参考,依据现有二维地震数据(图1)分别读取沙四段沉积期、沙三段沉积期和沙二段—东营组沉积期的双程旅行反射时间,利用时深关系得到沿断裂走向上不同时期的垂直位移(图4),并剖析不同期次的半地堑在平面上的展布特征(图5)。

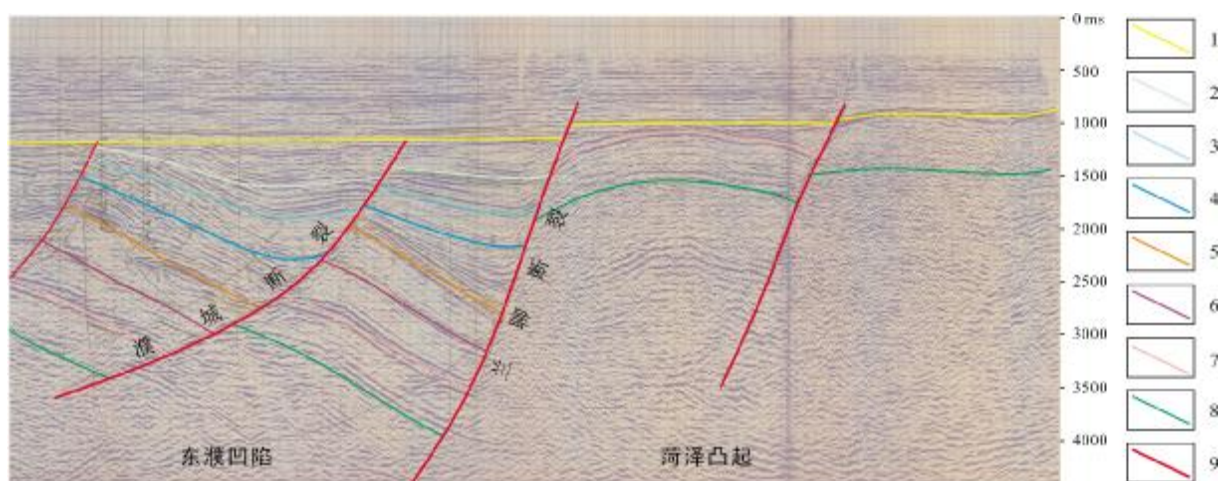


图2 过兰聊断裂测线 L342.5 地震解释剖面图

Fig. 2 Seismic interpretation profile of survey line L342.5 across Lanliao fault

1—第四系—新近系(Quaternary-Neogene); 2—东营组(Dongying fm.); 3—沙一段(Sha-1 mem.); 4—沙二段(Sha-2 mem.); 5—沙三段(Sha-3 mem.); 6—中生界(Mesozoic); 7—石炭—二叠系(Carboniferous-Permian); 8—寒武—奥陶系(Cambrian-Ordovician); 9—断裂(fault)



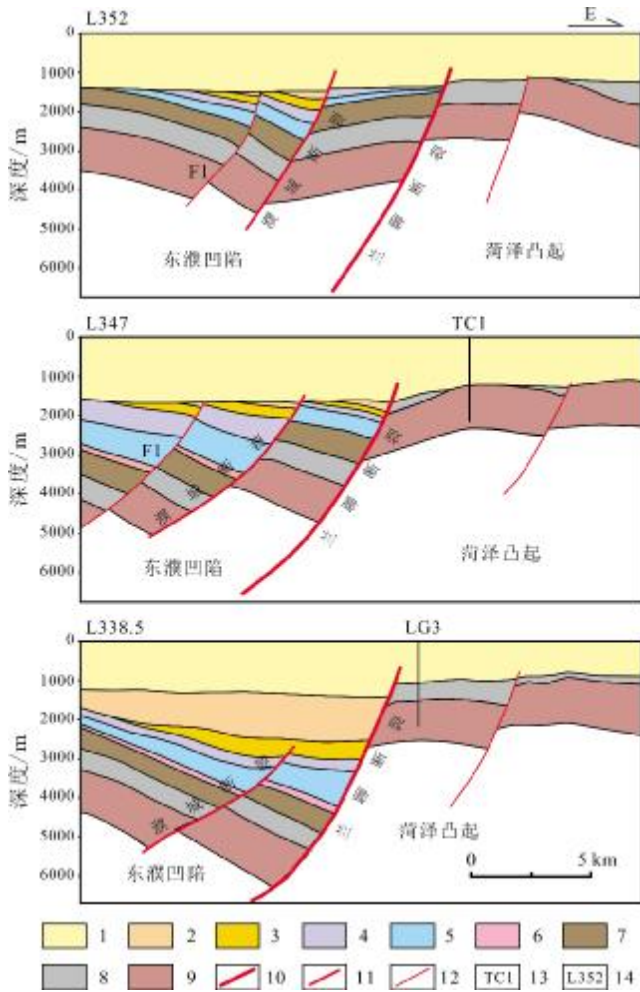


图3 横穿断裂不同测线位置的地质剖面图

Fig. 3 Geological profiles of different survey lines across the faults

1—第四系-新近系 (Quaternary-Neogene); 2—东营组 (Dongying fm.); 3—沙一段 (Sha-1 mem.); 4—沙二段 (Sha-2 mem.); 5—沙三段 (Sha-3 mem.); 6—沙四段 (Sha-4 mem.); 7—中生界 (Mesozoic); 8—石炭-二叠系 (Carboniferous-Permian); 9—寒武-奥陶系 (Cambrian-Ordovician); 10—一级断裂 (first-order fault); 11—二级断裂 (second-order fault); 12—三级断裂 (third-order fault); 13—井位 (well location); 14—测线号 (survey line)

图4和图5显示,沙四段沉积期为兰聊断裂北部断层的初始裂陷阶段,断层活动较弱,沿断层走向上垂直位移小于500 m。地震测线L338.5到L341.4之间存在垂直位移的极小值,而地震测线L347往北垂直位移为零,这表明在沙四段沉积期,兰聊断裂北段可进一步划分为1号断层和2号断层,而3号断层在该时期并不发育。此时,北段断层的分段演化特征已初步显现。沙三段沉积期为兰聊断裂北部断层的主要裂陷阶

段,断层活动较强,地层沉积厚度较大,沿断裂走向上垂直位移最大约1500 m。此时,兰聊断裂北段被分隔为3条次级断层。地震测线L337.5附近断层垂直位移最大,往北至L341.4附近断层垂直位移逐渐减小,至L347以北沿断裂走向上开始有一定的垂直位移。1号断层和2号断层具有明显的独立位移分布特征且活动强度大;而3号断层活动很弱,沿断裂走向上垂直位移最大不到100 m,不具独立正断层位移形态,推测此处为兰聊断裂东濮段和临清段的断裂分段点,这与前人的研究成果也是相一致的<sup>[12-15]</sup>。沙二段—东营组沉积期为兰聊断裂北部断层的连锁阶段,断层分段特征开始减弱,逐渐连成一条大断裂。此时,1号断层处垂直位移最大约2000 m,向南和向北断层垂直位移逐渐减小,表现为典型的正断层特征,即沿断裂走向上仅有一个沉降中心,具有统一的断裂系统。

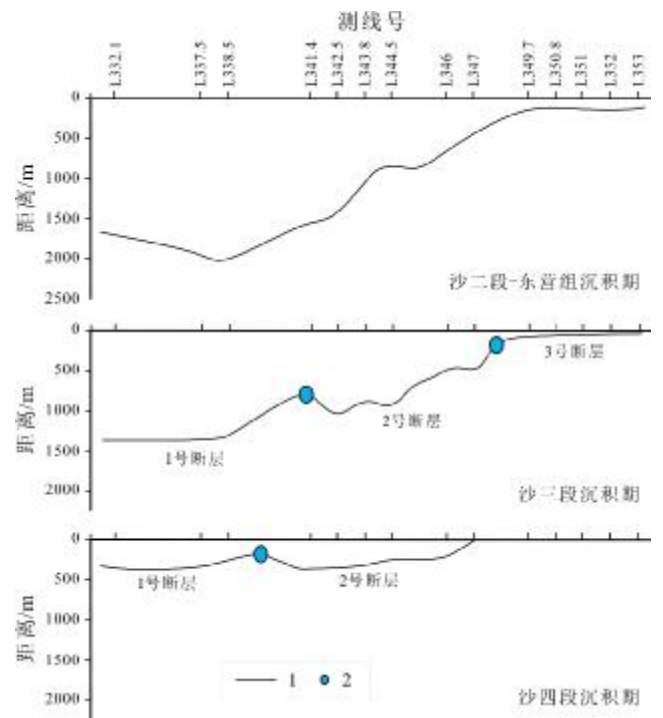


图4 兰聊断裂北段沿走向垂直位移分布图

Fig. 4 Vertical displacement distribution of northern Lanliao fault along the strike

1—位移曲线 (displacement curve); 2—垂直位移极小值 (minimum of vertical displacement)

### 2.3 断裂活动差异性及位移传递

不同时期断层生长特征表明,兰聊断裂北段是各个分段断层多期活动耦合的结果。采用断层活动速率

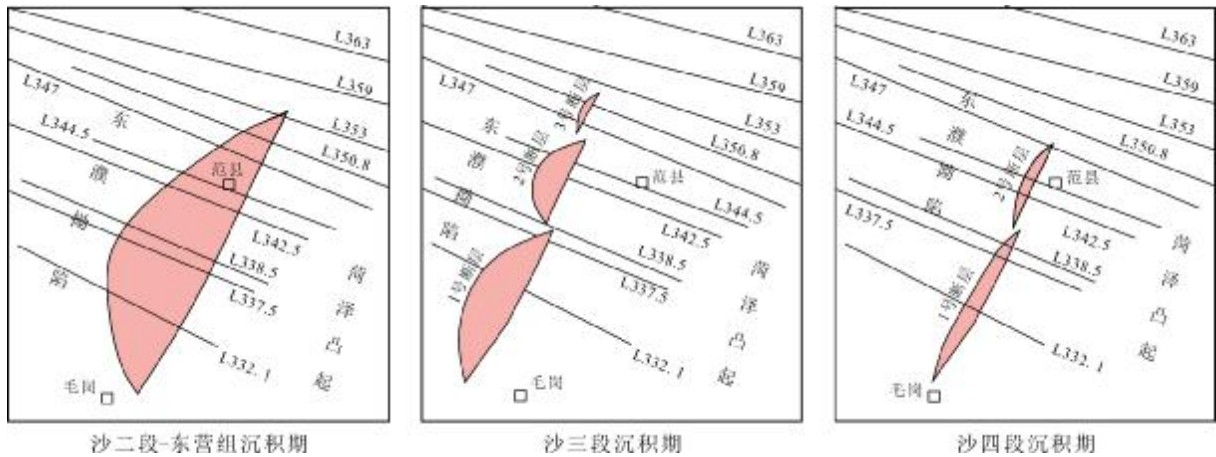


图 5 不同时期半地堑平面分布图

Fig. 5 Plane distribution maps of half-graben in different stages

法以突出地质时间的概念,进而更好地分析断层活动性(图 6). 纵向上,沙河街组沉积时期断裂活动强烈,尤其是沙三段沉积期,断裂活动强度达 200 m/Ma,地层呈楔形状沉积,厚度变化较大. 东营组沉积时期,断裂活动减弱,由早期的沉积断陷期转为沉积拗陷期,地层沉积范围扩大,构造均一化程度增加,发育一个沉降中心. 横向上,不同位置断裂活动强度差异很大,3 号断裂活动速率小于 50 m/Ma,是兰聊断裂东濮段和临清段的分段点,而分段点两侧断裂活动速率较大.

不同断裂沿走向上垂直位移具有一定的差异性(图 7). 兰聊断裂在主测线 L338.5 处位移较大,往北至主测线 L347 和往南方向垂直位移有逐渐减小趋势;濮城断裂与 F1 断裂在主测线 L347 附近位移较大,往北至主测线 L361 和往南至主测线 L338.5 附近垂直位移减小至消失. 推断在断裂叠覆带内,兰聊断裂与濮城断裂之间存在明显的应力传递,两者活动强弱具有此消彼长的特点;而 F1 断裂为濮城断裂的次生断层,两者具有较好的一致性. 对 3 条断裂的垂直位移进行累加,总位移呈现中部位移量大,即 2 号断裂处位移最大,越往南部 1 号断裂和北部 3 号断裂位移量逐渐减小的特点. 在区域范围内,应变总体守恒,兰聊断裂垂直位移的减小是由于其部分位移量传递给濮城断裂和 F1 断裂. 与此同时,总位移曲线表明 2 号断裂下盘地层抬升幅度大,剥蚀作用相对更强烈.

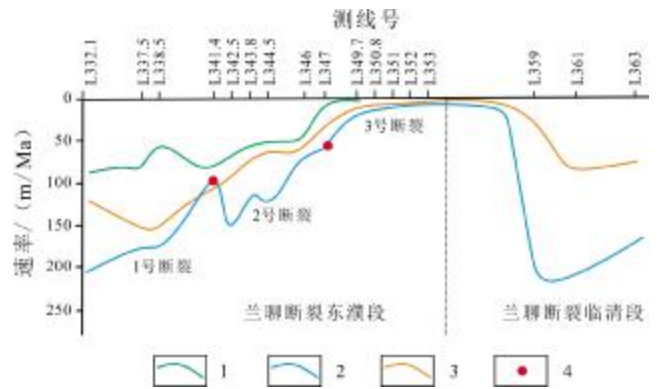


图 6 兰聊断裂北段不同时期断层活动速率图

Fig. 6 Activity rate of northern Lanliao fault in different stages 1—沙四段沉积期 (deposition stage of Sha-4 mem.); 2—沙三段沉积期 (deposition stage of Sha-3 mem.); 3—沙二段-东营组沉积期 (deposition stage of Sha-2 mem.-Dongying fm.); 4—断层分段点 (fault segmentation point)

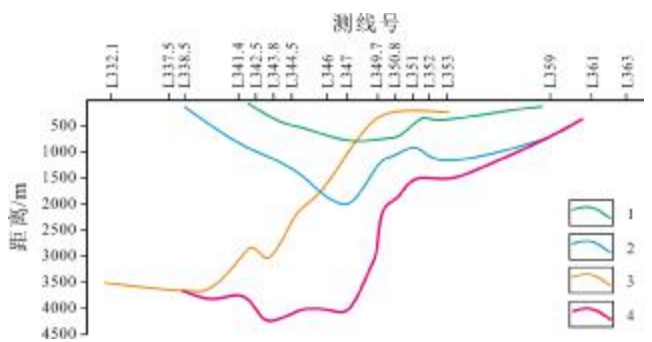


图 7 各断层系垂直总位移分布图

Fig. 7 Total vertical displacement distribution of each fault system 1—F1 断裂 (F1 fault); 2—濮城断裂 (Pucheng fault); 3—兰聊断裂 (Lanliao fault); 4—三条断裂总位移 (total displacement of three faults)

### 3 断层分段对岩溶热储控制作用

#### 3.1 对岩溶热储空间展布控制

菏泽凸起北部受兰聊断裂带多期次构造运动影响,最终形成以寒武—奥陶系岩溶热储为主要勘探层系的地热资源有利区域<sup>[36]</sup>.不同构造部位的连井对比可揭示出断层分段对岩溶热储改造作用差异性影响(图8).处于2号断裂上升盘的TC1井和DXZ1井热储顶面埋深较浅,为岩溶高地区,峰峰组遭受不同程度剥蚀,残存厚度仅60~107 m,峰峰组、上马家沟组上段上部、上马家沟组下段和下马家沟组上段上部为岩溶储层发育有利区.据TC1井测井解释结果显示:在1 073~1 603 m斜长范围内,共发育32个裂隙储层段,视厚度93.4 m.其中一类裂隙9层累计34.7 m,二类裂隙22层累计57.6 m,三类裂隙1层1.1 m,裂缝储层发育率18%.裂隙带孔隙度3.4%~14.2%,平均孔隙度10.5%.

对比1号断裂上升盘的LG3井,该区岩溶热储埋

藏较深,处于岩溶斜坡区域,峰峰组残存厚度166 m;岩溶热储主要发育于奥陶系上马家沟组上段中部和下马家沟组上段上部.据LG3测井解释结果显示:在1 644~2 274 m斜长范围内,共发育19个裂隙储层段,视厚度41.6 m.其中一类裂隙3层累计8.2 m,二类裂隙6层累计10.6 m,三类裂隙10层累计22.8 m,裂缝储层发育率6.6%,平均孔隙度2.5%.相比较而言,2号断裂活动强度大,上升盘地层剥蚀强烈,其岩溶裂缝较1号断裂上升盘更为发育,平均孔隙度高出70%,是有利的岩溶热储发育区.

#### 3.2 对岩溶热储热传递的控制

已有研究表明,基岩隆起区热阻相对凹陷区低,地壳深部热流向浅部热传导时,易在基岩隆起区聚集,形成地热异常<sup>[37-42]</sup>.不同构造部位的温度-深度曲线显示断层分段对热储温度有重要控制作用.

位于2号断裂上升盘的TC1井,温度-深度曲线呈典型的二段式线性增温结构,表现为传导型地温的

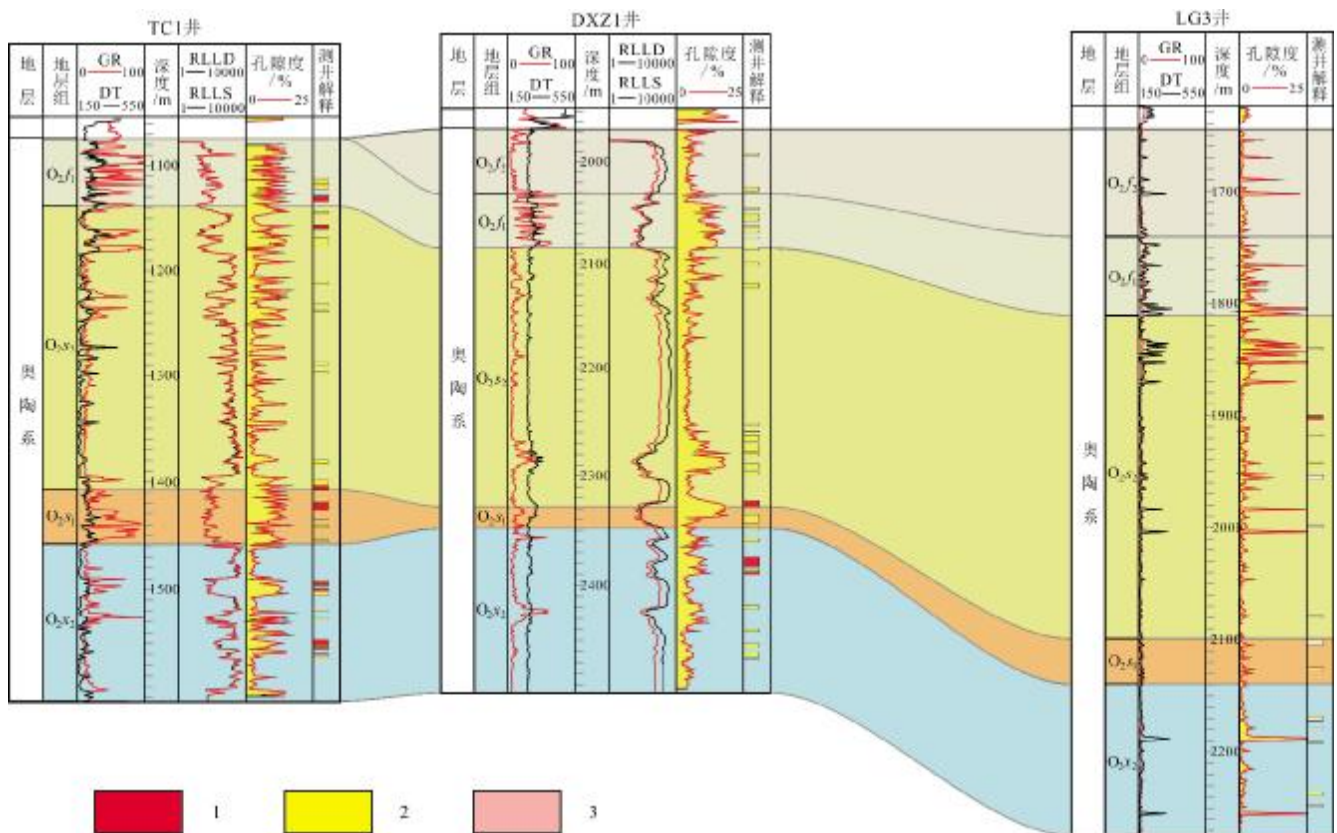


图8 菏泽凸起北部测井解释对比图

Fig. 8 Comparison of well logging interpretation in northern Heze uplift

1—一类裂缝层(Type I fissure layer); 2—二类裂缝层(Type II fissure layer); 3—三类裂缝层(Type III fissure layer)



特点;该区为基岩隆起区,地层剥蚀严重,缺失石炭—二叠系,盖层新生界平均地温梯度为  $3.66\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ,大于华北地区平均地温梯度  $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ,热封盖性能较好;热储层奥陶系平均地温梯度为  $0.91\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ,小于华北地区平均地温梯度,反映了热储段传热作用强,且温度—深度曲线显示在进入奥陶系热储后,呈明显的“左凹型”,推测该部位裂缝较为发育,受低温钻井液的影响引起地温下降(图9a).

位于1号断裂上升盘的LG3井,温度—深度曲线为直线型,属于传导型地温结构.该区发育石炭—二叠系,盖层平均地温梯度为  $2.68\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ,热储地温梯度为  $2.23\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ (图9b).对比不同构造部位的温—深曲线,兰聊断层北段分段特征是影响地温差异分布的直接原因.中部2号断层下降盘沉降量较南部1号断裂大,菏泽凸起区基岩隆起更为凸显,出现了局部的盖层高地温梯度值,即2号断裂上升盘的地热异常比1号断裂带的更高,地热异常更明显.与此同时,2号断裂上升盘热储地温梯度较1号断裂变化较慢,则反映了2号断裂岩溶裂缝更为发育,储层内部热传递较快,热储温差变化较小.

### 3.3 对岩溶热储产能的控制

结合兰聊断裂北段分段特征对菏泽凸起区奥陶系热储的空间展布和温度分布的影响,2号断裂处奥陶系岩溶热储裂隙更为发育,地热异常更为明显.基于2

号断裂地热井产量,分析不同构造部位其热储富水差异<sup>[43]</sup>.图10为利用单井产水量及其降深计算得到的奥陶系热储供液能力平面图.该区供液能力呈北东条带状展布,其中LD2单井产水量  $130\text{ m}^3/\text{h}$ ,降深  $7\text{ m}$ ,单井供液能力约  $18.6\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$ ,位于该部位的地热井供液能力强.越靠近兰聊断裂发育区,供液能力也表现出增强的趋势,其中DXZ1井单井产水量  $140\text{ m}^3/\text{h}$ ,降深  $25\text{ m}$ ,供液能力约  $5.6\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$ .而在北东条带状两翼的其他地区,供液能力逐渐减弱至  $2.0\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$ .

叠合构造等值线可知,北东条带状的地热井高产率与背斜核部的脊线相一致,推测背斜核部因轴面劈理作用产生了大量的垂直裂缝,有利于岩溶热储的溶蚀改造,进而增加了储集性能,热储富水性最好;背斜两翼裂缝发育程度较核部偏低,富水性逐渐减弱;而在背斜消失的转折端部位,应力作用最弱,裂缝发育程度最低,热储富水性最差,如TC1与DXZ1之间的过渡区.热储产能受控于储集体的发育程度,兰聊断裂北段的2号断层系垂直位移较大,应力作用较强,热储裂缝更为发育,对产能有积极的贡献作用.而1号断裂和3号断裂为背斜翼部及转折端消失的部位,应力作用较弱,热储裂缝发育程度有限,对产能存在一定影响.

## 4 结论

基于断裂定性分析和定量研究对兰聊断裂北段断

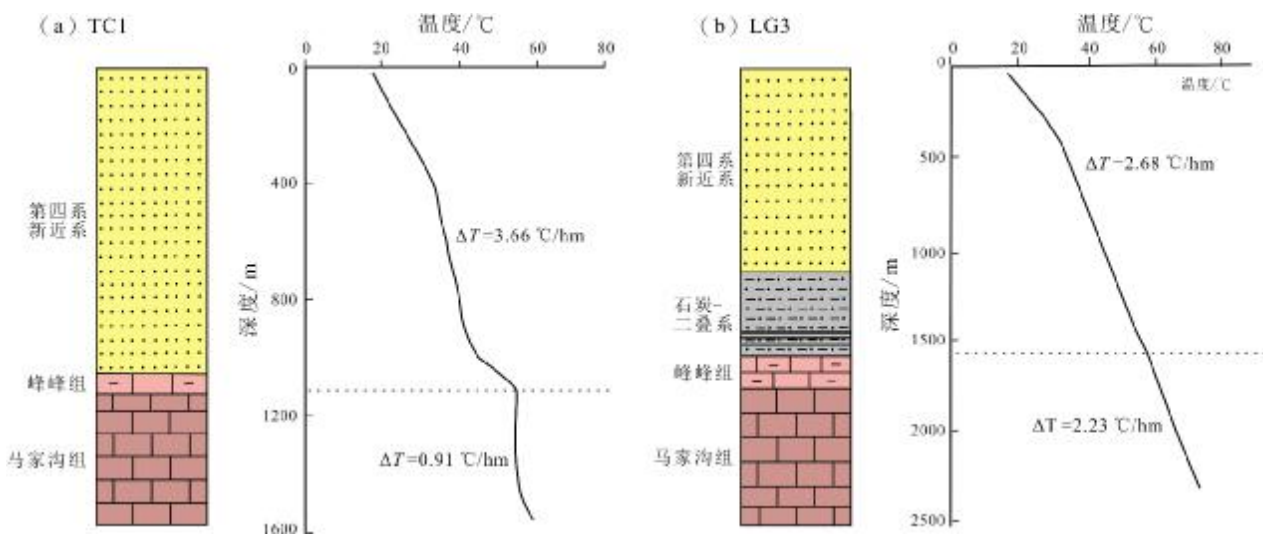


图9 菏泽凸起北部单井深度—温度分布图

Fig. 9 Temperature vs. depth diagram of single well in northern Heze uplift

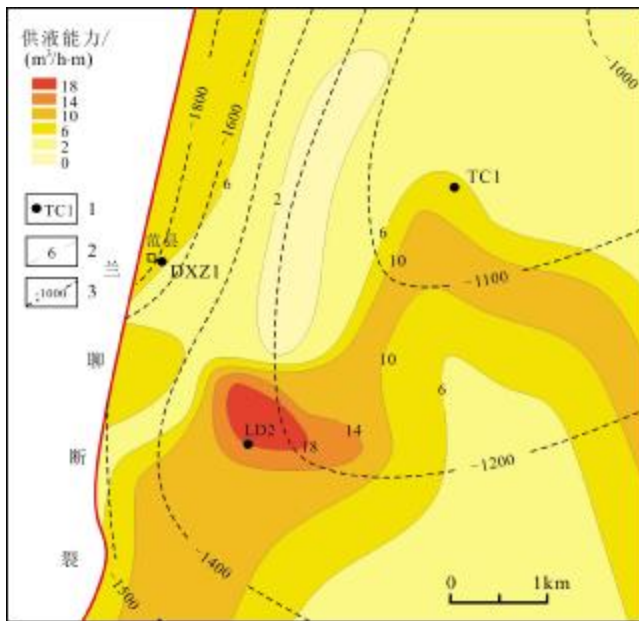


图 10 兰聊断裂北段中部奥陶系热储供液能力平面分布图

Fig. 10 Plane distribution map of fluid supply capacity of Ordovician thermal reservoir in the central part of northern Lanliao fault

1—井位 (well location); 2—供液能力等值线 (fluid supply capacity contour); 3—构造等值线 (structure contour)

层的生长演化进行了系统的研究. 通过对不同时期沿断裂走向的垂直位移和断层活动速率的分析, 揭示了兰聊断裂北段三段式断裂的时间和空间上的活动规律. 在沙河街组沉积初期, 断裂分段特征初见雏形, 沙三沉积期断裂分段较为明显, 表现为具有独立位移特征的断裂段, 沙二—东营沉积期各个断层侧向生长, 最终连接为一条大断裂, 形成中间位移大, 两边位移逐渐减小的正断层系统.

综合断层分段特征分析, 认为断层分段对奥陶系岩溶热储的空间展布、热传递差异和产能具有重要的控制作用. 兰聊断裂北段 2 号断裂下降盘沉降量大, 菏泽凸起区抬升明显, 局部基岩剥蚀严重, 热储具有埋藏浅, 岩溶裂缝发育, 地温梯度高, 产能较好的特点, 是今后地热勘探开发的最有利区域. 1 号断裂和北部 3 号断裂上升盘菏泽凸起区剥蚀程度较中部地区偏弱, 热储具有埋藏深度偏大, 地温梯度略低于基岩凸起区, 产能略低于背斜核部的特点, 是地热勘探开发的较有利区域. 建议该部位地热井的部署, 需综合考虑断层活动差异的影响及裂缝发育程度, 确保地热井的成功率.

## 参考文献 (References):

- [1] Cartwright J A, Trudgill B D, Mansfield C S. Fault growth by segment linkage: An explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah [J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17(9): 1319–1326.
- [2] Peacock D C P. Displacements and segment linkage in strike-slip fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(9): 1025–1035.
- [3] Davis K, Burbank D W, Fisher D, et al. Thrust-fault growth and segment linkage in the active Ostler fault zone, New Zealand [J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(8): 1528–1546.
- [4] 杜彦男, 吴孔友, 刘寅, 等. 断陷盆地边界断裂结构特征及物性差异定量评价: 以车镇凹陷埕南断裂为例 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2020, 56(3): 405–417.  
Du Y N, Wu K Y, Liu Y, et al. The development of fault zone architecture of deep buried boundary faults in the rift basin: A case from the Chengnan fault of the Chezhen depression [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2020, 56(3): 405–417.
- [5] Trudgill B, Cartwright J. Relay-ramp forms and normal-fault linkages, Canyonlands National Park, Utah [J]. *GSA Bulletin*, 1994, 106(9): 1143–1157.
- [6] 柏道远, 李彬, 李银敏, 等. 湖南常德—安仁断裂印支期构造运动分段性: 来自花岗岩的约束 [J]. *地质科技通报*, 2021, 40(5): 173–187.  
Bai D Y, Li B, Li Y M, et al. Segmentation of the movement in Indosinian of the Changde-Anren fault in Hunan: Constraints from granite [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(5): 173–187.
- [7] 王海学, 吕延防, 付晓飞, 等. 裂陷盆地转换带形成演化及其控藏机理 [J]. *地质科技情报*, 2013, 32(4): 102–110.  
Wang H X, Lü Y F, Fu X F, et al. Formation, evolution and reservoir-controlling mechanism of relay zone in rift basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(4): 102–110.
- [8] Peacock D C P, Sanderson D J. Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(6): 721–733.
- [9] 雷宝华. 生长断层活动强度定量研究的主要方法评述 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(9): 947–956.  
Lei B H. Review of methods with quantitative studies of activity intensity of the growth fault [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(9): 947–956.
- [10] 陈刚, 戴俊生, 叶兴树, 等. 生长指数与断层落差的对比研究 [J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29(3): 20–23.  
Chen G, Dai J S, Ye X S, et al. A comparison of the fault growth index with fault throw [J]. *Journal of Southwest Petroleum University* 2007, 29(3): 20–23.
- [11] Muraoka H, Kamata H. Displacement distribution along minor fault traces [J]. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5(5): 483–495.



- [12]施发剑. 兰聊断裂带的形成与演化[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.  
Shi F J. The formation and evolution of Lanliao fault zone[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [13]余海波, 程秀申, 徐田武, 等. 东濮凹陷古近系构造特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(3): 42-52.  
Yu H B, Cheng X S, Xu T W, et al. Paleogene tectonic characteristics and their controlling effect on hydrocarbon accumulation in Dongpu Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(3): 42-52.
- [14]张亚敏, 吕延仓, 徐林丽, 等. 东濮凹陷兰聊断裂带构造演化与油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 57-60.  
Zhang Y M, Lü Y C, Xu L L, et al. Structural evolution and hydrocarbon exploration of Lanliao fault belt in Dongpu depression[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(1): 57-60.
- [15]孙思敏, 彭仕宓, 汪新文. 东濮凹陷兰聊断层的分段特征及其石油地质意义[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 26-30.  
Sun S M, Peng S M, Wang X W. Segmentation characteristics of Lanliao fault in Dongpu depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 26-30.
- [16]孙思敏, 彭仕宓, 汪新文, 等. 东濮凹陷长垣断层系中转换斜坡的特征与油气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 22-24.  
Sun S M, Peng S M, Wang X W, et al. The characteristic of relay ramps in fault system of the placanticline in Dongpu sag and their relevance to hydrocarbon exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 22-24.
- [17]孙思敏. 东濮凹陷调节构造特征[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(2): 38-41, 46.  
Sun S M. Characteristics of accommodation structures in Dongpu sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(2): 38-41, 46.
- [18]孙思敏, 彭仕宓, 汪新文. 东濮凹陷长垣断层的生长特征与半地堑演化[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 123-125.  
Sun S M, Peng S M, Wang X W. Growing characteristics of Changyuan fault and half-graben evolution in Dongpu depression[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 123-125.
- [19]尚墨翰. 东濮凹陷构造-沉积演化与油气成藏的关系[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 50-53, 57.  
Shang M H. Relationship between structural-depositional evolution and oil-gas accumulation in Dongpu sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 50-53, 57.
- [20]杨询昌, 周世海, 王成明. 山东省深部岩溶热储埋藏分布及岩溶发育特征[J]. 山东国土资源, 2013, 29(4): 8-12.  
Yang X C, Zhou S H, Wang C M. Distribution of deep karst thermal reservoir and karst development characteristics in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2013, 29(4): 8-12.
- [21]康凤新, 隋海波, 郑婷婷. 山前岩溶热储聚热与富水机理: 以济南北岩溶热储为例[J]. 地质学报, 2020, 94(5): 1606-1624.  
Kang F X, Sui H B, Zheng T T. Heat accumulation and water enrichment mechanism of piedmont karstic geothermal reservoirs: A case study of northern Jinan[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(5): 1606-1624.
- [22]刘树亮, 刘子勇, 高中显, 等. 山东地区基岩岩溶热储分布特征及资源潜力评价[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 699-708.  
Liu S L, Liu Z Y, Gao Z X, et al. Distribution characteristics and resource potential of thermal bedrock karst reservoirs in Shandong[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 699-708.
- [23]刘金侠, 毛翔, 季汉成, 等. 东濮凹陷奥陶系岩溶型热储分布特征及成因研究[J]. 地质前缘, 2017, 24(3): 180-189.  
Liu J X, Mao X, Ji H C, et al. Distribution and genesis of karstic thermal reservoir in Dongpu depression[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 180-189.
- [24]王贵玲, 张薇, 蔺文静, 等. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1074-1085.  
Wang G L, Zhang W, Lin W J, et al. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1074-1085.
- [25]毛小平, 汪新伟, 李克文, 等. 地热田热量来源及形成主控因素[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4256-4266.  
Mao X P, Wang X W, Li K W, et al. Sources of heat and control factors in geothermal field[J]. Earth Science, 2018, 43(11): 4256-4266.
- [26]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 S S, Zhu C Q, Qiu N S, et al. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2026-2035.
- [27]曹瑛倬, 鲍志东, 鲁锴, 等. 冀中坳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 Y Z, Bao Z D, Lu K, et al. Genetic model and main controlling factors of the Xiongxin geothermal field[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(4): 863-872.
- [28]汪新伟, 郭世炎, 高楠安, 等. 雄安新区牛东断裂带碳酸盐岩热储探测及其对地热勘探的启示[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 14-26.  
Wang X W, Guo S Y, Gao N A, et al. Detection of carbonate geothermal reservoir in Niudong fault zone of Xiong'an New Area and its geothermal exploration significance[J]. Geology Bulletin of China, 2023, 42(1): 14-26.
- [29]梁富康. 东濮凹陷南部沙三段沉积体系展布及岩性圈闭区带预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.  
Liang F K. Depositional system and lithologic traps in the third member of the Shahejie Formation, South of Dongpu sag[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [30]高红灿, 郑荣才, 陈发亮, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街

- 组层序地层[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 839-850.
- Gao H C, Zheng R C, Chen F L, et al. Sequence stratigraphy of the Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 839-850.
- [31] Su J B, Zhu W B, Wei J, et al. Fault growth and linkage: Implications for tectonosedimentary evolution in the Chezhen Basin of Bohai Bay, eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(1): 1-26.
- [32] Anders M H, Schlische R W. Overlapping faults, intrabasin highs, and the growth of normal faults[J]. The Journal of Geology, 1994, 102(2): 165-179.
- [33] Schlische R W. Geometry and origin of fault-related folds in extensional settings[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(11): 1661-1678.
- [34] Dawers N H, Anders M H. Displacement-length scaling and fault linkage[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17(5): 607-614.
- [35] 赵勇, 戴俊生. 应用落差分析研究生断层[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 13-15.
- Zhao Y, Dai J S. Identification of growth fault by fault fall analysis [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 13-15.
- [36] 王领法, 张尚坤, 谢寅骧, 等. 菏泽凸起地下水热资源成矿地质条件研究[J]. 菏泽师专学报, 2002, 24(2): 25-27, 35.
- Wang L F, Zhang S K, Xie Y X, et al. Study of the geological conditions of the underground hot-water resources of Heze salient[J]. Journal of Heze Teachers College, 2002, 24(2): 25-27, 35.
- [37] 赵迎冬, 甘华军, 时阳, 等. 北部湾盆地福山凹陷异常地温特征及其对油气藏的影响[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 40-46.
- Zhao Y D, Gan H J, Shi Y, et al. Characteristics of geothermal anomaly and its effect on oil and gas reservoir in Fushan sag of Beibuwan Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 40-46.
- [38] 宋铁军. 东营凹陷中央隆起带地温场建立及地热系统发育模式[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(2): 68-75.
- Zhu T J. Establishment of geothermal field and development model of geothermal system in central uplift belt of Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 68-75.
- [39] 王朱亭, 张超, 姜光政, 等. 雄安新区现今地温场特征及成因机制[J]. 地球物理学报, 2019, 62(11): 4313-4322.
- Wang Z T, Zhang C, Jiang G Z, et al. Present-day geothermal field of Xiongan New Area and its heat source mechanism [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(11): 4313-4322.
- [40] 宿宇驰, 毛小平, 张飞, 等. 沧县隆起北部地温场特征及其主控因素分析[J]. 现代地质, 2021, 35(2): 403-411.
- Su Y C, Mao X P, Zhang F, et al. Characteristics and major controlling factors of geothermal field of North Cangxian uplift [J]. Geoscience, 2021, 35(2): 403-411.
- [41] 王思琪, 张保健, 李燕燕, 等. 雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制[J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 12-21.
- Wang S Q, Zhang B J, Li Y Y, et al. Heat accumulation mechanism of deep ancient buried hill in the northeast of Gaoyang geothermal field, Xiong'an New Area [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(3): 12-21.
- [42] 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 X, Zhang H, Wang X W, 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.
- [43] 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 X W, Wang T H, Zhang X, et al. Genetic mechanism of Xiwenzhuang geothermal field in Taiyuan Basin [J]. Earth Science, 2019, 44(3): 1042-1056.