

# 渤海湾盆地埕北低凸起构造特征与数值模拟

张玟<sup>1,2</sup>

1.西安石油大学地球科学与工程学院; 2.陕西省油气成藏地质学重点实验室

DOI:10.12238/jpm.v3i10.5350

**[摘要]** 基于埕北低凸起地震资料和测井资料, 选择典型的地震剖面图, 通过研究研究区及其周边地质构造背景, 精细展开剖面解释工作, 识别分析出埕北低凸起的典型构造样式且具有的特征, 梳理出多种构造样式组合。结合区域应力场特征和地球动力学背景, 运用 Move 软件平衡剖面技术绘制构造演化史图, 进一步研究研究区构造演化历程, 共分为五个演化历程。最后采用数值模拟建立研究区潜山构造地质模型, 进行正演模拟并分析预测其岩性。

**[关键词]** 埕北低凸起; 构造特征; 构造演化; 数值模拟

Structural characteristics and numerical simulation of Chengbei low uplift in Bohai Bay Basin

Zhang Wen<sup>1,2</sup>

1. School of Earth Sciences and Engineering Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China

**[Abstract]** Based on the seismic data and logging data of Chengbei Low Uplift, typical seismic profiles are selected. Through studying the geological structure background of the study area and its surrounding areas, profile interpretation is carried out carefully, and typical structural styles and characteristics of Chengbei Low Uplift are identified and analyzed, and multiple structural style combinations are sorted out. Combined with the characteristics of regional stress field and geodynamic background, use the Move software balance profile technology to draw the tectonic evolution history map, and further study the tectonic evolution process of the study area, which is divided into five evolution processes. Finally, the geological model of buried hill structure in the study area is established by numerical simulation, and its lithology is analyzed and predicted by forward modeling.

**[Key words]** Chengbei low up-lift; structural characteristics; structural evolution; numerical simulation

## 引言

埕北低凸起位于渤海湾盆地南部, 属于浅海海域, 被埕北凹陷、桩东凹陷、渤中凹陷、沙南凹陷包围环绕, 研究区总体呈 EW 向带状形展布(图 1)。已勘探石油地质储量十分丰富, 古生界是已探明油田的重要含油层系, 呈现凸起状态构成潜山, 埕北低凸起古生界埋藏时间深, 经历多期构造运动, 产生形变历史时间长, 并且形态复杂。细致剖析其构造特征和演化史对渤海湾盆地油气勘探和开发可以奠定坚实的基础。当前, 胡贺伟主要研究埕北低凸起及周边发育比较完整的沉积“源—汇”系统<sup>[1]</sup>; 张在振分析影响断层发育的构造运动且细致梳理出三种断裂类型: 负反转断裂、走滑拉张性断裂和构造调节控制断裂。最后详细解释分析了不同类型的断裂对油藏的控制作用<sup>[2]</sup>; 袁静主要对埕北低凸起东部斜坡带古近系东营组不同埋藏深度、不同构造单元及不同沉积相类型的砂岩展开成岩作用及其与物性关系进行研究<sup>[3]</sup>; Jingxiang Guo 主要研究深湖盆地边缘阶梯斜坡上沉积物重力流沉积的相类型、分布以及主控因素<sup>[4]</sup>。各位学者清楚研究了渤海湾盆地埕北低凸起的沉积体系、沉积的相分布、主控因素等, 但是对埕北低凸起构造特征方面的研究相对较少, 鲜有涉及构造特征、构造演化及数值

模拟等方面的研究, 这在一定程度上制约了埕北低凸起油气勘探项目进程。

文章通过选取研究区典型地震剖面, 开展地震构造解释, 梳理埕北低凸起的断裂特征。然后采用软件技术恢复并探讨埕北低凸起的演化史, 并且细致分析研究埕北低凸起构造演化, 同时采用数值模拟—波动方程方法开展过工作, 对研究区典型地质构造模型进行正演模拟, 能够使我们更加清楚的了解剖面波的传播规律以及对研究区潜山岩性进行预测, 对于地震资料的解释更加快捷, 进一步推荐渤海湾盆地埕北低凸起的油气勘探进程奠定坚实的基础。

## 1 地质概况

埕北低凸起位于渤海湾盆地渤中凹陷西部, 呈北西-南东向展布, 与长堤凸起一起形成超长丝带形。研究区地理位置优越, 从南边到北边与埕子口凸起、埕北凹陷、埕北低凸起、沙南凹陷以及沙垒田凸起共同形成三隆夹两凹的构造格局。在构造方面, 研究区是一个大型潜山披覆构造带, 是在前第三系基底背景下所形成, 基底隆升分别由中生代构造地层、古生代构造地层和新古生代构造地层组成。断裂活动和大地构造运动的原因, 使得地层分布很不均一。在晚古生代时期沉积发育的碳

酸盐岩地层拥有很好的储盖优势,是基底隆起含油气系的主力军<sup>[2, 5]</sup>。

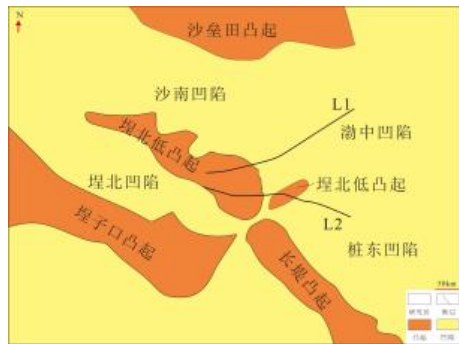


图1 坨北低凸起及邻区构造区

## 2 研究区断裂特征

坨北低凸起经历多期次构造运动,身处位置也深受郯庐断裂影响,断层和裂缝发育,对研究区油气勘探中,分析断层具有重大意义。在构造样式上,坨北低凸起主要发育犁式正断层、“Y”字形断层、雁列式断层、地堑和地垒等多种构造组合样式。

**犁式正断层:**也称为铲式正断层,是伸展裂陷构造区最重要的构造样式,是指断层由上到下逐渐变缓,形成铲状。这种断层主要发育在拉张裂陷凹陷中,在基底呈现出铲状倾斜状态,断层主断面在斜坡上方产状慢慢平缓(图2L2),呈不对称形态。研究区凹陷内部沉积数套地层,沉积地层厚度分布不均衡,并表现出离铲式断层距离越远,地层沉积厚度渐渐减薄最终形成“箕状”构造形态<sup>[6]</sup>。

**“Y”字形断层:**在张性盆地中,断层表现为相互切割,形成“Y”字形等各种断裂样式。

在地震剖面上表现为2条倾向相反的正断层(主干断层、分支断层)组成的小型地堑。依据次级断层与主干断层相对位置的差异,划分为“Y”字形和反“Y”字形断层。研究区“Y”字形断层主要分布在坨北低凸起边界位置<sup>[7, 8]</sup>。

**雁列式断层:**剖面上呈叠瓦状分布,主要分布在研究区东斜坡处,发育于太古界,大多断穿于古近系地层,呈北西-南东向展布。

**地堑和地垒:**在剖面上既可以单独出现,也有伴生在一起相间排列的,研究区地堑和地垒相间排列展布,生长一些规模较小的次生调节断层,让研究区的半地堑构造进一步复杂化,在坨北低凸起上堑-垒分布较发育<sup>[9]</sup>。

## 3 构造演化

近东西向坨北低凸起是一个大型的基底隆起区,身处特殊地理位置,位于渤海湾盆地南部,受郯庐断裂带影响,并且发育历史悠久,经历多期次构造演化形成今天的构造格局,其形成与整个渤海湾盆地的构造演化密不可分。运用 Move 软件通过平衡剖面技术绘制演化史图。研究区总共经历五个构造演化阶段:古元古代(华北地台基底形成阶段)、古生代(稳定克拉通发展阶段)、中生代(潜山开始发育阶段)、古近纪(潜山形成阶段)、新近纪(断裂埋深加大阶段)。

**古元古代(华北地台基底形成阶段):**在古元古代时期,研究区经历吕梁运动,这一运动使得太古代地层发生变形褶皱,其过程发生混合岩化、花岗岩化等变质作用,最终结局形成结晶基底。其中、新元古代发生构造抬升,随后通过漫长的风化剥蚀作用,最终变为准平面化的古地理构造格局<sup>[4]</sup>。

**古生代(稳定克拉通发展阶段):**这一阶段坨北低凸起的寒武纪和奥陶纪期间,古元古代形成的结晶基底在古生代沉积了一系列海相碳酸盐岩。坨北低凸起经历加里东造山运动,在中奥陶世末时期华北地台发生整体抬升,造成研究区缺失晚奥陶世和早石炭世地层的结果。华北地台在晚石炭世至早石炭世期间在其下伏早古生代地层上方发育了一套过渡海陆沉积<sup>[4]</sup>。

**中生代(潜山开始发育阶段):**是研究区基底隆起的初始发育阶段,研究区地层沉积主要在侏罗系和白垩系时期。这一时期研究区经历印支运动,发生区域挤压,整个华北地台遭受NE-SW向挤压作用,且基底出现褶皱、发生推覆、隆升、断层成山的情况,在坨北低凸起地区出现区域性NNW-SSE向逆冲断层<sup>[2]</sup>。在此阶段,研究区还经历了燕山期幕式运动,这一运动使得早期断裂发生构造反转,与此同时研究区收到郯庐断裂左旋走滑作用,产生NW向拉分、NE向挤压应力作用,发育数条走滑断层,平面上整体呈现出帚状分布,燕山运动对古生界的改造作用主要是断块掀斜。晚白垩世的燕山晚期造山运动形成的持续性北西-南东向挤压应力使得地层进一步发生抬升并被强烈侵蚀,断层逐渐收敛,研究区继承性凸起进一步复杂化<sup>[4]</sup>。

**古近纪(潜山形成阶段):**在古近纪喜马拉雅运动产生的区域拉张使得研究区正断层较发育,基底潜山得到一系列改造,其在新近纪早期定型。渤海湾盆地在喜马拉雅运动的作用下进入长期断陷沉降阶段,在这一阶段,坨北低凸起也发生剧烈断裂,断层活动致使坨北凸起周围出现许多断陷。随后,许多巨厚近源粗粒沉积物在此沉积填充,逐渐覆盖在外部隆起上,在渐新世晚期,低凸起逐渐被淹没变成沉积区。形成古近纪地层<sup>[1]</sup>。

**新近纪(断裂埋深加大阶段):**渤海湾盆地在近新纪进入裂谷后阶段,具有相对均匀的地层厚度特征。在这一阶段,研究区进入裂谷后阶段,也就是以热裂陷沉降和热沉降为主。由于印度-亚洲碰撞和太平洋板块相对于欧亚板块俯冲的共同作用形成了中国东部新生代构造演化<sup>[10]</sup>。这一时期,碰撞俯冲减弱,以弱构造活动为主,断层活动性减弱或者基本停止,地壳主要是均衡调节的作用,研究区呈整体下陷状态,古生代潜山被进一步深埋<sup>[11]</sup>。

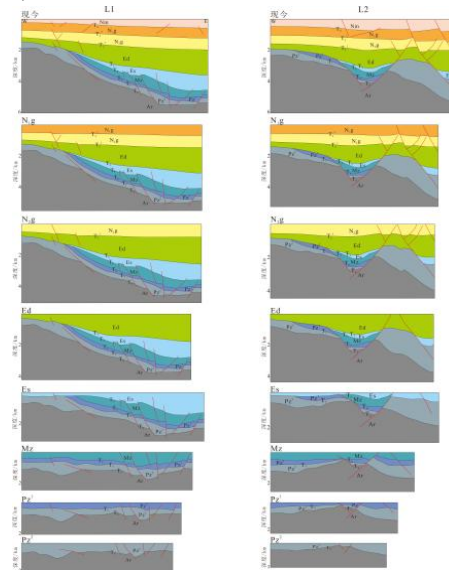


图2 坨北低凸起构造演化史图

(现今剖面据 Jingxiang Guo 等, 2021 修改)

#### 4 数值模拟

利用数值正演模拟是利用计算机把相关的地质模型先模拟出来,得到一组与理论相符合的参数。使用正演模拟建立一定的响应模式,把人工地震记录与真实的地震记录进行对比,来达到检验解释的目的,确保研究的准确性。主要通过基于波动方程所使用的有限差分法,分析它对地震波数值模拟的影响。然后根据所收集到的地质参数,利用软件建立常见的二位地震的地质模型,然后进行复杂地质构造的波场数值模拟的一系列问题。分析地震波正演模型是利用雷克子波进行实现的,因为它的参数对解释振幅、频率以及相位是非常有利的。

在深入研究研究区地质资料的情况下,建立研究区潜山构造地质模型,使用中频(30Hz)雷克子波的成像效果比较理想。根据现有地震勘探成果等,对现有地震剖面潜山构造进行研究分析预测其岩性为碳酸盐岩<sup>[11, 13]</sup>。收集相应的地层物性参数,如速度、密度等,在参照地震剖面的基础上应用 Tesserai 正演软件建立二维地质模型。

在软件上模拟出古潜山构造模型,地质模型的区间为 100 0&1000,建模时,它的速度变化范围在 1200 到 1800m/s 之间,密度在 1800 到 2400kg/m<sup>3</sup> 之间。在建模观测系统中采用中间放炮两端接收的方式。地震波的震源还是在坐标系中间,选用频率是 30Hz 雷克子波,时间间隔是 1ms,将模型开始记录的时间设为 0.004s,结束记录时间 1.6s。对地质模型进行正演模拟,模拟得到的地震波正演模拟时间剖面图,清楚的看到直达波和反射波的反射传播。经过比较参照,分析知模拟时间剖面与实际地震剖面有着较高的相似度,得知根据给定物性参数建立的模型是合理的。结果表明渤海湾盆地埋北低凸起地震正演模拟剖面与实际地震剖面较相同且预测为碳酸盐岩的结果与其他学者研究一致。

#### 5 结论

(1) 埋北低凸起主要发育犁式正断层、“Y”字形断层、雁列式断层、地堑和地垒等多种构造组合样式。雁列式断层呈北西-南东向展布,主要发育在太古界且断穿于古近系地层。研究区地垒-地堑式构造样式也较发育。

(2) 研究区受郯庐断裂带影响,经历多期次构造演化史,其形成于整个渤海湾盆地的构造演化息息相关。埋北低凸起共经历 5 个构造演化阶段:古元古代、古生代、中生代(潜山开始发育阶段)、古近纪(潜山形成阶段)以及新近纪时期。中生代潜山开始形成阶段主要经历印支运动和燕山造山运动,使得地层进一步发生抬升并被强烈侵蚀;潜山形成阶段主要经历了喜马拉雅运动,断层发育,基底潜山得到一系列改造,并在新近纪完成早期定型。

(3) 运用数值模拟中波动方程原理,建立波动方程,分析地震波数值模拟的影响,手机地质参数,用正演模拟建立相应

技术,最后建立研究区潜山构造地质模型,结果表明埋北低凸起潜山岩性育成为碎屑岩。

#### [参考文献]

- [1]胡贺伟,李慧勇,于海波,等.渤海湾盆地埋北低凸起及围区古近系“源-汇”系统控砂原理定量分析[J].古地理学报,2020,22(2):12.
- [2]张在振,张卫平,李照延,等.渤海湾盆地埋北低凸起潜山断裂特征及其控藏机制[J].海相油气地质,2014,000(002):8-14.
- [3]袁静,周涛,马立驰,景安语,孙超,吴根杰.断陷湖盆斜坡带储层差异性成岩-成储模式——以渤海湾盆地埋北低凸起东部斜坡带东营组为例[J/OL].沉积学报:1-19[2022-08-16].DOI:10.14027/j.issn.1000-0550.2021.165.
- [4]Guo J, Jiang Z, Xie X, et al. Deep-lacustrine sediment gravity flow channel-lobe complexes on a stepped slope: An example from the Chengbei Low Uplift, Bohai Bay Basin, East China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 124(2021).
- [5]郭涛,李慧勇,石文龙,等.渤海海域埋北低凸起及周围地区构造沉积特征与有利勘探目标[J].油气地质与采收率,2015(2):6.
- [6]陈彦,赵长毅,姜文亚,等.板桥斜坡第三纪构造几何学分析[J].能源与环保,2019,41(1):6.
- [7]张田,朱伟林,胡森清,陈春峰,高顺莉,陈忠云,付晓伟,钟镨.南黄海盆地中部隆起构造特征及其成因机制[J].地球科学,2021,46(10):3481-3495.
- [8]马德波,汪泽成,段书府,等.四川盆地高石梯-磨溪地区走滑断层构造特征与天然气成藏意义[J].石油勘探与开发,2018,45(5):11.
- [9]孙铁军,李庆华,王立,等.哈萨克斯坦南图尔盖盆地构造特征研究[J].石油地球物理勘探,2008(S2):8.
- [10]Ye T, Chen A, Hou M, et al. Structural Characteristic of the Bodong segment of the Tanlu Fault Zone, Bohai Sea Area, Eastern China: Implications for hydrocarbon exploration and regional tectonic evolution[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 201(2):108478.
- [11]戴俊生.埋岛油田古生界构造特征及演化[J].中国海上油气(地质),2000,14(3):4.
- [12]郭景祥.渤海湾盆地埋北低凸起东部斜坡带东三段深水重力流沉积体系研究[D].中国地质大学(北京),2020.DOI:10.27493.