

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.02.002

渤中 13-2 双层结构太古宇潜山 成藏条件分析与勘探发现

施和生¹ 牛成民² 侯明才³ 高阳东⁴ 赖维成¹ 陈安清³ 徐国盛³ 许鹏²
曹海洋³ 阎建国³

(1 中海石油(中国)有限公司勘探部; 2 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院; 3 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室; 4 中海石油(中国)有限公司深圳分公司)

摘要: 潜山已成为中国海域油气勘探的一个重要领域, 并且向大于 3500m 的深埋潜山拓展。渤中 19-6 单层太古宇变质岩潜山大气田发现之后, 多层结构的潜山成藏潜力大小成为急需解决的瓶颈。通过钻井、地震资料和地球化学数据, 开展区域地质构造演化研究及成藏条件分析, 结果表明: 基于成山成储受控于区域构造活动及其相关的裂缝作用的认识, 获得了渤中 13-2 油气田勘探发现(探明地质储量亿吨级油气当量), 证实多层结构潜山的太古宇变质花岗岩具有极好的成藏条件; 通过进一步对渤中 13-2 油气田的成藏要素分析及其与渤中 19-6 大气田的对比表明, 多期立体网状裂缝及其与供烃窗口的连通性是潜山成储—成藏的关键, 与断裂伴生的“短轴状不连续反射”可以作为太古宇潜山优质储层的识别标志; 超压宽窗供烃—多元联合输导驱动了双层结构潜山成藏, 网状连通的孔—缝体系为油气在潜山内部的运移聚集提供了有效空间。渤中 13-2 双层结构潜山油气发现, 再次证实了裂缝为主导的非沉积岩潜山勘探思路, 对中国海域潜山勘探具有重要的指导意义。

关键词: 渤中 13-2; 太古宇; 双层结构潜山; 成藏要素

中图分类号: TE122 **文献标识码:** A

Analysis of hydrocarbon accumulation conditions of double-layered Archeozoic buried hill and major discovery of Bozhong 13-2 Oil and Gasfield, Bohai sea area

Shi Hesheng¹, Niu Chengmin², Hou Mingcai³, Gao Yangdong⁴, Lai Weicheng¹, Chen Anqing³, Xu Guosheng³, Xu Peng²,
Cao Haiyang³, Yan Jianguo³

(1 Exploration Department of CNOOC Co., Ltd.; 2 Bohai Petroleum Research Institute of CNOOC (China) Co., Ltd. Tianjin Branch; 3 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology; 4 Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd.)

Abstract: Buried hill has become an important field for oil and gas exploration in sea areas of China and the exploration depth is extended to greater than 3500 m. After the major discovery of Bozhong 19-6 Gasfield in Archeozoic single-layer metamorphic buried hill, hydrocarbon accumulation potential of buried hill with multi-layered structures is another geological problem to be clarified urgently. Regional geological and tectonic evolution have been studied and hydrocarbon accumulation conditions analyzed by well, seismic and geochemical data. The result shows that the development of buried hill and reservoir is controlled by regional tectonic activities and their induced fracturing. The discovery of Bozhong 13-2 Oil and Gasfield (proven geological reserves of 100 million tons of oil equivalent) confirms that the Archeozoic multi-layered metamorphic granite buried hill has excellent hydrocarbon accumulation conditions. Further analysis on accumulation elements of Bozhong 13-2 Oil and Gasfield and comparison with those of Bozhong 19-6 Gasfield show that the multi-stage stereoscopic fracture network and effective connection with hydrocarbon supply window are the key to reservoir development and hydrocarbon accumulation in buried hill.

基金项目: 国家科技重大专项“渤海海域勘探新领域及关键技术研究”(2016ZX05024-003)。

第一作者简介: 施和生(1962-), 男, 江苏启东人, 博士, 2011年毕业于同济大学海洋地质专业, 教授级高级工程师, 主要从事石油地质学及油气勘探综合研究与管理。地址: 北京市东城区朝阳门北大街25号中国海洋石油集团有限公司, 邮政编码: 100010。E-mail: shihsh@cnooc.com.cn

收稿日期: 2021-03-05; 修改日期: 2021-03-09

The “short-axis discontinuous reflection” associated with fault is marker of Archeozoic high-quality buried hill reservoir. The combination of overpressure wide hydrocarbon supply window and multivariate migration path promotes accumulation in double-layered buried hill, and the well-connected pore-fracture system provides sufficient space for hydrocarbon migration and accumulation inside the buried hill. In conclusion, oil and gas discovery in Bozhong 13-2 double-layered buried hill confirms the effectiveness of exploration in non-sedimentary buried hill dominated by fractured reservoirs, which has great significance to buried hill exploration in China sea area.

Key words: Bozhong 13-2, Archeozoic, double-layered buried hill, hydrocarbon accumulation element

引用：施和生，牛成民，侯明才，等. 渤中 13-2 双层结构太古宇潜山成藏条件分析与勘探发现 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 12-20.
Shi Hesheng, Niu Chengmin, Hou Mingcai, et al. Analysis of hydrocarbon accumulation conditions of double-layered Archeozoic buried hill and major discovery of Bozhong 13-2 Oil and Gasfield, Bohai sea area [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 12-20.

0 引言

新生盆地之下的基底正地貌被称为潜山，潜山的油气勘探已有上百年历史。中国的潜山油气发现绝大部分都在渤海湾盆地。从最早的任丘碳酸盐岩潜山油田^[1]，到后来的辽河拗陷兴隆台变质岩潜山油田^[2]，再到如今的渤中 19-6 气田与渤中 13-2 油气田的发现，渤海的潜山成为一个重要的勘探领域^[3]。特别是渤中 19-6 气田发现促使潜山勘探由早期的浅埋潜山向埋深大于 3500m 的深埋潜山拓展。根据潜山的地层结构特征，渤中 19-6 构造属于单层潜山，即古老的太古宇经过长期的暴露剥蚀而直接被新生界覆盖的潜山^[4]。太古宇潜山储层研究表明，太古宙经历的多期构造裂缝作用及多期暴露淋滤作用是原本致密的变质花岗岩发育储集空间的关键因素，储层具有裂缝主导而成的立体网状特征^[5]。经历长期暴露的潜山山头是潜山成储—成藏的绝佳部位，但是渤海海域暴露的单层太古宇潜山较少。如何突破已有勘探模式，向多层潜山拓展是摆在勘探人员面前的难题。目前，只有陆上的辽河拗陷兴隆台、胜利埋岛等潜山内幕有油气发现，渤海海域的太古宇变质花岗岩是否发育被古生界或中生界覆盖的内幕潜山储层及其潜在的成藏机制是阻碍领域拓展的关键问题。从成藏条件来看，渤中西南环的深埋潜山处于最为有利的油气运移指向区。从断裂是控制太古宇储层发育最为关键的因素来看，渤中西南环也是最有可能在多层结构潜山中发育大型内幕太古宇储层的地区。针对上述关键勘探问题，通过系统分析裂缝成储作用和潜山成藏条件，确定出渤中 13-2 是最有可能再次获得太古宇勘探突破的潜山构造，并最终被渤中 13-2（探明地质储量亿吨级油气当量）的油气发现所证实，对下一步潜山勘探有重要的指导意义。

1 地质背景与潜山特征

渤中 13-2 构造带位于渤海湾盆地渤中凹陷西南部，北部为渤中凹陷主洼，西南、东南侧分别与埋北

低凸起、渤南低凸起相邻，距离南侧储量超千亿立方米渤中 19-6 大型凝析气田约 35km（图 1）^[6-9]。

已有钻井揭示渤中 13-2 潜山地层为双层结构，自下而上为太古宇构造层和中生界构造层，缺失古生代地层记录（图 2）。太古宇构成潜山的结晶基底，岩性以形成于距今 1.7~2.6Ga 花岗片麻岩为主，同时花岗片麻岩为该构造带主要储层。中生界直接覆盖在太古宇花岗片麻岩之上，厚度变化较大，为 100~1500m，其岩性自下而上为厚层凝灰质砂砾岩、沉凝灰岩夹凝灰岩。潜山之上依次发育新生界古近系沙河街组（Es）、东营组（Ed），新近系馆陶组（Ng）与明化镇组（Nm），以及第四系平原组（Q）。沙河街组发育暗色泥岩，为辫状河三角洲相及湖泊相沉积；东营组岩性为湖泊相及辫状河三角洲相暗色泥岩及砂岩；馆陶组岩性为辫状河砂岩；明化镇组岩性为曲流河砂岩（图 1）。

渤中 13-2 潜山整体经历了印支期—燕山早期挤压逆冲成山、燕山中期拉张反转改造、喜马拉雅期埋藏定型 3 个阶段^[3]。潜山顶面总体为南高北低，受 NE—SW 向断裂影响，潜山顶部被切割成一系列反向翘倾断块。据渤海海域“结构—成因”潜山分类方案，渤中 13-2 潜山为双层—褶皱断块型潜山^[4]。

2 烃源条件

渤中凹陷发育多套烃源岩，包括始新统沙河街组三段（沙三段）和沙河街组一段（沙一段），以及渐新统东营组三段（东三段）烃源岩^[10-11]，总厚度为 500~2500m^[8]。前人研究表明，渤中凹陷这 3 段烃源岩都具有较高的生烃潜力，其中沙三段烃源岩品质最优，TOC 平均为 2.98%，氢指数平均为 17.74mg/g，有机质类型以 II₁ 型为主；其次为沙一段烃源岩，TOC 平均为 2.53%，氢指数平均为 15.09mg/g，有机质类型以 II₁ 型为主；东三段烃源岩品质相对较差，TOC 平均为 1.78%，氢指数平均为 8.74mg/g，有机质类型以 II₁—II₂ 型为主^[8]。

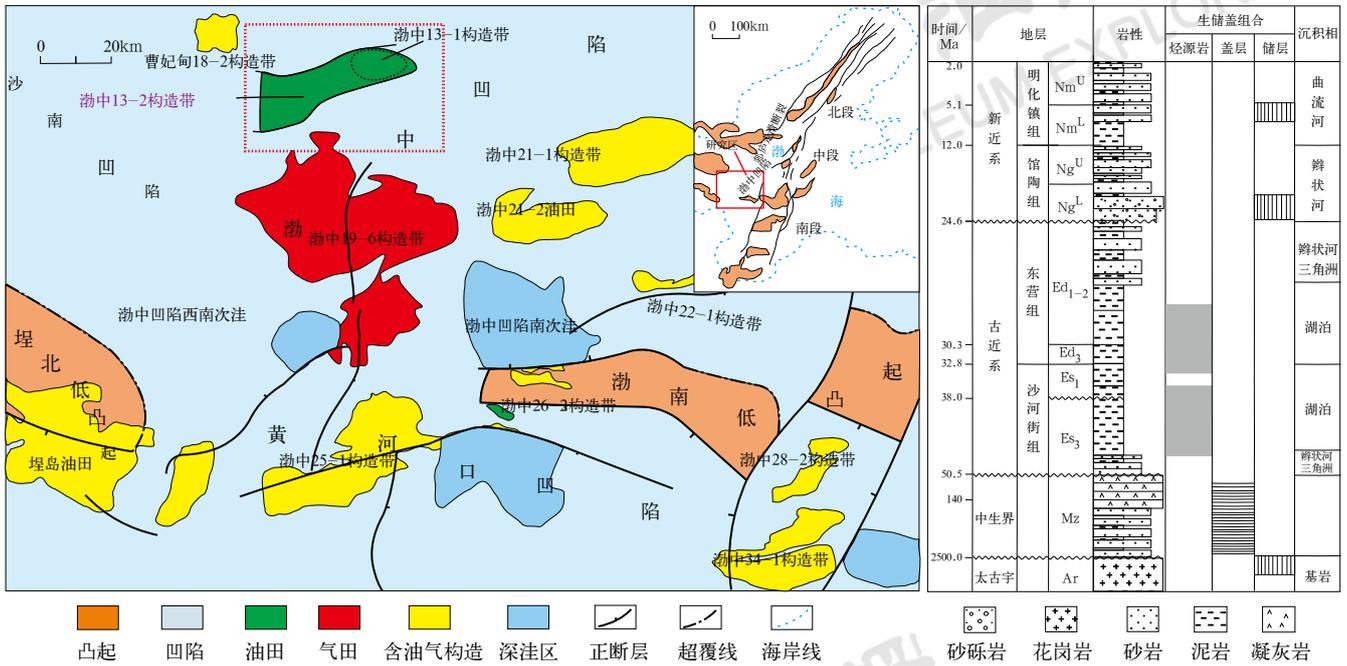


图1 渤中13-2构造带区域位置图(左)与地层综合柱状图(右)

Fig.1 Regional location map of Bozhong 13-2 structural belt (left) and comprehensive stratigraphic column (right)

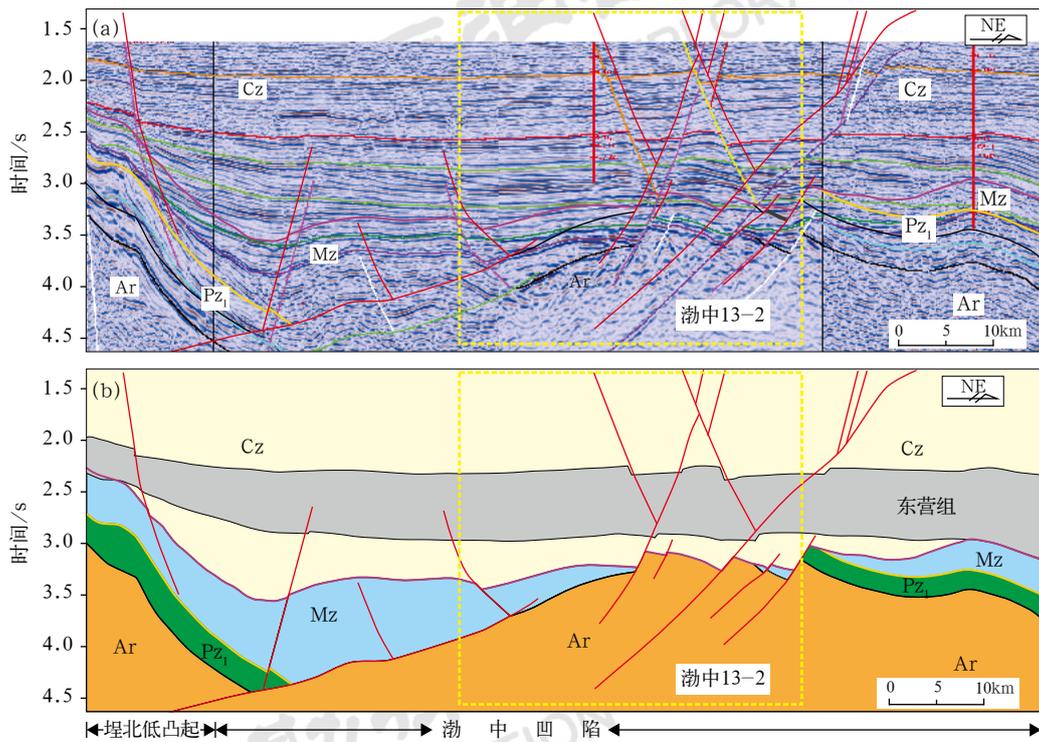


图2 渤中13-2潜山构造区结构图

Fig.2 Seismic profile and sketch geological section of Bozhong 13-2 buried hill structure area

(a) 地震剖面; (b) 地质剖面

渤中13-2构造带位于渤中凹陷西南部,左临渤中凹陷西南次洼,右靠渤中凹陷南次洼。这两个洼陷烃源岩品质优且生烃量充足,使得渤中13-2构造带具备很好的烃源条件;并且渤中13-2构造带太古宇潜山西部和南部边界断层直接与有效烃源岩接触,接

触面积达7.3km²,最大供油窗口可达1000m^[3],为烃源岩的排烃和太古宇潜山储层油气的充注提供了有利条件。更为有利的是,周围烃源岩处于高演化阶段且普遍高压,压力系数可达1.4~1.8,烃源岩与潜山储层之间的压差可达25~45MPa^[7],这种高压差为

潜山储层油气的充注提供了强大动力。

3 储集条件与成储机理

渤中 13-2 构造带与渤中 19-6 构造带相邻，二者均位于郯庐西支走滑断裂带上，经历多次复杂构造运动，形成了复杂的断裂体系，均形成大型整装潜山储集体。渤中 13-2 太古宇潜山具有与渤中 19-6 潜山类似的储层物质组成，在岩石特征及储集条件研究上具有可对比性，基于大量岩石薄片分析、地球物理方法及综合研究，可讨论渤中 13-2 潜山成储机理。

3.1 储集条件

渤中 13-2 潜山储层岩性以太古宇淡色长英质混合花岗岩为主，其上部覆盖 300~1500m 厚的中生界砂砾岩和凝灰岩^[3]，通过大量薄片观察和统计可知，与渤中 19-6 潜山相比，渤中 13-2 潜山具有浅色矿物（长英质矿物）含量更高的特征，具体表现为长石

含量高，黑云母等暗色矿物含量较少。长英质矿物为典型脆性矿物，应力作用下易发育裂缝，长石类矿物易溶蚀，因此，以长石为主的长英质储集体具有发育高效储集空间的物质基础。

渤中 13-2 潜山主要发育裂缝和溶蚀孔洞两类储集空间（图 3），裂缝系统多发育于石英与长石类矿物中，裂缝发育具有多期性和广泛性，垂向上广泛分布，网状交织，切割矿物颗粒，并且沟通溶蚀孔洞，与渤中 19-6 潜山储层类似。结合扫描电镜分析可知，渤中 13-2 潜山储层长英质矿物多被溶蚀（图 4），这与渤中 19-6 裂缝型储层具有明显差异。渤中 13-2 潜山内幕广泛发育钾长石粒内溶蚀孔、钠长石溶蚀孔及石英颗粒间孔，此外，可见脉体及交代矿物中发育方解石晶内溶蚀孔及铁白云石晶内溶蚀孔。潜山储层呈立体网状，局部具有相对致密夹层，相对致密夹层同样由长英质矿物组成，裂缝多被铁白云石等次生矿物充填。

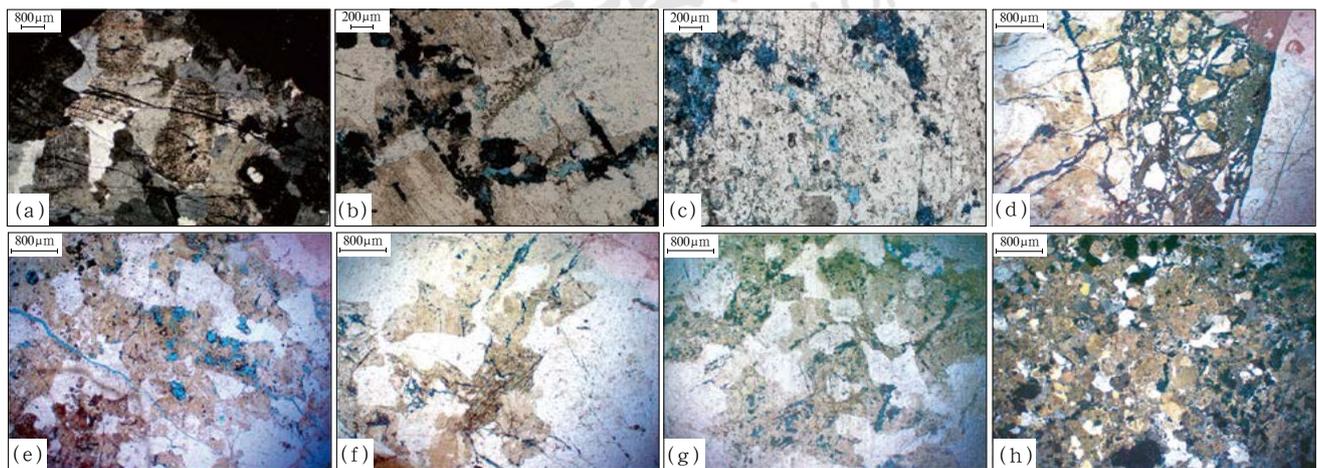


图 3 渤中 13-2 潜山储层储集空间

Fig.3 Reservoir space of Bozhong 13-2 buried hill reservoir

(a) BZ13-2-B 井, 1.25×(-), 4410m, 潜山顶部裂缝发育, 切穿矿物颗粒; (b) BZ13-2-B 井, 5×(-), 4601m, 长石晶内溶蚀孔, 菱铁矿充填; (c) BZ13-2-B 井, 5×(-), 4647.5m, 微斜长石晶间溶蚀孔及晶内溶蚀孔; (d) BZ13-2-B 井, 12.5×(-), 4676m, 基岩碎裂; (e) BZ13-2-B 井, 12.5×(-), 4676m, 裂缝体系沟通溶蚀孔; (f) BZ13-2-B 井, 12.5×(-), 4755m, 相对致密夹层, 裂缝被铁白云石充填; (g) BZ13-2-B 井, 12.5×(-), 4935m, 潜山内幕大量溶蚀孔, 局部铁白云石充填; (h) BZ13-2-B 井, 12.5×(+), 5025m, 潜山内幕碳酸盐化

渤中 13-2 潜山被中生界覆盖部分顶部风化淋滤带遭受改造，没有保留类似渤中 19-6 潜山典型风化壳特征，残存部分矿物具有黏土化特征，可见长石类矿物沿解理溶蚀及顶部方解石溶蚀，推测被中生界覆盖前，潜山顶部遭受强烈风化淋滤作用改造；渤中 13-2 潜山内幕广泛发育铁白云石交代作用，并且铁白云石发育晶内溶蚀孔（图 4c），此外，潜山内幕碳酸盐化（图 3h），推测有深部含二氧化碳热液流

体改造作用。渤中 13-2 靠近区域断裂系统，潜山内幕基岩多呈碎裂状，表生流体沿断裂系统对内幕储层具有改造作用。

3.2 储层地球物理预测

结合渤中 19-6 潜山变质岩储层的地质及地球物理特征的认识，可以进一步确认渤中 13-2 太古宇潜山也具有“立体网状”规模性优质储层发育模式。根据

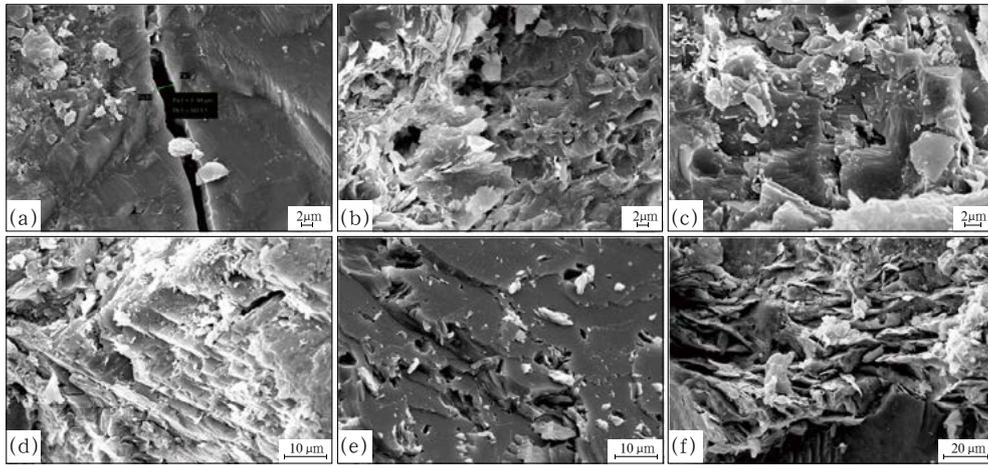


图4 渤中13-2潜山储层储集空间扫描电镜特征

Fig.4 SEM characteristics of reservoir space of Bozhong 13-2 buried hill

(a) BZ13-2-B井,4601m,见钾长石宽约 $3.1\mu\text{m}$ 裂缝;(b) BZ13-2-B井,4505m,方解石晶内溶蚀孔发育,左边为丝片状伊利石;(c) BZ13-2-B井,4556m,铁白云石晶内溶蚀孔发育;(d) BZ13-2-B井,4676m,长石沿解理溶蚀,边缘为伊利石;(e) BZ13-2-B井,4780m,钾长石粒内溶蚀孔发育,见伊利石充填;(f) BZ13-2-B井,4823m,石英颗粒间孔内充填丝片状伊利石

渤中13-2潜山构造区实际地震资料,结合地震正演及已钻井资料综合分析,明确了潜山断缝体储层具有“短轴状不连续反射”地震响应特征,特别是与断裂伴生的“短轴状不连续反射”,可以作为潜山优质储层的响应和预测模式。图5为实际连井地震剖面,图中黑色虚线部分标示出“短轴状不连续反射”;图6为根据实际地震剖面建立的正演模型图,模拟实际地震剖面中存在的断层及“短轴状不连续反射”体;图7是地震正演剖面与实际地震剖面融合图,从图中可以看到不同尺度的断缝系统均具有“短轴状不连续反射”特征。

根据以上地震响应模式,开展平面上裂缝发育区及优质储层的识别和预测,如图8和图9所示。图8为利用方向加权相干地震属性得到的裂缝发育带预测

结果,红白区域为裂缝发育区;色标柱为加权地震相关属性值,值越大表示裂缝密度大、裂缝越发育。图9为结合裂缝发育密度和地震反射振幅特征所得到的优质储层预测结果,其中红色—黄色区域为储层发育区,I区为优质储层发育区;色标柱为潜山储层累计绝对振幅值,值越小表明裂缝型储层越发育。

从相关结果可以看到:①裂缝发育与渤中13-2潜山构造区深大断裂有较强的伴生关系,耦合形成的断缝系统是优质储层核心控制因素;②利用地震资料结合地质模式,开展平面及剖面的地震响应识别,可以较好地确定和预测多期次“立体网状”断缝系统及优质储层发育区,从而为成储机理认识及优质储层预测提供有利依据。

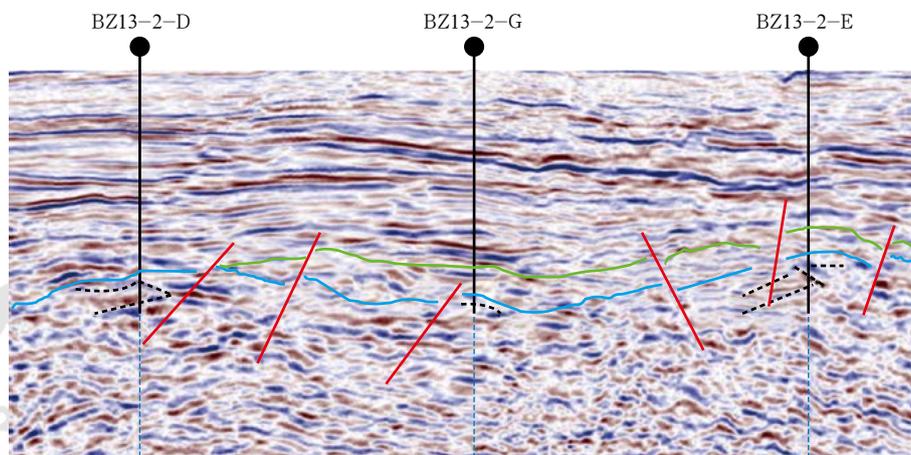


图5 渤中13-2潜山构造区实际连井地震剖面

Fig.5 Well-tie seismic profile of Bozhong 13-2 buried hill structure area

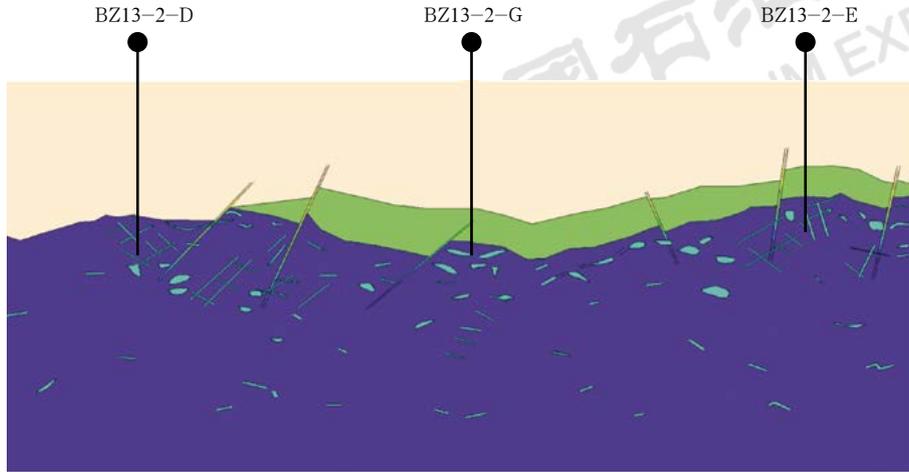


图 6 渤中 13-2 潜山构造区地震正演剖面模型图

Fig.6 Forward model seismic profile of Bozhong 13-2 buried hill structure area

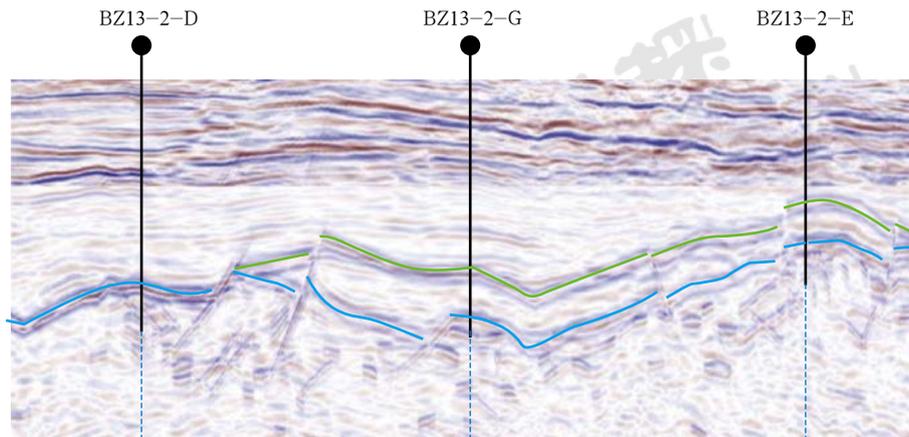


图 7 渤中 13-2 潜山构造区地震正演剖面与实际地震剖面融合图

Fig.7 Superimposition of forward model and original seismic profile of Bozhong 13-2 buried hill structure area

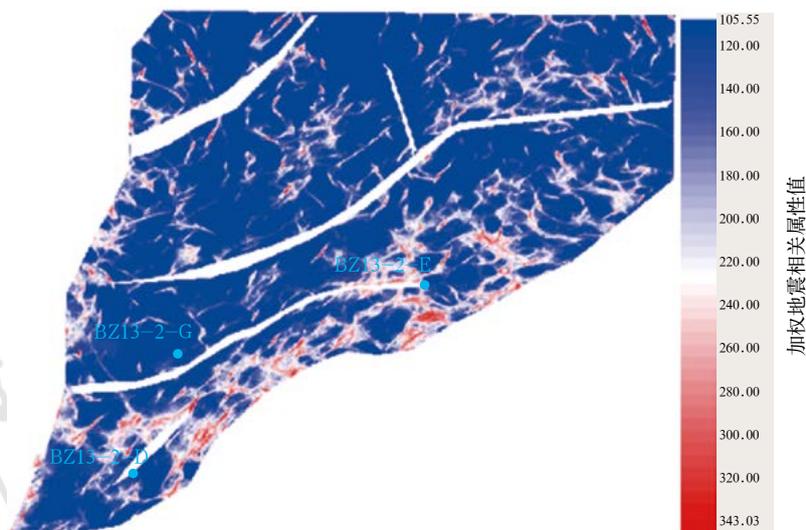


图 8 渤中 13-2 潜山构造区裂缝发育带预测结果

Fig.8 Prediction of fracture development zone in Bozhong 13-2 buried hill structure area

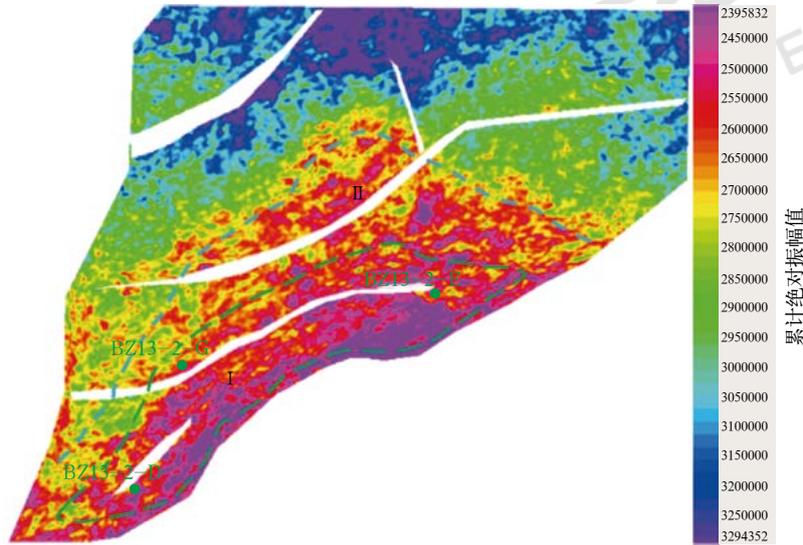


图9 渤中13-2潜山构造区优质储层预测结果

Fig.9 Prediction of high-quality reservoir in Bozhong 13-2 buried hill structure area

3.3 成储模式

渤中13-2潜山储层岩性以富含长英质矿物的混合花岗岩为主，上覆中生界盖层，为典型双层结构潜山（图2）。在中生界盖层发育之前，潜山经历了长期的风化暴露期，中生代地层发育时期，对潜山顶部风化淋滤带有强烈的改造作用，使得中生界覆盖区残存的风化淋滤带较少，而暴露区具有与渤中19-6类似的风化淋滤带特征。表生流体对潜山顶部具有强

烈的改造作用，暴露区保留风化淋滤带，流体通过断裂系统对潜山内幕储层同样具有建设性改造作用；含有二氧化碳的深部热液流体同样对储层具有改造作用，形成的铁白云石交代作用广泛发育，并且溶蚀成孔。由于矿物组成的差异及断裂系统的控制，潜山内幕多碎裂成缝，但局部具有相对致密夹层。在优势岩性—多期构造—双向流体的共同作用下，发育大型网状缝洞储层系统，形成渤中13-2大型双层结构潜山油气藏（图10）。

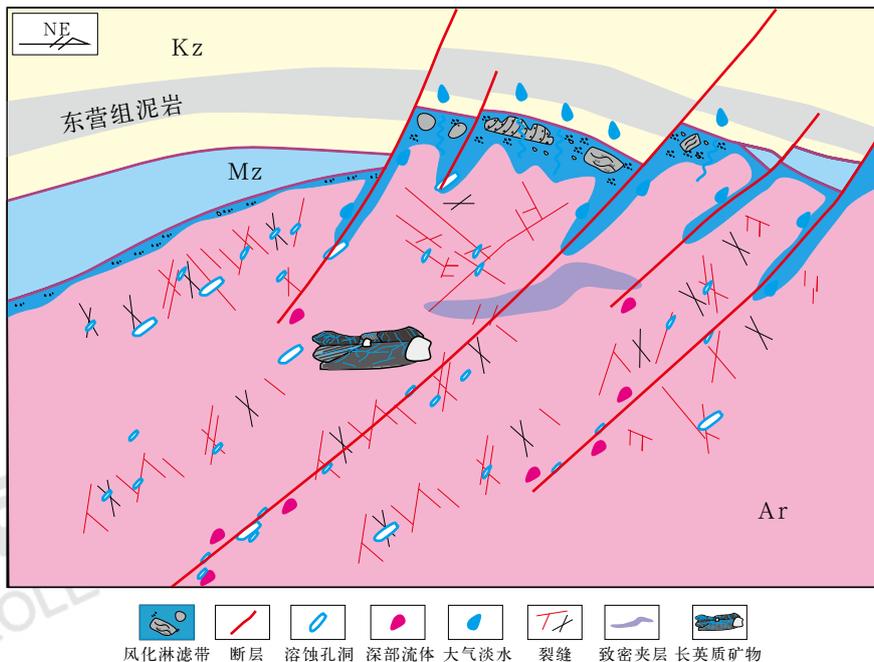


图10 渤中13-2潜山储集体发育模式

Fig.10 Reservoir development mode of Bozhong 13-2 buried hill

4 运聚条件与成藏模式

4.1 成藏期次及运聚条件

储层岩石中油气包裹体的分布、颜色及荧光特征等可以指示油气成藏期次和烃源岩成熟度^[12]。渤中 13-2 构造太古宇储层中发育丰富的油气包裹体，大

多沿切穿花岗片麻岩石英矿物的微裂隙，呈线状或带状分布；液烃包裹体呈透明无色、淡黄色，显示蓝色荧光；气烃包裹体呈灰色，无荧光显示（图 11）。流体包裹体岩石学特征表明，太古宇油藏仅发生一次油气充注，且油气源自高成熟度烃源岩，这与前人认为的晚期快速成藏是一致的^[3]。

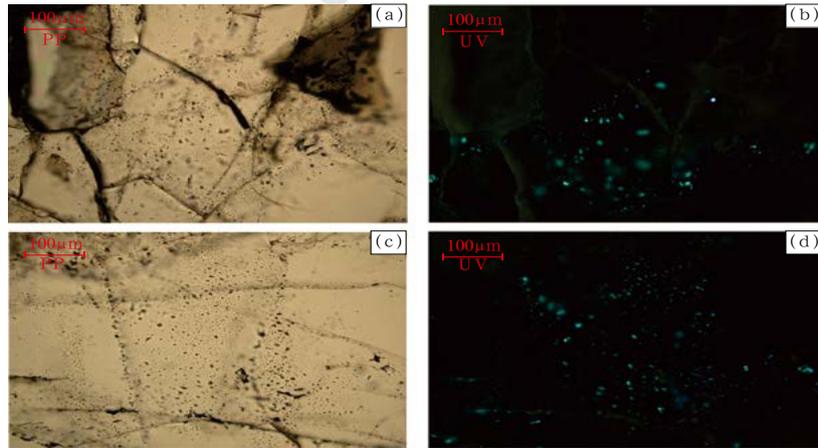


图 11 渤中 13-2 构造带太古宇储层流体包裹体岩石学特征

Fig.11 Petrological characteristics of fluid inclusions of Archeozoic reservoir in Bozhong 13-2 buried hill structure area
PP—单偏光，UV—荧光。(a)、(b)同一视域，BZ13-2-A 井，4621m，淡黄色—灰色气液烃包裹体，显示蓝色荧光；(c)、(d)同一视域，BZ13-2-A 井，4717m，淡黄色—灰色气液烃包裹体，显示蓝色荧光

渤中 13-2 构造带自太古宙以来，经历了多期构造运动，历经多次挤压—拉张应力场变换，断层十分发育。断层走向以北东向为主，少数呈现北北东向及北北西向，新构造运动以来，断层活动性增强，有利于油气沿断层垂向运移。潜山边缘断层直接与古近系多层烃源岩接触，并且接触面大，为太古宇潜山储层油气的运移充注提供了便利条件。太古宇顶为研究区重要的不整合面，潜山顶部遭受长期风化淋滤，形成优质的孔缝型输导层，可将周边洼陷生成的油气运移至潜山圈闭。另外，不整合面和断层具有良好的配置关系，上倾的不整合面与倾向相同的正断层相接触，在浮力的驱动下，洼陷内部生成的油气可以大量沿不整合面—断层输导体系进入太古宇潜山圈闭，为油气的大规模成藏提供了有利条件。研究区太古宇潜山在印支早期、印支晚期和燕山期这 3 期构造应力叠加作用下，形成网状连通型内幕裂缝，为油气在潜山内部的运移聚集提供了有效通道，有利于形成大型古潜山油气藏。

供油窗口的宽窄对潜山储层油气运聚有着重要的影响。供油窗口越宽，有效烃源岩与油源断裂在剖面上的接触宽度越大，意味着烃源岩在初次运移中有着更大的排烃面积，使得更多的油气可以沿断层面进入潜山圈闭中。渤中 13-2 构造带太古宇潜山西部和南

部供油窗口宽，烃源岩与边界断层接触面积大，因此圈闭含油性好，有较好的勘探前景；而北部缺乏供油窗口，油气运聚条件差，因此圈闭含油性差，致使钻探井失利。

4.2 成藏模式

分析认为，渤中 13-2 构造带为超压宽窗供烃、断层—不整合面—裂缝联合输导双层结构潜山成藏模式。古近系沙三段、沙一段及东三段烃源岩成熟后，生成的大量油气主要沿太古宇顶部区域不整合面运移至潜山边缘断裂处。在烃源岩内部高压及浮力等超强动力驱动下，大量油气沿宽阔的断层面（供油窗口）进入潜山内幕裂缝储层，并顺着网状裂缝进一步运移，在合适的圈闭中聚集成藏（图 12）。

5 勘探发现意义

任丘碳酸盐岩潜山油田发现以来，渤海湾盆地的潜山领域历经 50 余年曲折的勘探历程。潜山油田的发现时断时续，每个相对较大的发现都是经历 10 多年以上的沉寂，反映出潜山油气成藏机制相对于常规油气复杂得多，勘探理论认识创新需要很长一段时间积累。渤中 19-6 大型凝析气田的勘探实践表明，区域尺度的基础地质认识对潜山勘探极为重要。在此基

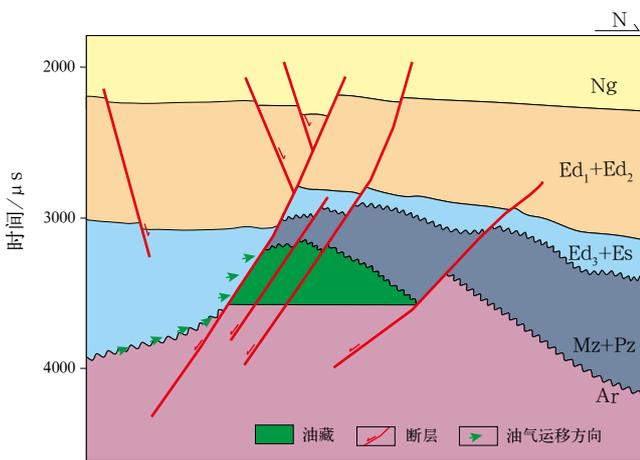


图 12 渤中 13-2 双层结构潜山油气成藏模式

Fig.12 Hydrocarbon accumulation model of Bozhong 13-2 double-layered buried hill

基础上，基于对双层结构潜山储层发育控制因素和成藏机制的深化认识，最终获得渤中 13-2 油气田的发现（探明地质储量亿吨级油气当量），再次证实成山成储机制与区域构造活动及其相关裂缝作用密切相关，配合超压驱动，成就了渤中 13-2 油气田的形成。渤中 13-2 油气田的发现，一方面大大拓展了潜山勘探面积，从寻找暴露侵蚀的太古宇山头延伸到被潜山地层覆盖的内幕；另一方面，也启示出过去认为似乎无规律可循的潜山勘探是有成藏规律的，即多期裂缝发育规律及其与供烃窗口的连通性是潜山成储成藏的主线。

6 结论

(1) 渤中 13-2 太古宇潜山被中生界直接覆盖，形成双层—皱褶断块型潜山。

(2) 渤中 13-2 双层结构太古宇潜山构造带裂缝发育与该区深大断裂有较强的伴生关系，耦合形成的断缝系统是优质储层核心控制因素，并且在优势岩性—多期构造—双向流体的共同作用下，发育大型网状缝洞储层系统。

(3) 渤中 13-2 构造带为超压宽窗供烃、断层—不整合面—裂缝联合输导双层结构潜山成藏模式，极大地拓展了凹陷低部位深层潜山勘探空间。

参考文献

[1] 张以明, 田建章, 杨德相, 等. 冀中拗陷潜山内幕寒武系府君山组成藏条件与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2019,24(3):297-312.
Zhang Yiming, Tian Jianzhang, Yang Dexiang, *et al.* Accumulation conditions and exploration direction of Cambrian Fujunshan Formation inside buried hills in Jizhong Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(3):297-312.

[2] 罗海炳, 胡英杰, 刘兴周, 等. 辽河拗陷隆台潜山中生界地质新认识与油气新发现[J]. 中国石油勘探, 2019,24(4):439-448.
Luo Haibing, Hu Yingjie, Liu Xingzhou, *et al.* New understanding of Mesozoic geology and new discovery of oil and gas in Xinglongtai buried hill, Liaohe Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(4):439-448.

[3] 薛永安. 渤海海域深层天然气勘探的突破与启示[J]. 天然气工业, 2019,39(1):11-20.
Xue Yong'an. Breakthrough and enlightenment of deep natural gas exploration in Bohai Sea[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1):11-20.

[4] 徐长贵, 侯明才, 王粤川, 等. 渤海海域前古近系深层潜山类型及其成因[J]. 天然气工业, 2019,39(1):21-32.
Xu Changgui, Hou Mingcai, Wang Yuechuan, *et al.* Types and genesis of Pre-Paleogene deep buried hills in Bohai Sea[J]. Natural Gas Industry, 2019,39(1):21-32.

[5] 侯明才, 曹海洋, 李慧勇, 等. 渤海海域渤中 19-6 构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2019,39(1):39-50.
Hou Mingcai, Cao Haiyang, Li Huiyong, *et al.* Characteristics and controlling factors of deep buried hill reservoir in Bozhong 19-6 structural belt, Bohai Sea[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1):39-50.

[6] 薛永安, 李慧勇, 许鹏, 等. 渤海海域中生界覆盖型潜山成藏认识与渤中 13-2 大油田发现[J]. 中国海上油气, 2021,33(1):13-22.
Xue Yong'an, Li Huiyong, Xu Peng, *et al.* An understanding of Mesozoic covered buried-hill reservoir formation and discovery of Bozhong 13-2 Oilfield in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021,33(1):13-22.

[7] 李慧勇, 牛成民, 许鹏, 等. 渤中 13-2 大型整装挥发性太古界潜山油气田的发现及其油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2021,41(2):19-26.
Li Huiyong, Niu Chengmin, Xu Peng, *et al.* Discovery of large integrated volatile Archeozoic buried hill oil and gas field in Bozhong 13-2 and its significance for oil and gas exploration[J]. Natural Gas Industry, 2021,41(2):19-26.

[8] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中 19-6 构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019,24(1):40-49.
Shi Hesheng, Wang Qingbin, Wang Jun, *et al.* Discovery and exploration significance of large-scale condensate gas field in Bozhong 19-6 structure, deep Bozhong Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(1):40-49.

[9] 谢玉洪. 渤海湾盆地渤中凹陷太古界潜山气藏 BZ19-6 的气源条件与成藏模式[J]. 石油实验地质, 2020,42(5):858-866.
Xie Yuhong. Gas source conditions and reservoir forming model of Archean buried hill gas reservoir BZ19-6 in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5):858-866.

[10] Hao Fang, Zhou Xinhui, Zhu Yangming, *et al.* Lacustrine source rock deposition in response to co-evolution of environments and organisms controlled by tectonic subsidence and climate, Bohai Bay Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 2012,42(4):323-339.

[11] Yin Jie, Xu Changgui, Hao Fang, *et al.* Controls on organic matter enrichment in source rocks of the Shahejie Formation in the southwestern Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 560.

[12] Li Changzhi, Xu Guosheng, Xu Fanghao, *et al.* A model for faults to link the Neogene reservoirs to the Paleogene organic-rich sediments in low-relief regions of the south Bohai Sea, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021.