文章编号:1673-5005(2017)01-0042-09

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.01.005

# 渤海湾盆地渤中凹陷深埋古潜山天然气 成藏主控因素探讨

周心怀,张如才,李慧勇,王保全,郭永华

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300452)

摘要:渤中凹陷钻探的两口科学探索井均在古生界潜山发现天然气流,其中科 A2 井经测试获日产天然气 40.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,揭示了渤海海域目前埋深最大、温度最高的古潜山天然气藏。根据渤中凹陷渤中 21 ~ 22 古潜山油气成藏条件 和实际地质、测井和地震资料的综合解释,对研究区天然气成藏控制要素进行研究。结果表明:古潜山圈闭面积大, 且具有完整背斜形态;深层沙四段—东三段发育大量优质高成熟烃源岩,油气源充足;古潜山储集空间为溶蚀孔洞 和裂缝,储层物性较好;成藏要素匹配关系好,天然气具有明显的晚期持续充注成藏的特点。该古潜山气藏的发现, 不仅是渤中凹陷深埋古潜山天然气勘探的重大突破,也是深埋古潜山油气成藏地质条件认识和勘探工程技术进步 的重大成果,能够推动渤海海域乃至整个渤海湾盆地凹中深埋古潜山的油气勘探工作。

关键词: 渤中凹陷; 科学探索井; 深埋古潜山; 天然气成藏; 主控因素

中图分类号:TE 122.1 文献标志码:A

**引用格式**:周心怀,张如才,李慧勇,等. 渤海湾盆地渤中凹陷深埋古潜山天然气成藏主控因素探讨[J]. 中国石油大 学学报(自然科学版),2017,41(1):42-50.

ZHOU Xinhuai, ZHANG Rucai, LI Huiyong, et al. Major controls on natural gas accumulations in deep-buried hills in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41 (1):42-50.

## Major controls on natural gas accumulations in deep-buried hills in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin

ZHOU Xinhuai, ZHANG Rucai, LI Huiyong, WANG Baoquan, GUO Yonghua

(CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300452, China)

**Abstract**: Paleozoic commercial gas reservoirs were discovered in deeply buried hills in Bozhong depression by two scientific exploration drilling-wells. The gas production from the A2 well was up to  $40.2 \times 10^4$  m<sup>3</sup>, and the gas reservoirs were currently the deepest buried and have the highest subsurface temperature in the offshore Bohai Bay Basin. Gas accumulations in the buried-hill reservoirs and their controls were studied by systematic interpretations on core data, well-logging data and seismic data in Bohai sea, and the results suggest that there are four major contributors for the gas accumulation in Bozhong 21–22 buried-hill reservoirs: Bozhong 21–22 buried-hill reservoirs were large anticlines with enough trapping areas for the gas; there were good source rocks of members Sha-4 to Dong-3 in the Bozhong Depression with huge thickness, which were in high hydrocarbon potentials and thermal maturity; great reservoir spaces with dissolved caves and fractures were developed in the buried-hills with good petrophysical properties; and the gas were accumulated obviously late and were in good timing among essential elements of petroleum geology, which meant late and continuous gas charging into the buried-hill gas reservoir is not only a breakthrough of natural gas exploration for buried-hills in deep part of the depression, but also an achievement of understanding hydrocarbon accumulation in buried-hill reservoirs in the deep part of the depression, which provides a great prospective

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05023-006)

作者简介:周心怀(1970-),男,教授级高级工程师,博士,研究方向为石油地质勘探。E-mail:zhouxh3@ cnooc.com.cn。

to oil and gas exploration in buried-hills in similar conditions in Bohai Bay Basin.

Keywords: Bozhong Depression; scientific drilling well; deep-buried hill; natural gas accumulation; key control factor

渤海湾盆地是典型的裂谷盆地,强烈的断裂活 动造成了基底的差异沉降,因此盆地前第三系基底 容易形成古潜山结构[1],环渤海陆地探区围绕古潜 山已获得了大量的油气发现[24]。渤海海域古潜山 勘探始于 20 世纪 70 年代, 渤中 28-1、锦州 25-1/ 南、蓬莱 9-1 等一系列古潜山圈闭已经获得了油气 发现,这些古潜山油气藏主要分布在凸起上,而凹陷 中的深埋古潜山并未获得油气发现。2011—2014 年渤中凹陷渤中 21~22 构造先后钻探科学探索井 (以下简称科探井)科 A1 井和 A2 井,钻遇古牛界奥 陶系碳酸盐岩古潜山,发现天然气规模储量约50× 10° m3.该古潜山气藏的发现是凹中深埋古潜山天 然气勘探的重大突破,因此笔者基于渤中凹陷勘探 实践,提出凹中深埋古潜山的天然气富集主控因素, 探讨其油气成藏模式,以推动渤海海域乃至整个渤 海湾盆地凹中深埋古潜山的油气勘探。

### 1 区域地质与勘探概况

渤中 21~22构造位于渤中凹陷西南环,基底古 潜山位于渤中凹陷主洼和渤中凹陷西南次洼之间, 构造整体向北东方向倾没(图1、2,图2剖面位置见 图1中A-B)。该构造及围区的油气勘探工作始于 1980年12月钻探的BZ28-1-1井,其主要目的层 为前第三系古潜山,在古生界发现工业油气流。截 至2010年底,围区已钻探井30余口,发现9个油气 田(含油气构造),其中五个为古潜山油气藏,两个 已投入开发,证实本区为富油气区带。通过三维地 震资料精细解释,渤中21~22构造在明化镇组、东 营组、沙河街组和古生界都发育圈闭,但纵向叠合较 差。其中古生界古潜山圈闭面积大,且具有较好的 半背斜形态,是研究区寻求天然气勘探突破的首选。









## 2 渤中 21~22 天然气富集主控因素

#### 2.1 有利的古潜山圈闭及形态特征

渤中21~22构造基底发育太古界花岗岩、古生 界碳酸盐岩古潜山,整体具有凹中隆的构造背景。 古生界碳酸盐岩古潜山整体呈现为完整的背斜形态,圈闭面积合计为104.9 km<sup>2</sup>,圈闭幅度100~400 m,主要由渤中21 和渤中22 两个古潜山组成。西侧的渤中21 古潜山主要发育北东向、近东西向断裂系统,北东向 F1 断层为区内最大断层,断距为200

m,将渤中21 古潜山高点分为东、西两个山头;近东 西向断层数量多,断距小,在古潜山内幕形成了许多 小断阶、小地垒和小地堑,使内幕构造进一步复杂 化。东侧的渤中22 古潜山主要受一条近东西向断 层控制,背斜形态较完整,其内幕被多条方向各异的 断层所复杂化。

碳酸盐岩古潜山内幕构造为一南高北低的半面 山,内幕地层倾角为5°~15°。由于渤中21~22西 南部太古界花岗岩剥蚀裸露,碳酸盐岩顶部被剥蚀 形成尖灭,其上与古近系地层呈角度不整合接触,东 营组巨厚泥岩提供了良好的盖层条件。渤中21~ 22 内部存在3 套不同的地震波组特征,通过与邻区 已钻古潜山地层的地震反射波组特征和地震相进行 详细的类比分析,确定发育元古界、古生界和中生界 等地层[5]。元古界花岗岩在地震剖面上表现为较 高频率的杂乱反射,与渤中26-2古潜山剖面特征 相类似;邻区的渤中28-1 古潜山为古生界碳酸盐 岩古潜山,在地震剖面上表现为低频、强振幅和较连 续的平行反射特征, 渤中21~22地区也存在这样的 地震反射,可以推测为同一套地层,科探井科 A1 钻 井证实了预测的准确性。渤中21~22古生界之上 覆盖的地层具有低频、弱振幅和断续杂乱反射的地 震反射波组特征,BZ22-1-1A 井钻遇该套地层为中 生界火山岩。

#### 2.2 深层烃源岩发育

渤中21~22构造紧邻渤中凹陷主洼和渤中西

南次洼,洼陷中存在沙四段、沙三段、沙一段和东营 组4套烃源岩,其中沙一段和东营组烃源岩在该构 造区十分发育,主要表现为烃源岩总厚度大,发育半 深湖—深湖相暗色泥岩,为本区的优质烃源岩 段<sup>[6-7]</sup>。科A1井由上而下依次钻遇平原组、明化镇 组、馆陶组、东营组、沙一段和奥陶系,其中东三段下 部至沙一段属半深湖沉积,微—半咸水,矿物质丰 富,水生生物繁盛,有机质保存条件优越,为一套分 布广泛的优质烃源岩,在渤中21~22构造区发育, 在洼陷中厚度更大。需要强调的是,本井钻探过程 中首次在渤海海域取得东三段优质烃源岩岩心,为 烃源岩评价提供了有力的证据。

科 A1 井由于烃源岩样品热演化程度已经很高,现今干酪根 H/C 原子比和岩石热解氢指数已大幅降低,判断有机质类型主要依靠干酪根显微组分分析及烃源岩统计规律。从表1可以看出,该井钻遇的东营组和沙一段烃源岩干酪根显微组分以壳质组为主,约占 80% ~90%,镜质组约占 10%,腐泥组及惰质组含量均很低,干酪根类型为 II1-II2型。渤海海域烃源岩干酪根类型指数随有机碳含量增大而增大,即有机质类型随有机质丰度增大而变好,科 A1 井总有机碳含量大于 2% 的优质烃源岩样品干酪根类型指数偏低,可能受较高的热演化程度的影响,统计规律显示该优质烃源岩层段干酪根类型指数初始应大于 40,初始有机质类型应为 II1型。

	表 1 科 A1 井烃源岩有机质丰度及干酪根	类型分析
Table 1	1 Source rock organic matter abundance and kerogen type	e of scientific exploration well A1

			-					-	-	-	
<b></b>	厚度/ m	总有机碳 TOC/%	生烃潜量 (S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> )/ (mg/g)	氯仿沥青 "A"/10 <sup>-6</sup>	干酪根显微组分分析				热演化程度		
层位					腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组	类型 指数	镜质体反射 率 R <sub>o</sub> /%	热演化 阶段
东二上	230	0.64	2	777	0	82	14	4	27	0.70~0.90	产油
东二下	490	1.01	4	1916	2	86	10	2	36	0.90~1.30	生油
东三上	144	1.07	4	3 0 4 9	2	89	7	2	40	1.30~1.45	生凝析气
东三下	200	2.17	5	3 7 4 4	0	90	9	1	37	1.45 ~ 1.65	生凝析气+
沙一段	87	2.23	3	2947	1	87	11	1	35	1.65~1.75	湿气

结合实测与模拟镜质体反射率结果来看,科 A1 并生烃门限深度约为3000 m,对应镜质体反射率为 0.5%;天然气大量生成的深度约为4400 m,对应镜 质体反射率为1.3%。东二上和东二下烃源岩仍处于 生油阶段;东三段下部优质烃源岩岩心实测镜质体反 射率为1.56% ~1.60%,处于生成凝析油和湿气阶 段;氢指数仅为71~96 mg/g,转化率大于80%。沙 一段烃源岩埋深为4404~4862 m,对应镜质体反射 率大于1.3%,同样处于生凝析油和湿气阶段;奥陶系 碳酸盐岩实测海相镜质体反射率大于 2.0%。

单井埋藏史分析表明科 A1 井在约 10 Ma 时埋 藏深度迅速加快(图 3), 烃源岩生排烃速度亦开始 加速, 现今东三段下部和沙一段优质烃源岩镜质体 反射率大于 1.5%,转化率大于 80%。岩石热解分 析和成藏模拟表明, 科 A1 井沙一段和东营组排烃 强度高达近 1000×10<sup>4</sup> t/km<sup>2</sup>, 具备形成大中型油气 田的条件<sup>[8]</sup>。洼陷中东营组烃源岩厚度更大, 并且 存在沙四段和沙三段烃源岩, 生排烃强度会更高。



前面已述,科 A1 井钻探所揭示的沙一段与东 营组烃源岩热演化程度高,生排烃强度大,大于 4600 m强超压段与优质烃源岩发育段对应,因为泥 岩欠压实和生烃所引起的双重超压作用有利于沙一 段和东营组烃源岩牛成的天然气沿泥质烃源岩微裂 缝向下进入奥陶系碳酸盐岩古潜山成藏。钻时气测 显示古潜山天然气与上覆烃源岩钻时气测组分的干 燥系数相似,古潜山天然气与上覆东三段--沙--段 烃源岩吸附气重烃指纹对比较好,推测其对古潜山 天然气成藏有重要贡献。科 A1 井古潜山天然气与 渤中凹陷东营组烃源岩生成的天然气、黄河口凹陷 沙三段烃源岩生成的天然气重烃指纹对比可以看出 (图4).科 A1 井古潜山天然气环戊烷/2-甲基戊 烷、2-甲基戊烷/3-甲基戊烷、环己烷/2-甲基己烷、 正己烷/环己烷参数比值相对较高,部分具有沙三段 烃源岩生成的天然气特征,因此综合认为科 A1 井 古潜山天然气有同时来自沙三段、沙一段—东营组 烃源岩的贡献,且以后者为主。





#### 2.3 凹中深埋古潜山储层条件良好

与渤海湾地区其他次级盆地一样,渤中凹陷是 叠置在华北地台基底之上的中、新生代裂谷断陷盆 地<sup>[9]</sup>。受华北地台构造运动影响,古生代中期至古 近纪早期, 渤中 21~22 构造区长期隆起, 遭受风化 剥蚀,构造西南部古近系地层直接覆盖在太古界花 岗岩之上,构造主体区出露古生界早---中奥陶统碳 酸盐岩,东北缘向渤中凹陷主体延伸堆积了0~ 2000 m厚的中生界火成岩。在加里东、海西、燕山

等多期构造运动的影响下, 渤中21~22 碳酸盐岩古 潜山形成了一套风化壳岩溶储集体。

科 A1 井钻探揭示,古近系沙河街组一段泥岩 直接覆盖于碳酸盐岩古潜山之上,表明该套海相碳 酸盐岩地层遭受了长期的暴露剥蚀。岩溶角砾岩是 古岩溶作用最明显的识别标志,该井4882.5~ 4892.5 m 段岩心表明岩溶角砾岩十分发育,角砾结 构既有基质支撑也有颗粒支撑。阴极射线下,岩溶 角砾边缘具有很亮的橙色发光带,而方解石胶结物 具有明暗相间的环带状阴极发光性,属于典型的渗 流一潜流带沉淀物<sup>[10]</sup>。结合岩心、岩屑、录井、测井 等资料,可以识别出多期岩溶旋回,同时结合伽马能 谱测井得到的铀相对比值、钍铀比等参数曲线呈非 均一性指状,表明该区为多期表生岩溶特征<sup>[11-13]</sup>。 为更清晰地表征不同地层深度的旋回叠加、溶蚀方 式、溶蚀强度和储集特征,将科 A1 井古潜山划分为 地表岩溶段、上部溶蚀段、下部溶蚀段 3 个主要的岩 溶储层发育段(图5)。岩溶作用是改善碳酸盐岩储 集性能的重要途径,尤其是与不整合面有关的岩溶 作用更是受到广泛关注<sup>[14-15]</sup>。





上部溶蚀段(4930~5010 m):主要以潜流溶蚀 为特征,岩性以白云岩、石灰岩、泥岩为主。该层段 顶部泥岩较发育;常规测井曲线具有高自然伽马、高 中子、高声波时差、低密度和低电阻率特征。钍铀比 值大于 10,呈指状;铀相对比值接近 0,为典型的岩 溶地貌潜流带暗河充填。中下部发育一套白云岩、 灰质云岩,钻井至4962.55 m 处发生井漏,漏失合计 量为 38 m<sup>3</sup>,表明缝洞系统发育。常规测井曲线具



(a) 溶蚀缝(铸体,单偏光,岩心,4888.8m)

有低自然伽马、高中子、高声波时差、较低密度和低 电阻率特征;钍铀比值小于2,铀相对比值大于0.2, 曲线表现出较好的正幅度差异。反映出该套地层处 于还原环境,且岩溶作用较强,为岩溶储层发育带。 岩屑薄片观察(图6(b))及成像测井解释表明该层 段裂缝较发育,溶蚀孔洞次之。壁心实测孔隙度为 2.0%~10.5%,平均孔隙度为5.8%,为孔洞-裂缝 型储层。



(b)多期裂缝(单偏光,岩屑,4955~4960m)

#### 图 6 科 A1 井古生界古潜山裂缝发育特征 Fig. 6 Fracture development characteristics of Paleozoic buried hill of well A1

下部溶蚀段(5055~5110 m):主要以深部缓流 溶蚀为特征,岩性以灰质云岩、云质灰岩为主。常规 测井曲线具有较低自然伽马、高中子、高声波时差、 低密度、低电阻率特征。钍铀比值大部分小于2,局 部高值可超过10,呈尖刀状;铀相对比值大部分大 于0.2,低值与钍铀比高值相对应。两条参数曲线 正、负幅度差异交互出现,可能与白云石化作用的强 度有关,一定程度上反映多成因叠加型岩溶作用特 征。成像测井解释表明该层段溶蚀孔洞发育。壁心 实测孔隙度为1.9%~6.0%,平均孔隙度为3.8%, 为溶蚀孔隙型储层。

## 3 CO<sub>2</sub> 气来源分析

渤海湾盆地海域及周围陆地油区已发现了多个 高含 CO<sub>2</sub> 油气藏,地球化学指标特征表明油气藏中 的 CO<sub>2</sub> 主要为火山幔源无机成因气。科 A1 井二氧 化碳碳同位素进行分析结果为:δ<sup>13</sup>C<sub>co2</sub> = -3.2‰,判 断其为无机成因气;<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He(Ra)值为 6.407×10<sup>-6</sup>, 大于空气值 1.400×10<sup>-6</sup>,进一步证实其为幔源型 (图 7)。幔源无机成因 CO<sub>2</sub> 气主要源于富 CO<sub>2</sub> 地 幔脱气作用,气源丰度主要受幔源岩浆活动和基底 深大断裂发育程度控制<sup>[16]</sup>。渤海海域新生代岩浆 活动比较强烈,主要集中在环渤中地区。渤中凹陷 渐新世以来一直是渤海湾盆地构造演化和沉降迁移 收敛的中心,莫霍面深度小于 28 km<sup>[17]</sup>,是华北克 拉通破坏最强烈的地区,表明新生代以来渤中凹陷 经历了地幔强烈隆起导致地壳减薄、深部活动异常 强烈的过程。强烈的深部活动形成了一套源自上地 幔和部分软流圈内部大致 70~140 km 深度的以碱 性玄武岩为主的岩浆体<sup>[18]</sup>。碱性玄武岩浆沿地幔 断裂向上侵入下地壳,在下地壳中形成岩浆垫。岩 浆垫富含 CO<sub>2</sub> 气体,是幔源 CO<sub>2</sub> 气在地壳中的"气 源库"。

CO<sub>2</sub> 气与烃类气在充注时间上存在一定的先后 关系, 馆陶组沉积以来(距今24.6~0 Ma)烃类气持 续充注, 充注高峰期为距今10 Ma 以来; 而 CO<sub>2</sub> 的 充注可能主要与上新世以来(即新构造运动期)的 强烈断陷活动<sup>[19]</sup>有关。强烈活动的深大断裂是幔 源无机 CO<sub>2</sub> 运移的主要优势通道, 它对 CO<sub>2</sub> 的释放 和运移起着关键作用, 在一定程度上其活动的差异 性也导致了渤海海域幔源无机 CO<sub>2</sub> 分布的差异性。 环渤中地区断裂十分发育, 约 40% 的主干断裂活动 速率大于 25 m/Ma, 约 50% 的主干断裂活动速率在 25~10 m/Ma, 强烈活动的断裂源源不断地将深部 幔源无机 CO<sub>2</sub> 运移输导至浅层。高含 CO<sub>2</sub> 气藏的 石臼坨凸起南北断阶带、渤南低凸起北断阶带、渤中 凹陷西南环渤中 21~22 构造区皆发育多条强烈活 动的深大断裂, 表明高含 CO<sub>2</sub> 的气藏与新构造运动 期强烈活动深大断裂的空间展布关系十分密切,其 成藏时间亦与新构造运动期断裂强烈活动的时间相 呼应。因此推测渤中 21~22 构造科 A1 井 CO<sub>2</sub> 气 可能以晚期充注为主。





## 4 凹中深埋古潜山天然气成藏模式

渤中21~22 圈闭形成时间较早,主要受燕山构 造期地层抬升的影响,古近纪之前古潜山基本定型。 该古潜山被上覆的东三段—沙一段和邻近凹陷的沙 三段烃源岩所包围,以上两套烃源岩现今生烃门限 深度约3000 m.目前都已成熟,特别是沙三段烃源 岩,至明化镇组沉积时期,其埋深已超过5000 m的 高成熟门限,进入大量生气阶段。除了古潜山外深 层缺乏其他有效储层,因此大量生成的油气在深埋 高压条件下向古潜山圈闭持续高压充注,产生规模 性聚集。从天然气成分来看, 渤中21~22 气藏比较 复杂,既有烃类气体,又有 CO,、N, 和 H,S 等非烃类 气体。天然气成分分析表明,科 A1 井烃类气体含 量占 50.5% (其中甲烷含量占烃类气体总含量的 92.5%)、二氧化碳占48.92%、硫化氢占82.20× 10<sup>-6</sup>。科 A2 井烃类气体含量占 63.5%、二氧化碳 占 36%、一氧化碳占 122×10<sup>-6</sup>, 硫化氢为(137~ 172)×10<sup>-6</sup>。烃类气碳同位素分析结果为: $\delta^{13}C_1 = -$ 50. 3%,  $\delta^{13}C_2 = -30.5\%$ ,  $\delta^{13}C_3 = -29.3\%$ ,  $\delta^{13}C_4 = -$ 28‰,表明烃类气碳同位素具有正序列分布,说明 其主要为有机成因气。本文中主要针对烃类气成藏

模式进行叙述。

渤中21~22构造南北两侧断裂系统较发育,断 裂和大型不整合面组成了本区油气的立体输导系 统,它们很好地沟通了凹陷中的成熟烃源岩,为油气 运聚和成藏提供了有利的通道。 渤中 21~22 构造 两侧分别邻近渤中凹陷主洼和渤中西南次洼,其古 潜山天然气成藏可能存在两种途径,一是沙河街组 高成熟烃源岩生成的天然气通过断层的垂向输导和 不整合面的横向输导而聚集成藏:二是古潜山上覆 的东营组成熟烃源岩直接垂直向下排烃,至古潜山 风化壳和内幕成藏(图8)。根据3500~4510 m 段 流体包裹体资料来看,该层段存在3~4次相对较明 显油气充注。东一段3500~3510 m 深度范围内, 流体包裹体均一化温度为115~130℃:东二段 4380~4390 m 深度范围内,流体包裹体均一化温度 140~155 ℃;东三段4500~4510 m 深度范围,流体 包裹体均一化温度大于160℃。东一段与东二段包 裹体以气液两相包裹体共生为主;东三段包裹体以 气相包裹体为主,根据包裹体温度推测渤中21~22 天然气藏主要为晚期成藏,大致在5 Ma 以来,其形 成时间较晚,对天然气的保存也十分有利。



图 8 渤中 21~22 气藏成藏模式

Fig. 8 Hydrocarbon accumulation model for Bozhong 21-22 buried hill

### 5 结 论

(1) 渤中 21~22 凹中深埋古潜山圈闭形态好、 古生界古潜山取心证实溶蚀孔及裂缝较发育,且该 构造位于渤中凹陷和渤中西南次洼之间,凹陷深部 沙河街组和东三段烃源岩已达到高成熟—过成熟 期,且局部已进入大量生气阶段,通过断层的垂向输 导和不整合面的横向输导为构造区提供充足的天然 气来源。此外渤中 21~22 具有圈闭形成早于烃源 岩排烃高峰期以及天然气晚期持续充注的成藏优 势。以上几个方面为研究区成藏提供了十分有利的 条件。

(2) 渤中 21~22 凹中深埋古潜山具有烃类气和以二氧化碳为主的非烃类气混合充注成藏的特征, 它们在充注时间上存在一定的先后关系, 其中烃 类气自馆陶组沉积以来(距今24.6~0 Ma) 持续充 注, 充注高峰期为距今10 Ma 以来, 而二氧化碳晚期 (距今5~0 Ma) 具有与烃类气同期充注的特征。

(3) 渤中 21~22 凹中深埋古潜山井底深度达 到 5 141 m, 温度达到 180 ℃, 是目前渤海海域发现 深度最大、温度最高的天然气藏。科探井深层天然 气发现的重大意义在于它不仅激活了环渤中坳陷众 多深埋古潜山的勘探前景, 而且为具有相似构造及 储层条件的古潜山勘探提供了参考, 必将有望实现 渤海油田天然气发现的规模性突破。

**致谢** 感谢夏庆龙教授级高工、郝芳院士、金强教授指导和帮助。

#### 参考文献:

- [1] 李德生. 渤海湾含油气盆地的地质和构造特征[J]. 石油学报,1980,1(1):6-20.
  LI Desheng. The geological and structural characteristics of Bohai Bay petroliferous basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1980,1(1):6-20.
- JIN Qiang, ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, et al. Generation and accumulation of hydrocarbons in deep "buried hill" in the Baxian depression, Bohai Bay Basin, eastern China [J]. Journal of Petroleum Geology, 2014,37(4):391-404.
- [3] 孟卫工,陈振岩,李湃,等.潜山油气藏勘探理论与实践:以辽河坳陷为例[J].石油勘探与开发,2009,36
   (2):136-143.

MENG Weigong, CHEN Zhenyan, LI Pai, et al. Exploration theories and practices of buried-hill reservoirs: a case from Liaohe Depressions [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2):136-143.

[4] 蒋有录,叶涛,张善文,等. 渤海湾盆地潜山油气富集
 特征与主控因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):20-29.

JIANG Youlu, YE Tao, ZHANG Shanwen, et al. Enrich-

ment characteristics and main controlling factors of hydrocarbon in buried hill of Bohai Bay Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2015,39(3);20-29.

- [5] 贺电波,杜晓峰,李才,等. 渤中 21-2 潜山内幕地层的 地震识别与划分[J].石油物探,2011,50(1):45-50.
  HE Dianbo, DU Xiaofeng, LI Cai, et al. Seismic identification of formations in BZ21-2 buried-hill[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2011,50(1):45-50.
- [6] 姜福杰,庞雄奇.环渤中凹陷油气资源潜力与分布定量评价[J].石油勘探与开发,2011,38(1):23-29.
  JIANG Fujie, PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of hydrocarbon resource potential and its distribution in the Bozhong Sag and surrounding areas, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011,38 (1):23-29.
- [7] 李友川,黄正吉,张功成. 渤中坳陷东下段烃源岩评价及油源研究[J]. 石油学报,2001,22(2):44-48.
  LI Youchuan, HUANG Zhengji, ZHANG Gongcheng. E-valuation of the lower Dongying source and oil source research in Bozhong Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001,22(2):44-48.
- [8] 戴金星,邹才能,陶士振,等.中国大气田形成条件和 主控因素[J].天然气地球科学,2007,18(4):473-483.
  DAI Jinxing, ZOU Caineng, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and main controlling factors of large gas fields in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18 (4):473-483.
- [9] 王涛. 中国东部裂谷盆地油气藏地质[M]. 北京:石油 工业出版社,1997:19-40.
- [10] JAMES N P, CHOQUETTE P W. Paleokarst [M]. New York:Springe Verlag, 1988.
- [11] 张兵,郑荣才,王绪本,等.四川盆地东部黄龙组古岩 溶特征与储集层分布[J].石油勘探与开发,2011,38
   (3):257-266.

ZHANG Bing, ZHENG Rongcai, WANG Xuben, et al. Paleokarst and reservoirs of the Huanglong Formation in eastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development,2001,38(3):257-266.

 [12] 张松扬,范宜仁,王世星,等. 奥陶系喀斯特地层自然 伽马能谱测井曲线质量控制[J]. 测井技术,2007,31
 (5):455-457. ZHANG Songyang, FAN Yiren, WANG Shixing, et al. Quality control on GR spectral log in Ordovician Carbonate Carst Formation [J]. Well Logging Technology, 2007,31(5):455-457.

- [13] 张松扬,范宜仁,李会银.基于自然伽马能谱测井的 岩溶型碳酸盐岩储层层位划分与对比[J].中国石油 大学学报(自然科学版),2006,30(6):35-41.
  ZHANG Songyang, FAN Yiren, LI Huiyin. Karst carbonate reservoir division and contrast based on natural gamma ray spectrometry logging in Tahe Oilfield [J].
  Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2006,30(6):35-41.
- [14] 吕修祥,杨宁,周新源,等. 塔里木盆地断裂活动对奥 陶系碳酸盐岩储层的影响[J]. 中国科学(D辑):地 球科学,2008,38(增刊I):48-54.
  LÜ Xiuxiang, YANG Ning, ZHOU Xinyuan, et al. The fault activities and their effects on Ordovician carbonate reservoir in Tarim Basin[J]. Science in China (Ser D): Earth Science,2008,38(sup I):48-54.
- [15] 罗贝维,贾承造,魏国齐,等.四川盆地上震旦统灯影组风化壳古岩溶特征及模式分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):8-19.
   LUO Beiwei, JIA Chengzao, WEI Guoqi, et al. Charac-

teristics and models of weathering paleo-karst in Upper Sinian, Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015, 39(3):8-19.

- [16] 戴金星,宋岩,戴春森,等.中国东部无机成因气及气 藏形成条件[M].北京:科学出版社,1995:102-150.
- [17] 刘国栋. 华北平原新生代裂谷系的深部过程[M]// 现代地壳运动(1)——大陆裂谷与深部过程. 北京: 地震出版社,1985:17-25.
- [18] 朱伟林,米立军,龚再升,等. 渤海海域油气成藏与勘 探[M].北京:科学出版社,2009:1-35.
- [19] 邓运华. 郯庐断裂带新构造运动对渤海东部油气聚
   集的控制作用[J]. 中国海上油气(地质),2001,15
   (5):301-305.

DENG Yunhua. Control of the neotectonism along Tancheng-Lujiang fracture zone on hydrocarbon accumulation in the eastern Bohai sea [J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2001, 15(5):301-305.

(编辑 徐会永)