

文章编号: 0253-2697(2012)S1-071-09

## 冀中坳陷隐蔽型潜山油气藏主控因素与勘探实践

赵贤正<sup>1</sup> 王 权<sup>1</sup> 金凤鸣<sup>1</sup> 王海潮<sup>1</sup> 罗金洋<sup>1</sup> 曾贱辉<sup>2</sup> 范炳达<sup>1</sup>

(1. 中国石油华北油田公司 河北任丘 062552; 2. 中国石油大学地球科学学院 北京 102249)

**摘要:**渤海湾盆地冀中坳陷具有形成碳酸盐岩潜山油气藏的地质条件。随着勘探程度的不断深入,勘探方向逐步转向埋藏深、识别难度大、成藏条件复杂的隐蔽型深潜山、潜山内幕等隐蔽型潜山目标。研究表明,埋藏深度大于3 500 m的隐蔽型深潜山以沙河街组三段—四段为主要烃源层,油气资源比较丰富,其储集空间以孔洞、裂缝为主,物性受埋深影响小,具有较好的储集能力;潜山内幕成藏受控于潜山内幕储盖组合的有效性、潜山内幕储层物性与油气运移通道输导能力的耦合关系,具有良好封堵能力的内幕盖层、良好储集物性的内幕储层以及优势的油气运移通道是潜山内幕成藏的关键。牛东潜山带、长洋淀潜山带、肃宁潜山带等多个隐蔽型潜山油气成藏区带的发现,展现了冀中坳陷该领域良好的勘探前景。

**关键词:**渤海湾盆地;冀中坳陷;隐蔽型潜山油气藏;控制因素;成藏模式;勘探实践

**中图分类号:** TE122

**文献标识码:** A

## Main controlling factors and exploration practice of subtle buried-hill hydrocarbon reservoir in Jizhong depression

ZHAO Xianzheng<sup>1</sup> WANG Quan<sup>1</sup> JIN Fengming<sup>1</sup>

WANG Haichao<sup>1</sup> LUO Jinyang<sup>1</sup> ZENG Jianhui<sup>2</sup> FAN Bingda<sup>1</sup>

(1. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Jizhong depression in Bohai Bay Basin has the geological conditions to form carbonate buried-hill hydrocarbon reservoir. With continuous deepening of the degree of exploration, the exploration gradually shifts to subtle deep buried-hill, buried-hill inside and other subtle buried-hill targets with large buried depth, great identification difficulty and complex accumulation conditions. Studies have shown that the subtle deep buried-hill with burial depth greater than 3 500 m takes the 3rd member-4th member of Shahejie Formation as the major source rock with relatively rich oil and gas resources. The reservoir space is dominant by holes and cracks and presents better accumulation capacity because the reservoir physical properties are less affected by buried depth. As for buried-hill inside, the reservoir formation is controlled by the coupling relationship among the effectiveness of internal buried-hill reservoir and caprock assemblage, the physical properties of internal buried-hill reservoir and transporting capacity of oil-gas migration channel. The internal caprocks with better sealing capacity, internal reservoirs with better reservoir physical properties and preferential hydrocarbon migration channels are the key for internal buried-hill accumulation. In practice, multiple subtle buried-hill hydrocarbon accumulation belts have been discovered, such as Niudong buried-hill belt, Changyangdian buried-hill belt, Suning buried-hill belt, etc., presenting good exploration prospects in Jizhong depression.

**Key words:** Bohai Bay Basin; Jizhong depression; subtle buried-hill hydrocarbon reservoir; controlling factor; accumulation mode; exploration practice

渤海湾盆地冀中坳陷潜山油气成藏条件优越,1975年发现了中国第一个中—新元古界海相碳酸盐岩古潜山高产大油田——任丘古潜山油田<sup>[1]</sup>,探明石油地质储量 $4 \times 10^8$  t,最高年产量达 $1\,352 \times 10^4$  t。其后在不到10年的时间里又相继发现了多个大中型潜山油田,共计探明石油地质储量 $5.27 \times 10^8$  t,占坳陷总探明储量的52%,为中国原油年产量上亿吨做出了重

要贡献。

随着勘探程度的不断深入,冀中坳陷埋藏浅、规模大、容易发现的潜山顶块状油气藏大多数已经被钻探,发现规模储量的难度越来越大。但冀中坳陷剩余油气资源依然比较丰富,隐蔽型深潜山、潜山内幕、潜山坡等油气藏研究勘探程度低;随着三维地震连片采集、提高分辨率精细处理等三维地震勘探技术的发展,隐蔽

**基金项目:**国家重大科技专项(2011ZX05006-005)和中国石油天然气股份有限公司科技项目(2011D-0703)资助。

**第一作者及通讯作者:**赵贤正,男,1962年10月生,1986年毕业于华东石油学院,1989年获中国石油大学(北京)硕士学位,2005年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油华北油田公司副总经理、教授级高级工程师,主要从事石油地质综合研究与勘探管理工作。Email: xzzhao@petrochina.com.cn

型潜山油气藏已成为了冀中坳陷油气勘探的重要接替领域。近几年牛东1、长3、文古3等多个隐蔽型潜山油气藏的发现,展现了该领域良好的勘探前景。因此有必要对其油气成藏主控因素与勘探经验进行系统总结,以更好地指导今后该领域的深化研究与勘探工作。

## 1 隐蔽型潜山油气藏主要类型

隐蔽油气藏是指在现有勘探方法和技术条件下较难识别和描述的油气藏类型<sup>[2-4]</sup>。隐蔽油气藏概念的提出,对油气勘探实践具有重要的理论和现实意义<sup>[5-6]</sup>;研究中不必拘泥于已有的油气藏类型,而是要不断地开拓视野与范围,发现不同的油气藏类型,并采取不同的研究思路与勘探方法探索之。

根据隐蔽油气藏的概念,笔者将受三维地震资料品质、勘探技术方法、成藏条件复杂性以及研究认识程度限制,圈闭识别描述难度大、成藏模式更加复杂、油气聚集富集程度的预测与认识难度也更大的潜山油气藏统称为隐蔽型潜山油气藏。在前人研究基础上<sup>[7-10]</sup>,根据冀中坳陷潜山油气藏的圈闭条件、供烃条件、储集条件、输导条件等成藏条件,并借鉴其他地区潜山油气藏的分类方案<sup>[11-12]</sup>,将该区隐蔽型潜山油气藏划分为隐蔽型深潜山、潜山内幕(潜山腹)和潜山坡3种主要类型。

隐蔽型深潜山油气藏是指埋深大于3500 m、构造落实难度大或成藏可能性预测难度大的潜山顶块状油气藏。当然,这里并不是将所有的深层潜山顶块状油气藏都简单地归为隐蔽型深潜山油气藏,隐蔽型深潜山油气藏应当具有如下特性:由于埋藏深度大,甚至达到5000~6000 m以深,受三维地震资料品质的限制,其地震资料信噪比和分辨率不高,造成潜山构造的发现、落实难度较大,解释方案常存在多解性;或油气供给条件不易判断,聚集成藏条件更加复杂,潜山是否成藏预测难度大。近年发现的霸县凹陷牛东潜山带牛东1、饶阳凹陷长洋淀潜山带长3和肃宁潜山带宁古8X等潜山油气藏就属于隐蔽型深潜山油气藏(图1)。

潜山内幕油气藏是指位于潜山内部的油气藏类型,以“新生古储古盖”为典型特征。该类油气藏形成主要取决于潜山内部的储盖组合,尤其是隔(盖)层的有效性。潜山内幕油气藏主要分布于断陷(凹陷)斜坡带、洼中潜山断裂构造带以及紧邻生油洼槽的凸起潜山构造带,根据储盖层配置关系、地层产状与油藏形态等因素,又可细分为潜山内幕层状油气藏和潜山内幕块状油气藏。在霸县凹陷文安斜坡内带发现的文古3油藏就属于该类油气藏(图1)。

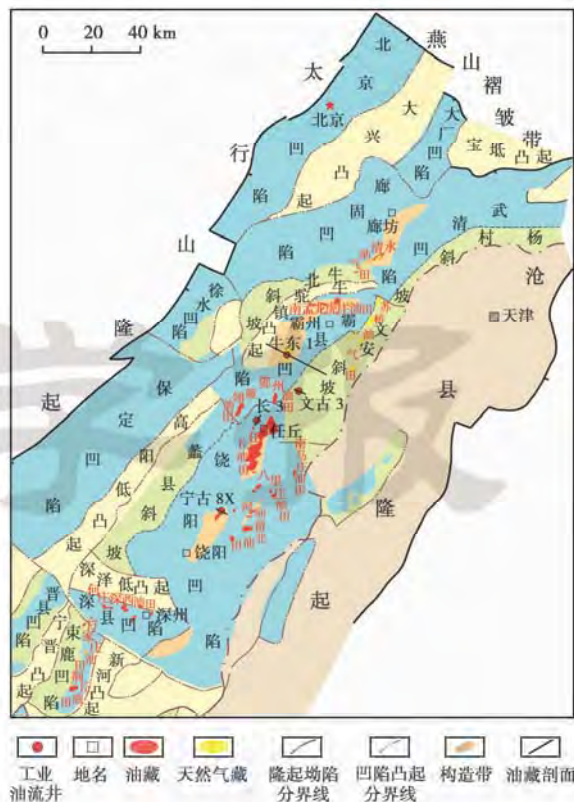


图1 冀中坳陷潜山油气藏分布

Fig. 1 Distribution of buried-hill reservoirs in Jizhong depression

潜山坡油气藏是指沿潜山坡不整合面分布的层状油气藏,其由不均衡剥蚀作用所导致的储集层沿山坡不整合面向上尖灭而形成。该类油气藏上部由古近系湖相泥岩封盖,侧面由潜山内幕隔层形成封堵。潜山坡底部是否有烃源供给,以及不整合面供油通道是否畅通是成藏的关键。

## 2 隐蔽型潜山油气藏主要控制因素

### 2.1 隐蔽型深潜山油气藏

#### 2.1.1 丰富的油气资源供给

丰富的油气资源是各种油气藏形成的重要前提条件,对于冀中坳陷隐蔽型深潜山油气藏更是如此。与渤海湾盆地的其他坳陷相比,冀中坳陷烃源岩层位老、埋藏深,深层油气资源更加丰富。冀中坳陷主力烃源岩沙河街组三段(沙三段)及沙河街组四段(沙四段)埋深一般大于3500 m,最大埋深超过8000 m,是隐蔽型深潜山的主要油气来源。油源对比分析表明,霸县凹陷牛东1超深潜山油气藏的油气就来自深层的沙四段烃源层<sup>[13]</sup>。

冀中坳陷深洼槽与沉积中心基本吻合,控制着各层系烃源岩的分布。沙三段和沙四段沉积期在廊固、霸县和饶阳3个主力凹陷发育大范围的半深湖—深湖相沉积,烃源岩发育,其中埋深大于3500 m的烃源岩



分布面积达 8 000 km<sup>2</sup>(图 2)。在上述 3 个凹陷内,沙三段烃源岩厚度一般为 300~1 500 m(表 1),有机碳含量平均为 1.2%~2.5%,总烃平均为(610~1 971)×10<sup>-6</sup>,生烃潜量平均为 3.15~9.10 mg/g,评价为好烃源岩。而沙四段—孔店组烃源岩以霸县凹陷发育最

好,烃源岩厚度为 500~1 500 m,有机碳含量平均为 1.6%,总烃平均为 904×10<sup>-6</sup>,生烃潜量平均为 3.57 mg/g,达到好烃源岩标准;其次是晋县凹陷,烃源岩厚度为 150~800 m,有机碳含量平均为 0.63%,总烃平均为 1 438×10<sup>-6</sup>,为中等—好烃源岩。

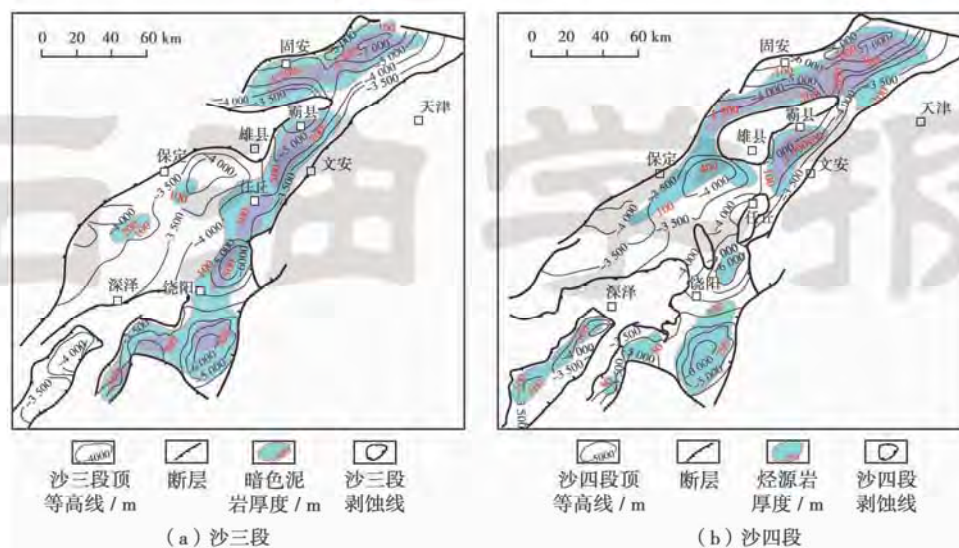


图 2 冀中拗陷深层烃源岩分布

Fig. 2 Deep source rock distribution in Jizhong depression

表 1 冀中拗陷分凹陷深层(>3 500 m)烃源岩评价

Table 1 Deep source rock(>3 500 m) evaluation results of different sags in Jizhong depression

凹陷	层位	暗色泥岩厚度/m	有机碳含量/%	总烃/10 <sup>-6</sup>	生烃潜量/(mg·g <sup>-1</sup> )	烃源岩评价
廊固	沙三段	1 300~1 500	1.20	610	3.15	中等—好烃源岩
	沙四段—孔店组	600~1 500	1.10	580	3.50	中等—好烃源岩
霸县	沙三段	500~700	2.36	1 064	8.92	好烃源岩
	沙四段—孔店组	500~1 500	1.60	904	3.57	好烃源岩
饶阳	沙三段	300~900	2.50	1 971	9.10	好烃源岩
晋县	孔店组	150~800	0.63	1 438		中等—好烃源岩
束鹿	沙三下亚段	200~600	1.01	1 090	3.17	好烃源岩

油气资源评价结果表明,冀中拗陷深层烃源岩生油量为 194.19×10<sup>8</sup>t,生气量为 94 075.6×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,分别占全区生油气量的 71%和 87%;深层石油聚集量为 18.25×10<sup>8</sup>t,天然气聚集量为 1 237.7×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,分别占全区总聚集量的 79%和 89%。其中霸县凹陷深层石油聚集量为 2.89×10<sup>8</sup>t,天然气聚集量为 573.5×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>;廊固凹陷深层石油聚集量为 1.89×10<sup>8</sup>t,天然气聚集量为 241.3×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>;饶阳凹陷深层石油聚集量为 8.78×10<sup>8</sup>t,天然气聚集量为 90.7×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。减去可能由深层运移到中浅层的资源量,冀中拗陷深层石油资源量为(9.14~10.3)×10<sup>8</sup>t,天然气资源量为 1 237.66×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,为深潜山油气藏形成奠定了比较丰富的油气资源基础。

隐蔽型深潜山多属于“深洼低隆”型潜山,一般在凹陷形成早期就已经具备潜山雏形,古近纪以来始终是油气运移的指向,具有近油源优势。在具有相同油气源和供烃途径的油气运、聚条件下,深层高成熟的轻质油或天然气首先运移、充注于就近的深潜山圈闭,达到圈闭溢出点后再继续沿断裂等通道纵向运移至中、浅层圈闭聚集,因此深潜山油气藏具有早期形成、早期充注的特点。由表 2 可以看出,同以河间—肃宁深洼槽为油源区的梁村、大王庄东、八里庄西以及薛庄等深潜山油气藏的原油密度、原油黏度随埋藏深度的变浅而增大,原始油气比则随埋藏深度的变浅而减小,这表明油气首先注入深潜山。因此深层丰富的油气资源为隐蔽型深潜山油气藏的形成提供了良好的资源基础。



表 2 冀中坳陷河间—肃宁洼槽潜山油藏原油特征对比

Table 2 Correlation of crude oil characteristics from buried-hill reservoirs in Hejian-Suning trough of Jizhong depression

潜山油藏	井号	层位	埋深/m	原油密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	原油黏度/ ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	油气比/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )
梁村	宁古 1	长城系高于庄组	5064	0.79	1.64	740
大王庄东	留 58	蓟县系雾迷山组	4163	0.83	3.69	328
八里庄西	马 25	蓟县系雾迷山组	3759	0.86	9.78	14
薛庄	马 71	蓟县系雾迷山组	2828	0.88	38.7	5

## 2.1.2 良好的储集条件

深层碳酸盐岩储集物性是决定深潜山能否成藏并富集的主要控制因素。譙汉生等人对渤海湾盆地 32 个(21 个奥陶系油藏、11 个蓟县系雾迷山组油藏)碳酸盐岩潜山油藏孔隙度与埋藏深度关系研究表明<sup>[14]</sup>,潜山碳酸盐岩储层随着埋藏深度的增加,孔隙度没有明显的减小,大体保持在 5%~6%,变化不大。这表明碳酸盐岩储层早期形成的孔洞和裂缝受埋藏成岩作用的影响较小,潜山埋至深层后仍然能保存大量的早期形成的孔洞和裂缝,具有较好的储集性能。

在冀中坳陷,深潜山储集层主要是蓟县系雾迷山组、寒武系府君山组(少数为长城系高于庄组)碳酸盐岩地层,上覆地层为古近系。深层碳酸盐岩主要经历燕山期与喜山期两次大规模的抬升剥蚀与风化淋滤作用,造就了良好的古岩溶地貌,形成孔、缝、洞复合储集空间。同时,由于储层物性受埋藏深度影响较小,在埋深较大时仍可形成较好的储集类型和较发育的裂缝。

其中,燕山期发育的碳酸盐岩古地貌潜山,一般是在大型复背斜的基础上由翘倾断块遭受剥蚀形成的古地貌潜山,储集体储集性能最好;喜山期发育的碳酸盐岩潜山(古近系与下伏潜山地层平行)储层次之。

以深潜山比较发育的饶阳凹陷、霸县凹陷为例,目前已发现的深潜山油气藏中主要碳酸盐岩储集体为雾迷山组、高于庄组藻云岩,以及寒武系、奥陶系的石灰岩和白云岩。碳酸盐岩的原始结构和构造孔隙大都经过重结晶作用、白云岩化作用、构造裂缝及岩溶作用等次生改造,多形成由缝洞孔组成的相互连通的复合储集体。深潜山碳酸盐岩主要储集空间有微裂缝-孔隙型、似孔隙型、缝洞孔复合型以及溶洞-裂缝型 4 种(图 3),具有较好的储集性能。如饶阳凹陷的大王庄东潜山油藏中部埋深达 4 183.6 m,产油量仍高达 1 142 t/d;霸县凹陷牛东潜山带牛东 1 井在 5 641.5~6 027 m 井段酸压后,产油量为 642.91  $\text{m}^3/\text{d}$ ,产气量为  $56 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[13]</sup>。

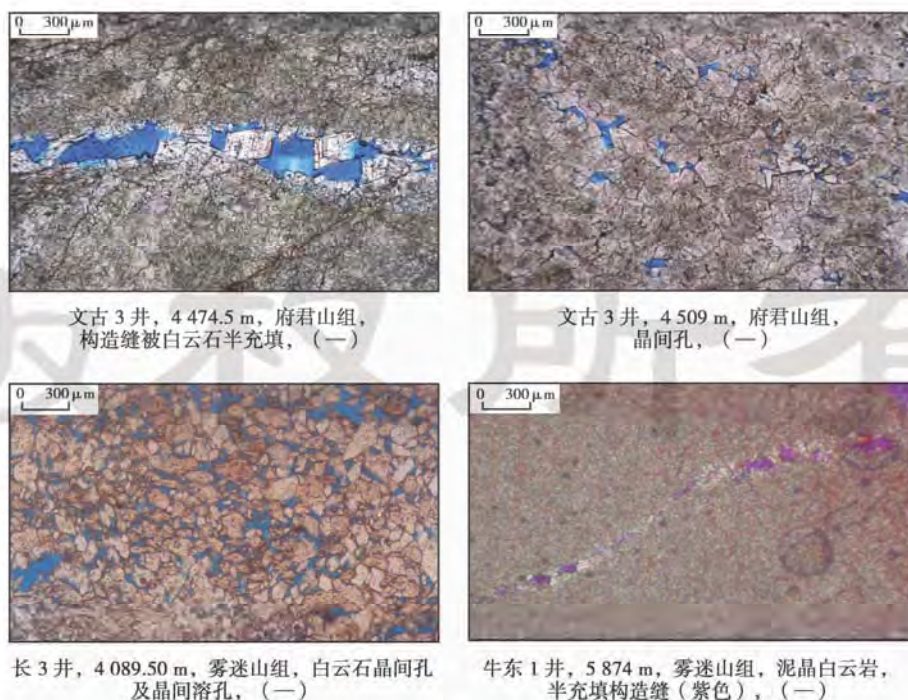


图 3 冀中坳陷碳酸盐岩储层薄片

Fig. 3 Carbonate reservoir thin sections in Jizhong depression



## 2.2 潜山内幕油气藏

### 2.2.1 封盖条件

根据岩性组合,冀中坳陷下古生界—中元古界可以划分出6套潜山内幕储盖组合(图4)。需要说明的是,以奥陶系中上统下马家沟组—峰峰组碳酸盐岩作储集层、上覆石炭系—二叠系煤系泥质岩为盖层的储盖组合,多形成碳酸盐岩潜山顶油气藏,因此在研究中多不将其划分到内幕储盖组合中。

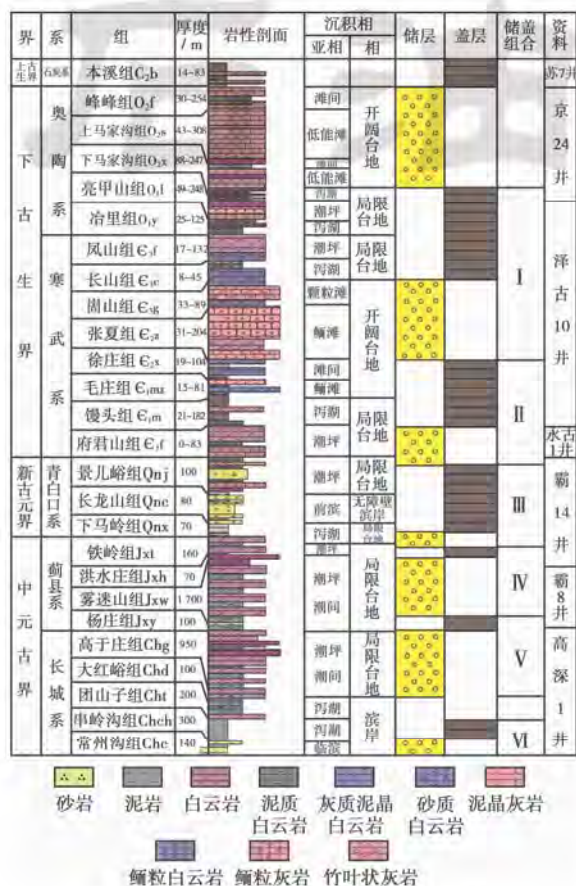


图 4 中元古界一下古生界储盖组合

**Fig. 4** The Mesoproterozoic—Lower Palaeozoic reservoir-sealing assemblages

第一套储盖组合,寒武系张夏—崮山组鲕灰岩作储集层,上覆长山—凤山组含泥质较重的碳酸盐岩作盖层。该套储盖组合主要分布于廊固凹陷东部—武清凹陷、霸县凹陷文安斜坡、饶阳凹陷南马庄构造带以及西南部地区、深县凹陷深南—榆科地区。

第二套储盖组合,寒武系府君山组碳酸盐岩作储集层,上覆馒头组—徐庄组泥页岩作盖层。该套储盖组合主要分布在廊固凹陷东北部、武清凹陷、霸县凹陷北部及文安斜坡、饶阳凹陷北部地区。

第三套储盖组合, 蓟县系铁岭组碳酸盐岩作储集层, 上覆青白口系下马岭组泥页岩作盖层。主要分布在廊固凹陷及霸县凹陷的牛北斜坡, 其余地区超覆缺失。

第四套储盖组合, 蓟县系雾迷山组碳酸盐岩作储集层, 上覆洪水庄组泥页岩作盖层。其中雾迷山组全坳陷分布, 洪水庄组仅分布于坳陷中北部, 大致是高阳—任丘—大城一线以北地区。该套内幕组合主要分布在廊固凹陷东部、霸县凹陷文安斜坡和武清凹陷。

第五套储盖组合,长城系高于庄组碳酸盐岩作储集层,上覆蓟县系杨庄组泥质白云岩作盖层。其中高于庄组三、四段全坳陷分布,杨庄组于高阳至河间一线以南地区相变为较纯的碳酸盐岩,失去隔层意义,以北地区可作盖层,且向北变好,为一套局部内幕储盖组合。该套内幕组合主要分布在饶阳凹陷中北部和武清凹陷。

第六套储盖组合, 长城系常州沟组石英砂岩作储集层, 上覆串岭沟组泥页岩作盖层。该套储盖组合在全坳陷均有分布。

潜山内幕圈闭形成油气聚集的关键, 在于是否存在好的潜山内幕盖(隔)层。在上述6套储盖组合中, 长山—凤山组、馒头—徐庄组、洪水庄组、串岭沟组已经证实可作为有效的盖(隔)层, 在这些盖(隔)层下找到了具有工业价值的潜山内幕油气藏。这些盖(隔)层岩性具有一个相同的特点, 就是岩石成分中泥质含量高, 在自然伽马测井曲线中表现为高值段, 一般达到12.7~20微伦琴/h, 其泥质相对体积含量一般在30%以上。特别是青白口系景儿峪组一下马岭组和蓟县系洪水庄组, 碳酸盐岩地层含泥质重, 自然伽马值为24.3~25.3微伦琴/h, 泥质相对体积含量高达60%以上, 封盖性能最好。

### 2.2.2 储层物性与断层输导体系耦合对潜山内幕成藏的控制

断陷盆地主要发育断垒型、断阶型、斜坡型等多种潜山构造带,具有断面、不整合面、渗透层等多种油气输导通道。其中,潜山内幕油气藏形成以断层为主要的油气运移输导通道。通过构建单断型潜山成藏地质模型,开展了潜山及内幕油气成藏物理模拟实验。结果表明,输导体系(断裂)与潜山内幕储层的物性差异影响着潜山内幕的油气充注与优先成藏。

建立的断层输导型地质模型如图 5(a)所示,图中 F 为输导断层, K2、K4 为隔挡层, K1、K3 和 K5 为潜山顶及内幕储集层。当断层渗透性输导能力较弱, 渗透率为 1 156 mD, K1、K3 和 K5 储层的渗透率分别为 3 746 mD、2 266 mD 和 1 156 mD 时[图 5(b)], 原油优先充注于模型底部的 K5 层, 然后向中部的 K3 层充注, 表明当断层输导能力较弱时, 有利于形成潜山内幕油藏。当断层输导能力较强, 渗透率为 5 596 mD, K1、K3 和 K5 储层的渗透率分别为 1 156 mD、2 266 mD 和



3 746 mD 时[图 5(c)],原油优先充注于模型顶部的 K1 层,之后是模型底部的 K5 层,而模型中部的 K3 层始终没有充注,表明当断层为高效输导层时,若潜山内幕存在高渗透性储层,则潜山顶和潜山内幕均可成藏,如文古 3 井寒武系潜山内幕油藏。

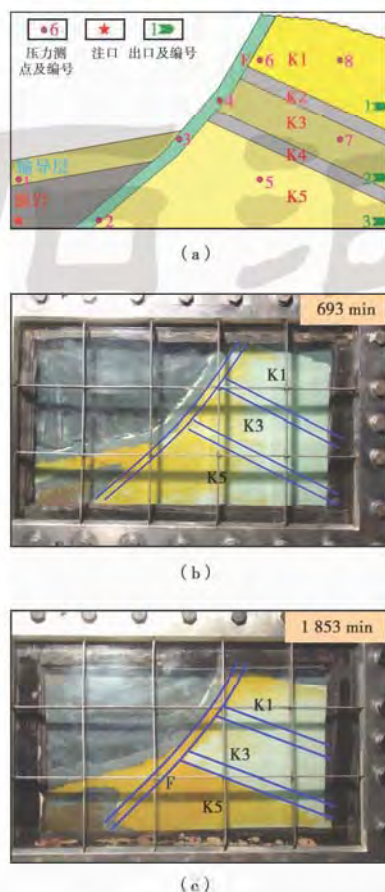


图 5 潜山成藏物理模拟实验结果

Fig. 5 Hydrocarbon migration simulation results of buried hill

### 2.3 潜山坡油气藏

潜山坡油气藏是指油气进入潜山斜坡上的圈闭而形成的油气藏,如任丘潜山奥陶系油藏、南马庄潜山寒武系府君山组油藏等。该类油气藏的形成主要受不整合面和顶、底隔板层的控制。

不整合面是主要的油气运移通道,其上的砾岩层和之下的半风化黏土层是不整合面输导体重要的组成部分,可以组成供烃“双层通道”。通过不整合面,主生油洼槽中生成的油气向潜山坡油藏中运移聚集,主要存在 3 种油气运移方式:①在潜山侧翼,烃源岩与不整合面接触形成直接油气运移,油气源供给条件好,如任丘潜山奥陶系油藏;②烃源岩与潜山坡油藏储层未直接接触,油气通过不整合面的“桥梁”作用进入潜山坡储层中;③洼槽区生成的油气通过断层-不整合面复合运移通道,在潜山坡圈闭中形成聚集,如南马庄潜山寒

武系油藏。

顶、底隔板层是形成潜山坡油气藏(圈闭)的决定性因素。潜山坡油气藏或圈闭的形成由两个遮挡条件构成,即顶部由不整合面之上的泥质盖层遮挡,侧面及底部由潜山内幕隔层形成封堵。如任北奥陶系潜山坡油藏,以亮甲山组上部一马家沟组白云岩和白云质灰岩为储层,不整合面之上的古近系泥岩为顶板层,潜山内储层下部的冶里组—亮甲山组下部非渗透层为底板层,从而形成良好的顶、底遮挡条件。如果没有隔板层的存在,油气会顺着不整合面之上的砾岩层或潜山内幕输导层运移至潜山顶,而不能形成潜山坡油气藏。

## 3 典型隐蔽型潜山油气藏的发现与启示

### 3.1 典型隐蔽型潜山油气藏的发现

#### 3.1.1 牛东 1 超深潜山油气藏

牛东 1 超深潜山位于霸县凹陷西部陡带牛东潜山带。1977—1978 年在该区先后钻探了家 4 井、家 6 井和新家 4 井 3 口潜山探井,结果都因地震资料精度的限制导致潜山圈闭不落实而未钻遇潜山。其后 20 余年该区长期处于勘探停滞状态。

1998 年以来,持续开展牛东地区潜山领域的勘探与研究,先后实施的 1:50 000 高精度重磁力勘探和二维宽线采集处理,均证实潜山构造的存在;2005 年钻探兴隆 1 井,发现深层沙四段优质烃源岩 574 m,认为深潜山具备成藏的良好油气供给条件;2006 年实施二次三维地震采集,地震资料品质有了大幅改善,牛东超深潜山反射波组特征清晰,呈现断阶山结构,圈闭落实由 3 个断阶潜山圈闭组成<sup>[13]</sup>。综合评价认为,该潜山带被沙四段优质烃源岩覆盖,侧向也与该套烃源岩呈对接关系,油气供给条件有利,并构建了超深断阶潜山油气成藏模式(图 6)。据此部署钻探牛东 1 井获得成功,对 5 641.5~6 027 m 井段进行大型深度酸压改造,采用 16 mm 油嘴、63.5 mm 孔板放喷求产,产凝析油 642.91 m<sup>3</sup>/d、天然气 56×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。牛东 1 井的突破,发现了渤海湾盆地乃至中国东部目前埋藏最深、温度最高(201℃)的潜山油气藏,对于拓宽渤海湾盆地深层勘探领域具有重要意义<sup>[14]</sup>。

#### 3.1.2 长 3“古储古堵”潜山油藏

长 3 潜山位于饶阳凹陷任丘潜山带西侧的长洋淀潜山带。以往按照统一油水界面的潜山成藏模式,先后钻探了任 96 井、任 97 井、任 97-1 井 3 口潜山井,结果最低部位的任 97 井在雾迷山组获得 262.0 t/d 的工业油流,而比任 97 井高出 56 m 的任 97-1 井仅获得低产,最高部位的任 96 井测试出水,反映出该



潜山带油水关系复杂,成藏模式与以往不同。又因任 97 井后期很快出水,油藏认识不清,导致了该带勘探开发的停滞。

2006 年,在潜山内幕地层对比和层位标定的基础上,借助高精度二次三维地震勘探,精细开展潜山带内幕构造层的解释,发现任 96 井北侧存在一条南掉老断层,断层两侧地层受剥蚀程度不同,断层南侧下降盘任 96 井区潜山地层为寒武系—青白口系,断层北侧上升盘层位较老,反射特征与任丘蓟县系雾迷山组潜山地

层的反射特征具有较好相似性。由此推断,该区具有上升盘雾迷山组白云岩储层被下降盘寒武系—青白口系泥页岩、致密砂岩封堵的地质结构。据此构建了任 96 北断层下降盘青白口系景儿峪组—长龙山组对断层上升盘雾迷山组形成有效封堵的“古储古堵”潜山成藏模式<sup>[15]</sup>(图 7)。钻探长 3 井,对雾迷山组 4 088~4 120 m 井段和 4 149~4 230 m 井段进行中途测试,产油量分别为 408 m<sup>3</sup>/d 和 518 m<sup>3</sup>/d,发现了一种新的潜山油气成藏类型。

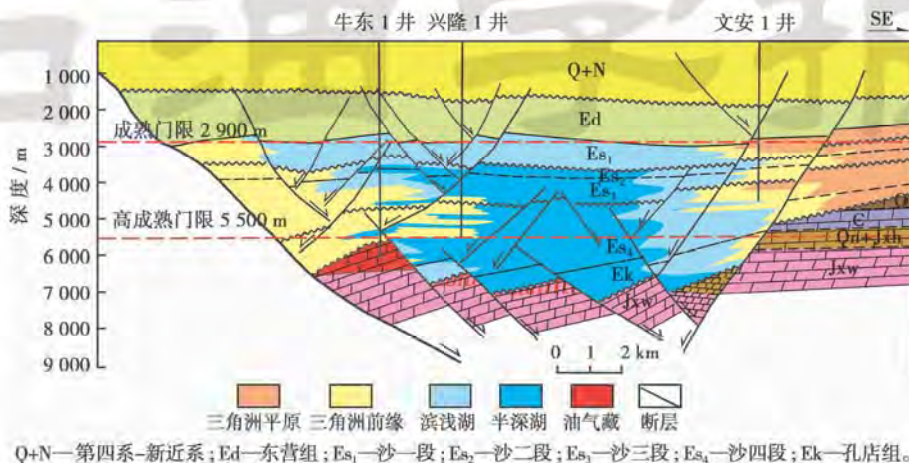


图 6 牛东 1 超深潜山油气藏剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 6 Profile of Niudong-1 ultra-deep buried-hill reservoir

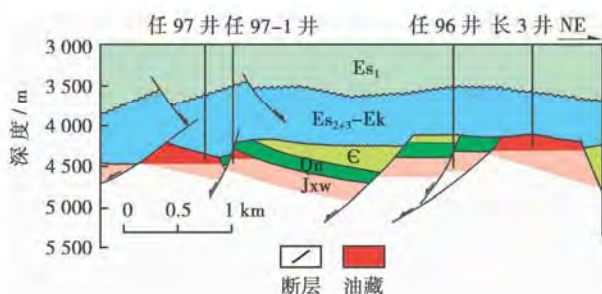


图 7 长 3 潜山油藏剖面

Fig. 7 Profile of Chang-3 buried-hill reservoir

### 3.1.3 宁古 8“红盖侧运”潜山油藏

宁古 8 潜山位于饶阳凹陷中部的肃宁潜山构造带。由于该潜山带埋藏深度大,圈闭形态落实不准,且该区潜山多被非生烃的沙四段—孔店组红色地层覆盖,成藏条件复杂,隐蔽性强,早年(1976—1987 年)曾以潜山为目的层钻探井 10 口,但仅发现了探明石油地质储量只有  $73 \times 10^4$  t 的小型宁古 1 潜山油藏。之后,该区的潜山钻探工作被迫停滞了下来。

2006 年,通过实施高精度二次三维地震勘探,深潜山成像得到改观,构造面貌较以往认识发生了较大变化,尤其是确定了宁古 2 断层下降盘的潜山层位,控

山断层断距由原来的 50 ms 增至 250 ms,以往认为的小潜山宁古 2 潜山的圈闭面积、幅度大幅提高,宁古 2 井钻在潜山的较低部位。同时研究发现,该潜山虽然顶部被红色地层覆盖,但其东侧下倾部位通过断层及不整合面可与该区沙三段主力烃源层对接,具有沙三段烃源岩生成的油气沿断面及不整合面向侧向运移至潜山顶部的储层聚集的“红盖侧运”型潜山成藏模式(图 8)。在宁古 2 潜山高部位钻探宁古 8X 井,于 4 688 m 进入潜山,层位为雾迷山组。对 4 692.78~4 862.15 m 井段测试,产油量为 253.2 m<sup>3</sup>/d、产气量为 6 364 m<sup>3</sup>/d。

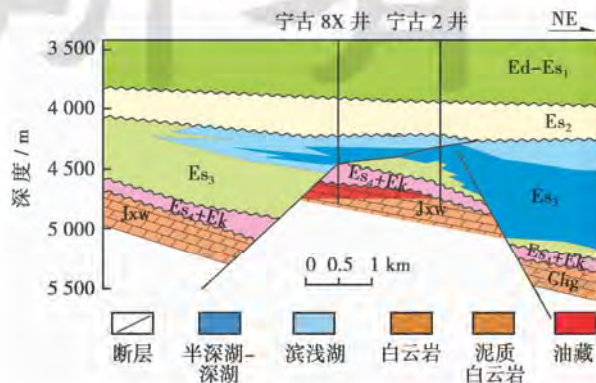


图 8 宁古 8 潜山油藏剖面

Fig. 8 Profile of Ninggu-8 buried-hill reservoir



### 3.1.4 文古 3“坡腹层状”潜山油藏

文古 3 潜山内幕圈闭位于霸县凹陷的文安斜坡。文安斜坡南北基底结构差异明显,斜坡北段基底断层断距大,形成垒堑相间、高垒深槽结构,发现了苏桥—信安镇潜山油气藏;而斜坡南段基岩断层断距总体较小,为低垒浅槽结构,常规构造型潜山圈闭不发育,多年勘探未发现潜山油藏。

重新认识文安斜坡南段潜山成藏条件,区内发育有寒武系府君山组白云岩做储层,上、下分别被寒武系馒头组—徐庄组和青白口系以泥岩、页岩、泥质灰岩为主的厚层致密层段所夹持的储盖组合,与中小型断层配置,不能形成大型山头潜山圈闭,但恰好可形成自身储盖组合侧向封堵的潜山内幕圈闭;同时,潜山内幕地层产状西倾,以断层或不整合面为油气运移通道,是主生油洼槽的主要油气运移指向,因而利于形成“坡腹层状”潜山内幕油藏(图 9)。据此钻探的文古 3 井,在潜山内幕寒武系府君山组 4 467.13~4 489.0 m 井段试油,产油量为 302.64 m<sup>3</sup>/d,产气量为 94 643 m<sup>3</sup>/d,实现了文安斜坡潜山内幕勘探的突破。

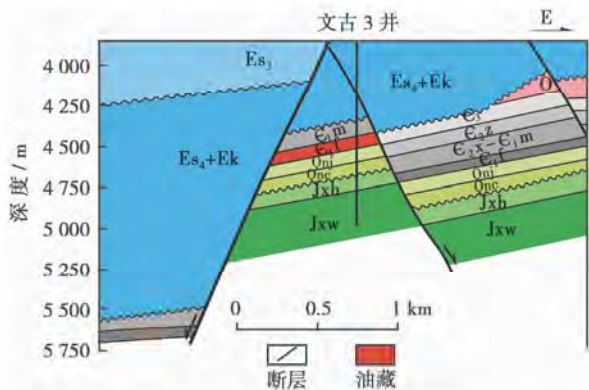


图 9 文古 3 潜山内幕油藏剖面

Fig. 9 Profile of Wengu-3 buried-hill reservoir

### 3.2 勘探启示

牛东 1、长 3、宁古 8(超)深潜山油气藏以及文古 3 潜山内幕油藏等隐蔽型潜山油气藏的成功勘探,进一步拓展了冀中拗陷潜山油气藏的勘探领域,成为老探区富油凹陷深化勘探、寻找规模富集储量的重要勘探方向。通过对隐蔽型潜山油气藏主控因素与勘探实例的剖析,可以得到以下 3 点重要启示。

(1) 积极转变勘探思路,不断探索新领域或油藏类型,是富油凹陷发展勘探的重要途径。中国东部渤海湾盆地老探区富油凹陷大多经历了 30 多年的大规模勘探,在以往新生古储、复式油气聚集等地质理论认识的指导下,发现了多个潜山油气田和古近系(构造)油气田。随着勘探工作的不断深入,上述领域的研究

与勘探程度也愈加深入,发现规模储量的难度越来越大。立足丰富的剩余油气资源,唯有不断转变勘探思路,积极探索新的勘探领域与油藏类型,才会实现油气勘探的不断深入与持续发展。冀中拗陷,就是在潜山顶油气藏勘探程度高的情况下,有意识地开展隐蔽型深潜山、潜山内幕油气藏等新油气藏类型的研究与探索,发现了富集储量,从而推动了富油凹陷的深化勘探工作。

(2) (连片)高精度三维地震资料,是精细落实圈闭、实现隐蔽型潜山勘探突破的基础。在富油凹陷勘探早期,以重力、磁力资料为主,寻找潜山主要发育区,利用二维、三维地震资料落实潜山形态,发现了一大批面积大、易于识别的中浅层潜山顶油气藏。但以往三维地震资料对于深潜山、复杂结构潜山、潜山内幕成像差,不能满足深潜山、潜山内幕等目的层段精细标定、识别和整体精细构造落实的需要。因此,在富油凹陷,实施二次三维地震采集、连片处理和精细处理,提高深潜山不整合面、潜山内幕层、控山断层和内幕断层的成像效果和精度,就成为隐蔽型潜山目标发现和落实的一个重要基础。牛东 1 井潜山油气藏的发现,就是开展岔河集三维地震二次采集,并进行三维地震资料连片处理,精细落实了牛东断陷潜山带的构造形态,实施钻探后取得的重大突破。长 3 井的成功,就是利用马西地区二次三维地震资料,发现了任 96 北潜山内幕断层,进而开展精细地层对比,构建了新的成藏模式,实施钻探取得了突破。

(3) 创新油气成藏模式,是隐蔽型潜山油气藏勘探突破的关键。地质认识创新,对推动富油凹陷油气勘探的持续深化具有重要的指导作用,其中油气成藏模式的创新尤为关键。通过开展油气成藏条件的综合分析,创新油气成藏模式,可以更好地指导有利勘探区带和目标的评价优选。在饶阳凹陷肃宁潜山构造带,就是开展主力烃源岩展布研究,认为潜山侧翼与主力烃源岩沟通,具有良好的油气供给条件;开展老井复查,在潜山圈闭低部位的宁古 2 井发现油气显示,认为潜山圈闭高部位具备成藏条件;综合分析构建了“红盖侧运”潜山成藏模式。以此为指导,钻探宁古 8X 井获得高产工业油流。

## 4 结 论

(1) 冀中拗陷具备形成各种类型潜山油气藏的良好条件,其中隐蔽型潜山油气藏勘探研究认识程度低,是重要的勘探新领域。

(2) 冀中拗陷深层潜山油气藏以沙三段和沙四段—孔店组为主力烃源岩,霸县凹陷、廊固凹陷和饶阳



凹陷是有利烃源岩发育区;深层石油资源量为 $(9.14 \sim 10.3) \times 10^8 \text{ t}$ ,天然气资源量为 $1237.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,油气资源丰富。

(3) 潜山储层的储集性能基本不受理藏深度影响,其储集空间类型主要有微裂缝-孔隙型、似孔隙型、缝洞孔复合型和溶洞-裂缝型 4 种,具有较好的储集条件。

(4) 冀中坳陷中元古界一下古生界主要发育 6 套潜山内幕储盖组合,具有形成潜山内幕油气藏的良好条件。成藏物理模拟实验表明,输导体系(断裂)与潜山内幕储层物性的有机配置,控制着潜山内幕油气藏的形成。

(5) 牛东 1 超深潜山油气藏、长 3“古储古堵”潜山油藏、文古 3“坡腹层状”潜山内幕油藏,以及宁古 8“红盖侧运”潜山油藏等多种富集的隐蔽型潜山油气藏的发现,不仅展示了冀中坳陷隐蔽型潜山领域广阔的勘探前景,同时对渤海湾盆地其他地区的潜山勘探具有重要的指导和借鉴作用。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨培山,李功治,任丘碳酸盐岩油藏的开发[J]. 石油学报,1980,1(4):57-64.  
Yang Peishan, Li Gongzhi. Development of carbonate reservoirs in the Renqiu Oil Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 1980, 1(4): 57-64.
- [2] Halbouty M T. The deliberate search for the subtle trap[G]. AAPG Memoir 32, 1982:351.
- [3] 牛嘉玉,李秋芬,鲁卫华,等.关于“隐蔽油气藏”概念的若干思考[J]. 石油学报,2005,26(2):122-126.  
Niu Jiayu, Li Qiufen, Lu Weihua, et al. Discussion on proposition and definition of subtle oil-gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(2): 122-126.
- [4] 庞雄奇,陈冬霞,张俊.隐蔽油气藏的概念与分类及其在实际应用中需要注意的问题[J]. 岩性油气藏,2007,19(1):1-8.  
Pang Xiongqi, Chen Dongxia, Zhang Jun. Concept and categorize of subtle reservoir and problems in its application[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(1): 1-8.
- [5] 杜美霞,庄新国.隐蔽油气藏勘探方法及发展趋势[J]. 海洋地质动态,2005,21(8):18-23.  
Du Meixia, Zhuang Xinguo. Prospecting method and development tendency of subtle traps[J]. Marine Geology Letters, 2005, 21(8): 18-23.
- [6] 庞雄奇,陈冬霞,张俊.隐蔽油气藏成藏机理研究现状及展望[J]. 海相油气地质,2007,12(1):56-62.  
Pang Xiongqi, Chen Dongxia, Zhang Jun. Progress and prospect of research on hydrocarbon accumulation mechanism of subtle reservoirs[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(1): 56-62.
- [7] 赵贤正,吴兆徽,闫宝义,等.冀中坳陷潜山内幕油气藏类型与分布规律[J]. 新疆石油地质,2010,31(1):4-6.  
Zhao Xianzheng, Wu Zhaohui, Yan Baoyi, et al. Distribution and types of buried hill oil-gas reservoir in Jizhong Depression[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(1): 4-6.
- [8] 易士威,赵淑芳,范炳达,等.冀中坳陷中央断裂构造带潜山发育特征及成藏模式[J]. 石油学报,2010,31(3):361-367.  
Yi Shiwei, Zhao Shufang, Fan Bingda, et al. Development characteristics of buried-hill and reservoir-forming pattern in central faulted structural belt of Jizhong Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 361-367.
- [9] 赵贤正,金凤鸣,王权,等.陆相断陷盆地洼槽聚油理论及其应用——以渤海湾盆地冀中坳陷和二连盆地为例[J]. 石油学报,2011,32(1):18-24.  
Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Wang Quan, et al. Theory of hydrocarbon accumulation in troughs within continental faulted basins and its application: a case study in Jizhong Depression and Erlian Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 18-24.
- [10] 高先志,吴伟涛,卢学军,等.冀中坳陷潜山内幕油气藏的多样性与成藏控制因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(3):31-35.  
Gao Xianzhi, Wu Weitao, Lu Xuejun, et al. Multiplicity of hydrocarbon reservoir and accumulation controlling factors within buried hills in Jizhong depression[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2011, 35(3): 31-35.
- [11] 李丕龙,张善文,王永诗,等.断陷盆地多样性潜山成因及成藏研究——以济阳坳陷为例[J]. 石油学报,2004,25(3):28-31.  
Li Pilong, Zhang Shanwen, Wang Yongshi, et al. Multiplex buried-hill genesis and pool-forming in rifted basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 28-31.
- [12] 杨明慧.渤海湾盆地潜山多样性及其成藏要素比较分析[J]. 石油与天然气地质,2008,29(5):623-631.  
Yang Minghui. Diversity of buried-hills and comparison of their hydrocarbon-pooling factors in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 623-631.
- [13] 赵贤正,金凤鸣,王权,等.渤海湾盆地牛东 1 超深潜山高温油气藏的发现及其意义[J]. 石油学报,2011,32(4):1-13.  
Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Wang Quan, et al. Niudong 1 ultra-deep and ultra-high temperature subtle buried hill field in Bohai Bay Basin: discovery and significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 1-13.
- [14] 潘汉生,方朝亮,牛嘉玉,等.渤海湾盆地深层石油地质[M]. 北京:石油工业出版社,2002.  
Qiao Hansheng, Fang Chaoliang, Niu Jiayu, et al. Petroleum geology of deep horizon in Bohaiwan Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [15] 赵贤正,金凤鸣,王余泉,等.冀中坳陷长洋淀地区“古储古堵”潜山成藏模式[J]. 石油学报,2008,29(4):489-498.  
Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Wang Yuquan, et al. Buried-hill reservoir-forming mode of “old reservoir-old sealing formation” in Changyangdian area of Jizhong Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4): 489-498.