

# 渤海湾盆地深层致密砂岩气勘探潜力浅析

马洪<sup>1</sup>, 王循<sup>2</sup>, 李欣<sup>1</sup>, 闫伟鹏<sup>1</sup>, 郭彬程<sup>1</sup>, 黄福喜<sup>1</sup>, 唐惠<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油天然气股份有限公司 冀东油田, 河北 唐山 063200)

**摘要:**致密砂岩气作为非常规油气资源的重要组成部分,近年来已成为天然气勘探的接替领域。天然气主要赋存于泥岩与致密砂岩互层的沉积组合中,以致密砂岩气的形式聚集成藏。良好而丰富的气源岩与紧邻烃源岩发育的有效砂岩的广泛分布是致密砂岩气成藏的基本条件。通过分析渤海湾盆地深层油气成藏的烃源岩和储集层两个主控因素,初步评价了渤海湾盆地深层致密砂岩气的成藏条件,其烃源岩与储层组合具备“千层饼”结构,有利于天然气近源短距运移成藏。多期次沉积砂体垂向叠置、横向联片,易于形成致密砂岩气藏。初步估算歧口凹陷歧北斜坡、辽河西部凹陷清水洼陷、霸县凹陷文安斜坡等区带致密砂岩气资源量约  $6 \times 10^{11} \sim 7 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,说明渤海湾盆地深层致密砂岩气具有较好的勘探前景,为渤海湾盆地深层的油气勘探提供地质依据。

**关键词:**渤海湾盆地深层;致密砂岩气;孔隙度;渗透率;勘探潜力

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)05-0063-08

## Analysis of Exploration Potential about Tight Sandstone Gas in Deep Zone of Bohai Bay Basin

MA Hong<sup>1</sup>, WANG Xun<sup>2</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, YAN Weipeng<sup>1</sup>, GUO Bincheng<sup>1</sup>, HUANG Fuxi<sup>1</sup>, TANG Hui<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. Jidong Oil Field, China National Petroleum Corporation, Tangshan, Hebei 063200, China)

**Abstract:** As an important part of the unconventional hydrocarbon resource, the tight sandstone gas has been the real replaced region of the gas exploration in recent years. Gases mostly occur in depositional combination of interbeds formed by mud and tight sandstone and form the reservoirs by the form of tight sandstone gas. The abundant hydrocarbon and the wide spread of the functional sandstones around the hydrocarbon sources were the basic condition for the tight sandstone gas to become reservoirs. Through the analysis of the main control factors of the hydrocarbon and reservoirs in the deep zone of Bohai Bay basin, we preliminary evaluated the conditions for the tight sandstone gas to become reservoirs. The combination of hydrocarbon and reservoirs is of “multi-layer steamed bread” structure contributed to form gas pool with near distance. Multiphase sand body overridden vertically and flaky reservoirs on the lateral direction have contributed to easily form tight sandstone gas. The preliminary evaluation showed that the tight sandstone gas resources in some areas, such as the north slope of Qikou sag, Qingshui subsag of the Liaohe west sag and Wen'an slope in Baxian sag were about  $6 \times 10^{11} \sim 7 \times 10^{11} \text{ m}^3$ , and showed some better exploration potential about tight sandstone gas in the deep zone of Bohai Bay basin.

**Key words:** deep zone of Bohai Bay basin; tight sandstone gas; porosity; permeability; exploration potential

致密砂岩气通常是指低渗透-特低渗透砂岩储层中无自然产能,需通过大规模压裂或特殊采气工艺技术方能产出具有经济价值的天然气。由于致密砂岩气藏大多分布在盆地中心或盆地构造的深部,呈大面积连

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 中国大型油气田及煤层气勘探开发技术发展项目(2008ZX05043)

作者简介: 马洪(1978—),男,山东莱阳人,高级工程师,博士,主要从事非常规油气资源及勘探部署成效分析方面的研究。

E-mail: mh1978@petrochina.com.cn

续分布,故部分学者又将其称为深盆气藏、盆地中心气藏、连续分布型气藏等。不同国家根据不同时期的石油资源状况和技术经济条件来制定致密含气砂岩的标准和界限,而在同一国家、同一地区,随着认识程度的提高,致密砂岩气的概念也在不断发展和完善。前人研究<sup>[1-4]</sup>认为,渤海湾盆地浅层(目的层埋深小于 3500 m 的地层)的勘探程度已经很高,随着勘探技术的提高及勘探难度的加大,深层已逐渐成为渤海湾盆地增产上储的重点勘探领域。但渤海湾盆地深层资源潜力、碎屑岩储层物性、储层下限等关键问题尚不清楚,因此渤海湾深层油气勘探的前景一直不明朗。基于此,笔者从渤海湾盆地深层油气成藏的烃源岩和储集层两个主控因素着手,精细分析了深层油气成藏的条件,为渤海湾深层今后的油气勘探提供地质依据。

## 1 致密砂岩气的涵义

国际上关于致密砂岩气尚未形成统一的标准和界限,不同国家、不同地区一般根据其天然气资源状况和技术经济条件来确定。致密砂岩气的概念最早出现于美国,1980 年美国联邦能源管理委员会(Federal Energy Regulatory Commission,FERC),根据美国国会 1978 年天然气政策法案的有关规定,确定致密砂岩气藏的注册标准是储层地层渗透率 $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。Spencer<sup>[5]</sup>对致密天然气储层,定义为天然气原地渗透率 $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的含气储层。Iverson 等<sup>[6]</sup>提出:致密砂岩气系指产自低渗透致密砂岩储集层(一般孔隙度 $<12\%$ 、渗透率 $<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )中的非常规天然气。Stepnen<sup>[7]</sup>认为,致密气藏是只有经过大型改造措施(水力压裂),或采用水平井或多分支井,才能以具有经济价值的产量生产并采出大量天然气的气藏。Nelson<sup>[8]</sup>将致密砂岩储层标准定为孔喉直径 2~0.03  $\mu\text{m}$ 。

国内关于致密砂岩气藏的定义与标准,没有统一认识。袁政文<sup>[9]</sup>认为致密储层是指渗透率 $<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的碎屑岩储层。关德师<sup>[10]</sup>指出,致密气藏是孔隙度低( $<12\%$ )、渗透率比较低( $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )、含气饱和度低( $<60\%$ )、含水饱和度高( $>40\%$ )、天然气在其中流动速度较缓慢的砂岩层中的非常规天然气藏。而按照我国储层评价标准,有效渗透率 $\leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (绝对渗透率 $\leq 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )、孔隙度 $\leq 10\%$ 的气藏为致密气藏。杨晓宁<sup>[11]</sup>认为致密砂岩一般指孔隙度 7%~12%、空气渗透率 $<1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以及孔喉半径 $<0.5 \mu\text{m}$ 的砂岩,在特定条件下,致密砂岩既可以作为天然气的储层也可以作为油气藏的盖层,与常规的砂岩储层相比较,具有明显的岩石物理性质和流体力学性质方面的差异。邹才能等<sup>[12]</sup>研究认为,致密砂岩气是指在孔隙度 $<10\%$ 、原地渗透率 $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或空气渗透率 $<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔喉半径 $<1 \mu\text{m}$ 、含气饱和度 $<60\%$ 的砂岩中储集的天然气,一般无自然工业产量,但在一定经济条件和技术措施后,可以获得工业天然气产量。

## 2 致密砂岩气的基本特征

致密砂岩气的勘探开发至今已有近百年历史。最早可追溯到 1927 年美国的圣胡安盆地布兰科气田梅萨沃德群砂岩中的天然气。但真正的致密砂岩气工业化开采始于 1976 年在加拿大西部的阿尔伯达盆地发现的世界上首个致密砂岩深盆气田——艾尔姆沃斯气田。2009 年世界致密砂岩气产量已达 4320 亿  $\text{m}^3$ ,约占非常规气总产量的 75%,占世界天然气总产量的 14.1%。

目前致密砂岩气已成为研究的热点领域以及勘探的重点领域,全球已有 36 个国家 70 多个盆地实现了致密砂岩气的工业性开采(图 1)。据估算,全球致密砂岩气资源量为 210 万亿  $\text{m}^3$ ,现今技术可开采的致密砂岩气储量约为 10.5~24 万亿  $\text{m}^3$ 。致密砂岩气资源主要分布在北美、中亚和中国、拉丁美洲、中东和北非及前苏联等地区。美国是世界上开发致密砂岩气最成功的国家,其储量大约为 13.03 万亿  $\text{m}^3$ ,是美国现有天然气储量的 3 倍。致密砂岩气一直占据美国非常规天然气的主导地位,2009 年致密砂岩气的产量近 2000 亿  $\text{m}^3$ ,占非常规天然气产量的 65%,占天然气总产量的 30.29%,据美国能源资料协会(Energy Information Administration,EIA)预测,今后 20 年致密砂岩气仍是非常规天然气主力。目前,美国 900 多个气田中致密砂岩气生产井已超过 10 万口。



注：阴影部分为致密砂岩气勘探开发国家

图1 全球已实现致密砂岩气勘探开发国家简图

Fig. 1 The countries for exploration and development of tight sand gas in the world

通过对北美致密砂岩气的勘探进展分析及成藏特征解剖发现，致密砂岩气藏的形成具有如下两个基本特征。

1) 良好而丰富的烃源岩为致密砂岩气的成藏提供了先决条件。北美致密砂岩气垂向分布范围大，从泥盆系至第三系均有分布。其成熟的大量生烃、排烃时期的烃源岩主要为煤系或高碳页岩地层。特别是阿巴拉契亚和奥亚基塔(Ouachita)前渊盆地的宾夕法尼亚纪-二叠纪煤层以及拉腊米构造运动形成的前渊盆地在早三叠世-晚白垩世发育的煤层，为烃源岩的高强度排烃提供了物质基础。此外，还包括成熟海相或者湖相的类脂烃源岩，如德克萨斯墨西哥湾沿岸上白垩统 Austin Chalk 区带、Val Verde 盆地(德克萨斯州)二叠纪浊积岩、圣胡安盆地(科罗拉多州)的达科塔区带、丹佛盆地(科罗拉多州)的侏罗纪以及阿巴拉契亚盆地(俄亥俄州和宾夕法尼亚州)的志留系致密气藏的烃源岩。我国的鄂尔多斯盆地和四川盆地致密砂岩气藏是以煤系生气为主的烃源岩，生排烃强度大，目前已成为我国天然气的主力战场。

2) 储层发育范围广、分布较为稳定、近邻烃源岩或与之紧密接触是致密砂岩气藏形成的必要条件。致密砂岩储层单层厚度变化较大，储层物性差。如美国皮申斯(Piceance)盆地 Mesaverde 群致密砂岩含气区带的 Iles(Rollins、Cozzette 和 Corcoran 段)，Sego 及 Castlegate 组海相滨砂岩的单砂体较厚，约 30 m，但储层物性差，孔隙度一般小于 6%，渗透率范围为 0.001~0.01 mD。Corcoran 和 Cozzette 段的海岸冲积平原沉积物由以透镜状交叉河道为特征的曲流河道砂岩组成，其砂体单层厚度约 1~5 m。孔隙度一般 3%~8%，渗透率小于 0.1 mD。而 Williams Fork 组远物源的辫状河道单层砂岩厚 6~30 m，孔隙度一般 2%~12%，渗透率 0.001~0.1 mD。

不同类型的盆地以及同一盆地的不同部位都有可能存在致密砂岩气藏。只要储层与成熟烃源岩相邻，就可能存在致密砂岩气藏。大多数致密砂岩气藏处于盆地深部位，很多位于盆地向斜，如美国西部落基山地区的尤因塔盆地、皮申斯盆地等致密气藏均位于盆地凹陷区，埋深均超过 2000 m。但致密砂岩气藏也可能聚集在盆地相对浅部位，不在或者不接近盆地中心。美国东部俄亥俄州的 Clinton(志留系)致密含气区，埋深约 300~1800 m。黑勇士盆地的宾夕法尼亚系致密气藏埋深大约 900~1500 m 以及 Wasatch 地台的上白

垩统致密含气区埋深大约 600~1800 m。

总体来看,致密砂岩气藏具有烃源岩有机质含量丰富、热演化程度高、储层分布范围广、物性差、与烃源岩紧密接触、气水关系复杂及埋藏深浅不一等特征,且多数致密砂岩气藏具异常压力(高压或低压)。

### 3 渤海湾盆地深层勘探现状

渤海湾盆地油气勘探的目的层埋深超过 3500 m 的勘探领域统称为渤海湾盆地深层油气勘探领域<sup>[3-4]</sup>,目前已经成为渤海湾盆地油气勘探的主要领域。

渤海湾盆地古近系埋深较大,各凹陷埋深最大超过 6000 m,但深层钻探与发现程度相对较低。截至 2010 年底,渤海湾盆地深层碎屑岩完钻探井超过 1200 口,占总探井数的近 20%,特别是黄骅坳陷、辽河坳陷的滩海深层勘探程度更低。截至目前渤海湾盆地深层钻井成功率约 28%,成功率相对较低;累计探明石油地质储量近 2 亿 t,占渤海湾盆地总探明储量的 4%左右,探明程度相对较低。

“十五”期间,渤海湾盆地深层碎屑岩钻井数占碎屑岩总钻井数量的 30%;“十一五”期间,该比例持续增大,平均达 40%以上。2010 年渤海湾盆地深层碎屑岩钻井占探井总数的 50%左右,碎屑岩探井平均井深超过 3300 m。其中,尤以歧口凹陷最为突出,从“十五”期间每年深层碎屑岩探井所占比例不到 30%,至 2010 年度该比例已经增加到 60%以上,探井井深逐年递增态势明显,2010 年碎屑岩平均井深超过 3700 m。2010 年歧口凹陷歧北斜坡埋深超过 3500 m 的新增探明储量占当年岩性油气藏新增探明储量的 70%以上,深层已经显现出较大的勘探潜力。

### 4 深层致密砂岩气勘探潜力

通过近年来对渤海湾盆地深层的探索,逐渐发现深层构造较浅层相对完整,中浅层的巨厚盖层能够形成有效封堵,其成藏的主控因素是烃源岩与储层物性。

#### 1) 烃源岩

研究证实<sup>[1-4]</sup>,渤海湾盆地深层沙河街组三段—孔店组地层烃源岩厚度达到 1000 m 以上,近年来黄骅、冀中、辽河三大坳陷深层不断发现新的源岩。如 2006 年,冀中霸县凹陷兴隆 1 井新发现沙河街组四段千余米优质烃源岩;辽河滩海东部葵东 2 井在沙河街组三段揭示暗色泥岩超过 800 m,滩海石油资源量增加一倍。2011 年,牛东 1 井新发现 4800 m 以下沙河街组四段—孔店组大段巨厚中—好烃源岩。辽河东部凹陷 2011 年大 46 井揭示沙河街组三段中下部 800 m 厚的泥岩,预测凹陷内部泥岩厚度比三次资评增加 600~1200 m;2010 年以来,在黄骅歧口凹陷主洼槽利用新的三维地震大连片资料,解释洼槽主体区烃源岩总厚度可达 1500~5000 m,歧口凹陷的资源量远大于三次资评结果。

传统认为大型淡水湖泊是陆相优质烃源岩形成的有利环境<sup>[2-4]</sup>,然而越来越多的油气勘探和地质研究表明,不论是东部断陷湖盆还是西部拗陷湖盆,优质烃源岩的形成与湖盆咸化作用或超盐度环境有关<sup>[4,13-14]</sup>。济阳拗陷研究证实,沙河街组三段下部—沙河街组四段咸化湖泊环境下富藻类、页理结构发育、富含有机质的烃源岩,具有早生、早排、生烃周期长的特点<sup>[4,13-14]</sup>。烃源岩产烃率由原来的 20%~40%提高到目前的 50%~70%,排烃效率则由 40%~60%提高到 60%~90%,其生烃、排烃效率是淡水环境源岩的 2 倍和 1.5 倍,济阳拗陷主要凹陷剩余油气资源量增加了 54.6%。冀中、黄骅、辽河坳陷深层沙河街组三段下部—沙河街组四段与济阳拗陷具有相似沉积环境,如霸县凹陷兴隆 1 井、牛东 1 井揭示的深层沙河街组三段下部—沙河街组四段地层沉积时期古湖泊盐度多为 5%~15%,其中沙河街组三段下部古盐度最高,达 14.5‰,平均 9.3‰,为低盐度—半咸水环境,同样应该具有较高的生排烃效率。

渤海湾盆地深层油气资源量有可能被低估,原因有四。首先,第三次全国油气资源评价认为渤海湾盆地深层古近纪烃源岩达到凝析油湿气阶段,随着古近系深层烃源岩不断发现,逐渐证实其热演化程度已经超过了凝析气阶段,甚至达到干气阶段。如歧口凹陷主洼槽烃源岩  $R_o$  可达 2.3%,因此第三次全国油气资源评价时对渤海湾盆地深层烃源岩成熟度的评价偏低,影响了天然气资源量的计算。其次,渤海湾盆地冀中、黄骅坳陷深层残留成熟度较高的石炭—二叠系煤系烃源岩,以及在沙河街组三段—沙河街组四段地层中发育碳

质泥岩和煤岩条带等煤系烃源岩生气量被低估甚至没有参与计算。第三,以往认为天然气易散失,运聚系数一般取值较低,最新研究证实<sup>[15-16]</sup>,渤海湾盆地天然气具有后期持续生气、就近高效运聚的特点,天然气运聚系数可达3%,第三次全国油气资源评价一般取值为1%,运聚系数取值偏低。第四,目前渤海湾盆地深层石油探明率不足10%、天然气探明率不到3%,剩余油气资源量大。

## 2) 储集层

渤海湾盆地深层碎屑岩次生孔隙发育带,易于形成有效储层(图2)。前人研究<sup>[17]</sup>认为,渤海湾盆地深层以滨浅湖一半深湖沉积为主,主要发育暗色泥岩;现代地质考察与实际勘探不断证实,由于丰水期与枯水期不断交互出现,在凹陷的缓坡和陡坡带广泛发育大型辫状河三角洲、扇三角洲及湖底扇沉积体系,大面积发育的储集砂体在平面上可深入湖盆,纵向上与湖相烃源岩交错叠置,利于形成大面积的岩性油气藏。不同沉积相带中,水动力条件的不同导致砂岩粒度、分选出现差异,并导致岩石成分成熟度、孔隙结构差异。沉积亚相中,辫状河(扇)三角洲前缘亚相砂体分布面积和厚度大,储层物性较好,是深层最主要的储集体类型。在相同的沉积亚相条件下,不同沉积微相储层物性也各有差异,如在辫状河(扇)三角洲前缘亚相中,水下分支河道微相砂体物性一般优于远砂坝和席状砂微相砂体。

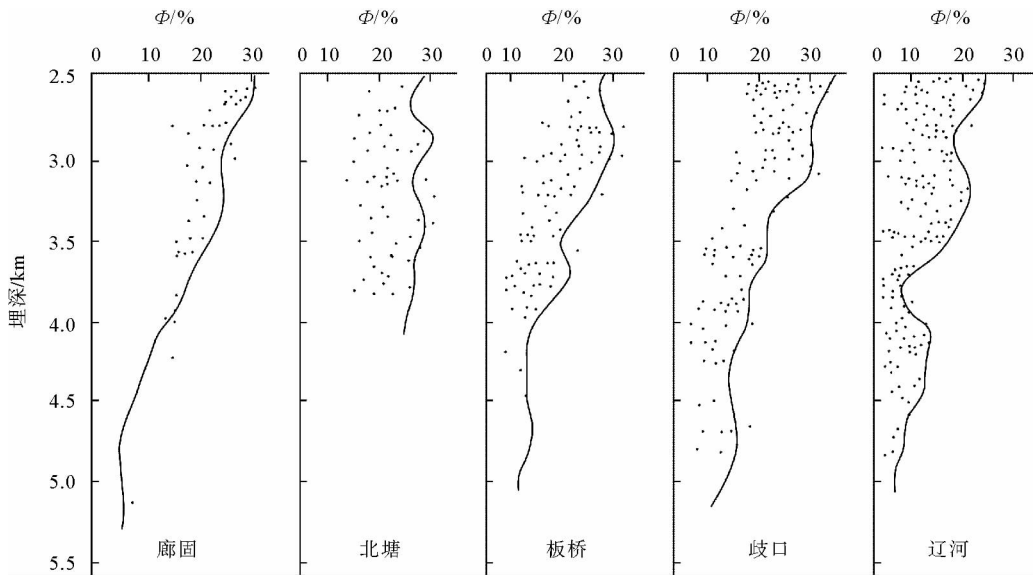


图2 渤海湾盆地北部各主要凹陷孔隙度随深度变化曲线图<sup>[1]</sup>

Fig. 2 The change curves of the porosities with the depths in main depressions in northern area of Bohai Bay basin

深层碎屑岩储层在埋藏过程中经历了溶蚀等多种成岩作用,随成岩作用的增强,压实、胶结作用持续存在,溶蚀作用交替进行,形成多个次生孔隙发育带,可以形成有效储层,溶蚀的对象主要以硅铝酸盐矿物(长石、岩屑)为主。研究发现,高温高压下,特别是150~180℃,岩石溶蚀速率会增大2~3倍,使深层碎屑岩产生一定孔隙,成为油气储层。渤海湾盆地古近系深层储层的长石含量较高,黄骅坳陷、冀中坳陷、辽河坳陷长石含量分别为46%,35%,31%,岩屑含量相近,为17%~20%,高含量的长石组分为次生溶蚀孔隙的发育奠定了物质基础。渤海湾盆地地温梯度一般在3.4℃/100m左右,150℃大约相当于埋深4000m,由此推断该深度以下溶蚀作用增强,次生孔隙形成的储层相对发育,勘探深度亦向下延伸了1000m以上。目前在黄骅、辽河、冀中坳陷的深层均发现了2~3个次生孔隙发育带,其储集性能明显优于相同深度的储层,并形成油气富集的甜点<sup>[1,3,16]</sup>。实际钻探证实,黄骅坳陷深层储层物性优于辽河和冀中坳陷相同深度的储层。

异常压力的存在有利于油气的运移与聚集。渤海湾盆地深层普遍发育异常高压,其成因有三:一是各坳陷在古近系不同层系发育封闭性较好的岩层,如黄骅、辽河、冀中坳陷在沙河街一段和三段发育油页岩,同时冀中凹陷在沙河街二段发育膏岩、膏泥岩,对下伏层系起到了良好的封闭作用;二是古近系沙河街组到东营



组沉积时期,沉积了大套的暗色泥岩,压实过程中,随着埋深的增加,泥岩的孔、渗性降低,封闭性增强,使得孔隙水难以及时排出,压力难以释放而造成欠压实与异常压力系统;三是后期的持续生烃排出大量的烃类和非烃类液态与气态产物,使得烃源岩孔隙流体体积和压力增加,对异常高压的形成具有补充作用。异常高压带的存在减缓了压实、胶结作用的发生,可以有效地保留一部分原生孔隙,并造成溶蚀作用向深层延伸,改善了中深层碎屑岩的储集性能。因此,在深层储集层总体物性较差的背景下,异常压力发育区段可能多为储集物性甜点区。

### 5 深层致密砂岩气有利勘探领域

上述研究表明,渤海湾盆地深层能够发育好储层且勘探下限较以往大幅下延,不仅发育常规油气藏,亦可以形成非常规油气藏,油气勘探领域广阔。常规油气勘探认识与技术已经十分成熟,对于非常规油气而言,勘探程度较低,目前非常规领域主要是致密砂岩气。

渤海湾盆地具有持续沉降、后期烃类持续生成的特点。晚期生成的天然气,由于断层活动减弱,深层致密储集层渗流能力低下,纵向运移受阻,在生烃层系内近距离聚集成气藏,洼槽和斜坡区低部位天然气富集,具有“源储一体,自生自储,异常超压发育”的特点(图 3)。如歧口凹陷沙河街组烃源岩埋深超过 10 000 m, 5000 m 以下  $R_o$  超过 2.0%, 以生成干气为主,具备成烃条件,与深层碎屑岩匹配利于形成致密气藏。

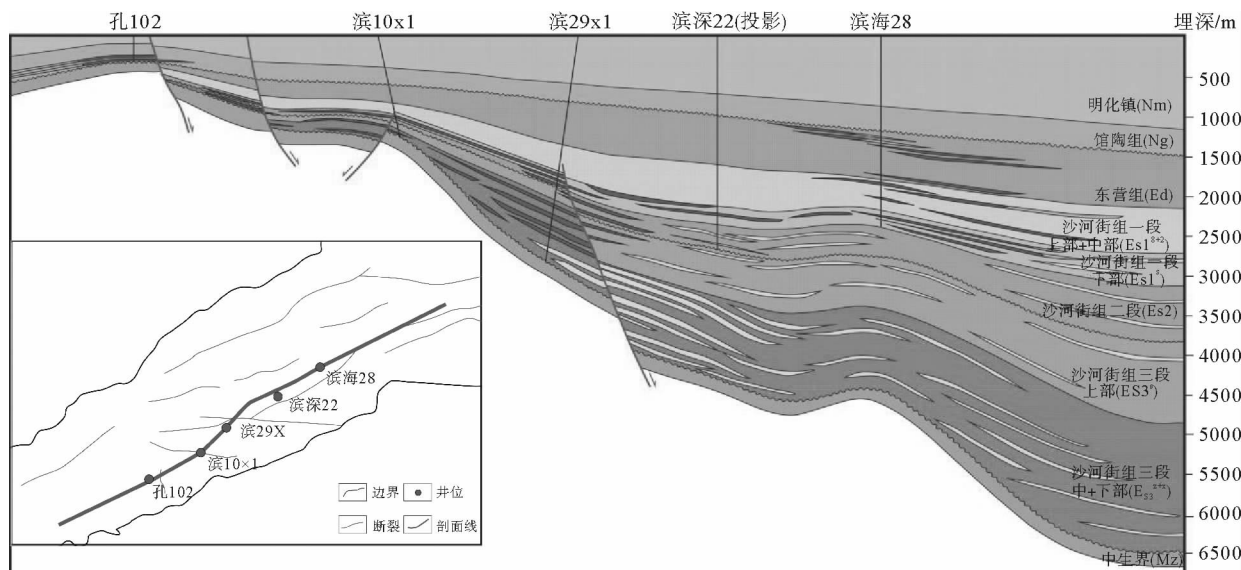


图 3 渤海湾盆地歧口凹陷歧北斜坡油气成藏模式图

Fig. 3 The hydrocarbon modal shape for Qibei dip in Qikou depression to form reservoirs in Bohai Bay basin

目前,已在渤海湾盆地深层发现了致密气藏,主要分布在沙河街组(图 4),如歧口凹陷滨海斜坡和歧北斜坡发现了滨海 4、滨深 22 等气藏,在辽河西部凹陷双南构造带发现了双 202、双 225 等气藏,由于储层物性差,孔隙度多小于 10%,渗透率多小于 1 mD,因此这些气藏均隶属于致密气藏。如滨海 4 气藏沙河街组一段下部埋深超过 5200 m,岩性为细砂岩,测井解释平均孔隙度为 8%、渗透率为 1.52 mD,具有埋深大、储层致密、含气饱和度较高、异常高压发育等特征。气藏明显受埋藏深度控制,具有“上油下气”特点,反映油气源成熟度更高、后期充注的特征。储层物性受成岩作用控制明显,如滨深 3x1 井目的层段由于埋藏深度大,成岩作用影响储层物性,孔隙度小于 10%、渗透率小于 1 mD,已是典型的致密层。

综上所述,渤海湾盆地深层烃源岩发育、成熟度较高、气源充足,沙河街一段一四段洼槽和斜坡远岸水下扇、辫状河(扇)三角洲前缘砂体发育,与主力烃源岩近距离大面积接触,超压充注易于形成致密砂岩气藏。初步估算歧口凹陷歧北斜坡、辽河西部凹陷清水洼陷、霸县凹陷文安斜坡等区带致密砂岩气有利勘探面积超过 4000 km<sup>2</sup>,其资源量近万亿 m<sup>3</sup>,具有较大的勘探潜力。

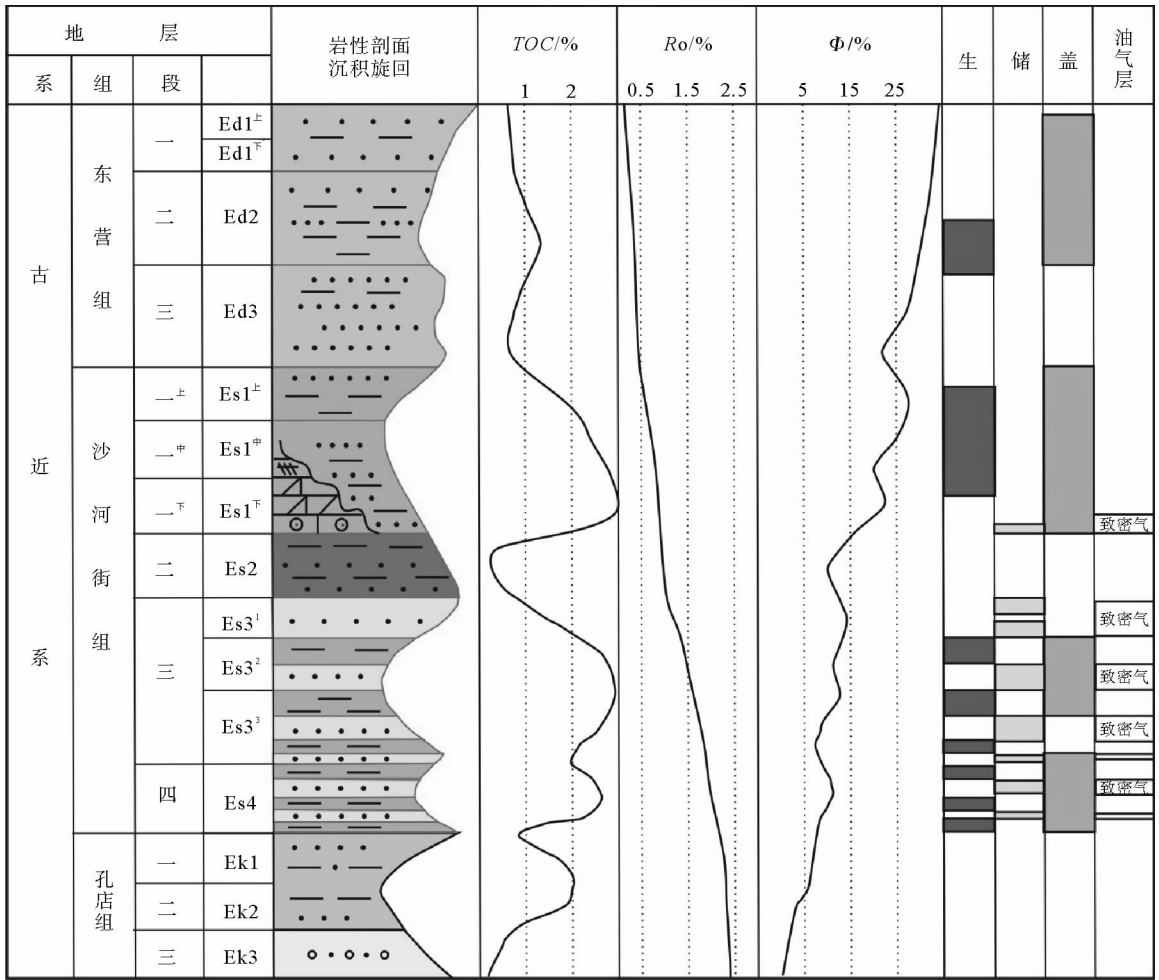


图 4 渤海湾盆地致密砂岩气成藏综合柱状示意图

Fig. 4 Sketch of composite columnar section of tight sand gas reservoirs in Bohai Bay basin

渤海湾深层碎屑岩由于埋深大,导致工程成本高、勘探风险相对增大,因此需要优选烃源岩发育规模较大、储层分布广泛的凹陷和构造保持条件相对较好的层系作为突破方向。通过与国外致密砂岩气藏的类比分析,初步确定面积大于 2000 km<sup>2</sup>、古近系地层厚度大于 5000 m、烃源岩厚度大于 2000 m、深层碎屑岩已有发现的富油气凹陷作为重点凹陷,初步优选出渤海湾盆地歧口凹陷、辽河西部凹陷、辽河东部滩海、霸县凹陷等 4 个地区作为重点勘探领域。根据实际勘探与发现情况、资源潜力、烃源岩与沉积相带匹配等条件,优选出上述 4 个凹陷内 6 个重点区带:即歧口凹陷歧北斜坡、埕海斜坡、歧口板桥次凹、辽河西部凹陷双南—双台子构造带、辽河滩海中央构造带两翼斜坡带、冀中霸县凹陷文安斜坡内带可作为目前渤海湾盆地致密砂岩气的有利区带。通过探索上述重点区带,力争实现渤海湾深层致密砂岩气的勘探突破,实现渤海湾盆地资源的有序接替。

## 6 结论与建议

1)渤海湾盆地深层具备致密砂岩气的成藏条件:沙河街组—孔店组的烃源岩与储层具备“千层饼”结构,烃源岩与储层的组合有利于天然气近源短距运移成藏。多期次沉积砂体垂向叠置、横向联片,易于形成致密砂岩气藏。

2)优选出中石油探区歧口凹陷、辽河凹陷等 4 个有潜力的致密砂岩气勘探区,为渤海湾盆地深层致密砂岩气指明了有利勘探方向,有助于打开渤海湾盆地深层油气勘探的新局面。

3)建议进一步加强渤海湾盆地深层成藏条件及勘探潜力的整体评价,明确不同凹陷深层天然气的空间

分布、有利储层分布的预测及区带目标优选;加强深层致密砂岩气藏的开发技术调研与攻关。

参考文献:

- [1]孟元林,李亚光,牛嘉玉,等.渤海湾盆地北部深层碎屑岩储层孔隙度影响因素探讨[J].中国海上油气,2007,19(3):154-156.  
MENG Yuanlin, LI Yaguang, NIU Jiayu, et al. A discussion on factors to control porosity of deep-buried clastic reservoirs in the northern Bohai bay basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(3): 154-156.
- [2]李兆影,邱楠生,李政,等.渤海湾盆地深层孔店组烃源岩评价[J].天然气工业,2006,26(10):18-20.  
LI Zhaoying, QIU Nansheng, LI Zheng, et al. The evaluation of the deep-buried Kongdian group hydrocarbon in the Bohai bay basin[J]. Gas Industry, 2006, 26(10): 18-20.
- [3]譙汉生,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,2002:10-20.
- [4]李美俊,孟元林,顾雪琴.深层烃源岩成烃理论研究进展[J].特种油气藏,2002,9(4):1-14.  
LI Meijun, MENG Yuanlin, GU Xueqin. Progress in theory of hydrocarbon generation in deep source rocks[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2002, 9(4): 1-14.
- [5]SPENCER C W. Geologic aspects of tight gas reservoirs in the Rocky Mountain Region[J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, 37(7): 1308-1314.
- [6]IVERSON W P, SURDAM R C. Tight gas sand production from the Almond formation, Washakie basin, Wyoming[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1997, 14(4): 1125-1138.
- [7]STEPHEN A. Tight gas sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 2006, 58(6): 86-93.
- [8]NELSON P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(3): 329-340.
- [9]袁政文,朱家蔚,王生朗.东濮凹陷沙河街组天然气储层特征及分类[J].天然气工业,1990,10(3):6-11.  
YUAN Zhengwen, ZHU Jiawei, WANG Shenglang. Characteristics and classification of gas reservoirs in Shahejie formation in Dongpu depression[J]. Natural Gas Industry, 1990, 10(3): 6-11.
- [10]关德师,黄保家,严经芳.中国生物气藏及成藏类型[J].中画海上油气地质,1996,10(4):231-236.  
GUAN Deshi, HUANG Baojia, YAN Jingfang, et al. Biogenic gas pools and pool-forming types in China[J]. China Offshore Oil and Gas Geology, 1996, 10(4): 231-236.
- [11]杨晓宁,张惠良,朱国华.致密砂岩的形成机制及其地质意义:以塔里木盆地英南2井为例[J].海相油气地质,2005,10(1):31-36.  
YANG Xiaoning, ZHANG Huiliang, ZHU Guohua. Formation mechanism and geological implication of tight sandstones: A case of well YN-2 in Tarim basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(1): 31-36.
- [12]邹才能,董大忠,王社教.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.  
ZHOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [13]康竹林.渤海湾盆地深层油气勘探前景[J].石油勘探与开发,1996,23(6):20-23.  
KANG Zhulin. Exploration potential for deep hydrocarbon zones in Bohai bay basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(6): 20-23.
- [14]牛嘉玉,王玉满,譙汉生.中国东部老油区深层油气勘探潜力分析[J].中国石油勘探,2004,9(1):34-41.  
NIU Jiayu, WANG Yuman, QIAO Hansheng. Analysis of potential for oil & gas exploration of deep formations in old oil areas in east China[J]. China Petroleum Exploration, 2004, 9(1): 34-41.
- [15]王仁冲,徐怀民.超深层油气藏储层特征和成藏模式[J].科技导报,2009,27(3):39-45.  
WANG Renchong, XU Huaimin. Reservoir characteristics and reservoir formation model of super deep oil and gas reservoirs[J]. Science Technology Review, 2009, 27(3): 39-45.
- [16]王宗礼,李君,李正文,等.渤海湾盆地深层油气藏特征及其勘探前景[J].海洋地质与第四纪地质,2010,30(3):105-112.  
WANG Zongli, LI Jun, LI Zhengwen, et al. Hydrocarbon accumulation characters and exploration prepects of deep-seated oil-gas reservoirs in Bohai bay basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(3): 105-112.
- [17]何海清,王兆云,程玉群.渤海湾盆地深层石油地质条件分析[J].沉积学报,1999,17(2):273-278.  
HE Haiqing, WANG Zhaoyun, CHENG Yuqun. Petroleum geology condition analysis to the deep zone of Bohai bay basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 273-278.