

渤南洼陷古近系天然气成藏条件

牟雪梅¹, 查明¹, 吴兆徽¹, 王东晔²

1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东东营 257061

2. 胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营 257015

摘要 渤南洼陷古近系天然气呈现良好的勘探前景。研究天然气成藏条件, 有助于认识天然气的成藏过程和成藏机理, 为今后的天然气勘探提供理论依据。综合利用地质、地震、测井和录井等资料, 系统分析了该区的有利成藏条件。研究表明, 渤南洼陷气源灶以沙四上亚段为主, 热演化程度高, 晚期成藏, 具有优越的气源条件; 各类扇体及次生孔隙形成古近系天然气较好的储集条件; 沙三中、下亚段泥岩及沙四上的膏盐层与泥岩互层, 共同构成了优质区域盖层与天然气保存条件; 各成藏地质条件的有效配置是天然气聚集藏藏的关键因素; 渤南洼陷深层发育的膏盐层, 相应形成盐间及盐下两套天然气成藏系统。生气中心及周缘广泛分布的各类扇体为该区域下一步的勘探目标。

关键词 渤南洼陷; 古近系; 天然气; 成藏条件; 勘探方向

中图分类号 TE121

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)07-0083-05

The Reservoir Forming Conditions for Natural Gas in Paleogene Formation, Bonan Sag

MU Xuemei¹, ZHA Ming¹, WU Zhaohui¹, WANG Dongye²

1. Faculty of Geo-Resource and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China

2. Geoscience Research Institute, Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, Shandong Province, China

Abstract The prospect of natural gas exploration in Paleogene, Bonan sag is very promising. The study on the gas reservoir forming conditions will help to understand the forming process and the mechanism of the gas reservoirs, and to provide a theoretical basis for future gas exploration. It is carried out in this paper, based on geological, seismic and logging data in this area. It is shown that the main gas generating bed is the upper Sha4, with high thermal evolution degree, as a late accumulation, and with advantageous gas source conditions. All kinds of fans and secondary pores create favorable reservoir conditions of Eogene. Mudstone in middle and lower Sha3, together with salt bed and mudstone in upper Sha4, form a favorable regional cap bed and reservoir bed. The effective configuration of reservoir-forming and geologic conditions is the key factor of the natural gas accumulation. Deep Bonan sag correspondingly forms an inter and below salt bed natural gas reservoir-forming system. The gas generation center and the areas surrounding all kinds of fans are the next exploration targets.

Keywords Bonan sag; Paleogene; natural gas; reservoir-forming conditions; exploration directions

渤南洼陷位于沾化凹陷的中部, 为沾化凹陷内面积最大、古近系埋藏最深的次级洼陷, 勘探面积约 600km²。构造上为一北陡南缓的断陷湖盆。洼陷南北以边界断层分别与埕东凸起、孤岛凸起和陈家庄凸起构造相接, 东以孤西断裂带与

孤北洼陷分开, 西以罗北断裂带与四扣洼陷分隔(图 1)。沉积环境为湖相, 沉积了近 4000m 厚的古近系, 其中埋深大于 3500m 的主要为沙三段和沙四段, 分布面积约 350km²。在渤南洼陷义 115、义 121 和渤深 5 并在沙四段含膏岩段获纯天

收稿日期: 2009-11-11

基金项目: 中国石化胜利山东探区勘探项目(73-2006-2scg-00024)

作者简介: 牟雪梅, 博士研究生, 研究方向为油气成藏机理与分布, 电子信箱: muxue_mei@163.com; 查明(通信作者), 教授, 研究方向为油气资源评价、油气成藏机理与勘探, 电子信箱: mzha@upc.edu.cn

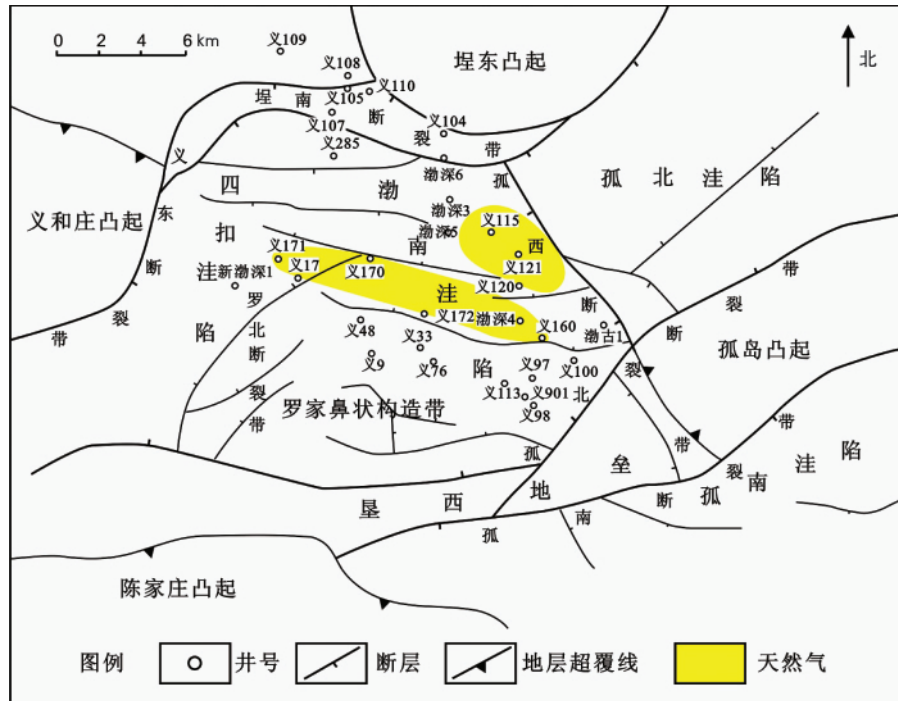


图 1 渤南洼陷区域构造概况及天然气平面分布

Fig. 1 Regional structure and natural gas distribution in Bonan Sag

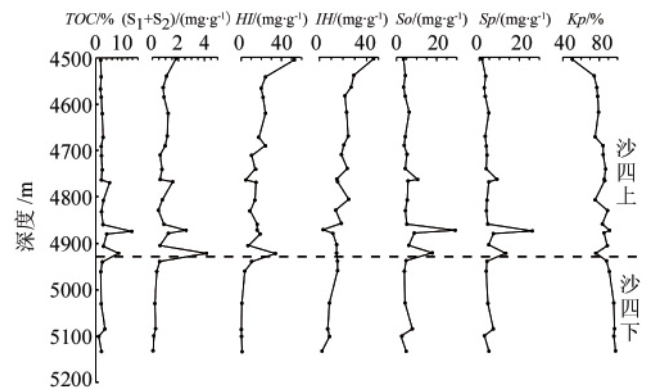
然气流,日产气 1560~3533m³,展示了深层裂解气良好的勘探前景^[2]。前人对于渤南洼陷油气的成藏条件、成藏过程及成藏机理等研究较多^[3-8],但大部分还在讨论“油”,目前专门针对研究区天然气的研究较少,缺乏对渤南洼陷天然气有利成藏条件的系统认识。本研究在总结前人渤南洼陷成藏条件成果的基础上,对渤南洼陷有利天然气成藏条件开展研究。

1 古近系沙四上烃源岩热演化条件提供优越生气基础

渤南洼陷古近纪经历的 3 个裂陷旋回构成了油区最重要的烃源层,即沙四上、沙三中下及沙一段,其中形成天然气的层位主要为沙四上^[9]。

沙四晚期,渤南洼陷气候干旱,地势较平坦,盆地与剥蚀区高差变小,陆源碎屑物质供应明显不足,化学岩和细粒的砂泥岩占绝对优势,形成半深湖相和盐湖相,半深湖相广泛分布于盆地中部,而盐湖相呈相对孤立状分布于盆地西南部和东部^[6-8]。渤南洼陷沙四上段烃源岩暗色泥岩厚度为 50~750m,厚度高值区分布在埕南断裂带以南的深洼区,其中渤南深洼中心沙四段有机质类型以 I 型和 II 型为主,有机质处于成熟~高成熟演化阶段,镜质体反射率(R_o)分布在 1.04%~1.65%,一般热解峰温(T_{max})>450℃,最大值>490℃,表明烃源岩已经进入高成熟阶段,可以大量生成高熟油型裂解气。如渤深 5 井的沙四上亚段烃源岩地球化学指标检测显示该井生烃潜力(S_1+S_2)为 0.07~2.61mg/g,平均为 0.99mg/g(图 2)。

李孝军等^[10]对济阳坳陷裂解气干酪根的热模拟结果表明,当温度超过 145℃时,有机质基本进入热演化的高成熟阶



注: TOC—有机碳含量; S_1+S_2 —残余生烃潜力; HI—烃指数; IH—氢指数; So—生烃潜力; Sp—排烃潜力; Kp—排烃效率

图 2 渤南洼陷渤深 5 井沙四段生烃指标分布

Fig. 2 Hydrocarbon generation index of Boshen 5 in Sha4 Formation

段,即以生气为主,温度越高生气量越大。对渤南洼陷 E_{s4} 段实测样品数据点的埋深值(T ,℃)与埋深(H ,km)的拟合关系($T=0.0353H+17.08$)进行分析,平均埋深到 4532km 即进入裂解气成熟门限。沙四段实测样品的成熟度参数镜质体反射率(R_o ,℃)与埋深(H ,km)的拟合关系为 $R_o=0.1251e^{0.0005H}$,在该深度时 R_o 值达 1.3%左右。在渤南洼陷中央,义 115 井、渤深 5 井、义 121 井、义 120 井沙四段埋深均高于 4532m, R_o 大于 1.3%(义 115 形成 R_o 高值中心,沙四上底 R_o 达 1.79%),且于 4430~5144m 已经出现低产气流。结合渤南洼陷深洼带的沉积

埋藏史、热演化及生烃史分析,沙四上亚段烃源岩在沙三中后期开始进入生油门限,在沙二早期达到生油高峰,东营构造运动后持续接受沉积,逐渐达到生气阶段,在馆陶末—明化镇初达到大量生成油型高熟裂解气门槛,至今仍保留该状态(图3)。

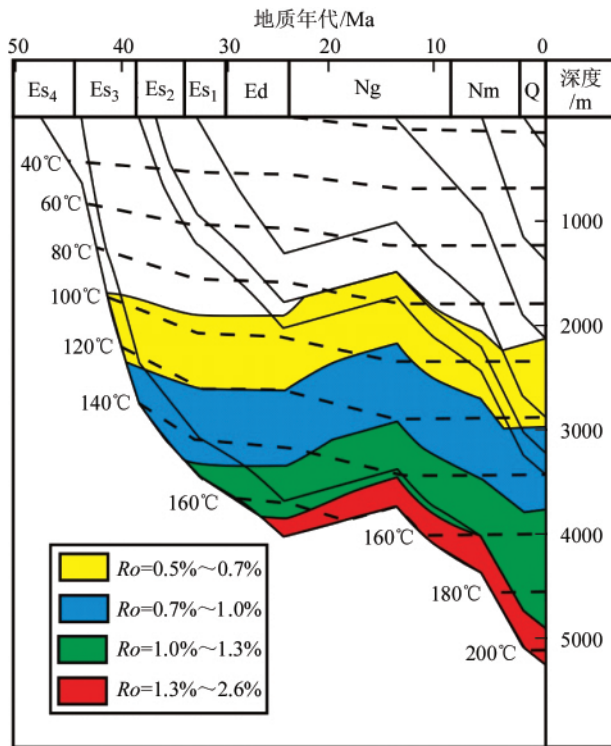


图3 义115井埋藏史、热演化史及生烃史
Fig. 3 Burial history, thermal evolution history, and hydrocarbon generation history of Yi 115

2 各类扇体及次生孔隙形成良好储集条件

渤南洼陷深层发育扇三角洲、近岸水下扇、冲积扇等多种沉积相,构成深层天然气主要储集体。以沙四上为例,东、南、北三面环扇,埕南断裂带、孤西断层的下降盘主要发育水下冲积扇砂砾岩体;而垦西斜坡带以及陈家庄斜坡带主要发育扇三角洲及水下冲积扇砂砾岩体;洼陷带主要发育半深湖相、深湖相沉积建造,并在此背景下发育了水下冲积扇、扇三角洲前缘的滑塌浊积扇及远源砂砾岩透镜体(图4)^[2]。如在洼陷中心地带渤深5、义17井在大套深灰色泥岩、灰岩、膏盐深湖、半深湖相层序中夹有砂岩透镜体,这些砂岩透镜体周围被烃源岩包围,具有良好的油源条件,其上有膏盐岩层的遮挡作用,易于形成岩性油气藏。埋藏较深、进入裂解气生油门限,围绕生气中心所发育的水下冲积扇、扇三角洲前缘的滑塌浊积扇及远源砂砾岩透镜体是深层裂解气最有利的储集体。

渤南洼陷深层发育巨厚的膏盐层,一方面因其抑制成岩作用使得盐下的岩层通常具有较高的孔隙度,另一方面石膏

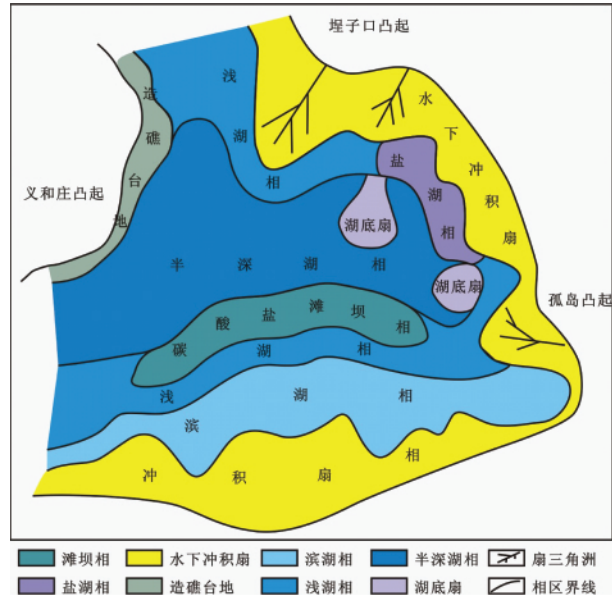


图4 渤南洼陷沙四上亚段沉积相(据吴富强,2004)
Fig. 4 Sedimentary facies of upper Sha4 in Bonan Sag (according to Wu Fuqiang, 2004)

向硬石膏转化排出的水溶解有机酸进一步溶蚀矿物,形成次生孔隙带^[11-12],同时有利于硬石膏晶间孔的形成,从而导致膏盐层具有较好的储集作用,其本身可作为储集层,如义97井和义160井膏盐层中录井均见油斑显示。渤南洼陷3500m以下深度共发育4个次生孔隙带,这些次生孔隙发育带或者在膏盐层内,或者在膏盐层之下,表明膏盐层下次生孔隙为天然气提供了良好的储集空间,如膏盐层下义160井、义170井、义171井钻遇了天然气。另外,渤南洼陷普遍含白云质、灰质及砂质等脆性成分,致使泥岩裂隙发育,泥质岩类中平均视密度为0.66条/m。国内外深层致密天然气储层勘探经验显示,裂缝和次生孔隙的形成可改善深层致密天然气储层的物性^[13-14]。因此,渤南洼陷古近系深层应该具有物性较好的储集条件。

3 膏岩层的发育形成盐间、盐下两套天然气成藏系统

渤南洼陷膏盐层主要分布在沙四段,最为发育的层段是沙四上,累计厚度达1638.5m。据录井资料统计,膏盐层的岩性以石膏、膏泥岩、含膏泥岩和含膏砂岩为主,另外还含有少量的膏质白云岩和灰岩^[11-12]。渤南洼陷的膏盐层分布在渤南、罗家、垦西及邵家油田,膏盐层在东西走向连续性较好,从洼陷中心向南逐渐变薄;剖面上,渤南洼陷膏盐层集中分布在3000~4000m,随着深度增加,石膏的含量变少,最深部位不超过5500m(图5)。如义115井膏层主要分布在4920~5190m,渤深5井4950~5400m。渤南洼陷膏盐层发育产生异常高压^[15],形成封闭的流体动力系统,如渤深4井发育膏盐层的3753~3934m深度段压力系数为1.26,膏泥岩和含膏砂、泥岩累计厚度为73m;义17井和义160井压力系数都比较高,约1.7。

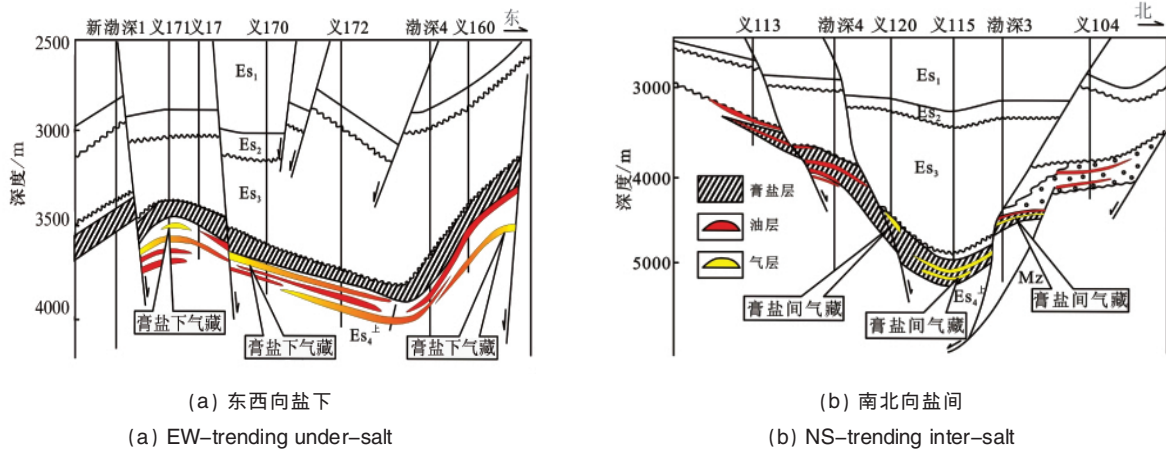


图 5 渤南洼陷气藏分布
Fig. 5 Distribution of gas reservoir in Bonan Sag

根据膏盐层、超压与气藏的空间位置关系,结合地震、测井、录井等资料,可将渤南洼陷已发现的中深层气藏归纳为两种类型:盐间天然气成藏系统及盐下天然气成藏系统^[12]。膏盐间气藏即膏盐层内部所夹的砂体形成的气藏,储层主要是细砂岩,其物性相对较好,气体被周围膏盐层封闭或受断层

控制形成气藏,如义 115、义 121、渤深 3 井等;膏盐下气藏即膏盐层集中段之下发育的气藏,由于膏盐层在东西向上发育较完整,连续性好,对其下油气起到良好的封盖作用,如义 171、义 170、义 17 及义 160 井等(图 5)。盐间及盐下两套天然气成藏系统的成藏条件及主控因素存在明显差异(表 1)。

表 1 渤南洼陷深层盐间、盐下两套天然气成藏系统特征

Table 1 Characteristics of natural gas reservoir-forming system inter-salt and under-salt in deep Bonan Sag

成藏系统	生烃体系	储层	盖层	垂向输导体	压力特征
盐间天然气成藏系统	沙四上	扇三角洲前缘的滑塌堆积扇及远源砂砾岩透镜体	沙四段发育的膏盐层、泥岩层	垂向难以迁移,侧向以砂岩体为主	既有有异常高压也有异常低压,压力系数在 0.9~1.3
盐下天然气成藏系统	沙三下 沙四上	各类近岸水下扇体及砂砾岩透镜体	沙四上亚段发育的膏岩-膏泥岩及沙三段下部的泥页岩和油泥岩	垂向以盆倾生长断层为主,侧向以砂岩体为主	异常高压发育,压力系数较高,基本在 1.5~1.7

4 优质盖层及弱的后期构造运动匹配构成良好的保存条件

沾化凹陷古近系发育沙四、沙三中下和沙一等区域性盖层,尤其在洼陷部位盖层厚度较厚,形成了良好的封盖条件,如在沙三段中、下亚段中渤南洼陷泥岩厚度达到了 300~500m,对该洼陷内裂解气的保存非常有利。除此之外,渤南洼陷目前有近 50 口井在埋深 3500m 的深度钻遇膏盐层,膏盐层集中发育在沙四段上部。连续性很好的膏盐层与泥岩层交互分布,一起形成古近系深层盐下天然气成藏系统的区域性盖层^[12]。从渤南洼陷东西向盐下及南北向盐间气藏分布(图 5)可以看出,渤南洼陷膏盐层的发育是深层裂解气成藏的最有效封盖。此外,膏盐层下发育的超压体系构成了相对封闭的准封存箱,箱内与箱外相对难以产生物质交换或对流,有利于天然气的有效保存。

沾化凹陷北东向边界断层馆陶期开始衰弱,至明化镇期

已基本消亡。北东东向断层馆陶期开始消亡。在烃源岩主要生、排烃期,断层活动基本停止活动,天然气沿断层垂向迁移受到很大限制,因而天然气藏具有良好的后期保存条件。

5 成藏事件的配置关系是天然气聚集的关键因素

渤南洼陷沙四上具有充足的气源,沙四上各类扇体及次生孔隙发育形成较好的储集条件,沙四上及沙三中下优质盖层发育及弱的后期构造运动一起构成优越的保存条件,天然气主要沿着沙四上砂岩体发生侧向迁移,拥有自生、自储、自盖的生储盖组合特征,圈闭类型以岩性圈闭、构造、构造—岩性圈闭为主,主要形成于东营和明化镇时期。

由于生烃期较晚,馆陶末—明化镇初期才开始生气,在圈闭形成之后,因此具备形成大规模气藏的条件(图 6)。此外,因为构造运动破坏时期在主要圈闭形成之前,油气迁移发生在圈闭形成之后,气源可以沿着各种砂砾岩体侧向迁移,再加上明化镇之后有效盖层遮挡形成了以岩性圈闭为主

[illegible]

Fig. 6 Natural gas reservoir-forming events in Bonan Sag

- [1] 张枝茂, 曾艳涛, 张学军, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷原油地球化学特征及成藏期分析[J]. 石油实验地质, 2006, (1): 54-58.
Zhang Zhihuan, Zeng Yantao, Zhang Xuejun, *et al.* *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(1): 54-58.
- [2] 吴富强. 渤南洼陷沙四下亚段浊积体沉积相划分 [J]. 新疆石油地质, 2004, 25(3): 251-253.
Wu Fuqiang. *Xijiang Petroleum Geology*, 2004, 25(3): 251-253.
- [3] 胜利石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷六)·胜利油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
Editorial Committee of "Petroleum Geology of China". *Petroleum geology of China (Vol.6): Shengli Oilfield* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.

- (责任编辑 吴晓丽)

本刊编辑部