

文章编号:1001-6112(2008)06-0600-06

冀中霸县凹陷古近系深层油气资源潜力研究

李欣^{1,2}, 郑署泓², 彭宁², 和雅琴², 贺淑萍², 乔晓霞²

(1.中国矿业大学北京 100083; 2.中国石油华北油田分公司,河北任丘 062552)

摘要:以往认为冀中霸县凹陷主力烃源岩为沙三中下段和沙四上段暗色泥岩。通过兴隆1井的钻探,发现了厚度巨大的沙四中下段暗色泥岩。对该套暗色泥岩详细的地球化学研究表明,其有机碳含量在0.6%~6%之间,热解生烃潜力在0.5~14 mg/g之间,有机质类型为II₂-II₁型,为中等—好烃源岩,而不是以往所认为的属于品质差的烃源岩。有机质成熟度研究表明,兴隆1井烃源岩成熟门槛为3 200 m,4 700 m进入生油高峰阶段,5 100 m左右进入凝析油、湿气阶段。该井沙四中下段暗色泥岩已经进入凝析油、湿气阶段,并已获得自生自储的原油和天然气,表明该套烃源岩具有生成油气的能力。应用盆地模拟法对霸县凹陷沙四中下段油气资源量进行计算,石油资源量增加2 200×10⁴ t,天然气资源量增加561×10⁸ m³,大大提升了霸县凹陷深层的勘探价值。

关键词:沙四中下段;古近系;深层;烃源岩;资源潜力;霸县凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

ANALYSIS OF DEEP-SEATED HYDROCARBON RESOURCE POTENTIAL OF PALAEOGENE IN THE BAXIAN SAG, CENTRAL HEBEI PROVINCE

Li Xin^{1,2}, Zheng Shuhong², Peng Ning², He Yaqin², He Shuping², Qiao Xiaoxia²

(1. China University of mining & Technology, Beijing 100083, China;

2. Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China)

Abstract: Middle and lower Es³ and upper Es⁴ dark shale was previously considered as the main source rocks in Baxian of Central Hebei Province. Middle and lower Es⁴ dark shale with great thickness was discovered through the drilling of Well Xinglong-1. It is indicated through detailed geochemical study on this set of dark shale that its organic carbon content is 0.6%~6%, pyrolysis hydrocarbon generation potential 0.5~14 mg/g and organic matter type II₂-II₁. It is obvious that it is medium-good source rock. It is indicated through organic matter maturity research on source rocks in Well Xinglong-1 that its maturity threshold is at 3 200 m, oil generation peak at 4 700 m and condensate and wet gas generation at about 5 100 m. In Well Xinglong-1, middle and lower Es⁴ dark shale has entered into the stage of condensate and wet gas. Therefore, this set of source rocks has hydrocarbon generation capacity. Basin simulation approach is used to measure hydrocarbon resource of middle and lower Es⁴ in the Baxian Sag, and the petroleum resource incremental is 22 million tons and natural gas resource incremental is 56.1 billion cubic meters. Thus, deep layer exploration in the Baxian Sag becomes more important.

Key words: middle and lower Es⁴; Palaeogene; deep layer; source rock; resource potential; the Baxian Sag; the Bohai Bay Basin

1 地质概况

霸县凹陷是冀中坳陷北部的的主要含油气凹陷,勘探总面积约2 400 km²。自1956年开始石油钻探至今,相继发现了岔河集、高家堡、郑州、苏桥、文安、南孟、龙虎庄、顾辛庄8个油气田,发现了Ng,

Ed, Es¹, Es², Es³, C-P, O 7套含油层系,已探明石油资源量1.31×10⁸ t,天然气资源量151×10⁸ m³,是冀中主要产油气区(图1)。

目前,霸县凹陷还有70%的剩余资源没有找到,已探明储量主要集中在中浅层,井深一般在3 500 m以内,中深层——尤其是Es³中下段以下钻探程度

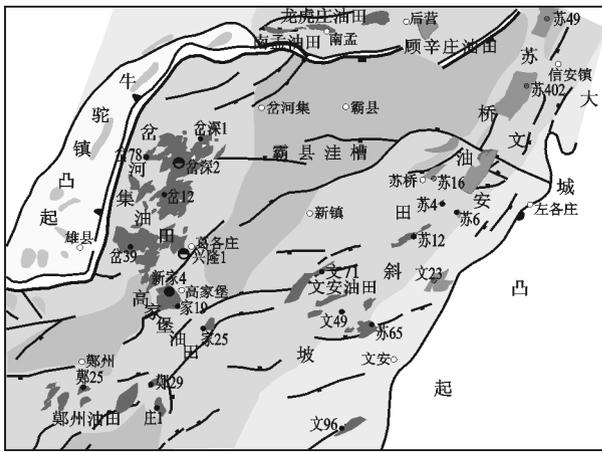


图1 冀中霸县凹陷油气田分布

Fig.1 Exploration achievements of the Baxian Sag in Central Hebei Province

低。该层段发育2套膏盐岩层,为良好区域盖层,可有效阻止深层油气向上运移,因此凹陷深层有没有勘探潜力关键是烃源岩。截至2006年环霸县洼槽完钻于Es³中下段的井仅有新家4井和盆深2井,其中新家4井在4 598.4~4 670.2 m井段酸化试油,初期日产气5 383 m³,日产油5.13 t,累计产油126 t,展示深层具有较好的成藏条件。因此,中深层极有可能是油气富集的部位,也是下步勘探的主攻方向。为探明深层的油气资源,2005年钻探兴隆1井,该井于2006年初钻达5 500 m深度后完钻,是目前霸县凹陷完钻最深的探井,结果在深部发现了一套厚度巨大的Es⁴中下段暗色泥岩,揭示该凹陷深层可能具有良好的油气资源潜力。

2 样品与实验分析

兴隆1井岩屑、岩心、原油和天然气样品均由

笔者在钻井现场采集,岩屑样品在分析之前用清水冲洗干净并阴干。

实验仪器及分析方法如下:1)采用LECO公司CS-200型仪器测定有机碳含量。2)采用Rock-Eval II型生油岩分析仪进行热解分析。3)沥青抽提和分离,将250 g左右的岩样在70℃恒温下(以氯仿为溶剂)在索氏抽提器中连续抽提72 h;用石油醚润湿柱子后倒入样品滤液,用石油醚冲洗得到饱和烃;用二氯甲烷冲洗得到芳烃;用乙醚冲洗得到非烃。上述实验中所用试剂均经过精制处理。4)色谱、色谱-质谱分析,分析仪器采用SSQ-7000色质联用仪,HP-5890A型色谱仪,色谱柱为HP-5,柱长30 m,内径为0.25 mm;起始温度为70℃,升温速率为4.0℃/min,终点温度为300℃,终温后恒温25 min;柱箱温度为300℃,离子源温度为250℃,电子能量为70 eV。5)有机岩石学分析,采用LEITZ公司MPV-SP显微镜光度计。6)干酪根组分鉴定,采用ZEISS公司XIOSKOP PLUS 2多功能生物显微镜。7)同位素分析,采用Finnigan公司MAT-252同位素质谱仪。8)天然气组分分析,采用HP-5890II型色谱仪。

3 深层烃源岩地球化学特征

3.1 烃源岩有机质丰度

兴隆1井153个岩石样品的有机质丰度统计结果如表1所示。根据我国陆相生油岩有机质丰度评价标准^[1,2],Es¹段样品属差生油岩;Es²和Es³上段样品属于差—中等烃源岩。该井烃源岩有机质最富集是Es³中下部和Es⁴上部暗色泥岩,75个样品中92%的样品有机碳大于1%,且可溶烃含量较高,氯仿沥青“A”平均值均大于1.5%,达

表1 冀中霸县凹陷兴隆1井烃源岩有机质丰度统计

Table 1 Organic matter abundance statistics of source rocks in Well Xinglong-1 in the Baxian Sag of Central Hebei Province

层位	井段/m	暗色泥岩厚/m 占地层厚,%	有机碳,%	生烃潜量/ (mg·g ⁻¹)	沥青“A”,%	总烃,10 ⁻⁶	I _H / (mg·g ⁻¹)	类型指数	综合评价
Es ¹	2 928~3 485	338	0.08~1.87	0.09~10.76	0.001 4~0.049 6	3~199	80~566	14.5~30.5	差烃源岩
		60.7	0.57(21)	1.69(21)	0.025 7(4)	90(4)	189(4)	22.13(4)	
Es ²	3 485~3 692	55	0.30~1.68	0.27~8.00	0.030 8~0.132 7	235~645	67~462	29.5~35	差—中等 烃源岩
		26.6	0.75(11)	2.18(11)	0.081 8(2)	440(2)	207(11)	32.25(2)	
Es ³ (上)	3 692~3 850	109	0.30~0.63	0.25~1.40	0.025 3~0.103 9	129~765	74~205	23.5~40	差—中等 烃源岩
		69	0.51(10)	0.92(10)	0.074(3)	474(3)	155(10)	30.17(3)	
Es ³ (中下)	3 850~4 429	396	0.35~6.02	0.31~31.16	0.040 2~0.337 6	195~1 846	70~643	17.5~71.25	好烃源岩
		74.9	1.86(50)	7.06(50)	0.154 2(16)	819(16)	293(50)	45.17(16)	
Es ⁴ (上)	4 429~4 848	174	0.91~7.34	1.16~17.27	0.085 4~0.322 7	345~2 021	114~277	22.75~35.25	好烃源岩
		41.5	2.24(25)	5.28(25)	0.192 8(7)	1 117(7)	192(25)	29.22(8)	
Es ⁴ (中下)	4 848~5 500	357	0.59~6.36	0.30~13.83	0.049~0.225 3	255~1 904	33~194	20.75~53.5	中等—好 烃源岩
		54.8	1.43(35)	2.06(35)	0.110 6(9)	759(9)	94(35)	34.6(9)	

注:表中分式意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}(\text{样品数})}$ 。

到好烃源岩标准;Es⁴中下部稍次之,有机碳为平均1.43%,可溶烃含量较高,沥青“*A*”平均值为0.1106%,生烃作用导致了该套烃源岩的热解生烃潜量相对偏低,综合评价属于中等—好烃源岩。

3.2 烃源岩有机质类型

从烃源岩的热解氢指数(*I_H*)与最高热解峰温(*T_{max}*)关系图分析(图2),Es³中下段暗色泥岩类型差异较大,多数样品的氢指数大于300 mg/g,部分样品小于300 mg/g, I, II₁, II₂型有机质均有分布,是该井中有机质类型最好的烃源岩。Es⁴上段烃源岩*I_H*在100~300 mg/g之间,属于II₂—II₁型有机质。Es⁴中下段烃源岩的*I_H*在50~200 mg/g之间,但其*T_{max}*已经达到450℃以上,已经处于较高的成烃演化阶段,氢指数已经难以反映其真正的有机质类型。以往沉积相研究表明,Es³中下、Es⁴地层均为三角洲前缘亚相沉积。因此,其物源既有陆源碎屑(高等植物)输入,也有水生生物输入。综合考虑Es⁴烃源岩目前的氢指数、热演化程度及演化趋势、沉积相和有机质组成等,可以认为其有机质应为腐泥—腐殖混合型母质类型。

3.3 烃源岩的有机质热演化程度

镜质体反射率(*R_o*)资料显示,3 200~3 300 m

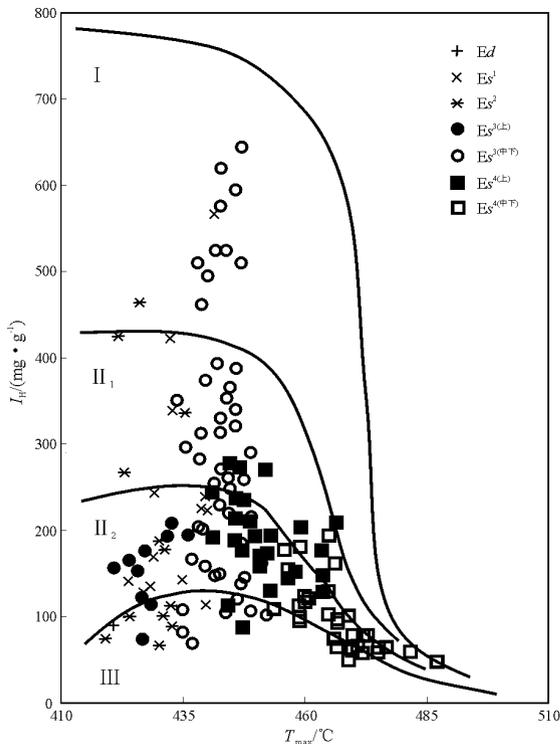


图2 冀中霸县凹陷兴隆1井岩石氢指数与最高热解峰温关系

Fig.2 Relationship of hydrogen index vs. maximum pyrolysis peak temperature of Well Xinglong-1 in the Baxian Sag of Central Hebei Province

井段*R_o*已经达到0.5%的成熟门限值(图3);可溶有机质中饱和烃色谱*OEP*值在2 900 m以下已经全部小于1.2;生物标志物异构化参数在3 200 m以下都已经达到成熟界线(如:C₂₉甾烷的ββ/(αα+ββ)和20*S*/(20*S*+20*R*)均在0.25以上,C₃₁藿烷22*S*/22*R*大于1.0)。因此,综合各项资料分析认为,3 200 m以下烃源岩已经成熟;4 700 m进入高演化阶段。应用Basinmod盆模软件对兴隆1井的埋藏史进行模拟(图4),表明在4 600 m左右烃源岩达到生油高峰,5 100 m左右进入凝析油、湿气阶段。由此可见,兴隆1井区烃源岩成熟层位为Es¹下部,主力烃源岩Es³、Es⁴均已成熟,Es³中下段至井底中等—好的成熟烃源岩厚度为927 m,并且Es⁴中下段烃源岩已经进入凝析油、湿气阶段。因此,霸县凹陷深层烃源岩已经具备了生成石油和天然气的条件,而且已经生成了油气。

4 深层油气地球化学特征

4.1 原油地球化学特征与油源判别

兴隆1井在井深4 607.4~4 655.0 m钻获油气层。原油呈黄褐色,油质较轻,20℃原油密度为0.8257 g/cm³,50℃时原油密度为0.8047 g/cm³,粘度2.58 mPa·s,凝固点23℃,属轻质油。组分分

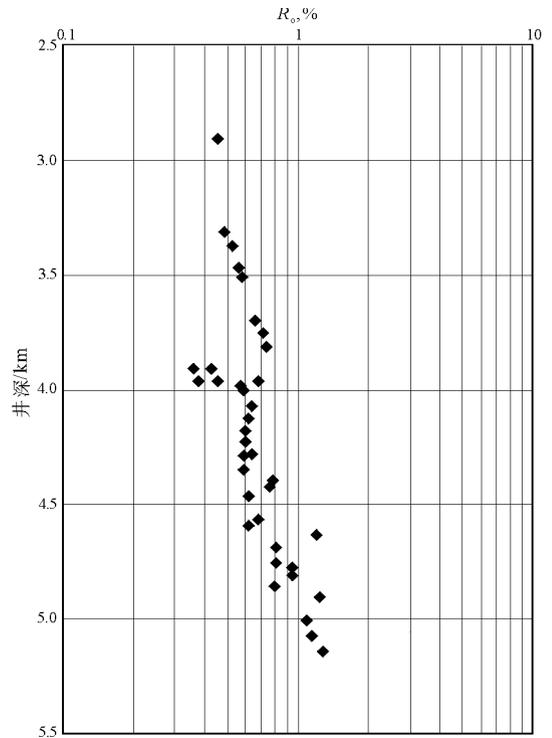


图3 冀中霸县凹陷兴隆1井镜质体反射率随井深变化

Fig.3 Relationship of vitrinite reflectance vs. well depth of Well Xinglong-1 in the Baxian Sag of Central Hebei Province

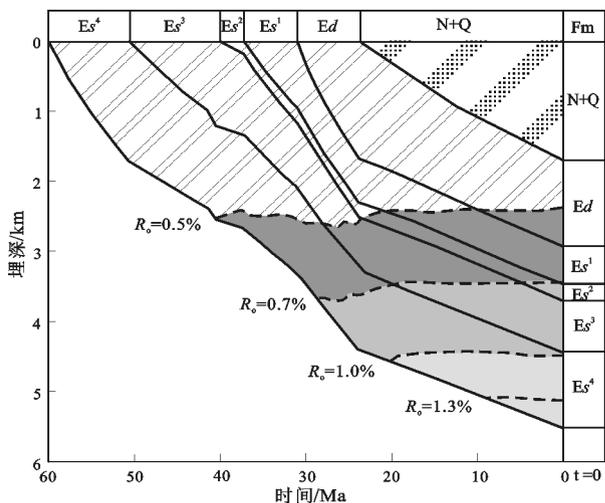


图 4 冀中霸县凹陷兴隆 1 井沉积演化史

Fig.4 Sedimentary history of Well Xinglong-1 in the Baxian Sag of Central Hebei Province

析表明该原油中几乎不含非烃、沥青质,全部由饱和烃、芳烃组成,二者含量分别为 71.8%、28.2%。

原油饱和烃色谱、质谱分析显示,该原油 Pr/Ph 比较大,达到了 5.32(图 5),甾烷中三种构型甾烷中以 C₂₉ 为主,萜烷中三环萜烷含量丰富,且 C₁₉ > C₂₀ > C₂₁,呈现降序排列,奥利烷含量高,伽马蜡烷含量中等(图 6);OEP 达到 1.02,C₂₉ 甾烷异构化参数 20S/(20S+20R),ββ/(αα+ββ) 均为 0.53。

从原油的物性、组分以及饱和烃色谱、色质特征看,原油成熟度高,而且原始有机母质类型较差,主要应为高等植物来源。这些特点与以前发现的高家堡—岔河集南部原油、岔河集北部原油、霸县凹陷北部的潜山油藏原油、文安斜坡原油、苏桥—文安地区奥陶系和石炭—二叠系原油均不同^[3],属于新的原油类型。油源对比表明该原油来自本井首次

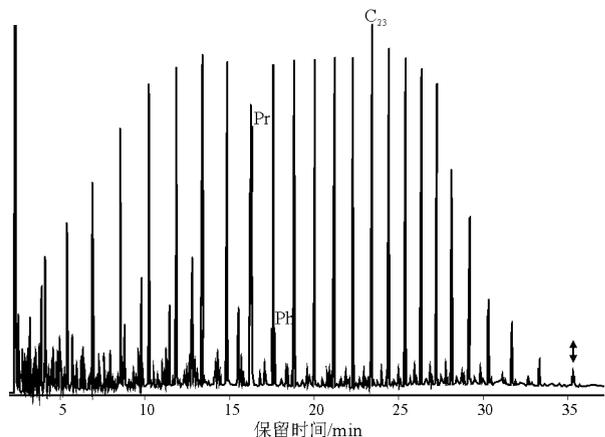


图 5 冀中霸县凹陷兴隆 1 井原油饱和烃色谱图

Fig.5 Saturated hydrocarbon chromatogram of crude oil in Well Xinglong-1 in the Baxian Sag of Central Hebei Province

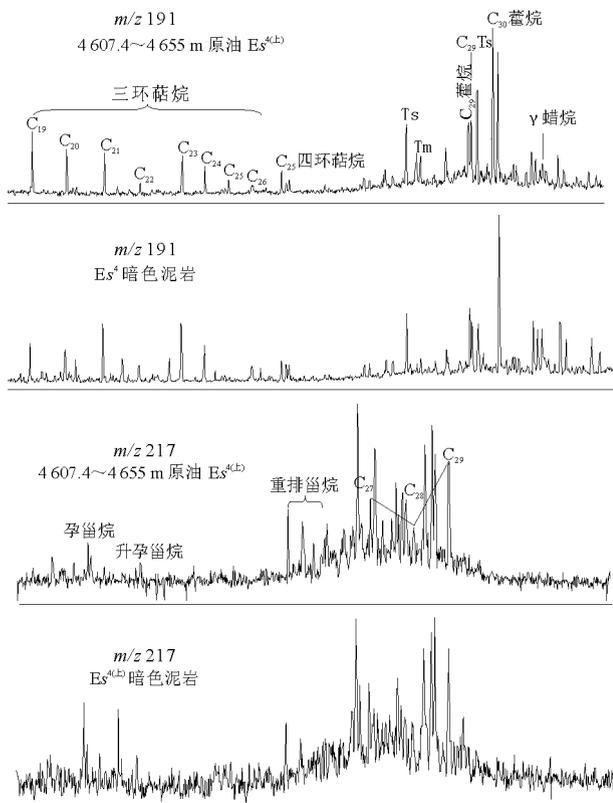


图 6 冀中霸县凹陷兴隆 1 井原油和暗色泥岩饱和烃质谱图

Fig.6 Saturated hydrocarbon mass chromatogram of crude oil and dark shale in Well Xinglong-1 in the Baxian Sag of Central Hebei Province

发现的深部 Es⁴ 烃源岩(图 6),属自生自储油藏。

4.2 天然气地球化学特征与气源

天然气组分分析显示,Es⁴ 段 4 607.4~4 655.0 m 井段天然气中甲烷含量仅为 69.8%(表 2),重烃组分含量高,属于湿气。天然气碳同位素较轻,甲、乙烷碳同位素分别为-48.3‰,-32.2‰。与以前报道的霸县凹陷文安斜坡煤成气不同,而与霸县凹陷

表 2 冀中霸县凹陷兴隆 1 井天然气组分、稳定碳同位素含量

Table 2 Gas composition and stable carbon isotope content of Well Xinglong-1 in the Baxian Sag of Central Hebei Province

组分	组分含量, %	δ ¹³ C _{PDB} , ‰
甲烷	69.8	-48.3
乙烷	11.7	-32.2
丙烷	8.77	-28.0
异丁烷	1.58	-28.2
正丁烷	2.90	-26.8
异戊烷	0.75	-26.7
正戊烷	0.67	-27.1
CO ₂	2.80	
原油		-27.0

盆河集油气田 E_d, E_s^1, E_s^2 发现的天然气相似^[4]。按照戴金星等天然气类型鉴别图版^[5]判识属于油型气。重烃组分的碳同位素分析结果与原油的碳同位素分析结果非常接近,如天然气中正戊烷碳同位素 $-27.1‰$ 、原油碳同位素 $-27.0‰$ 。说明该天然气与原油关系密切,应该是来自同一套烃源岩,即深部 E_s^4 烃源岩。

5 深层油气资源潜力重新预测

5.1 沙四段烃源岩厚度重新预测

三次资评时,霸县凹陷只在凹陷边缘钻遇 E_s^4 段地层,凹陷中心没有探井钻遇,因此烃源岩厚度取值总体较低,平均取值为 $100\sim 300$ m。在兴隆 1 井地区当时未钻遇 E_s^4 地层,故烃源岩厚度仅计算了 E_s^3 地层,取值 300 m。兴隆 1 井的钻探揭示, $4\ 429\sim 5\ 500$ m 井段沙四段地层厚度为 $1\ 071$ m (未穿),其中暗色泥岩 531 m。这是本区首次钻遇大段沙四段地层,其中 E_s^4 中下段地层厚 652 m,暗色泥岩 357 m。如此大套的 E_s^4 中下段暗色泥岩在霸县凹陷还是首次发现。根据地震剖面资料推测,沙四段地层厚度可达 $2\ 500$ m,即在兴隆 1 井井底深度以下还有 $1\ 000$ 多 m 的沙四中下段地层,在凹陷最深处沙四段地层厚度可达 $9\ 000$ m。由此可见,霸县凹陷深部 E_s^4 段烃源岩的厚度很大,是该凹陷中很重要的烃源岩层。

5.2 沙四段烃源岩生烃潜力重新认识

多年来的研究结果表明,霸县凹陷 $E_s^1-E_s^2$ 地层暗色泥岩有机质丰度偏低,基本属于差—中等烃源岩; $E_s^3-E_s^{4上}$ 为该地区古近系主要烃源层^[6,7],从有机质丰度统计结果来看(表 3),其有机质丰度普遍较高,各项参数基本都达到了中等—好烃源岩标准;而 $E_s^{4中}-E_k$ 地层泥岩的有机质丰度较低,属于差—非烃源岩范畴^[8,9]。兴隆 1 井钻探对 E_s^1, E_s^2, E_s^3 烃源岩的认识与以往基本一致,但是对沙四中下段暗色泥岩的认识发生了很大的变化,该段烃源岩属于中等—好烃源岩,为一套新的生油层系,从而提升了霸县凹陷深层的勘探价值,特别是深层天然气勘探具有良好前景。

5.3 霸县凹陷油气资源重新估算

应用盆地模拟方法对 E_s^4 段资源量重新进行了计算。选取的参数与二次资评、三次资评有较大变化,有机质丰度参数即有机碳含量从原来的最高 1.0% 调整为 1.5% ,烃源岩厚度从最大 300 m 调整为 900 m,相应的面积、体积等其他参数也进行了修正。原油和天然气运聚系数沿用以前的数值,分别为 6% 和 3.7% 。重新计算后,霸县凹陷石油资源量增加 $2\ 200\times 10^4$ t,天然气资源量增加 561×10^8 m³(表 4)。目前霸县凹陷石油资源转化率不足 37% ,天然气资源转化率不足 23% ,仍具备深化勘探的良好资源基础,尤其是深层勘探领域具有良

表 3 冀中霸县凹陷古近系烃源岩有机质丰度

Table 3 Organic matter abundance of Palaeogene source rocks in the Baxian Sag of Central Hebei Province

层位	暗泥厚度/m	有机碳,%	沥青“A”,%	总烃, 10^{-6}	生烃潜量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	综合评价
$E_s^1-E_s^2$	450~700	$\frac{0.05\sim 1.71}{0.60(161)}$	$\frac{0.005\sim 0.244\ 8}{0.039\ 8(31)}$	$\frac{39\sim 1481}{249(31)}$	$\frac{0.01\sim 9.76}{1.77(128)}$	差—中等烃源岩
$E_s^3-E_s^{4(上)}$	500~700	$\frac{0.12\sim 5.65}{1.51(159)}$	$\frac{0.006\ 3\sim 0.572\ 0}{0.105\ 6(66)}$	$\frac{46\sim 3\ 872}{682(30)}$	$\frac{0.01\sim 17.09}{4.18(123)}$	好烃源岩
$E_s^{4(中)}-E_k$	400~600	$\frac{0.2\sim 1.43}{0.48(25)}$	$\frac{0.009\ 2\sim 0.005\ 2}{0.023\ 0(9)}$	$\frac{37\sim 284}{106(9)}$	$\frac{0.02\sim 5.43}{0.70(23)}$	差—非烃源岩

注:表中分式意义为 $\frac{\text{最小值}\sim\text{最大值}}{\text{平均值(样品数)}}$ 。

表 4 冀中霸县凹陷沙四段资源量计算对比

Table 4 Resource calculation comparison of the Fourth Member of Shahejie Formation in Baxian Sag of Central Hebei Province

评价轮次	层位	有效厚度/ km	面积/ km ²	体积/ km ³	有机碳, %	生油量/ 10 ⁸ t	排油量/ 10 ⁸ t	生气量/ 10 ⁸ m ³	油资源量/ 10 ⁸ t	气资源量/ 10 ⁸ m ³
二次资评 (1994)	E_s^4	0.1~0.3	393.0	60.87	0.5~1.0	2.95	1.570	3 203	0.318	96
三次资评 (2002)	E_s^4	0.1~0.3	566.0	87.76	0.5~1.0	7.81	2.861	3 858	0.460	140
本次计算	E_s^4	0.3~0.9	732.0	220.00	0.5~1.5	11.33	7.217	19 338	0.680	701

好的资源潜力,不仅可能找到石油,而且可能找到大量天然气,值得进一步勘探。

6 结论

1) 霸县凹陷沙四中下段烃源岩厚度大、有机质丰度较高、生烃潜力大,有机质类型为 II₂—II₁型,是一套新发现的烃源层。目前该套烃源岩已处于凝析油、湿气演化阶段,具备了生成油气的条件。

2) 兴隆1井沙四段油气层中的石油与天然气来源于沙四段烃源岩,与沙四中下段具有较好可比性,属于自生自储油气藏。

3) 沙四中下段烃源岩的发现使霸县凹陷石油资源量增加 $2\ 200 \times 10^4$ t,天然气资源量增加 561×10^8 m³。霸县凹陷深层具有良好的油、气勘探前景。

参考文献:

1 刘洛夫,妥进才,陈践发. 烃源岩的研究现状[J]. 勘探家,1997,

2(3):62~64

2 秦建中,贾蓉芬,郭爱明等. 华北地区煤系烃源层油气生成运移评价[M]. 北京:科学出版社,2000. 121~122

3 梁宏斌,张敏,王东良等. 冀中坳陷苏桥—文安地区混源油定量识别模式研究:典型原油混合实验及混源油识别模式[J]. 沉积学报,2004,22(4):689~693

4 梁宏斌,降栓奇,杨桂茹等. 冀中坳陷北部天然气类型、成藏模式及成藏条件研究[J]. 中国石油勘探,2002,7(1):17~33

5 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[A]. 见:戴金星. 天然气地质和地球化学论文集(卷一)[M]. 北京:石油工业出版社,1998. 204~213

6 王雪平. 冀中坳陷天然气源几个问题浅析[J]. 石油实验地质,1986,8(3):215~223

7 杜金虎,赵贤正,张以明等. 中国东部裂谷盆地地层岩性油气藏[M]. 北京:地质出版社,2007. 103~128

8 杨彩虹,刘俊奇,王权等. 冀中坳陷深层油气成藏条件分析及勘探前景[A]. 见:谯汉生编. 中国东部深层石油勘探论文集[C],北京:石油工业出版社,2001.179~203

9 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京:科学出版社,2005. 471~491

(编辑 徐文明)

(上接第599页)

4 曾宪顺,刘开时,邹景文. 论龙门山逆冲推覆构造带北段的地质结构及油气远景[J]. 天然气工业,1989,9(3):10~16

5 何军,于三公. 龙门山推覆体形成机制及其北段含油性[J]. 天然气工业,1989,9(3):16~21

6 王宓君,包茨,李懋钧. 中国石油地质志(第十卷):四川油气区[M]. 北京:石油工业出版社,1989

7 腾格尔,胡凯,高长林等. 上扬子东南缘下组合优质烃源岩发育及生烃潜力[J]. 石油实验地质,2006,28(4):359~365

8 童崇光,胡受权. 龙门山山前带北段油气远景评价[J]. 成都理工大学学报,1997,24(2):1~8

9 陈洪德,庞林,倪新锋等. 中上扬子地区海相油气勘探前景[J]. 石油实验地质,2007,29(1):13~18

10 王庭斌. 中国大中型气田成藏的主控因素及勘探领域[J]. 石油与天然气地质,2005,26(5):573~574

11 戴鸿鸣,刘文龙,杨跃明等. 龙门山北段山前带侏罗系油砂成因研究[J]. 石油实验地质,2007,29(6):604~608

12 王兰生,韩克猷,谢邦华等. 龙门山推覆构造带北段油气田形成条件探讨[J]. 天然气工业,2005,25(增刊A):1~5

13 谢邦华,王兰生,张鉴等. 龙门山北段烃源岩纵向分布及地化特征[J]. 天然气工业,2003,23(5):21~23

14 黄第藩,王兰生. 川西北矿山梁地区沥青脉地球化学特征及其意义[J]. 石油学报,2008,29(1):23~28

15 周文,邓虎成,丘东洲等. 川西北天井山构造泥盆系古油藏的发现及意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2007,34(4):413~417

16 刘光祥,王守德,潘文蕾等. 广元天井山古油藏剖析[J]. 海相油气地质,2003,8(1-2):103~107

17 李艳霞,钟宁宇. 川东石炭系气藏中固体沥青形成机理探讨[J]. 石油实验地质,2007,29(4):402~404

18 谢增业,魏国齐,李剑等. 川西北地区发育飞仙关组优质烃源岩[J]. 天然气工业,2005,25(9):26~28

19 Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. Englewood cliffs N J:Prentice Hall,1993.1~363

20 Czochanska Z, Gilbert T D, Philp R P, et al. Geochemical application of sterane and triterpane biomarkers to a description of oils from the Taranaki Basin in New Zealand[J]. Organic Geochemistry, 1988, 12:123~135

21 Grantham P J. The occurrence of unusual C₂₇ and C₂₉ sterane predominances in two types of Oman crude oil[J]. Organic Geochemistry, 1986,9:1~10

22 张水昌, Moldowan J M, Li M 等. 分子化石在寒武—前寒武纪地层中的异常分布及其生物学意义[J]. 中国科学(D辑),2001,31(4):299~304

23 Peters K E, Moldowan J M. Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum[J]. Organic Geochemistry, 1991, 17:47~61

24 Peters K E, Moldowan J M, Driscoll A R, et al. Origin of Beatrice oil by co-sourcing from Devonian and Jurassic source rocks, Inner Moray Firth, U.K. [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73:454~471

(编辑 徐文明)