

文章编号:0253-9985(2004)04-0400-08

文留地区石炭-二叠纪煤系 生烃史及生烃潜力

许化政,周新科

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:东濮凹陷文留地区石炭-二叠纪煤系分布稳定、含有机质丰富,是文留气藏可靠的气源岩。煤系在埋藏过程中有两次生烃过程:第一次发生在中、下三叠统沉积后,镜质体反射率(R_o)、磷灰石裂变径迹、古流体包裹体分析证实当时煤系的古埋深约为3500 m,古地温118℃,古演化程度为 $R_o=0.80\% \sim 0.85\%$ 。其后经历了中生代约180 Ma以抬升剥蚀为主的历程,煤系生烃中止。早第三纪裂谷发育期间,煤系因埋深加大而进入二次生烃期,并在东营组沉积后达到生烃峰值阶段。主体烃源岩主要分布在文东-前梨园洼陷,埋深5290~6360 m。文留地区天然气资源探明程度已达到90%以上,有效供气边界条件清楚。经计算,文留气藏有效供气区石炭-二叠纪煤系生烃量为 $3253.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,排烃量 $2657.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,天然气聚集系数为5.92%。

关键词:文留气藏;石炭-二叠纪煤系;生烃潜力;一次生烃;二次生烃;聚集系数

中图分类号:TE112.1

文献标识码:A

Hydrocarbon-generating potential and history of Carboniferous-Permian coal measure strata in Wenliu area

Xu Huazheng, Zhou Xinke

(Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing)

Abstract: The Carboniferous-Permian coal measure strata in Dongpu sag is a fair source rock unit of Wenliu gas pool due to its stable distribution and high organic content. There are two hydrocarbon-generating periods in the burial history of coal measures. The first one occurs when the $T_{1,2}$ formation is deposited. Vitrinite reflectance, apatite fission track and fluid inclusion analyses indicate that the burial depth of coal measures is about 3500 m, with the palaeotemperature of 118℃ and R_o of 0.80%–0.85%. Hydrocarbon generation of coal measures was interrupted in the Mesozoic uplift and erosion period (about 1.8 million years). During the Paleogene rifting period, the coal measures was entered into its secondary hydrocarbon-generating period as the burial depth increases, reaching its hydrocarbon-generating peak after the deposition of Dongying formation. The gas-prone source rock is mainly distributed in the region of Wendong-Qianliyuan, with the buried depth of 5290–6360 m. The discovery maturity (percentage of ultimately proven reserve with respect to total resources) of gas resources in Wenliu area is more than 90%. In the effective gas supply area of Wenliu gas pool, the hydrocarbon-generating volume and hydrocarbon-expelling volume of Carboniferous-Permian coal measures are estimated to be 3253.3 million m^3 and 2657.0 million m^3 respectively, with a gas accumulation coefficient of 5.92%.

Key words: Wenliu gas pool; Carboniferous-Permian coal measures; hydrocarbon-generating potential; first hydrocarbon-generating period; secondary hydrocarbon-generating period; accumulation coefficient

东濮凹陷文留气田是一个典型的煤成气田^[1,2]。它的发现,不仅验证了石炭-二叠纪煤

系在经过200 Ma的埋藏和多次盆地改造后,在新生代强烈的构造活动背景下,仍具备很强的成烃

基金项目:中国石化科技项目“中国石化环渤海湾地区前三系油气资源前景”(P03076)

第一作者简介:许化政,男,59岁,教授级高级工程师,石油地质

收稿日期:2004-06-02

潜力,而且为研究石炭-二叠纪煤系成烃历史及成藏条件,提供了一个良好的例证。详细研究石炭-二叠纪煤系的埋藏历史(含受热史)及二次生烃的背景条件,可为华北地区石炭-二叠纪煤成气勘探选区提供理论依据和参数,包括一次生烃的 R_0 (镜质体反射率)、最大埋深背景值、产气率和聚集系数等。

1 气藏特征

文留气田位于东濮凹陷文留中央隆起带北部,是一个在基岩隆起背景上继承性发育的向南倾没的鼻状构造气田^[3,4]。气田的东西两侧,分别是落差达900~1300 m的文东和文西大断层,北

侧是落差达500 m的文北断层,南以鼻状构造倾没端的气水界面为限。这些断层的下降盘分别是沙河街组三⁴、三²亚段(以下简称沙三⁴、沙三²亚段)的滑塌盐块,形成侧向封堵。在上述构造所限范围内,背斜轴部地层产状平缓(4°~9°),天然气储集在沙河街组四段(以下简称沙四段)砂岩中,其上为厚度大于300 m的沙三⁴亚段盐岩(厚320~650 m),下伏为中生界红色砂泥岩、石炭-二叠系(其中煤系厚220 m)和下古生界(图1)。在沙三⁴亚段盐岩的严密封盖下,唯有煤系烃源岩成熟并可向圈闭中供烃,使文留地垒形成一个以石炭-二叠纪煤系为烃源岩、沙四段为储集层的独立的生运聚单元(成藏系统)。

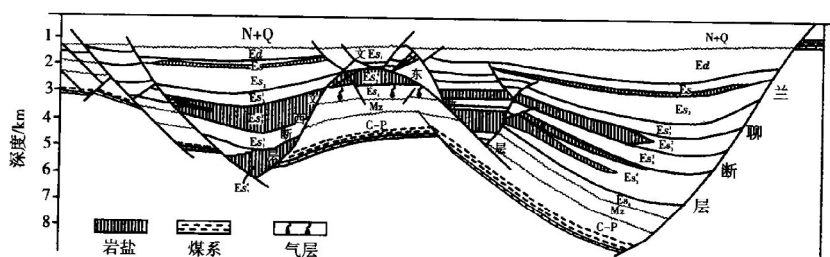


图1 文留气藏构造横剖面图

Fig.1 Tectonic profile of Wenliu gas reservoir

天然气富集程度受背斜构造控制,气藏高度达400 m,构造充满系数44.1%,气层累计厚度达150 m。含气层段内60%~80%的砂层为气层,平均含气饱和度达66%,是一个含气丰度极高(12.25×10⁸ m³/km²)的块状煤成气田。

2 烃源岩埋藏及热演化史

2.1 烃源岩分布

文留地区已有3口井(濮深1、文古1、文古2)钻

穿沙四段气层进入古生界。在沙三⁴亚段盐盖层之下,已发现两套暗色地层。其一是沙四段上部浅灰-灰黑色泥页岩夹浅灰色粉砂岩,厚103 m,分布面积小于15 km²,埋藏深度浅于3000 m(R_0 小于0.6%)。这套地层由于成熟度低,体积小,不可能成为文留气田的烃源岩。其二是以石炭-二叠纪下部的山西-太原组为主的深灰色-灰黑色泥岩、浅灰色粉砂岩、深灰色石灰岩及煤层,厚约220 m,其中的烃源岩为煤系暗色泥岩、碳质泥岩和煤层(表1)。

表1 文留地区石炭-二叠纪烃源岩厚度统计表

Table 1 Thickness of the Carboniferous-Permian hydrocarbon source rocks in Wenliu area

井号	太原组				山西组				下石盒子组			
	总厚 /m	暗色泥 岩厚度/m	煤层 厚度/m	碳质泥 岩厚度/m	总厚 /m	暗色泥 岩厚度/m	煤层 厚度/m	碳质泥 岩厚度/m	总厚 /m	暗色泥 岩厚度/m	煤层 厚度/m	碳质泥 岩厚度/m
濮深1	154	55	3.5	9.0	72	39	8	2.5	-	-	-	-
文古1	137	60	14	2.5	79	45	2.5	5	132	21	-	4
文古2	55	37.5	5	4	85	39.5	7	4	136	82	-	-

注:文古2井石炭系下部断缺约90m;表中空格为未钻遇地层

煤系中含煤7~10层,厚11.5~16.5 m;碳质泥岩厚7.5~11.5 m,暗色泥岩厚94~105 m。这套

暗色地层虽然厚度不甚大,但分布稳定,特别是含有机质丰富,是文留气藏可靠的烃源岩^[5]。

2.2 埋藏史

埋藏作用是沉积有机质生烃演化的基本条件,重塑石炭-二叠系的埋藏历程,是揭示其生烃历史的关键。东濮凹陷古生界煤系埋藏历史主要经历了海西期的台地型掩埋、印支-燕山期的隆升剥蚀、喜山早中期断陷型深埋、喜山中期强烈剥

蚀和喜山晚期的拗陷沉积 5 个演化阶段(表 2)^[6]。各阶段沉积(剥蚀)厚度及古地温场变化情况的推算结果列于表 2。

2.2.1 克拉通盆地——低温阶段

该阶段经历了早期近海克拉通内盆地(C_2-P_1)和晚期陆相克拉通盆地(P_2-T_2)两个沉积阶

表 2 东濮凹陷石炭-二叠纪煤系埋藏及热史演化表

Table 2 Burial and thermal histories of the Carboniferous-Permian coal measures in Dongpu sag

地层(时代/Ma)	构造运动	沉积(降)类型	沉积(剥蚀)厚度/m		火山活动	古地温梯度 ($^{\circ}\text{C km}^{-1}$)	构造-热事件
			东濮凹陷	文留地区			
$N_1g_1-Q(0-17)$	喜山运动(Ⅲ)	冲积平原	+1 200~2 700	+1 500	弱	29~34	裂谷后拗陷-降温阶段
$E_3d_1-N_1g_2$ (17~24.6)	喜山运动(Ⅱ)	强烈隆升	-500~-2 500	-1 700	弱	35	隆升-降温阶段
$E_2s^4-E_3d_2$ (24.6~50)	喜山运动(Ⅰ)	湖泊	+2 000~6 000	+3 300	强	35~40	裂谷-升温阶段
$K_2-E_1k(50-97.5)$	喜山运动	抬 隆	-1 700~-2 800	-1 830	弱	30	隆升降温阶段
$J_3-K_1(97.5-213)$	燕山运动				强	35~45	高地温场阶段
$T_3(213-230)$	印支运动				弱	27~30	陆坡低温阶段
C_2-T_2 (208~330)	海 西	河流三角洲	+3 000~3 400	+3 200	弱	27~30	克拉通盆地——低温阶段

段。第一阶段形成了厚约 220 m 的含煤暗色泥岩地层,第二阶段沉积了厚 3 000~3 400 m 干燥炎热环境下的河流-三角洲相红色砂泥岩。整个克拉通沉积阶段构造稳定,沉积厚度差异小,古地温梯度低。依明古 1 井 3 330 m 太原组方解石脉流体包裹体测定古地温为 118 $^{\circ}\text{C}$,设当时地面温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,煤层古埋深为 3 500 m。经计算,古地温梯度为 28 $^{\circ}\text{C/km}$ 。

2.2.2 隆升剥蚀阶段

印支期(晚三叠世)华北地块东部开始挤压隆升并波及东濮地区,从此开始了漫长的以隆升剥蚀为主体的地质历史,直至新生代古新世以后拗陷再次下陷接受沉积。印支期(T_3)是盆地转型时期,华北盆地由原来的台地型沉积转变为陆相克拉通内拗陷沉积(大鄂尔多斯盆地)。东濮地区虽以隆升为主,但岩石圈稳定,古地温场较低,依周章保*利用磷灰石裂变径迹、Eassy R_0 反演古地温梯度为 27~30 $^{\circ}\text{C/km}$ 。

燕山中期,华北盆地进一步分解,岩石圈处于伸展减薄状态,太行山开始活动,岩浆侵入、喷发广泛,区域上属高地温场阶段。东濮凹陷的岩浆

侵入活动全部发现在黄河南地区,长 1 井、东 1 井、马古 6 井、兰古 1 井、予深 1 井在石炭-二叠纪煤系中或煤系上下发现大段侵入岩。予深 1 井 5 700 m(石盒子组)花岗岩 K-Ar 法测定地质年龄为 130 Ma;马古 6 井 3 031.69 m(太原组)煌斑岩 K-Ar 法测年为 104.48(± 3.14)Ma;兰古 1 井 3 360 m(下奥陶统)花岗岩 K-Ar 法测年为 132.18(± 2.2)Ma,即属这一时期的岩浆侵入活动。这一时期的古地温攀升对东濮凹陷南部石炭-二叠纪煤系的热变质可能造成一定影响, R_0 测定南部边缘隆起区石炭-二叠纪煤系普遍比北部高 0.2% 以上。根据区域古地温资料,推测东濮凹陷这一时期古地温梯度达 35~45 $^{\circ}\text{C/km}$ 。

经历了燕山期的强烈挤压-拉张后,晚白垩-古新世东濮凹陷处于热冷却隆升阶段,岩石圈增厚,古地温降低,地温梯度约在 30 $^{\circ}\text{C/km}$ 左右。

燕山中晚期构造分异加剧,导致剥蚀厚度差别较大。东濮凹陷北部三叠系残存厚度 300~600 m,文留地区(文古 1 井)推算三叠系剥蚀厚度达 1 830 m。桥口-新霍以南地区三叠系全部遭受剥蚀,马厂地区剥蚀至下石盒子组,剥蚀厚度超过 2 500 m。

* 周章保.渤海湾盆地临清拗陷构造-热事件与上古生界煤成气藏.2002

2.2.3 裂谷-升温阶段

早第三纪喜山运动I幕期间地壳拉张加剧,东濮凹陷迅速沉积了沙河街组四段-东营组($E_{s4}-E_d$)。东营期末抬升剥蚀前,文留地区下第三系沉积厚度达3 300 m,前梨园洼陷下第三系厚度达6 000 m。依文古2井4 386.5 m(石盒子组)方解石脉流体包裹体形成温度(160°C)计算,该时期古地温梯度为 $36^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

2.2.4 隆升-降温阶段

发生于早第三纪晚期-晚第三纪早期(东营组-馆陶组)的喜山运动II幕(东营运动)造成渤海湾盆地的区域性隆升和剥蚀,在东濮凹陷最大剥蚀量超过2 500 m(文留地区1 700 m),并伴随降温作用。这次运动中地层剥蚀卸载,以及大规模的褶皱断裂,破坏了地层中油气水原有的平衡,发生大规模的油气运移和聚集,是油气成藏的关键

时刻。

2.2.5 坳陷-降温阶段

东濮凹陷经过东营运动(E_d)大量剥蚀后,晚第三纪、第四纪盆地进入平稳沉积的坳陷期,构造活动大大减弱,地温梯度大大降低,文留地区现今地温梯度 $32^{\circ}\text{C}/\text{km}$,沉积补偿厚度1 500 m,石炭-二叠纪煤系基本未达到东营运动剥蚀前最大古埋深和最高古地温。由于有机质成烃演化的不可逆性,可以肯定地说,煤系地层热变质程度不会递增,表明自渐新世末盆地抬升剥蚀以来,煤系地层生烃过程一直处于停止阶段。

2.3 受热史

2.3.1 裂变径迹分析

文留与邻近地区6个石炭-二叠系样品磷灰石裂变径迹测试与计算成果列于表3。

表3中样品裂变径迹长度和表观年龄均呈多

表3 文留与邻近地区磷灰石裂变径迹表观年龄、平均径迹长度与地温史*

Table 3 Apatite fission track apparent age, average length and geothermal history in Wenliu and adjacent areas

井号	现井深 /m	层位	颗粒数 /n	$P_s/(10^3 \cdot \text{cm}^{-2})$ (N_s)	$P_i/(10^3 \cdot \text{cm}^{-2})$ (N_i)	r_{si}	T/Ma	$L/\mu\text{m}$ (N)	退火率 /%	受热温 度/ $^{\circ}\text{C}$	古埋深 /m	古地温梯度 / $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1})$
文古1	3 696	P_{2s}	17	0.817(87)	12.995(1384)	0.10	17.6 ± 1.5	7.3 ± 2.0 (33)	55.2	125	3 346	33
	3 930	P_{1x}	16	0.548(52)	16.348(1455)	0.0	13.2 ± 3.8	7.0 ± 2.0 (25)	57.1	126	3 580	31
文古2	4 389	P_{1s}	5	3.258(87)	11.086(296)	0.58	27 ± 2.53	9.4 ± 2.7 (15)	57.7	127	3 581	31
明古1	3 300	C_3t	12	0.689(108)	4.569(716)	0.47	30.1 ± 5.4	8.8 ± 2.3 (58)	46	117	3 505	29
	3 795	P_{2sh}	13	0.803(42)	8.987(470)	0.68	18.7 ± 3.1	9.1 ± 1.5 (16)	55.8	126	3 453	35
庆古2	4 168	C_3t	19	0.445(27)	0.003(609)	0.36	9.9 ± 2.2	8.0 ± 1.9 (5)	49.1	120	3 526	30

注: P_s —矿物中 U^{238} 自发裂变径迹密度; N_s — P_s 所测径迹数; P_i —云母外探测器记录的 U^{238} 诱发裂变径迹密度; N_i — P_i 所测径迹数; T —表观年龄; r_{si} —相关系数; L —修正偏斜后的平均径迹长度; N —所测封闭径迹总数。古地表温度取 15°C ; 退火率 = (诱发径迹长度 - 实测径迹长度)/诱发径迹长度(诱发径迹长度取 $16.3\mu\text{m}$)

峰状,主峰时间位于喜马拉雅晚期,其地质年代平均为 24.3 Ma ,正好处于东营运动前的时段,相应的古地温梯度为 $30 \sim 35^{\circ}\text{C}/\text{km}$,文留地区煤系古埋深3 580 m。

2.3.2 矿物流体包裹体分析

文留及邻区流体包裹体特征分析成果见表4。样品主要为砂岩及方解石,取自烃源岩层位,可以

反映初次运移的时间。依据表4中有机包裹体测温资料,以及样品中流体的盐度和冰点,可大致划分出两个成烃(藏)期。第一成烃(藏)期,均一温度小于 136°C ,应属于海西晚期一次成烃产物;第二成烃(藏)期,主体温度大于 145°C ,应属新生代裂谷活动期间,石炭-二叠纪煤系埋深再次大于古埋深并开始初次运移时的产物。

* 程克明,王兆云.东濮凹陷上古生界地热中及源岩生烃史研究.2002

表4 文留及邻区石炭-二叠纪方解石脉流体包裹体特征

Table 4 Features of fluid inclusions in the Carboniferous-Permian calcite veins in Wenliu and adjacent areas

井号	深度/m	层位	形态	颜色	大小/ μm	气液比/%	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	冰点/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/%	期次
文古2	4 386.5	P_1s	不规则	无色	3	5	148(6)	-2.8~3.4	4.65~5.56	第二期
			不规则	无色	3~8	5	160(6)	-4.0~4.1	6.45~6.59	第二期
文古2	4 389	P_1s	不规则	无色	3~4	5	161(8)			第二期
明古1	3 330	C_3t	不规则	无色	8	5	118(1)			第一期
			不规则	无色	3	5	131(4)			第一期
			不规则	无色	4	5	146(5)			第二期
庆古2	3 795	P_2s	不规则	无色	3~8	5	136(6)	-2.8~3.0	4.65~4.96	第一期
			不规则	无色	3~10	5	146(6)	-3.2	5.26	第二期
庆古2	3 927	P_1s	不规则	无色	3~8	5	146(11)	-3.0~3.2	4.96~5.26	第二期
庆古2	4 168	C_3t	不规则	无色	4~8	5	151(9)	-3.1~3.7	5.11~6.01	第二期

注:括号内为测温包体个数;表中空格为无数据。

3 生烃史

3.1 一次生烃

石炭-二叠纪煤系的一次生烃是在海西晚期中下三叠统沉积厚度不断加大的过程中实现的^[7]。由于地势平坦,构造稳定,岩性均一,煤系生烃演化的递进速度在东濮凹陷范围内应该基本一致,可通过测试现今埋藏较浅的煤层镜质体反射率获取其古变质程度的信息。

东濮凹陷北部边缘及隆起区石炭-二叠纪煤层镜质体反射率为0.70%~0.93%,煤层现埋深1 437~3 550 m,相差逾2 000 m。在浅于3 500 m的深度范围内,煤层埋藏深度(H)与镜质体反射率(R_o)关系不明显。但在埋藏深度超过3 500 m以后,煤层 R_o 随埋深加大而有规律地增加(图2),说明有机质变质程度开始递进,即开始发生二次生烃作用^[6,7]。由此推断海西晚期石炭-二叠纪煤系第一次生烃所达到的各项参数(表5)。

煤层热变质生成的天然气首先被煤层吸附,然后才能以扩散、溶于水等形式运移。根据沁水盆地晋试1井521.6~609.6 m石炭-二叠系12个煤样吸附气含量实测结果:3号煤(山西组大煤)含气量为23.4~30.3 m^3/t ,平均为27.4 m^3/t 。参考晋试1井测试结果,文留地区石炭-二叠纪煤层吸附气含量选为27 m^3/t 。据张文正等^[8]研究我国不同组分低阶煤的煤气发生率,以镜质组为主要组分的低阶煤 R_o 演化至0.9%时的煤气发生率为77~93 m^3/t ,平均为85 m^3/t ,减去煤层吸附气量,则有58 m^3/t 的天然气发生了运移。

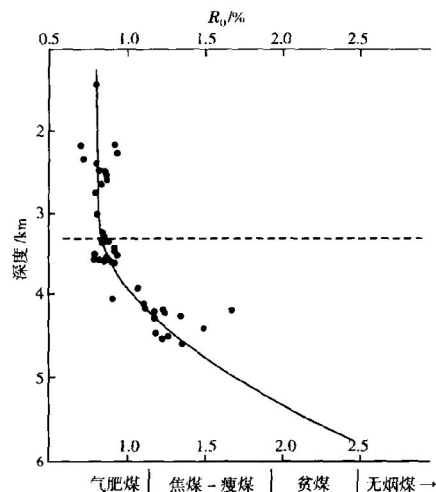
图2 文留及邻区石炭-二叠纪煤系 R_o 与埋深关系图Fig.2 Relationship between R_o and buried depth of the Carboniferous-Permian coal measures in Wenliu and adjacent areas

表5 文留-文明寨地区石炭-二叠纪煤系一次生烃期演化参数表

Table 5 Evolutionary features of the first hydrocarbon-generating period in the Carboniferous-Permian coal measures, Wenliu-Wenmingzhai area

古埋深 / m	古地层温度 / $^{\circ}\text{C}$	古地温梯度 / ($^{\circ}\text{C km}^{-1}$)	古演化程度 (R_o) / %	古煤阶
3 580	118	28.7	0.85	气煤

文留地区印支-燕山期三叠系剥蚀量达1 830 m,历经180 Ma,煤系以上地层剖面中因无良好封盖层,一次生烃期间运移出来的天然气很难保存下来。但经剥蚀后,石炭-二叠纪煤系埋深仍达1 000~

1 700 m,煤系有机质和煤层吸附气得以保存。

3.2 二次生烃

3.2.1 二次生烃的起始古温度(古埋深)

热解实验揭示,二次生烃并不是沿着一次生烃的轨迹连续演化,而是存在“迟缓”现象^[4],即二次生烃所需要的起始温度比第一次生烃终结时的温度要高,且一次生烃成熟度越高,迟缓现象越明显。

天然气的初次运移必须满足两个条件,一是天然气大量生成并达到一定浓度的积累;二是地层压力达到临界突破压力^[9]。石炭-二叠纪煤系地层进入二次生烃期,生烃速度远大于扩散速度,煤系地层流体压力不断上升,到某一阈值(岩石突破临界压力)时,裂缝与煤岩割理张开,天然气快速从气源岩中运移出来;地层压力降到某一值时,裂缝重新闭合^[10]。这种间歇性微裂缝运移是煤系地层初次运移的主要方式,生烃增压是煤成气初次运移的主要动力^[11]。据此,煤系地层压力与煤层温度的关系式为

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2 \quad (1)$$

式中 P_1 为常压条件, 0.1 MPa; V_1 为二次生烃期产气率, m^3/t ; T_1 为标准状况温度, 20℃; P_2 为地层压力, MPa; V_2 为吨煤岩孔隙体积, m^3/t , 煤炭成岩后孔隙度一般小于 6%, 煤岩密度为 $1.5 \text{ t}/\text{m}^3$; T_2 为地层温度, ℃。

文留地区煤层现埋深平均为 4 400 m, 煤系地层热变质程度为焦煤早期 ($R_o = 1.2\% \sim 1.4\%$)。参考文古 2 井下古生界、户部寨气田中生界(文留构造北翼)压裂数据, 推测煤系地层突破压力为 53 MPa。纯煤岩煤气发生率按 $20.3 \text{ m}^3/\text{t}$ 计算^[5], 文留地区石炭-二叠纪煤岩纯度按 69.8% 换算, 由一次生烃的最高变质阶段 ($R_o = 0.85\%$) 演化至焦煤早期阶段 ($R_o = 1.2\%$) 初始排烃期, 实际的煤气发生率为 $14.2 \text{ m}^3/\text{t}$ 。代入式(1)

$$\frac{0.1 \times 14.2}{(273 + 20)} = \frac{53 \times (1/1.5) \times 0.06}{(273 + t)}$$

计算得 $t = 164.4^\circ\text{C}$ 为地层压力达到 53 MPa 时的地层温度。前已述及, 前第三纪时期古地温梯度为 $36^\circ\text{C}/\text{km}$, 古地表温度为 20°C , 由此计算二次生烃期间发生初次运移时的煤系埋深为 4 011 m (图 3)。要达到这样的埋藏深度, 在中央隆起带应该是东营组沉积早期, 在前梨园洼陷是沙三段沉积晚期。

3.2.2 二次生烃主体烃源岩的分布

早第三纪时期是石炭-二叠纪煤系的主要生

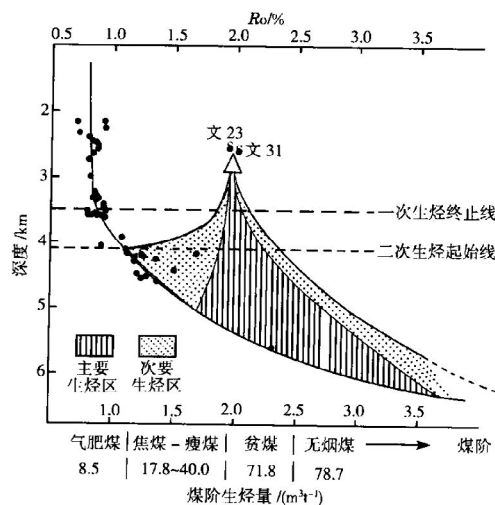


图3 文留气田天然气源追索及天然气垂向运移图

Fig.3 Gas source and vertical migration of natural gas in the Wenliu gas field

烃期。与一次生烃不同的是, 该期构造沉积积分加大, 文留中央隆起带下第三系沉积速率为 $124.5 \text{ m}/\text{Ma}$, 最大沉积厚度 3 300 m; 而两侧洼陷下第三系沉积速率达 $226.4 \text{ m}/\text{Ma}$, 沉积厚度超过 6 000 m, 由此导致文留地垒带与两侧洼陷带石炭-二叠纪煤系埋藏受热史不同, 二次生烃发生的时期和强度不一致(表 6, 图 4)。

表 6 说明, 前梨园洼陷石炭-二叠纪煤系在沙三段沉积时期即开始二次生烃, 至东营组剥蚀前达到无烟煤演化程度。而中央隆起带二次生烃发生晚, 至东营早期才开始二次生烃, 东营中晚期抬升剥蚀前达到焦煤演化程度。

文留气田天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1 = -30.30\% \sim -27.8\%$ 。沈平等^[6]根据中国资料的统计回归获得的 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_o$ 的煤成气判别式为

$$\delta^{13}\text{C}_1\% = 8.6 \log R_o - 32.8$$

依上式计算得煤成气源岩的成熟度 R_o 为 $1.95\% \sim 3.8\%$, 相应的烃源岩埋藏深度为 5 290 ~ 6 360 m (图 3)。此段埋深的石炭-二叠纪煤系是文留气田的主体气源岩, 它们主要分布在文东-前梨园洼陷。

4 聚集系数

4.1 目的意义

由于天然气较原油更容易从母质中脱附出

表 6 文留地区不同构造部位石炭-二叠纪煤系二次生烃演化特征表

Table 6 Evolutionary features of the second hydrocarbon-generating period in the Carboniferous-Permian coal measures from the different structural locations, Wenliu area

构造位置	特征参数	一次生烃(气煤) (R_o 为 0.7%~0.9%)	二次生烃(R_o /%)				
			肥煤 (1.0~1.2)	焦煤 (>1.2~1.7)	瘦煤 (>1.7~1.9)	贫煤 (>1.9~2.5)	无烟煤 (>2.5)
中央隆起带	古埋深/m	3 500	4 011~4 200	4 200~4 800	—	—	—
	古地温/℃	118	164.4~171.21	71.2~194.5	—	—	—
	时代	T_2	Ed3	Ed2	—	—	—
前梨园洼陷	古埋深/m	3 500	4 011~4 200	4 200~4 800	4 800~5 200	5 200~5 800	>5 800
	古地温/℃	118	164.4~167	167~188	188~202	202~223	>223
	时代	T_2	Es3	Es2 ^F	Es2 ^L	Es1	Ed

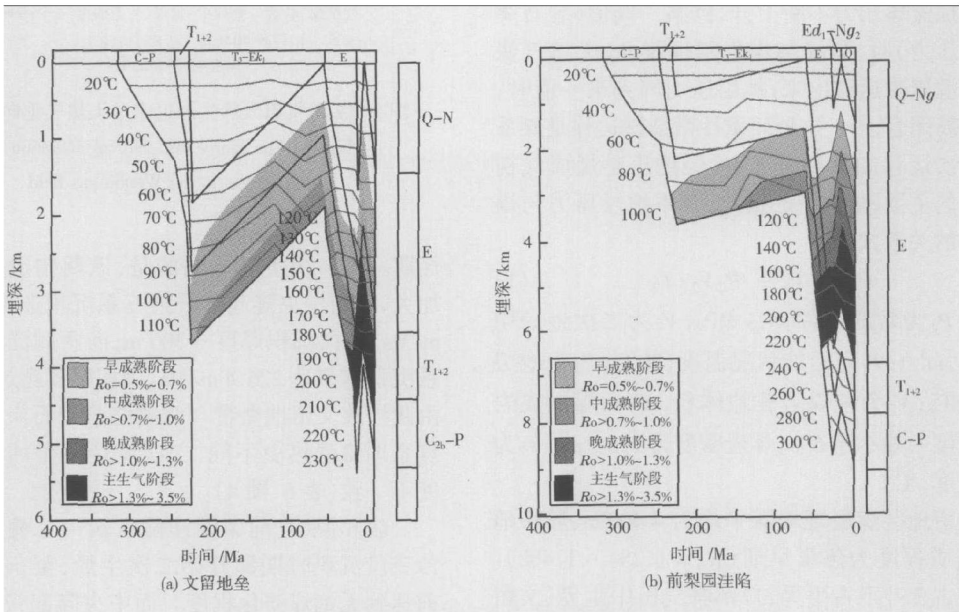


图 4 文留地区石炭-二叠纪煤系埋藏及受热史图

Fig.4 Burial and thermal evolution histories of Carboniferous-Permian coal measures in Wenliu area

来,且不易溶于水,只要有好的盖层和圈闭条件,可以有比石油还要高的聚集系数。但当盖层条件差或后期改造作用强烈时,天然气又容易散失或气藏容易遭受破坏而使聚集系数很低。因此,具有不同地质条件的地区天然气聚集系数变化很大,而成为天然气资源评价中的一大难题^[12, 13]。

为对天然气资源评价和勘探潜力分析提供类比参数,以文留地区沙三⁴亚段盐下煤成气生、运、聚单元进行天然气聚集系数研究和推算,是一件有意义的工作。该区可进行天然气聚集系数推算的条件是:

(1)文留地区沙三⁴亚段盐下气源单一,即仅有来自下伏石炭-二叠系煤成气;

(2)气藏的边界条件清楚,可以较有依据地划定石炭-二叠纪煤系供气范围,西部以文西断层为界,东部以前梨园洼陷轴为界,北以文北断层为界,南以文 216-219 断层为界;

(3)区内钻井较多,天然气资源分布清楚,煤成气探明储量的可信度较高,天然气生成、运移、聚集成藏的三维地质单元认识深刻。

4.2 参数求取

(1)供气面积。在 T_g 构造图上,求取供气面积共 120 km²。其中中央隆起带顶部供气面积 40 km²,煤系热变质程度为焦煤阶段 ($R_o = 1.2\% \sim 1.6\%$),平均埋深 4 200~5 000 m;中央隆起带翼部(文东、文西、文南)供气面积 40 km²,煤系热变质程

度为瘦煤($R_o > 1.6\% \sim 2.0\%$),平均埋深5 000 ~ 5 300 m;前梨园洼陷供气面积 40 km²,煤系变质程度为贫煤-无烟煤($R_o > 2.0\%$),煤系埋藏深度 5 300 ~ 8 700 m。

(2)煤气发生率。以龙古1井肥煤、开35井暗色泥岩(它们代表了印支期的最高演化程度,是二次生烃的背景值)为实验对象(表7),通过热模拟求出各变质阶段的煤气发生率(表8)。

表7 模拟实验样品原始地化数据表^[3]

Table 7 Original geochemical data of simulation test samples

井号	岩性	层位	深度/m	$R_o/\%$	有机碳含量/%	$\delta^{13}C$ /‰	元素分析					热解色谱		
							C/%	H/%	O/%	H/C	O/C	T_{max} /℃	$S_1/(mg \cdot g)^{-1}$	$S_1 + S_2$ $/(mg \cdot g)^{-1}$
龙古1	煤	P _{1s}	1 437.5 ~ 1 445	0.79	53.45	-26.34	74.09	4.51	8.49	0.73	11.65	448	7.81	157
开35	泥岩	C _{3t}	3 044 ~ 3 153	1.27	4.2	-	7.22	0.43	0.96	0.72	0.1	465	0.83	6.97

表8 东濮凹陷石炭-二叠纪煤和暗色泥岩模拟实验产气率表^[3]

Table 8 Gas-generating rates of simulation tests for the Carboniferous-Permian coal and dark mudstone in Dongpu sag

演化阶段($R_o/\%$)		肥煤(0.8 ~ 1.15)	焦煤(>1.15 ~ 1.6)	瘦煤(>1.6 ~ 2.0)	贫煤(>2.0 ~ 2.5)	无烟煤(>2.5)
煤	烃气发生率/(m ³ t ⁻¹)	8.46	26.23	66.25	138.08	216.75
	煤阶生烃率/(m ³ t ⁻¹)		17.77	40.02	71.83	78.67
泥岩	烃气发生率/(m ³ t ⁻¹)	8.78	31.8	51.97	101.33	143.57
	煤阶生烃率/(m ³ t ⁻¹)		23.02	20.17	49.6	42.24

(3)根据钻井统计的源岩厚度及有机质丰度分析数据,确定文留地区烃源岩厚度及有机质丰度的代表值为:煤层厚 13.8 m,有机碳含量 69.8%;暗色泥岩厚 125 m,有机碳含量为 2.4%。以焦煤早期阶段($R_o = 1.2\%$)为初始排烃期。

(4)排烃效率。文留地区石炭-二叠纪煤系在地质历史中埋深较大,至今煤系之上仍保存有

超过 800 m 厚的石盒子组-石千峰组和厚约 800 m 的中、下三叠统,煤层吸附气已趋饱和而未散失。因此,煤系二次生烃形成的天然气具有较高的排烃系数,几乎可以全部排出^[14]。煤系排烃量等于东营组沉积末期煤系最大热变质阶段生烃量减去肥煤阶段生烃量(表9)。

文留气藏有效供气区内石炭-二叠纪煤系生

表9 文留地区石炭-二叠纪排烃量及天然气聚集系数表

Table 9 Hydrocarbon-expelling volume and gas accumulation coefficient of the Carboniferous-Permian strata in Wenliu area

地区	煤阶 $R_o/\%$	面积/ km ²	岩性	厚度 /m	密度 /(t·m ⁻³)	有机碳 含量/%	有机碳总量 /10 ⁸ t	烃气发生率 /(m ³ t ⁻¹)	烃气生成量 /10 ⁸ m ³	初次运移量 /10 ⁸ m ³	探明储量 /10 ⁸ m ³	聚集系 数/%
洼陷	无烟煤 >2.5	40	煤	13.8	1.5	69.8	5.78	216.7	1 252.5	1 192.8		
			泥岩	125	2.3	2.4	2.76	143.6	396.3	368.9		
斜坡	瘦煤 >2.0 ~ 2.5	40	煤	13.8	1.5	69.8	5.78	138.1	798.2	696.3		
			泥岩	125	2.3	2.4	2.76	101.8	279.6	234.1	157.4	5.92
轴部区	焦煤 1.2 ~ 2.0	40	煤	13.8	1.5	69.3	5.78	66.3	383.2	259.6		
			泥岩	125	2.3	2.4	2.76	52.0	143.5	105.3		

烃量为 $3\,253.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,排烃量 $2\,657.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,文留气藏探明天然气地质储量为 $149.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,预测尚未发现天然气地质储量 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$,天然气聚集系数为 5.92%。

文留沙三⁴亚段盐岩在气藏形成过程中的盖层作用是显而易见的,它使该地区的天然气聚集系

数变大,在世界范围内也是偏高的^[15]。巨大的厚度和胶塑性使发育于沙四段气藏内部的断层全部消失于盐盖层之内。文东、文西、文北断层虽贯穿沙三⁴亚段,但它们下降盘盐岩的滑塌使背斜圈闭幅度加大。如果没有巨厚的盐膏岩封盖气藏,天然气的保存是难以想象的。

(下转第 421 页)

藏更多地分布在不整合面古地貌梯度较大部位的顶部,所以,在剖面上,地层超覆位置的古地貌梯度变化成为油藏的重要判断因素。

3.4 成烃与成藏要素

东营凹陷的构造演化与成烃演化史研究表明,东营凹陷主要有两次成烃与成藏期^[11~14]。喜山运动东营幕致使东营凹陷区域性隆升和广泛剥蚀,第一个生油期中断,此次成烃期生烃、排烃量相对较少,且排烃时间短,油气主要集中在靠近利津洼陷生油中心地带,尚未运移至北部陡坡带高台阶的王庄—宁海地区。中新世晚期,东营凹陷下沉进入盆地坳陷期,沙三、沙四段烃源岩相继再次进入生油门限,形成东营凹陷重要的成烃期,一直延续至今^[11]。据流体包裹体分析揭示,东营凹陷北部陡坡带沙三、沙一段及其他层位油气均为晚期成藏(距今仅几百万年)。利津洼陷早期(约36Ma)所形成的原油主要聚集在靠近生油中心的缓坡带。北部陡坡带油气多形成于东营凹陷晚期成烃、成藏阶段,Ⅱ期烃类的生成与早期沉积的沙河街组大型砂体、以及多种类型的复合疏导体系形成较好的配置,而且,晚期构造活动相对微弱,尽管北部陡坡带高台阶部位砂砾岩扇体具有较强水动力环境及高孔渗性的储层为油气遭受次生改造提供了条件,致使现今油气主体为稠油^[15],但总体讲,东营凹陷北部陡坡带仍具有油气保存的条件,有利于隐蔽油气藏的富集、成藏。

参 考 文 献

- 1 孔凡仙. 东营凹陷北带砂砾岩扇体勘探技术与发展[J]. 石油

学报, 2000, 21(52): 27~31

- 2 林松辉, 王华, 王兴谋, 等. 东营凹陷第三系隐蔽油气藏的地震预测研究[J]. 地质科技情报, 2003, 22(2): 57~62
- 3 曾藏辉, 张善文, 邱楠生, 等. 济阳坳陷砂岩透镜体油气藏充满度大小及其主控因素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(6): 729~732
- 4 李丕龙, 金之钧, 张善文, 等. 济阳坳陷油气勘探现状及主要研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 1~4
- 5 袁选俊, 谯汉生. 渤海湾盆地富油气凹陷隐蔽油气藏勘探[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(2): 130~133
- 6 李春光. 东营凹陷稠油油藏成因机制探讨[J]. 特种油气藏, 1996, 3(1): 1~5
- 7 陈建渝, 李水福, 田波, 等. 垦西—罗家油区稠油成因[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 248~253
- 8 陈建渝, 刘从印, 张树林, 等. 原油中生物标志物的组成是成藏史的反映[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(1): 97~102
- 9 朱光有, 金强, 周建林, 等. 济阳坳陷胜坨油田原油物性及其成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 9~13
- 10 宗国洪, 冯有良, 刘承华, 等. 同沉积断裂带砂砾岩隐蔽油藏研究——以东营凹陷胜北断裂带为例[J]. 石油实验地质, 2003, 25(3): 274~284
- 11 毕业泉. 陡坡带砂砾岩体油气成藏模式[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 2002. 80
- 12 蒋有录, 刘华, 张乐, 等. 东营凹陷油气成藏期分析[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 215~218
- 13 隋凤贵. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩扇体成藏动力学特征——以东营凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 335~340
- 14 邱楠生, 金之钧, 胡文瑄. 东营凹陷油气充注历史的流体包裹体分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 95~103
- 15 李素梅, 庞雄奇, 邱桂强, 等. 东营凹陷北部陡坡带稠油成藏机理与油气运聚特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(4): 451~456

(上接第407页)

参 考 文 献

- 1 朱家蔚, 戚厚发. 文留煤成气藏的发现及其对华北盆地找气的意义[J]. 石油勘探与开发, 1983, 10(1): 4~12
- 2 朱家蔚, 许化政. 东濮凹陷煤成气地化指标及其与油成气的对比[J]. 石油与天然气地质, 1985, 6(3): 272~279
- 3 许化政. 文留盐背斜形成与油气富集[J]. 石油与天然气地质, 1988, 9(3): 288~296
- 4 许化政, 周新科. 渤海湾盆地东濮凹陷文留构造发育特征与气藏形成[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 712~719
- 5 许化政. 东濮凹陷煤系有机质地化特征及生烃演化模式[J]. 石油实验地质, 1987, 9(2): 87~97
- 6 中原石油勘探局. 东濮凹陷油气生成地球化学研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991
- 7 谯汉生, 方朝亮, 牛嘉玉. 中国东部深层石油地质[M]. 北京: 石

油工业出版社, 2002

- 8 张文正, 裴戈, 关德师. 烃源岩轻烃生成的热压模拟实验研究[J]. 石油勘探与开发, 1991, 18(3): 7~15
- 9 陶一川. 油气运移聚集的流体动力学机理问题[J]. 石油与天然气地质, 1983, 4(3): 254~268
- 10 陈荷立. 油气运移研究的有效途径[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 126~131
- 11 张照录, 王华, 杨红. 含油气盆地的输导体系研究[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 133~135
- 12 包茨. 天然气地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1988
- 13 戴金星, 钟宁宁, 刘德汉, 等. 中国煤成大中型气田地质基础和主控因素[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000
- 14 关德师, 张文正, 裴戈. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系产层的油气源[J]. 石油与天然气地质, 1993, 14(3): 191~199
- 15 郭绪杰, 焦贵浩. 华北古生界石油地质[M]. 北京: 地质出版社, 2002