

文章编号:0253-9985(2005)03-0349-07

松辽盆地徐家围子断陷火山活动期次 与烃源岩演化

金晓辉¹, 林壬子², 邹华耀², 冯子辉³, 任延广³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学, 北京 102249;

3. 中国石油大庆油田股份公司大庆石油勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712)

摘要:徐家围子断陷在断陷期有 3 次较大规模的火山活动, 营城组火山活动持续时间最长。火山活动加速了深层火石岭组、沙河子组、营城组 3 套主力烃源岩的成熟。烃源岩的埋藏史、热史和生烃史模拟计算结果表明, 徐家围子断陷深层火石岭组烃源岩埋深 1 300 m 的 R_o 值, 在约 1Ma 时间内迅速达到 0.7%。沙河子组以及火石岭组烃源岩埋深约 2 600 m 时, R_o 值已经达到 1%。泉头组沉积前, 沙河子组及火石岭组烃源岩已进入生气高峰。青山口组沉积前, 营城组烃源岩处于生气高峰, 沙河子组以及火石岭组开始生成干气。此时, 登娄库组二段和泉头组一、二段区域盖层业已形成, 徐家围子断陷开始形成营城组—泉头组天然气藏。嫩江期末, 由于边界断层的活动, 营城组—泉头组天然气藏进行再分配。

关键词:烃源岩; 生烃演化史; 天然气; 松辽盆地

中图分类号: TE112.3

文献标识码: A

Volcanic activities and evolution of source rocks in Xujiaweizi fault depression, Songliao basin

Jin Xiaohui¹, Lin Renzi², Zhou Huayao², Feng Zihui³, Ren Yanguang³

(1. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing; 2. China University of Petroleum, Beijing;

3. Daqing Petroleum Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Co. Ltd., Daqing, Heilongjiang)

Abstract: Xujiaweizi fault depression has experienced three relatively large volcanic activities during rift faulting, among which the volcanic activity during the deposition of Yingcheng Fm had the longest duration. The volcanic activity speeded up the maturation of the major source rocks including deep Huoshiling Fm, Shahezi Fm and Yingcheng Fm. Simulations of burial history, thermal history and hydrocarbon generation history show that the R_o value of Huoshiling Fm source rocks at a burial depth of 1 300 m would have rapidly reached 0.7% in about 1Ma. The R_o value of Shahezi and Huoshiling Fms source rocks would have reached 1% at a burial depth of 2 600 m. Before the deposition of Quantou Fm, Shahezi and Huoshiling Fms source rocks would have entered the peak of gas generation. Before the deposition of Qingshankou Fm, Yingcheng Fm source rocks would have been in the peak of gas generation, while Shahezi and Huoshiling Fms source rocks would have begun to generate dry gas. At this time, the regional seals of the 2nd member of Dengloulou Fm and the 1st and 2nd members of Quantou Fm would have been formed, leading to the formation of gas pools in Yingcheng-Quantou Fms. By the end of the deposition of Nenjiang Fm, the movement of boundary faults led to the redistribution of gas pools in Yingcheng-Quantou Fms.

Key words: source rock; hydrocarbon generation history; natural gas; deep formations in Songliao basin

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2001BA605A-08-01)

第一作者简介: 金晓辉, 男, 40 岁, 高级工程师(博士), 石油地质专业

收稿日期: 2005-02-12

近年来,随着中浅层油气的逐渐发现和勘探技术的不断提高,油气勘探目标不断向深层扩展^[1~4]。松辽盆地深层包括白垩系泉头组一、二段(K_1q^{1-2})、登娄库组(K_1d)、营城组(K_1yc)、沙河子组(K_1sh),以及侏罗系的火石岭组(J_3h)。

徐家围子断陷深层经历了盆地断陷期(J_3h-K_1yc)和拗陷期(K_1d-K_1q)。前期火山活动频繁,后期挤压、反转构造发育,地层经历了多期热事件和多期剥蚀事件。因此,只有对成烃史作出正确精细刻画,才能更加有效的指导深层油气勘探和评价工作。

1 深层烃源岩

徐家围子断陷是盆地内深层油气的主要勘探领域。目前已经发现汪家屯、昌德等气田(图1),天然气三级探明储量为 $583.06 \times 10^8 m^3$ 。其中,徐深1井探明天然气储量为 $300 \times 10^8 m^3$,是徐家围子断陷目前单井储量最大的气田。

徐家围子深层有火石岭组、沙河子组、营城组3套烃源岩(岩性以暗色泥岩为主、有机碳丰度大多数大于0.4%),主要分布于徐家围子断陷的徐北和徐南两个凹陷。其中,徐北凹陷烃源岩有机

质丰度明显高于徐南凹陷(表1)。徐北凹陷沙河子组泥质烃源岩分布范围较大;营城组二段泥质烃源岩集中分布在徐深1井以东很小范围内;沙河子组煤层主要分布在升平、宋站及徐深1井周围地区;火石岭组煤层发育局限。已有的钻井,尤其是徐深1井钻遇52 m煤层,证明徐家围子断陷火石岭组、沙河子组具有较厚的煤层,是主要的气源岩之一。

徐家围子断陷深层烃源岩有机质类型以陆源Ⅲ型为主,部分为Ⅱ型。有机质镜煤反射率 R_o 值一般大于1%,徐北凹陷83个样品 R_o 值为0.81%~3.56%,平均值为2.00%;徐南凹陷6个样品 R_o 值为2.08%~2.39%,平均值为2.22%。深层烃源岩处于成熟至过成熟阶段。徐北凹陷相同层位烃源岩比徐南凹陷埋藏深,有机质成熟度高。不同地区有机质生源构成相似,但由于沉积成岩环境不同,主力烃源岩具有双重母质类型。饱和烃色谱既有双峰型也有单峰型, C_{27-29} 甾烷系列以“V”字型为主,并有倒“L”型和“L”型,萜类化合物中伽马蜡烷发育,有机质来源既有深湖相水生生物源输入,也有陆源高等植物输入。

2 火山活动

烃源岩沉积后的火山活动与生烃作用有密切关系^[5]。松辽盆地在断陷期具有频繁的火山活动,根据火山岩体的空间分布情况,结合岩心及薄片观察,徐家围子断陷火山活动具多次喷发、喷溢旋回的间歇性喷发特征。火山喷发频率高,间隔时间较短,既有强烈的中心式爆发,也有较为宁静的裂隙式溢流喷发。其中,营城期火山活动最为频繁,形成的火山岩规模大、分布面积广,火山活动对烃源岩的影响也最大,其次为火石岭期火山喷发旋回。根据火山岩同位素年代鉴定^[6]和徐深1井层序地层的研究,徐家围子断陷期主要有3次较大规模的火山活动*。

晚侏罗世(约145~164 Ma)伊泽奈崎板块由北北西向欧亚大陆斜向俯冲,引起增厚地壳的重力均衡和热伸展作用,揭开了东北地区被动大陆裂谷系的演化历史。此时,徐家围子地区在拉张作用下,其古老的低角度断裂复活。随着拉张作用的加剧,深大断裂沟通了下地壳与上地幔,发生

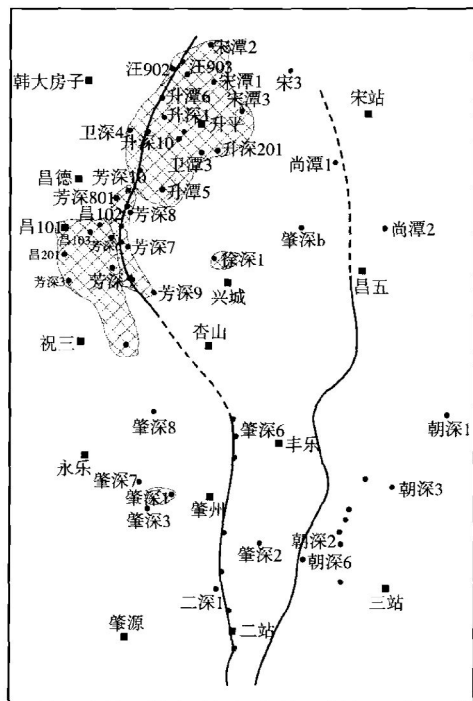


图1 徐家围子气田分布图

Fig.1 Distribution of gas fields in Xujiaweizi fault depression

* 任延广,朱德凤,李景坤,等.徐家围子断陷徐深1井单井评价报告.大庆油田股份公司勘探开发研究院,2001

表1 徐家围子断陷南部和北部有机质丰度比较

Table1 Correlation of organic matter abundances in the southern and northern parts of Xujiaweizi fault depression

层 位		登娄库组一、二段	营城组二段	沙河子组	火石岭组	
徐	有机碳含量/%	最小值	0.118	0.34	0.12	
		最大值	1.698	0.34	2.01	
		平均值	0.342(54)	0.34(1)	0.97(7)	
南	生烃潜量/(mg·g ⁻¹)	最小值		0.05	0.03	
		最大值		0.09	0.18	
		平均值		0.063 3(3)	0.093(6)	
陷	氯仿沥青“A”含量/%	最小值		0.0122		
		最大值		0.261		
		平均值		0.118 1(7)		
徐	有机碳含量/%	最小值	0.07	0.134	0.136	0.68
		最大值	5.507	3.572	84.44	4.3
		平均值	0.473(202)	1.44(26)	14.63(95)	2.74(7)
北	生烃潜量/(mg·g ⁻¹)	最小值	0.022	0.05	0.03	0.02
		最大值	0.05	1.72	103.37	0.45
		平均值	0.037 5(4)	0.310 7(25)	4.082 6(25)	0.318 57(7)
凹	氯仿沥青“A”含量/%	最小值		0.002 2	0.002 7	0.000 2
		最大值		2.870 5	2.832 4	0.070 5
		平均值		0.609 7(28)	0.349 6(50)	0.015 6(11)
陷						

注:除徐南凹陷目前尚未钻遇沙河子组烃源岩,未进行分析外,其余空格表示无检测数据;(25)为样品数

了强烈的火山喷发,在东北地区形成了一套对比性较好的中基性火山岩。徐深1井为爆发相安山角砾岩,同位素测年为145~164 Ma。火山喷发的间隙有滨浅湖相沉积。此时,开始形成火石岭组烃源岩,火山热事件对其影响不大。

白垩纪早期,沙河子组沉积之后,发生强烈挤压作用^{*}。在135Ma时,地壳发生拉张作用,深大断裂活动,引起晚侏罗世以来的第二期火山喷发,盆地进入断拗转换阶段^{*},在东北地区形成了分布广泛的酸性火山岩。徐深1井主要为爆发相流纹质集块岩、熔凝灰岩、角砾岩和晶质凝灰岩,为一次完整的爆发相岩性旋回,火山岩同位素年龄为130~145Ma。此时,沙河子组主力气源岩形成,火山热事件使沙河子组烃源岩处于较高的热力学环境中,同时也加速了火石岭组烃源岩的演化,使其埋深约1300 m的 R_o 值,在约1 Ma时间内迅速达到0.7%。

营城火山喷发期(114.3~130 Ma)形成一套酸性火山岩。随之,约从126Ma开始,伊泽奈崎板块斜向俯冲速度减慢,盆地进入热沉降阶段,进入拗陷期^{*},气候由潮湿转换为干旱炎热。此时,主力气源岩沙河子组以及火石岭组演化成熟,使其埋深约2600 m,距今约120 Ma时, R_o 值已经达到1%。

在3次较大规模的火山喷发喷溢旋回中,营城期火山活动持续时间最长,次一级喷发、喷溢旋回最发育,其喷发旋回多达28~34个(如朝深1井);火石岭期与沙河子期火山喷发旋回相对较少。如火石岭组最多可划分出10个次一级火山喷发(尚深3井)旋回,沙河子组仅可划分出7个次一级火山喷发(尚深1井)旋回。

主力气源岩处于3次热事件的长期作用过程中,尤其是在烃源岩形成后发生的营城期火山活动持续时间最长,使有机质在沉积初期即处于较高的热演化环境中,促进了有机质的成熟。

区内火山岩包裹体均一温度分析也证明了盆地断陷期具有较高的热事件^[6]。徐深1井和芳深9井火山岩包裹体均一温度主要分布在大于160℃的以上的区间,流体是在较高的温度下注入储层空间的(图2)。

3 烃源岩热演化史

松辽盆地二次油气资源评价过程中曾对深层烃源岩热演化史进行过较详细研究^{*},认为盆地古热流的变化趋势为古高今低,在总变化背景上有3次高热流值期,分别为火石岭期—营城末期、泉头期—青山口期和第三纪初期,其大地热流值分别

* 迟元林,冯子辉,蒙启安,等.松辽盆地深层天然气勘探目标评价.大庆油田股份公司勘探开发研究院,1999

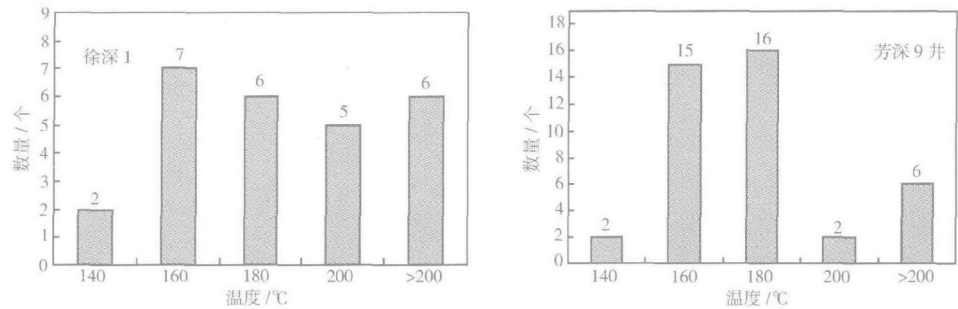


图 2 徐家围子火山岩包裹体均一温度分布图

Fig.2 Distribution of homogenization temperatures of fluid inclusions in volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression

为 83.4,87.5 和 75.9 mW/m²。火石岭组—营城组所经历的 3 次高热流期,第一次出现在盆地初始阶段——裂谷期,第二次产生在盆地发展阶段,第三次发生在盆地萎缩期。但是,伴随着 3 次较大规模的火山喷发喷溢旋回的第一期火石岭组—营城组高热流、高地温梯度期,对松辽盆地深层天然气的形成至关重要,控制着深层烃源岩有机质的热演化及天然气生成和运聚规律。

烃源岩生烃作用的关键因素是温度和时间。目前烃源岩热史恢复常用反演和正演模拟两种方法。反演模拟方法通常有有机质成熟度参数、粘土矿物的转化和有机包裹体均一温度法^[7-9];正演模拟方法主要有 TTI 时温指数方法^[10]和 EasyR_o 化学动力学方法^[11]。本次主要考虑主力烃源岩层位,选择代表性的井应用 Basin-Mod 软件对埋藏史、热史和生烃史进行模拟计算。

通过徐深 1 井、肇深 5 井 R_o 实测值的标定(图 3),火石岭期—营城末期的古地温梯度应在每

百米 5~6℃,深部地层的 R_o 值与实测 R_o 值才能达到较好的拟合。并与任占利^[12]提出“松辽盆地是交替变化高温型热盆地,晚侏罗世—早白垩世的古地温梯度达每百米 5~6℃”的结论相符合。由此认为,松辽盆地北部火山喷发活动对深层烃源岩有机质的热演化起着主要作用,烃源岩的成熟演化与地史过程中的热事件密切相关。

4 烃源岩生气史

徐深 1 井(结合芳深 9 井、肇深 5 井、尚深 3 井)的生烃史模拟表明:

火石岭组气源岩在营城期末开始生气,登娄库期进入生气高峰,泉头期为油裂解气阶段,泉头末期进入干气阶段;

主力气源岩沙河子组在登娄库期至泉头早期进入生气门限,泉头中晚期至青山口期达到生气高峰,姚家期至嫩江期为油裂解气阶段,四方台期进入干气阶段;

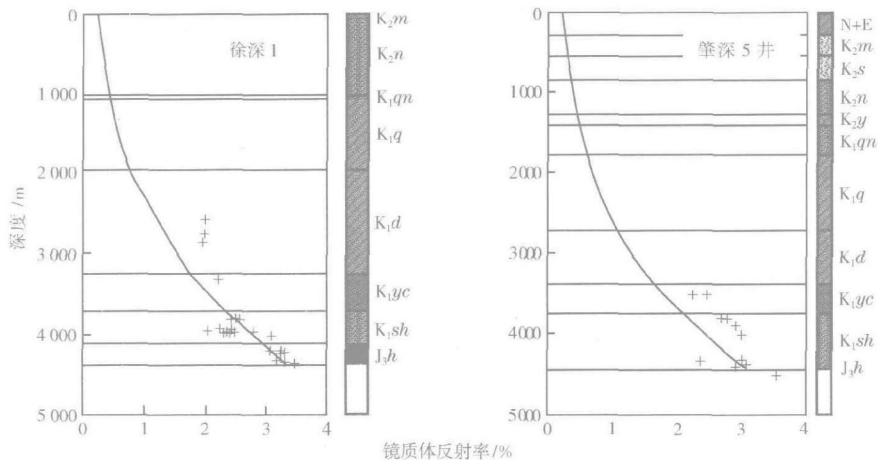


图 3 徐家围子断陷镜质体反射率 R_o 模拟曲线

Fig.3 Simulation curves of the vitrinite reflectance (R_o) in Xujiaweizi fault depression

营城组气源岩在泉头期进入生气门限,青山口期至姚家期进入生气高峰,嫩江期和明水期分别进入油裂解气和干气阶段。

上述分析表明,徐家围子断陷深层烃源岩与火山岩处于同一层系,烃源岩沉积时期即处于较高的地温场中。因此,在登娄库期的快速沉降阶段,烃源岩快速成熟,并进入主生气期,主力烃源岩生气期发生在 100 Ma 以前,亦即早白垩世晚期。

不同有机质类型烃源岩的生气演化阶段互有区别,但无论那一种类型干酪根烃源岩,其生烃门限成熟度 R_o 值约为 0.6%^[13]。对于以Ⅲ型干酪根为优势、生气为主的煤系烃源岩,可以认为烃源岩生气门限 R_o 为 0.6%,生气高峰期的 R_o 值为 0.75%~0.90%^[14]。

镜质体反射率(R_o)演化史模拟表明:徐深 1 井煤岩的主生气阶段 R_o 值为 0.6%~1.3%,生气高峰期 R_o 值为 0.75%~1.00%。在更高的成熟度阶段还有天然气的生成,但相对量要小得多。

煤系泥岩的生气高峰有两个,分别对应于热解气、油裂解气和干气, R_o 值分别为 0.5%~1.3%和大于 1.3%;但以第二个生气高峰期生气量为高。这可能与沙河子组泥质烃源岩含有较多的Ⅱ型干酪根生成较多液态烃裂解成气有关。由 R_o 值大于 1.3%相对应的沙河子组主力烃源岩的生气高峰期应在 125~100 Ma。

徐深 1 井的生气史与目前流行的天然气晚期成气成藏的观点^[15,16]不同,具有早期生气的特点(图 4)。

5 成藏模式

松辽盆地北部深层天然气生气较早,结合徐家围子断陷构造发育史和热演化史,可以建立徐家围子断陷深层天然气的成藏模式(图 5)。

沙河子组沉积前,伴随着火山喷发活动,形成火石岭组煤系烃源岩。

营城组一段沉积前,沙河子组暗色泥岩和煤系地层形成的大型生油凹陷已初具规模。在 135 Ma 时,徐家围子断陷发生第二次火山喷发,使沙河子组烃源岩处于较高的热力学环境中,加速了火石岭组烃源岩的成熟。

营城组四段沉积前,火石岭组烃源岩进入生气门限。这时断陷火山岩储层和基岩风化壳储层形成。

登娄库组沉积前,营城组末期火山喷发活动产生较高的地温场,盆地进入拗陷期热沉降阶段,气候由潮湿转换为干旱炎热。此时,沙河子组以及火石岭组主力气源岩进入成熟期,开始生气。基岩风化壳地层的不整合圈闭业已形成,但由于缺乏盖层,烃源岩生成的低成熟度天然气散失。

泉头组沉积前,盆地进入拗陷期快速下沉阶段,烃源岩热演化史开始主要受埋藏作用控制。沙河子组以及火石岭组主力气源岩已处于生气高峰后期,营城组烃源岩开始进入生气高峰,此时,登娄库组二段暗色泥岩盖层尚未完全压实,封闭天然气能力较差。

青山口组沉积前,营城组烃源岩处于生气高

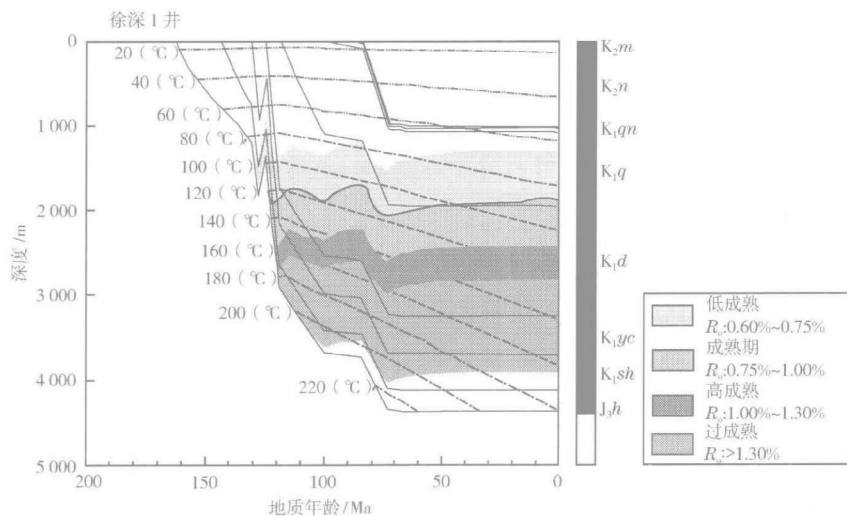


图 4 徐深 1 井烃源岩生气演化史图

Fig. 4 Evolution history of gas generation from source rocks in Xushen 1 well

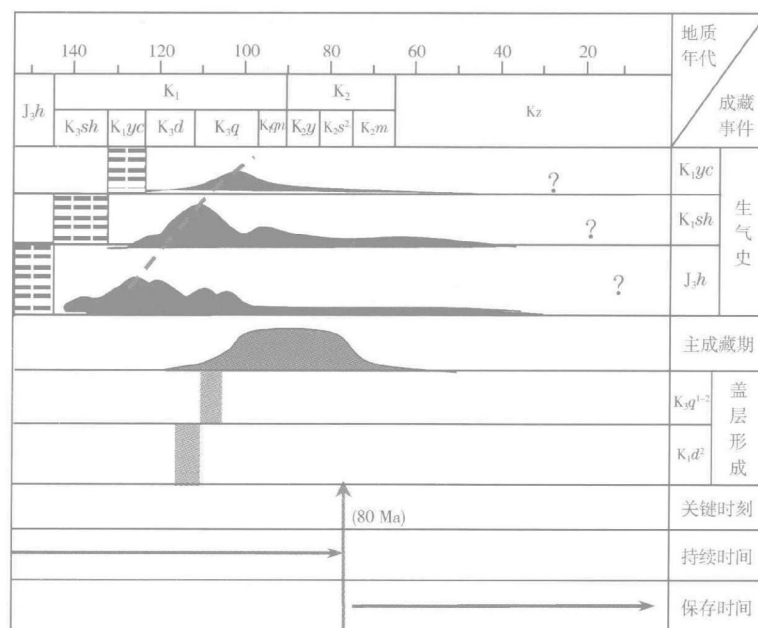


图5 徐家围子断陷成藏演化模式图

Fig. 5 Mode chart of reservoiring evolution in Xujiawazi fault depression

峰,沙河子组以及火石岭组开始生成干气。由于登娄库组二段和泉头组一、二段区域盖层业已形成,徐家围子断陷开始形成营城组—泉头组天然气藏。青山口组沉积前为徐家围子断陷主要气藏的成藏时期。

嫩江期末,由于边界断层的活动,其产生的裂缝引起营城组—泉头组天然气藏进行再分配,在断陷边部形成登娄库组、泉头组高成熟、过成熟度的干气气藏。

嫩江组沉积以后徐家围子断陷构造运动微弱,有利于天然气的保存。

天然气成藏演化史表明松辽盆地北部深层天然气是不同层位气源岩在不同成熟阶段所生成的混源天然气。混源成因天然气是中国天然气气藏的普遍现象^[17]。因此,芳深7井、徐深1井和肇深5井的天然气组分具有以甲烷为主、含有N₂和CO₂,干燥系数大于0.95,天然气组分碳同位素重等地球化学特征。

感谢王飞宇教授在生气史模拟计算方面给予的帮助,感谢王庭斌教授在论文写作过程中给予的帮助和指导。

参 考 文 献

1 康竹林.中国深层天然气勘探前景[J].天然气工业,2000,20

(6):1~5

Kang Zhulin. The exploration prospect of deep gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2000,20(6):1~5

2 戴金星,夏新宇,卫延召.中国天然气资源及前景分析——兼论“西气东输”的储量保证[J].石油与天然气地质,2001,22(1):1~3

Dai Jinxing, Xia Xinyu, Wei Yanzhao. Reestimation of natural gas resources and reserves in China: with concerning to reserves for West-East gas pipeline project[J]. Oil & Gas Geology, 2001,22(1):1~3

3 王庭斌.中国天然气地质理论进展与勘探战略[J].石油与天然气地质,2002,23(1):1~7

Wang Tingbin. Theory progress of natural gas geology and strategy of gas exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2002,23(1):1~7

4 马硕鹏,张福东,孔志平.我国陆上天然气资源特征[J].石油与天然气地质,1996,17(3):232~236

Ma Shupeng, Zhang Fudong, Kong Zhiping. Characteristics of land gas resources in China[J]. Oil & Gas Geology, 1996,17(3):232~236

5 郭占谦,杨兴科.中国含油气盆地的多种生烃机制[J].石油与天然气地质,2000,21(1):50~64

Guo Zhanqian, Yang Xingke. Multi-mechanism of hydrocarbon generation of China's petroliferous basins[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(1):50~64

6 王璞俊,杜小弟,王俊,等.松辽盆地白垩纪年代地层研究及地层时代划分[J].地质学报,1995,69(4):372~381

Wang Pujun, Du Xiaodi, Wang Jun, et al. The chronostratigraphy and stratigraphic classification of the Cretaceous of the Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 69(4):372~381

7 周中毅,潘长春.沉积盆地古地温测定方法及应用[M].广州:

- 广州科技出版社,1992
- Zhou Zhongyi, Pan Changchun. Determination methods of paleogeotemperature in sedimentary basins and their applications [M]. Guangzhou: Guangzhou Science & Technology Press, 1992
- 8 Roedder E. Fluid inclusion [J]. Reviews in Mineralogy, 1984, 12 (11-45): 251-290
 - 9 刘德汉. 包裹体研究——盆地流体追踪的有利工具 [J]. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 149-154
Liu Dehan. Fluid inclusion studies — an effective means for basin fluid investigation [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 12(3-4): 149-154
 - 10 Waples D W. Time and temperature in petroleum formation: application of Lopatin's method to petroleum exploration [J]. AAPG Bull, 1980, 64(6): 916-926
 - 11 Sweeny J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bull, 1990, 74(10): 1559-1570
 - 12 任占利. 中国北方沉积盆地热演化史的对比 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 33-37
Ren Zhanli. Comparison of thermal evolution history in sedimentary basins, North China [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(1): 33-37
 - 13 Hunt J M. Petroleum geochemistry and geology [M]. New York: Freeman, 1995
 - 14 Law B E. Thermal maturity patterns of Cretaceous and Tertiary rocks, San Juan basin, Colorado and New Mexico [J]. The Geological Society of America Bull, 1992, 104(2): 192-207
 - 15 王庭斌. 中国气田的成藏特征分析 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 103-110
Wang Tingbin. Reservoir characteristics analysis of gasfields in China [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 103-110
 - 16 陈践发, 徐永昌, 黄第藩. 塔里木盆地东部地区天然气地球化学特征及成因探讨(之一) [J]. 沉积学报, 2002, 18(4): 606-610
Chen Jianfa, Xu Yongchang, Huang Difan. Geochemical characteristics and origin of natural gas in east Tarim Basin (I) [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 18(4): 606-610
 - 17 戴金星. 威远气田成藏期及气源 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 473-480
Dai Jinxing. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan gasfield [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(5): 473-480

(编辑: 李树森)

(上接第348页)

- 9 Luo Xiaorong, Vasseur G. Geopressuring mechanism of organic matter cracking: numerical modeling [J]. AAPG Bull, 1996, 80(6): 856-874
- 10 Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence [M]. New York: Springer-Verlag, 1978. 260-297
- 11 徐国盛, 曾凡刚. 致密碎屑岩储层天然气成藏的古压控制作用 [J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 243-250
Xu Guosheng, Zeng Fangang. Control of paleopressure over natural gas formation in tight clastic reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(3): 243-250
- 12 李剑, 蒋助生, 罗霞, 等. 高成熟碳酸盐岩气源岩定量评价标准的探讨 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 354-356
Li Jian, Jiang Zhusheng, Luo Xia, et al. Discussion on quantitative evaluation criterion for high-matured carbonate gas source rocks [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(4): 354-356

(编辑: 李树森)