

武清凹陷石炭—二叠系烃源岩的二次生烃评价

朱炎铭, 秦勇, 范炳恒, 桑树勋, 杨永国, 姜波

中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221008

摘要: 武清凹陷石炭—二叠系烃源岩自形成以来经历了复杂的构造—埋藏历史, 并发生过多次生烃演化过程。基于详细的构造—埋藏史研究, 结合磷灰石裂变径迹测试及矿物包裹体分析, 运用 EASY% R_o 数值模拟技术, 深入研究了武清凹陷石炭—二叠系烃源岩的生烃演化历史, 阐明了石炭—二叠系生烃作用发生的构造期次、生烃强度, 揭示了武清凹陷石炭—二叠系烃源岩曾发生过 2 次重要的生烃作用过程, 分别发生在燕山期与喜山晚期, 得出了二次生烃作用主要发生在喜山晚期的主要结论。此外, 还结合有机质热解模拟量版, 定量评价了石炭—二叠系各期生烃强度, 并提出了武清凹陷是华北石炭—二叠系油气勘探的最有利地区之一。

关键词: 石炭—二叠系烃源岩; 构造—埋藏史; 二次生烃作用; 数值模拟。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2004)01-0077-08

收稿日期: 2003-04-01

Evaluation of the Second Hydrocarbon-Generation of the Permo-Carboniferous Source Rocks in Wuqing Depression

ZHU Yan-ming, QIN Yong, FAN Bing-heng, SANG Shu-xun, YANG Yong-guo, JIANG bo

College of Resource and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

Abstract: After the Permo-Carboniferous source rocks formed, they have gone through complicated tectonic-burial history in Wuqing depression, and multiple hydrocarbon-generation evolution have taken place. After detailed research on tectonic-burial history, combined with the fission tracks testing and fluid inclusion analyses, using the EASY% R_o numerical simulation, the paper reveals the evolution process, the tectonic episodes and the strength of hydrocarbon-generation of Permo-Carboniferous source rocks. It comes to a conclusion that two hydrocarbon-generation processes have taken place since the Permo-Carboniferous formation, and draws an important conclusion that more hydrocarbon-generation of the Permo-Carboniferous source rocks took place in late Cenozoic. Combined with the measuring map of hydrocarbon regenerated amount & maturation of organic matter, we quantitatively evaluated the hydrocarbon-generation strength of Permo-Carboniferous source rocks in different episodes. Finally the paper brings forward that Wuqing depression is an advantageous zone for the exploration of Permo-Carboniferous oil & gas in North China.

Key words: Permo-Carboniferous source rock; tectonic-burial history; the second hydrocarbon-generation; numerical simulation.

0 引言

对渤海湾盆地多年的勘探揭示深层石炭—二叠系含煤地层的油气显示非常活跃, 分布范围广。早在“六五”期间就发现并确认了苏桥、文安 2 个煤成油气田。近年来, 随着深层油气勘探的进展, 特别是黄

骅坳陷内孔古 4 井、乌深 1 井等与煤系有关的油气藏的发现, 显示了石炭—二叠系良好的勘探前景和潜力, 引起对渤海湾盆地的深层石炭—二叠系的石油地质条件的极大关注。

1 地质概况

武清凹陷是渤海湾盆地冀中坳陷东北部的一个边缘凹陷. 其北以南倾的宝坻断裂与燕山褶皱带相接, 西以东倾的河西务主断层与廊固凹陷毗邻, 东至王草庄、潘庄凹陷, 南以斜坡过渡到大城凸起, 西南呈鞍状与霸县凹陷相连(图1). 作为一个不对称(北断南超、西断东超)的箕状凹陷, 武清凹陷是冀中坳陷的一个次级负向构造单元.

地震和钻探揭示, 武清凹陷内的石炭—二叠系地层保存较为完整, 其厚度介于 500 ~ 900 m 之间. 暗色泥岩厚度大于 240 m, 平均 TOC 大于 3%, 累计煤层厚度在 25 m 以上, 有机质成熟度适中, $R_o = 0.7\% \sim 1.6\%$.

2 有机质二次生烃定量模拟实验

烃源岩经初次埋藏进入生烃门限(0.5% R_o), 开始生烃演化过程, 称之为一次生烃作用(或初次生烃作用). 在烃源岩生烃作用尚未达到终结之前发生地壳抬升、地温降低、生烃过程中断, 以后又再次埋藏, 地温升高时, 烃源岩在温度、压力、时间的作用下, 再次经历生烃演化过程, 而将一次生烃后烃源岩经历的各次生烃过程统称为“二次生烃”.

有机质的二次生烃并不沿一次生烃的连续轨迹演化, 存在明显的迟滞现象, 这一总体特征已为前人工作所发现(邬立言等, 1986; 刘洛夫等, 1995; 冉启贵, 1995; 程克明等, 1996; 钟宁宁等, 1997; 邹艳荣, 1998; 汤达祯等, 2000; 熊永强等, 2001). 本次研究采用自然演化系列的腐殖煤, 从中精选纯净的亮煤(其镜质组含量达 95%, 灰分产率小于 5%), 以降低煤岩类型或显微组分非均质性的干扰, 将原样缩分后作热解模拟实验, 用于模拟 III 型干酪根的生烃演化特征. 由于采用自然成熟度系列样品与预热残渣样品相结合的方式, 因此模拟的起始条件更接近于自然条件, 这与前人单纯的预热残渣方式有所不同. 在进一步揭示有机质某些具体演化特征的基础上, 较全面地揭示和描述了沉积有机质二次生烃迟滞性显现特征(秦勇等, 2000).

(1) 二次生烃峰位成熟度与起始成熟度之差, 随起始成熟度的增高呈抛物线式演化. 当二次生烃起始成熟度小于一次连续生烃峰位成熟度(1.0% R_o 附近)时, 随起始成熟度增高, 二次生烃峰位成熟度与起始成熟度差值(ΔR_1)随之而增大, 二次生烃

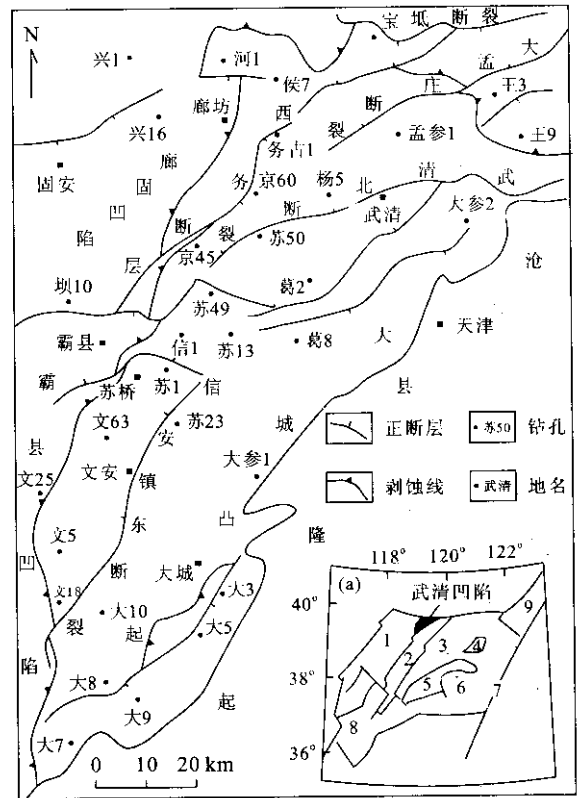


图1 武清凹陷构造简图

Fig. 1 Tectonic sketch map of Wuqing depression

a. 渤海湾盆地略图 1. 冀中坳陷 2. 沧县隆起 3. 黄骅凹陷 4. 渤中隆起 5. 埕宁隆起 6. 济阳凹陷 7. 庐郊断裂 8. 东濮—临清拗陷 9. 辽河拗陷

迟滞性显著增强, 迟滞程度最高者可达 0.55% ΔR_1 左右. 在二次生烃起始成熟度大于一次连续生烃峰位成熟度的前提下, ΔR_1 的变化规律与此相反. 这一规律为估算二次生烃高峰发生的时空位置提供了关键性依据. (2) 随着起始成熟度的增高, 二次生烃的绝对迟滞性和相对迟滞性均呈阶段性演化. 在起始成熟度小于 0.5% R_o 的阶段, 迟滞性随起始成熟度增高而变大; 在起始成熟度在 0.5% ~ 1.0% R_o 之间, 迟滞性逐渐变小; 当起始成熟度大于 1.0% R_o 时, 迟滞性重新增大, 在起始成熟度超过 1.5% 以后, 迟滞性又变小. 综合运用这 2 个参数的演化趋势, 结合烃源岩二次生烃的初始成熟度和成熟梯度, 可对二次生烃迟滞深度进行预测. (3) 二次生烃总量与起始成熟度有关. 当起始成熟度位于生烃高峰时(0.9% R_o) 其二次生烃总量达最大值. 为使热解模拟的结果能用于实践, 依据二次生烃迟滞性显现特征, 拟合出二

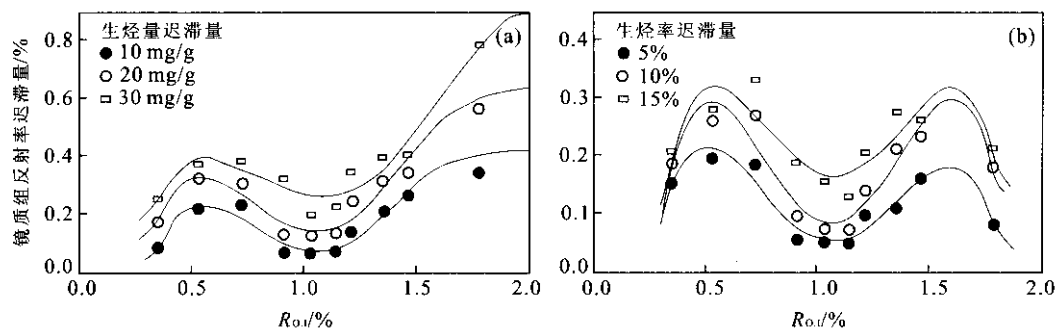


图 2 系列样品热解二次生烃迟滞性定量评价参数演化

Fig. 2 Evolution of parameters for quantitative evaluation of hydrocarbon lagging of coal sample series
a. 绝对迟滞性 b. 相对迟滞性

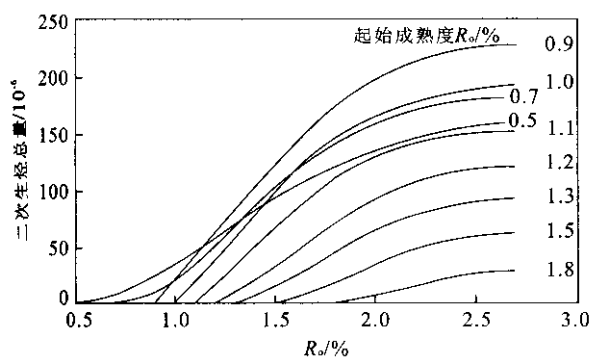


图 3 Ⅲ型干酪根有机质二次生烃总量/有机质成熟度量版
Fig. 3 Measuring map of hydrocarbon regenerated amount & maturation of the third type kerogen in organic matter

次生烃迟滞性量版(图 2)。根据各自然演化样品的成熟度与热解生烃量,模拟编制了腐殖型有机质(Ⅲ型干酪根)二次生烃量版图(图 3)。

3 武清凹陷石炭—二叠系埋藏史

武清凹陷的石炭—二叠系自形成以后,经历了复杂的构造演化历史,现今的构造格局是不同期次、不同类型、不同方向构造叠合而成的。深入的构造—沉积史分析揭示了武清凹陷石炭—二叠系烃源岩自埋藏以来大致经历了印支期、燕山期和喜马拉雅期 3 个埋藏—隆升旋回的交替演化(图 4)。

中石炭世后,华北克拉通盆地开始稳定沉降,上石炭统沉积厚度一般在 100 m 左右,二叠系沉积厚度多小于 1 000 m,三叠系原始厚度研究揭示其沉积约 2 000 m(朱炎铭等, 2001),石炭—二叠系经历初次埋深,在印支期,石炭系最大埋深约 3 000 m,二叠系约 2 000 m,在印支期末—燕山期初,地壳整体回

返,上古生界埋藏深度变浅。

燕山初期构造分异的加剧,不仅导致古生界—三叠系被剥蚀的厚度不一,而且使得燕山中—晚期沉积厚度空间分布存在高度的不均一性,结果造成古生界在该期再次埋藏的深度在区域分布发生显著分异。EASY%*R_o*反演揭示,在燕山期武清凹陷的石炭系埋深 < 2 500 m,二叠系埋深 < 1 500 m(秦勇等, 2001),到燕山期末—喜山期初,研究区地壳再度抬升,导致石炭—二叠系埋藏深度再次变浅。

在喜马拉雅期,由于裂谷作用和期后的热沉降作用,研究区基底大幅度沉降,石炭—二叠系埋藏深度再次显著增大,其埋深超过了以往各次,石炭系的最大埋深已超过 6 000 m,但多数在 5 000 m 以内,二叠系也超过 4 000 m。

4 武清凹陷石炭—二叠系受热史

有机质成熟作用特征直接控制着烃源岩的生烃演化,前期成熟度水平显著地影响到后续阶段二次生烃所可能达到的幅度和水平,而有机质成熟演化与古地热条件密切相关。武清凹陷的石炭—二叠系

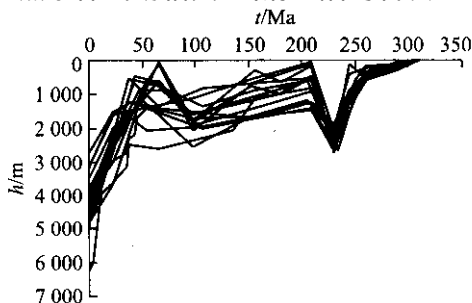


图 4 武清凹陷石炭—二叠系埋藏史

Fig. 4 Burial history of Permo-Carboniferous in Wuqing depression

自埋藏以来,在沉积-构造的控制下,经历了不同的地温演化阶段,烃源岩遭受了复杂的受热过程。

在详细的沉积-构造历史分析基础上,通过大量裂变径迹分析、矿物包裹体研究及有机质镜质组反射率的反演揭示(TTI法和EASY% R_0 法),渤海湾盆地的古生界在不同地区其受古地热场演化存在明显差异,大致可以将其划分为3个大的演化阶段结果,自上古生代以来古地热场经历了加里东期-印支期正常地热场,当时包括冀中拗陷在内的整个华北盆地属于大型克拉通盆地,古地热场正常,地温梯度约 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (王兆云等,1999.中国石油天然气总公司“九五”科技工程项目成果报告)。

燕山期,中国东部处于活动大陆边缘构造环境,与俯冲有关的陆内岩浆活动广泛发育,导致渤海湾地区的古地热梯度明显升高,武清凹陷古地热梯度可达 $4.4\sim 4.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,属异常高热地热场,喜马拉雅期,基本为正常地热场,其实测地温梯度约 $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。因此,武清凹陷的地热场主要经历了上述3个发展阶段,从印支期至燕山早期逐渐变热,在燕山中期达到了盆地变热的鼎盛阶段,从燕山晚期至喜山期逐渐变冷(朱炎铭等,2001;秦勇等,2001)(图5)。

武清凹陷 Su401 井二叠系的砂岩样磷灰石裂变径迹分析揭示,其表观年龄为 165 Ma(相当于燕山中期),其裂变径迹众数达 70%,指示主热事件所在,且径迹长度分布窄,预示着受热时间相对较短。该组径迹长度为 $10.1\text{ }\mu\text{m}$,退火率为 47.5%,受热温度约 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$,当时的古埋深约为 1800 m,推测其古地温梯度约为 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。Ge2 井的侏罗系样品裂变径迹表观年龄为 106 Ma,推测当时古地温梯度约为 $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (表 1)。矿物有机包裹体分析也揭示了印支期、燕山期和喜马拉雅期的 3 期不同地热场特征(表 2)。

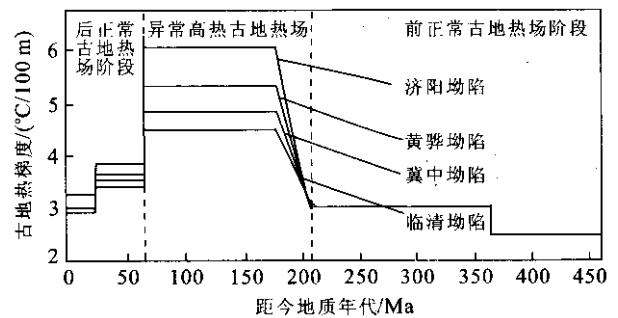


图 5 渤海湾盆地古地热场演化模式

Fig. 5 Evolution patterns of paleogeothermics field in Bohai Gulf basin

表 1 武清拗陷代表井的磷灰石裂变径迹表观年龄和平均径迹长度

Table 1 Ages and average lengths of fission tracks in several wells in Wuqing depression

钻孔	层位	井深/m	颗粒数	^{238}U 裂变径迹		^{235}U 裂变径迹		γ_{si}	$(t \pm \sigma)/\text{Ma}$	$L/\mu\text{m}$	N
				$\rho_s/(10^5\text{ cm}^{-2})$	N_s	$\rho_i/(10^5\text{ cm}^{-2})$	N_i				
Su401	P	4 100	15	8.58	818	10.79	1 289	0.81	164.9 ± 16.2	10.1 ± 1.9	110
Ge2	J	1 793	12	3.17	586	6.31	1 167	0.99	106.0 ± 22.0	10.5 ± 1.7	88
Ge2*	J		8	0.32	17	10.66	568	-	21.7 ± 11.5	-	-

*. 由于样品年龄太小,测试难度大,未获得径迹长度资料。 t : 表观年龄; γ_{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; ρ_s : 矿物中 ^{238}U 自发裂变径迹密度; N_s : ^{238}U 自发裂交所测径迹数; ρ_i : 云母外探测器记录的矿物中 ^{235}U 诱发裂变径迹密度; N_i : ^{235}U 诱发裂交所测径迹数; σ : 年龄误差。

表 2 武清拗陷脉体矿物流体包裹体研究成果及其所反映的古地热史

Table 2 Researched results and paleogeothermics history of fluid inclusion in calcite arterite in Wuqing depression

井位	现埋深/m	层位	矿物	第一期(印支期)			第二期(燕山期)			第三期(喜马拉雅晚期)		
				均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	古埋深/m	dt/dH	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	古埋深/m	dt/dH	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	古埋深/m	dt/dH
Ren813	3 474	0	方解石	105~112(108)	2 820	3.30	152~237(173)	3 310	4.8			
Su1-5	4 221	0	方解石	99~117(108)	3 150	2.95	132~145(142)	2 850	4.46			
Su1-4	4 100	0	方解石	92~113(103)	2 900	3.00	107~113(110)	2 200	4.4	127~145.6(138)	4 100	3.0
Su11	4 800	0	方解石	106(106)	2 800	3.25	76~104(89)	1 600	4.5	145(145)	4 800	2.7

dt/dH : 地温梯度, $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 106(106): 均一温度(平均值)。

5 武清凹陷的石炭—二叠系二次生烃

5.1 二次生烃演化

综合分析武清凹陷及邻区石炭—二叠系的构造—埋藏史、构造—热史,采用 EASY% R_o 数值模拟技术对武清凹陷 40 余口井的石炭—二叠系有机质的成熟度演化进行了反演,揭示了古生界的最高受热温度从加里东期到喜山期的“脉动式”递增导致有机质成熟度呈阶梯式增大(图 6, 7)。在此过程中主要发生了 3 期生烃演化, 2 次二次生烃作用(表 3, 4)。整体而言,有机质成熟度在印支期末刚进入生油门限($R_o > 0.5\%$),燕山期局部达到生烃高峰($0.6\% < R_o < 1.1\%$),到喜马拉雅晚期普遍达到生烃高峰(多数在 $0.8\% < R_o < 1.6\%$)。

印支期,石炭—二叠系经历初次埋藏,华北地台内构造活动微弱,以整体升降为主,研究揭示古地温正常(约 $3.0 \sim 3.3 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$),古生界烃源岩普遍经历一次生烃演化,其生烃作用的强弱主要受控于中、下三叠统沉积,研究揭示武清凹陷区中、下三叠统厚度变化在 $1200 \sim 2000 \text{ m}$ (朱炎铭等 2001)。单井研究揭示当时石炭系埋深一般不超过 2500 m ,二叠系埋深一般小于 1500 m ,有机质的最高受热温度约 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,反演得其终止成熟度普遍小于 $0.4\% \sim$

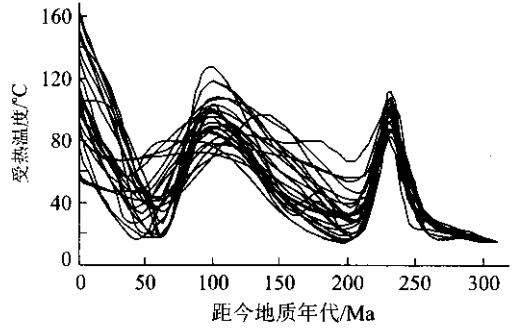


图 6 武清凹陷太原组受热史曲线

Fig. 6 Heated histories of Taiyuan Formation in Wuqing depression

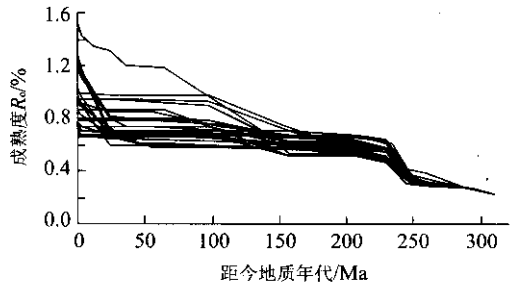


图 7 武清凹陷太原组有机质成熟度演化曲线

Fig. 7 Evolutional curves of maturity of Taiyuan Formation in Wuqing depression

0.65%(图 8a)。

表 3 武清凹陷苏 50 井石炭系烃源岩的 EASY% R_o 数值模拟

Table 3 EASY% R_o numerical simulation results of the Carboniferous source rocks in Su-50 well in Wuqing depression

构造演化阶段	加热时间/Ma	温度		加热速率/ ($\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$)	转化率	$R_o/\%$	$\lg(R_o/\%)$	生烃演化阶段
		$t/^\circ\text{C}$	T/K					
印支期	0.00	15.00	288.00	0.00 E+00	0.00 E+00	0.22	-0.665	
	21.30	23.40	296.40	1.25 E-14	7.11 E-02	0.28	-0.551	
	51.30	32.40	305.40	9.49 E-15	1.03 E-01	0.32	-0.500	
	66.30	44.10	317.10	2.47 E-14	1.20 E-01	0.34	-0.473	
	81.30	96.50	369.50	1.11 E-13	2.58 E-01	0.56	-0.251	一次生烃作用
燕山期	103.30	61.70	334.70	-5.01 E-14	2.83 E-01	0.61	-0.211	
	154.30	71.60	344.60	6.14 E-15	2.84 E-01	0.61	-0.210	
	204.30	113.80	386.80	2.67 E-14	3.40 E-01	0.76	-0.120	
	256.30	83.40	356.40	-1.85 E-14	3.52 E-01	0.79	-0.100	二次生烃作用
喜马拉雅早期	265.80	74.40	347.40	-3.00 E-14	3.52 E-01	0.79	-0.100	
	268.30	92.20	365.20	2.25 E-13	3.52 E-01	0.79	-0.100	
	273.30	96.20	369.20	2.53 E-14	3.52 E-01	0.80	-0.099	
喜马拉雅晚期	275.30	110.70	383.70	2.29 E-13	3.53 E-01	0.80	-0.099	
	288.00	118.50	391.50	1.94 E-14	3.62 E-01	0.82	-0.084	
	308.46	151.00	424.00	5.03 E-14	4.55 E-01	1.16	0.065	三次生烃作用
	311.30	157.00	430.00	6.69 E-14	4.73 E-01	1.24	0.094	

太原组底部 $R_o = 1.24\%$ 。研究中把成熟度 R_o 达到 0.5% 作为一次生烃,取地表常温为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $1.25 \text{ E-}14 = 1.25 \times 10^{-14}$, EASY% R_o 为反演沉积有机质热史的新方法(Sweeney and Barnham, 1990)。

万方数据

具现实意义的一期二次生烃演化的序幕(图8c)。

约 49.2×10^8 t, 山西组总量约 90.73×10^8 t 极有利的

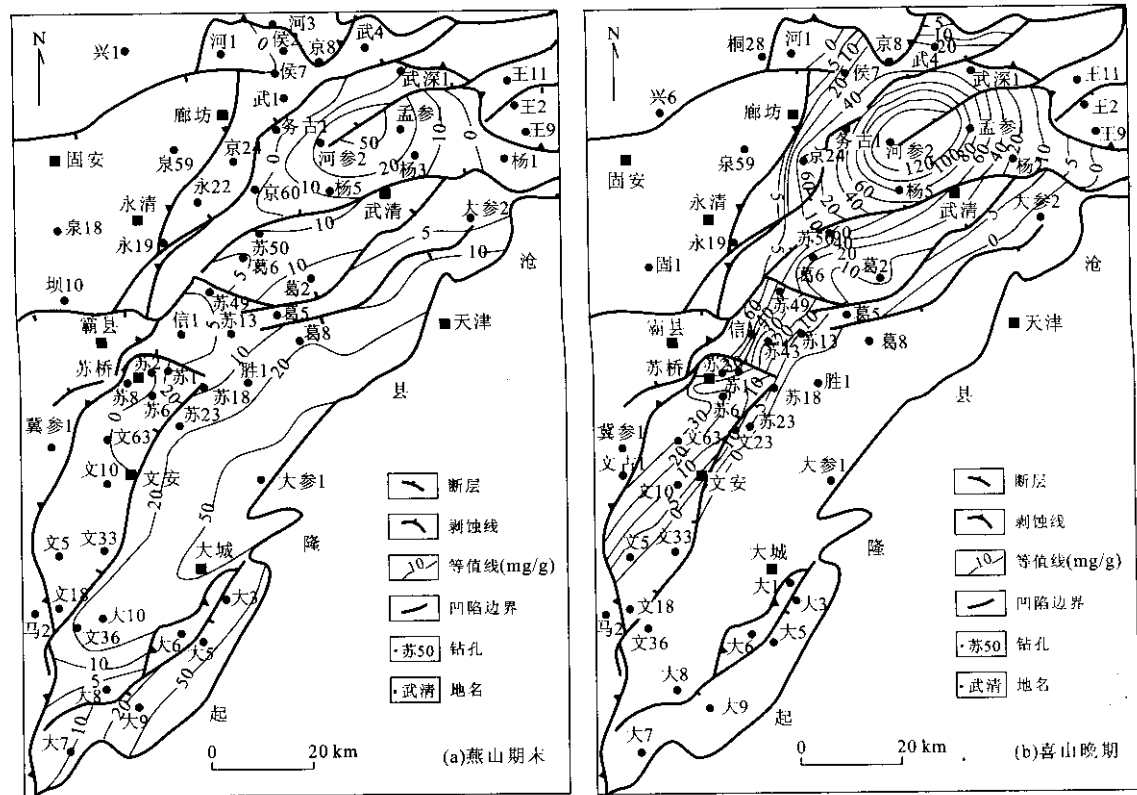


图9 武清凹陷上石炭统太原组二次生烃量分布

Fig. 9 Distribution maps of the second hydrocarbon-generation quantities of the Upper Carboniferous Taiyuan Formation in Wuqing depression

虽然单井评价揭示武清凹陷的石炭—二叠系烃源岩发生二次生烃时间主要集中在新第三纪和第四纪,但老第三纪裂谷控制下的沉积作用是烃源岩能在新第三纪发生二次生烃演化的基础。研究揭示,凡是老第三纪缺乏沉积作用或沉积作用微弱的地区,新第三纪以来古生界的埋深未能或仅导致有机质的微弱演进,没有或几乎未发生二次生烃作用,如大城凸起。

5.2 二次生烃量

为了全面地了解和正确评价武清凹陷中石炭—二叠系烃源岩的二次生烃特征,研究中选择了位于不同区的40口钻井,进行综合研究,结合包裹体测温资料、磷灰石裂变径迹资料,进行EASY%R_o数值模拟分析,依据二次生烃量版(图2-3),计算出不同构造期烃源岩二次生烃率分布(图9),并结合区域石炭—二叠系的有机质丰度,得出二次生烃量。

研究表明武清凹陷喜马拉雅期二次生烃总量约 149.47×10^8 t,其中太原组 58.738×10^8 t,而生烃率 $\geq 40 \times 10^{-4}$ 的极有利区面积达 1424.5 km^2 ,资源量

生烃面积达 1262.5 km^2 ,资源量约 71.90×10^8 t。因此,渤海湾盆地武清凹陷是一个最具潜质的石炭—二叠系油气勘探区,加大对武清凹陷储盖构造的研究,有望取得华北油田对深层石炭—二叠系油气勘探的突破。

6 结语

武清凹陷石炭—二叠系烃源岩经历了复杂的构造—埋藏历史,并发生过多生烃演化,其最后一次生烃作用发生在喜山晚期。燕山期因较高地温异常作用,石炭—二叠系曾发生过二次生烃,并为喜山期的大规模生烃演化提供了成熟度条件,该期规模较大的二次生烃集中在大城凸起区和武清凹陷中部。喜山期的裂谷作用和区域热沉降作用,导致石炭—二叠系烃源岩被深埋,烃源岩受热温度进一步增高,有机质的成熟度大幅度演进,引发新一轮的二次生烃作用,该期生烃作用范围广、强度大,生烃量巨大,特别是武清凹陷中部,由于后期未受到构造扰动,具

有重要的现实意义. 指出了武清凹陷是华北石炭—二叠系油气勘探的最有利地区之一, 进一步加强对武清凹陷的油气勘探, 有望使华北油田在石炭—二叠系等找油气取得新的突破.

References

- Cheng K. M., Wang Z. Y., Zhong N. N., et al., 1996. Theory and its experience of the oil & gas formation of carbonate rock. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Liu L. F., Wang W. H., Li S. Y., 1995. Study on thermal modeling for the hydrocarbon re-generation of kerogen. *Journal of Sedimentology*, 13(Suppl): 147 - 150 (in Chinese with English abstract).
- Qin Y., Zhang Y. S., Zhu Y. M., et al., 2000. Lagging and its kinetic mechanism of hydrocarbon re-generation from organic matters in coals. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* 25(3): 278 - 282 (in Chinese with English abstract).
- Qin Y., Zhu Y. M., Fan B. H., et al., 2001. Theory and its application of hydrocarbon re-generation from sedimentary organic matters. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Ran Q. G., 1995. Research on hydrocarbon re-generation of the Upper Paleozoic coals in North China. *Geosciences of Natural Gas*, 6(31): 13 - 17 (in Chinese with English abstract).
- Sweeney J. J., Barnham A. K., 1990. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bull.* 74: 1559 - 1570.
- Tang D. Z., Wang J. L., Lin S. Y., et al., 2000. An experimental study of program pyrolytic modeling on secondary hydrocarbon generation of coals. *Experimental Petroleum Geology* 22(1): 9 - 15 (in Chinese with English abstract).
- Wu L. Y., Gu X. Z., Sheng Z. W., et al., 1986. Quick and quantitative evaluation for oil-generated rocks. Science Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Xiong Y. Q., Geng A. S., Wang Y. P., et al., 2001. Study on the analogues experiment for the hydrocarbon regeneration kinetics of kerogen. *Science in China (Series D)*, 31(4):

- 315 - 320 (in Chinese with English abstract).
- Zhong N. N., Mu H. Z., Guan J. C., 1997. On conditions of the Permo-Carboniferous coal-bearing series in North China. In: Dai J. X., Fu C. D., Guan D. F., eds., *Advance on study of natural gas geology*. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zou Y. R., 1998. Study on hydrocarbon re-generation of the Late Paleozoic coals in North China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y. M., Qin Y., Fan B. H., et al., 2001. The original depositional thickness of Triassic resumed and significance in Bohai Bay basin. *30(2)*: 195 - 200 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程克明, 王兆云, 钟宁宁, 等, 1996. 碳酸盐岩油气生成理论与实践. 北京: 石油工业出版社.
- 刘洛夫, 王伟华, 李术元, 1995. 干酪根二次生烃热模拟研究. *沉积学报*, 13(增刊): 147 - 150.
- 秦勇, 张有生, 朱炎铭, 等, 2000. 煤中有机质二次生烃迟滞性及其反应动力学机制. *地球科学——中国地质大学学报* 25(3): 278 - 282.
- 秦勇, 朱炎铭, 范炳恒, 等, 2001. 沉积有机质二次生烃理论及其应用. 北京: 地质出版社.
- 冉启贵, 1995. 华北地区上古生界煤岩成烃及二次生烃研究. *天然气地球科学* 6(31): 13 - 17.
- 汤达祯, 王激流, 林善园, 等, 2000. 煤二次生烃作用程序热解模拟试验研究. *石油实验地质* 22(1): 9 - 15.
- 邬立言, 顾信章, 盛志伟, 等, 1986. 生油岩快速定量评价. 北京: 科学出版社.
- 熊永强, 耿安松, 王云鹏, 等, 2001. 干酪根二次生烃动力学模拟实验研究. *中国科学(D 辑)* 31(4): 315 - 320.
- 钟宁宁, 穆惠珍, 关金成, 1997. 论华北地区石炭—二叠纪煤系的二次成烃的条件. 见: 戴金星, 傅诚德, 关德范. *天然气地质研究新进展*. 北京: 石油地质出版社.
- 邹艳荣, 1998. 华北晚古生代煤二次生烃研究. 北京: 中国地质大学.
- 朱炎铭, 秦勇, 范炳恒, 等, 2001. 渤海湾盆地三叠系沉积厚度恢复及其意义. *中国矿业大学学报* 30(2): 195 - 200.