

文章编号: 1001-6112(2010)01-0058-06

渤海湾盆地济阳、临清坳陷 上古生界烃源岩生烃史分析

朱建辉^{1,2,3}, 胡宗全⁴, 吕剑虹³, 王保华³, 周新科⁴

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 成都理工大学 能源学院, 成都 610059; 3. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院

无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151; 4. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:建立在盆地叠加改造分析基础上的 TSM 盆地模拟, 揭示了渤海湾盆地上古生界多套不同类型烃源岩的生烃演化。济阳、临清坳陷上古生界烃源岩在中三叠世末之前大体进入生烃门限, 印支运动造成区域性生烃停滞, 中生代盆地演化差异导致了坳陷内不同凹陷上古生界源岩“二次生烃”过程的差异, 从而也影响了对上古生界生烃潜力的评价。模拟结果表明, 济阳坳陷上古生界源岩经历了燕山期、早喜山期 2 个“二次生烃”过程, 早喜山期生烃量最大, 并且生烃中心随时间呈迁移变化; 东濮凹陷在早喜山期开始“二次生烃”过程, 平均生烃强度较高。

关键词: TSM 盆地模拟; 二次生烃; 生烃强度; 烃源岩; 上古生界; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

HYDROCARBON GENERATION HISTORY OF UPPER PALEOZOIC SOURCE ROCKS OF JIYANG AND LINQING DEPRESSIONS, BOHAI BAY BASIN

Zhu Jianhui^{1,2,3}, Hu Zongquan⁴, Lü Jianhong³, Wang Baohua³, Zhou Xinke⁴

(1. State Key Laboratory of Oil-and-gas Reservoirs Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology,

Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. School of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu,

Sichuan 610059, China; 3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China;

4. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The TSM basin model software based on analysis of basin superposition and reformation has illustrated hydrocarbon evolution of different source rocks of Upper Paleozoic in the Bohai Bay Basin. The Upper Paleozoic source rocks in the Jiyang and Linqing Depressions have reached hydrocarbon threshold before the end of Middle Triassic and are regionally stagnated by the Indosinian movement. Differences of Meso-Cenozoic basin evolution have resulted in differences of ‘secondary hydrocarbon generation’ of the Upper Paleozoic source rocks in different sags, hence influencing evaluation of hydrocarbon generation potential of the Upper Paleozoic source rocks. Studies have indicated that, the Upper Paleozoic source rocks in the Jiyang Depression have experienced 2 processes of ‘secondary hydrocarbon generation’ during Yanshan and early Himalayan epoch, respectively. During the early Himalayan epoch, hydrocarbon generation amount has reached the maximum and the center of hydrocarbon generation migrates at any time. As to the Dongpu Sag, ‘secondary hydrocarbon generation’ starts in the early Himalayan epoch and the average hydrocarbon generation intensity is high.

Key words: TSM basin model; secondary hydrocarbon generation; hydrocarbon generation intensity; source rock; Upper Paleozoic; Bohai Bay Basin

目前,对渤海湾地区前第三系的油气研究和勘探程度相对较低。刘光鼎院士指出渤海地区油气研究尚未见底,发展前景相当诱人^[1]。并且前第三

系油气勘探在局部地区已取得很好效果,发现了东濮凹陷文留、济阳坳陷孤北等大中型油气田,并在多口探井中见古生界源岩的气显示,展示

收稿日期: 2009-05-15; 修订日期: 2009-12-29。

作者简介: 朱建辉(1970—),男,博士生,高级工程师,主要从事含油气盆地分析及模拟研究。E-mail: zhujh@mail.wuxisuo.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技部项目(P03076)。

了良好的勘探前景^[2-4]。但对于这个勘探新领域,勘探难度很高,主要是由于地质历史时间久远,多期构造运动旋回导致源岩演化过程复杂、历史记录多被改造或消失。

本文以渤海湾地区盆地构造演化认识为基础,依据 TSM 盆地模拟资源评价系统,选择适应性模拟模块以及参数,模拟埋藏史、热史和生烃史,对比评价不同地区、不同阶段、不同类型源岩的生烃贡献。

1 TSM 模拟流程和建模要点

TSM 盆地模拟资源评价技术以朱夏院士提出的盆地研究 TSM 系统工作程式为指导思想,是油气勘探中一种快速、动态、定量的综合研究手段,它是以油气盆地地质概念模型为基础,模拟再现地质历史演变过程中油气生成、排出和聚集过程;以定量描述形式表达地质观念、检验地质模式、逼近地质真实,从而达到由已知到预测未知的认识飞跃^[5-6]。在模拟过程中,地质模型建立和参数取舍是模拟研究是否合理的关键,下面首先讨论几个比较重要的方面。

1.1 早、中三叠世原始沉积厚度确定与盆地演化

三叠纪原始沉积厚度的确定直接影响到对古生界源岩“一次”成烃演化程度的认识,该问题一直是众多学者研究的重点^[7-8],也是本次模拟研究中较为关键的参数。早古生代—中三叠世末,济阳拗陷、临清拗陷以及东濮凹陷盆地发育统一于华北地台演化过程,区域上沉降、沉积幅度差异不大。印支运动以后,济阳拗陷广泛缺失三叠系地层,临清拗陷地区接受剥蚀,由南往北剥蚀程度变大,北部

已经剥蚀殆尽,而东濮凹陷仅在北部地区残存最大厚度为 600~700 m 左右的下中三叠统。研究表明,渤海湾地区早、中三叠世形成巨厚沉积,继承海西期台内拗陷盆地原型,沉积厚度横向变化不大,在 2 400~2 600 m 左右^[7]。

印支运动在渤海湾地区表现强烈,其抬升过程不仅将济阳拗陷早—中三叠世近 2 400 m 沉积剥蚀掉,而且还进一步影响着上古生界地层的厚度;侏罗—白垩纪在挤压环境下发生北东向差异沉降,形成盆岭相间结构,燕山末期遭受抬升剥蚀;古近纪北东走向的断陷作用再次形成强烈的差异沉降,埋深横向差异很大。临清拗陷盆地演化过程与济阳拗陷类似,仅印支运动影响较弱。而东濮凹陷演化过程与上述 2 个地区差异明显,主要因为全区普遍缺失侏罗—白垩系地层,三叠系仅在北部地区残留 100~700 m 厚。凹陷内侏罗—白垩系地层曾经有过一定的厚度,是后期被剥蚀,还是印支—燕山期该地区一直处于隆升剥蚀状态?这个问题由于缺少地层证据而无法论证。但上古生界源岩热演化分析表明^[9],即使燕山期曾经沉积了一定厚度,也不影响上古生界源岩早期演化程度。我们设定东濮凹陷从印支期到燕山期末一直处于抬升剥蚀状态,古近纪断陷作用与济阳拗陷相似,埋藏史模拟流程与济阳地区有一定差异(图 1)。

1.2 燕山末期剥蚀量确定

已有学者采用宇宙尘埃特征元素分析法、波动方程法、镜质体反射率(R_o)法、声波时差法以及磷灰石裂变径迹法等手段,计算了燕山末期的地层剥蚀量,同时恢复了济阳拗陷中生代地层的原始沉积

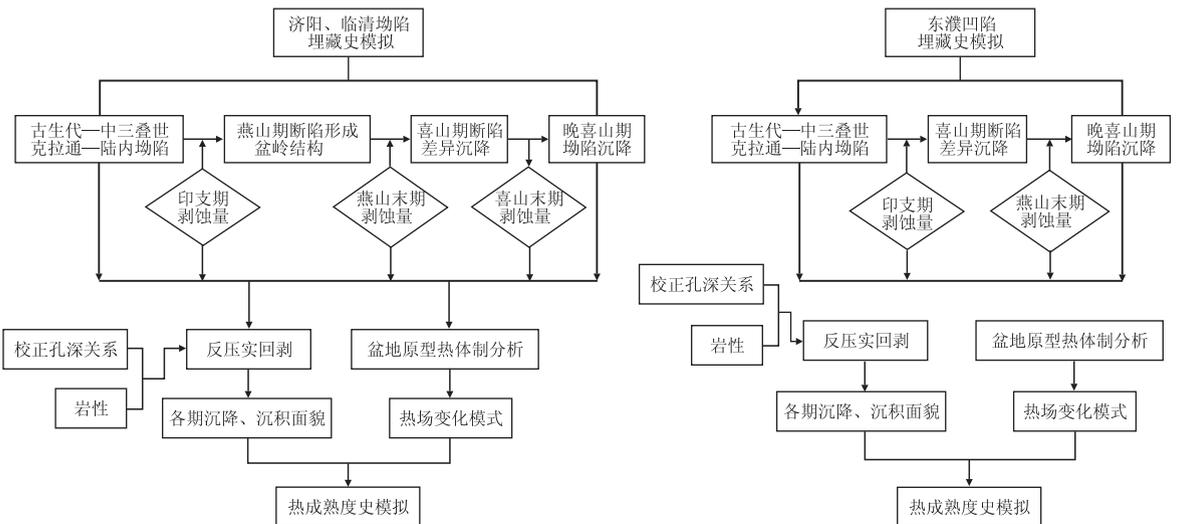


图 1 渤海湾盆地埋藏史模拟流程

Fig. 1 Modelling progress of burial history in Bohai Bay Basin

厚度^[7-8,10]。研究表明,燕山期沉积厚度走向呈北西向,最大沉积厚度在 4 000~4 500 m 左右,燕山末期抬升剥蚀后被古近纪北东向断陷叠加。因而济阳拗陷侏罗—白垩系地层发育较厚的地区往往位于古近纪断陷作用最深部位。而通过剥蚀量计算,燕山末期在侏罗—白垩系较厚之处剥蚀量较小,约 500 m,而在古近纪断陷凸起部位剥蚀量较大,侏罗—白垩系地层几乎被剥蚀殆尽。

根据钻井和地震资料分析,临清拗陷全区中生界广泛分布,包括三叠系残留在内的地震解释视厚 3 000 余 m,最大厚度中心位于德州、冠北以及梁水镇等地。侏罗—白垩系全区厚度变化较大,残留厚度一般在 1 000~2 000 m 之间。采用多种方法进行不整合面剥蚀量计算,中生界顶面剥蚀厚度在 1 000~2 000m^[11]。

2 生烃史模拟主要参数确定

2.1 烃源岩厚度

现今残余厚度的确定为烃源岩厚度分布计算提供了基础,但对于支离破碎、厚度差异较大的济阳拗陷石炭—二叠系而言,单从零星分布数口探井所揭示的源岩(煤和暗色泥岩)厚度来外推源岩展布是困难的。用钻井统计的厚度平均百分含量可能会在不同程度上消除各个地区实际源岩厚度差异,差异的消除带来的是对各个地区生烃量计算的不准确性,使得最终评价进入误区。

晚古生代台内拗陷盆地原型^[5,12-14]形成了横向变化稳定的石炭—二叠纪沉积环境。基于这一点,可以依据揭示石炭—二叠系地层较全的钻井,分析其源岩(煤岩和暗色泥岩)在地层柱中的分布状况,从地层底部开始计算随厚度增长烃源岩累计厚度的变化,建立地层厚度变化量与烃源岩累计厚度量之间的拟合函数。以此函数结合各个不同地区现今石炭—二叠系残余厚度,可以推测残留的源岩厚度(图2)。这种方法基于2个假设:1)区域上

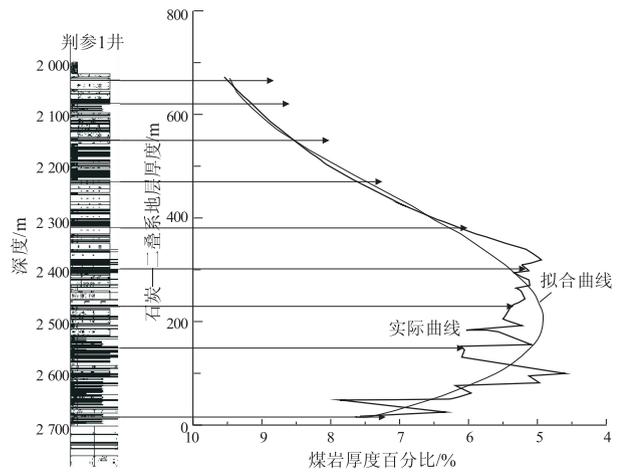


图 2 渤海湾盆地济阳拗陷上古生界煤岩厚度百分比变化
Fig. 2 Percentage map of thickness of Upper Paleozoic coal in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

沉积特征稳定,源岩纵向分布特征相似;2)地层没有发生较大的褶皱倒转。相当于将不同剥蚀程度对地层影响与源岩厚度建立联系,称之为“虚拟剥蚀面源岩厚度恢复法”。

2.2 残余有机碳

2.2.1 煤岩有机碳

济阳拗陷惠民、东营南坡、沾化东部等地区煤岩有机碳含量较高,其他地区普遍在 50%~60% 左右;按钻井揭示的不同层位煤岩平均值(表 1),下部石炭系本溪组、太原组比二叠系山西组的残余有机碳要高。临清拗陷揭示上古生界钻井没有济阳地区的丰富,堂古 5 井山西组煤岩有机碳含量 48.27%~68.13%,平均丰度值为 55.07%;馆深 1 井山西组煤岩有机碳含量 42.44%。东濮地区的煤岩有机碳含量较济阳、临清地区要高,根据统计平均值为 69.8%。综合考虑各个方面的因素,便于模拟计算,本文对研究区内煤岩有机碳含量使用统计平均值。

2.2.2 暗色泥岩有机碳

模拟研究区内暗色泥岩有机碳含量值变化相对

表 1 渤海湾盆地济阳拗陷上古生界不同层位煤岩有机质丰度

Table 1 Statistics of organic matter abundance in different layers of Upper Paleozoic in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

层位	岩性	残余有机碳/ %	氯仿沥青“A”/ 10 ⁻⁶	总烃/ 10 ⁻⁶	(总烃/C)/ %	生烃潜能 (S ₁ +S ₂)/(mg·g ⁻¹)
P _{1x}	煤	55.25				
P _{1s}	煤	$\frac{47.4 \sim 59.1}{53.25}$	12 177	5 771.2	1.275	81.25
C _{3t}	煤	$\frac{53.7 \sim 68.2}{59.88}$	$\frac{5\ 132 \sim 7\ 802}{6\ 400}$			
C _{2b}	煤	59.30	12 938	1		

注:表中分式含义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

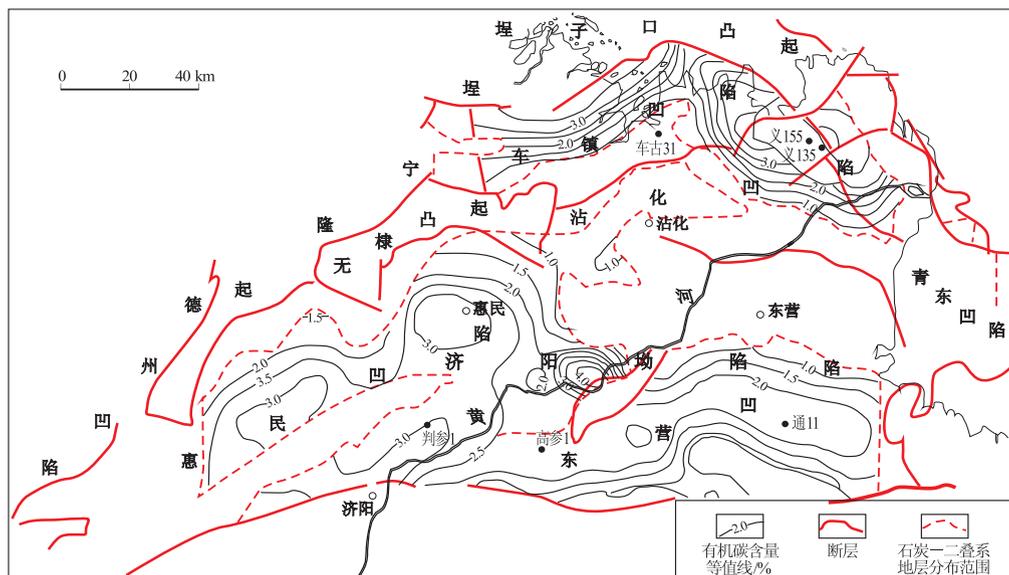


图 3 渤海湾盆地济阳坳陷石炭—二叠系暗色泥岩有机碳含量

Fig. 3 TOC distribution of dark mudstone of Permian-Carboniferous in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

较大。济阳地区分组统计结果表明,太原组 and 山西组暗色泥岩有机碳含量最高,分别为 2.17% 和 2.38%;本溪组和下石盒子组分别为 1.39% 和 1.59%。根据通 11、高参 1、判参 1、义 155、义 135 以及车古 31 等钻井地化测试成果的统计分析表明,以Ⅲ型有机质类型为主的石炭—二叠系暗色泥岩有机碳含量为 0.06%~5.69%,平均为 2.36%;氯仿沥青“A”含量为 0.002 2%~0.439 0%,平均为 0.072 1%。采用图 3 所示的石炭—二叠系暗色泥岩有机碳含量平面分布作为模拟的输入参数。

临清地区钻井揭示较少,因而在平面上进行有机碳含量变化推测有一定难度。现有钻井资料表明,该地区上古生界暗色泥岩有机碳含量要比中生界高,平均值普遍在 1.5% 以上,西部巨 1 井可达 2.32%~2.40%;东部堂邑凸起上平均值为 1.52%~1.81%;往东相对较低,仅为 0.017%。

东濮凹陷上古生界暗色泥岩有机碳含量相对临清坳陷要高,太原组暗色泥岩样品大多超过 1.5%,总体属于中等烃源岩;山西组以 0.75%~1.5% 和 1.5%~3.0% 之间分布较多,属于差—中等烃源岩(图 4);上石盒子组样品有机碳含量均小于 0.75%,下石盒子组也大多低于 0.75%。总的说来,纵向上有机质丰度以太原组最高,山西组和本溪组次之。

3 TSM 生烃史模拟结果分析

盆地数值模拟揭示了济阳坳陷、临清坳陷以及东濮凹陷地区埋藏史、热成熟度史的不同以及上古

生界的生烃演化史,反映了各个地区不同类型烃源岩在不同阶段供烃能力的差异。尤其是对烃源岩生烃能力的定量数值化,能够为各个地区前第三系资源量评价提供基础数据。

3.1 济阳坳陷

中三叠世末之前,上古生界源岩热成熟度在 0.7%~0.8% 范围内变化^[7],源岩演化程度不高,供烃能力没有充分发挥,给后期燕山和喜山期“二次生烃”保留了物质基础。侏罗—白垩纪期间,该套源岩生烃范围受限于侏罗—白垩纪沉降、沉积中心展布,模拟计算表明,主要生烃区域为滋镇、林樊家—金家、邵家西部、东营南坡以及孤北地区等。其中,滋镇、林樊家南部地区生烃强度最高超过 $30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$;相对而言,烃源岩中煤系暗色泥岩该时期总体生烃强度偏低。古近纪期间,生烃强度较高的地区仍然处

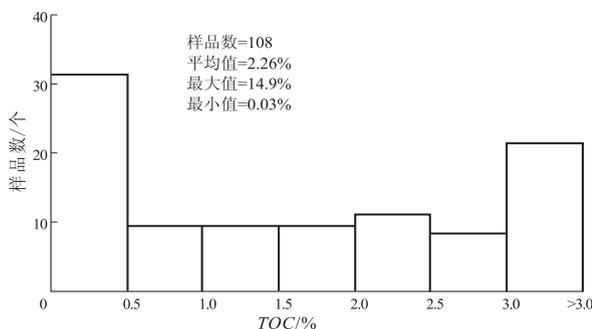


图 4 渤海湾盆地临清坳陷东濮凹陷本溪组—山西组暗色泥岩有机碳含量直方图

Fig. 4 TOC histogram of dark mudstone of Benxi-Shanxi Formation in Dongpu Sag, Linqing Depression, Bohai Bay Basin

于惠民凹陷和东营凹陷。惠民凹陷东部林樊家地区和西部滋镇—临南地区煤岩生烃强度超过 $40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的范围较大,最大超过 $50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$; 东营凹陷南坡生烃强度在 $(20 \sim 30) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 最大超过 $40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$; 暗色泥岩也相应进入大量生烃阶段,但分布面积要较煤岩生烃范围局限。

上古生界生烃强度平面展布特征主要受控于古近纪断陷作用过程以及地层展布情况。一方面,该套源岩由于受印支运动影响,早期被抬升剥蚀的区域在古近纪正好被断陷深埋,致使往古近纪深凹地区残余地层厚度逐渐减薄,相应源岩厚度也减薄;另一方面,断陷作用形成的差异沉降导致靠近深凹部位的源岩普遍演化程度高,向斜坡上演化程度逐渐降低,近深凹部位的源岩已经进入生烃死亡门限,对生烃的贡献已经达到极限。

由于各区块源岩经历过的埋藏过程和热体制阶段存在较大差异,因而不同阶段的生烃贡献能力存在区别。从各阶段对比来看,古近纪比燕山期要高,新近纪以来上古生界源岩已经处于过成熟阶段,供烃能力枯竭。

结合埋藏史、热成熟度史和生烃史模拟结果,上古生界源岩燕山期和喜山期生烃中心存在迁移现象,形成了不同地区在燕山期和喜山期不同阶段的供烃能力。主要规律为:燕山期经历过深埋的上古生界源岩在喜山期生烃能力减弱,燕山期末演化程度相对较低地区上古生界源岩是喜山期主要供烃源岩。生烃中心迁移变化受控于燕山期沉积、沉降中心向喜山期沉积、沉降中心迁移变化的过程。

3.2 临清拗陷

临清拗陷上古生界源岩在燕山期进入大量生烃阶段,高值区主要分布在东部莘县凹陷和西部丘县凹陷,其次是冠县凹陷南部、堂邑凸起南部以及馆陶凸起北部和南部地区。上古生界源岩生烃强度在 $(16 \sim 23) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 左右,最高接近 $40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$; 堂邑凸起北部与馆陶凸起西部地区相对偏低。古近纪期间,虽然上古生界源岩还进一步加大演化,但生烃能力已经大大减弱。上古生界煤岩除冠县凹陷和丘县凹陷生烃强度较高,为 $(15 \sim 20) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以外,其余地区均在 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以下。

总的说来,临清拗陷前第三系累计生烃量在 $28 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 左右,比济阳拗陷总生烃量小得多,对生烃贡献最大的是上古生界煤岩。临清拗陷盆地演化过程与济阳拗陷存在较大差异,从埋藏史模拟结果来看,燕山期临清拗陷沉降、沉积幅度最大。生烃史模

拟也揭示了燕山期是拗陷的主要供烃时期。

3.3 东濮凹陷

古近纪期间是东濮凹陷主要生烃期。上古生界在古近纪期间生烃强度较高地区可达 $(40 \sim 45) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 左右,主要分布在凹陷中部地区,包括前梨园次洼、海通集次洼以及北部中央隆起带的文留地区;生烃强度次之是位于东部洼陷南部的三春集次洼、西部洼陷的南部地区以及北部濮城—文留地区,在 $(20 \sim 30) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 范围变化;其余地区均在 $(5 \sim 10) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 左右;西部斜坡带生烃强度不大,但生烃范围较大,说明在古近纪期间,西部斜坡上古生界煤岩已经形成了一定的生烃能力,只是丰度太低而已。新近纪以来,凹陷范围内上古生界源岩基本上没有供烃能力,仅在濮城以西有一定生烃范围,范围较小,局部生烃强度最高可达 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 左右。

模拟结果表明,上古生界源岩中三叠世末进入生烃门限,早燕山期源岩演化停滞,主力生烃期为古近纪,新近纪以来生烃量很小。古近纪期间,上古生界源岩在各个地区生烃贡献不均,最大生烃区为东部洼陷带,大约为 $6.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$; 其次是西部洼陷带,为 $4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 左右;西部斜坡南部地区与北部中央隆起带较低,大致在 $(1.5 \sim 1.8) \times 10^{12} \text{ m}^3$; 南部中央隆起带和西部斜坡北部地区最低(图 5)。

4 结论

渤海湾地区上古生界中三叠世末基本进入生烃门限,随后的印支运动造成区域范围内生烃停

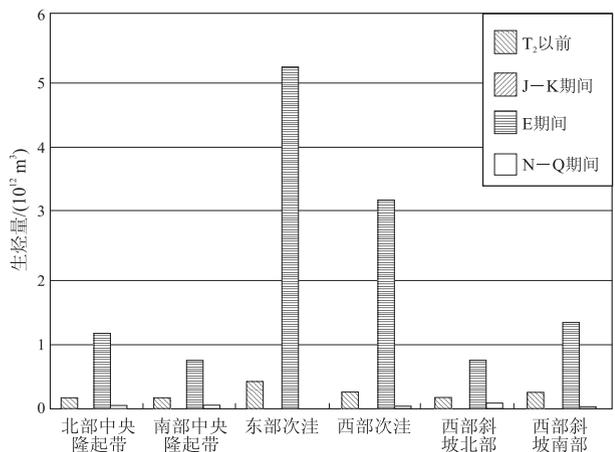


图 5 渤海湾盆地临清拗陷东濮凹陷分区石炭—二叠系煤岩不同阶段生烃量

Fig. 5 Hydrocarbon generation amount of coal of Permian-Carboniferous at different stages in Dongpu Sag, Linqing Depression, Bohai Bay Basin

滞,后期盆地演化差异使各地区上古生界源岩呈现出不同的热演化史,导致各地区生烃贡献大小不一。

就生烃史模拟结果而言,济阳坳陷总生烃量最大,为 $61.806 \times 10^{12} \text{ m}^3$;其次是临清坳陷,为 $28.483 \times 10^{12} \text{ m}^3$;东濮凹陷总生烃量为 $18.803 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。无论是累计生烃量,还是阶段生烃量,上古生界煤岩是生烃量的最大贡献者,其次是暗色泥岩。盆地演化的差异性导致了各个地区阶段生烃的差异。印支运动后,济阳坳陷经历了燕山期、喜山期 2 个“二次生烃”阶段,以早喜山期生烃量最大,生烃范围变化受控于 2 个时期沉降、沉积中心的迁移;临清坳陷也经历了这 2 个阶段,但主力生烃阶段为燕山期;东濮凹陷仅经历了喜山期一个“二次生烃”阶段。

参考文献:

- [1] 刘光鼎,郝天珧,祝靛谊. 环渤海地区油气资源探查的思考[J]. 地球物理学进展,2002,17(4):559-563.
- [2] 胡宗全,周新科,张玉兰. 济阳坳陷前第三系油气勘探前景[J]. 石油与天然气地质,2005,26(5):655-660.

- [3] 胡宗全,朱建辉. 渤海湾盆地中南部中—新生代盆地叠合特征及上古生界生烃规律[J]. 石油实验地质,2008,30(5):439-444.
- [4] 林武,李政,李钜源,等. 济阳坳陷孤北潜山带天然气成因类型及分布规律[J]. 石油与天然气地质,2007,28(3):419-426.
- [5] 张渝昌. 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京:南京大学出版社,1997.
- [6] 张渝昌,徐旭辉,江兴歌,等. 展望盆地模拟[J]. 石油与天然气地质,2005,26(1):29-36.
- [7] 许化政,周新科. 华北早中三叠世盆地恢复与古生界生烃[J]. 石油与天然气地质,2005,26(3):329-336.
- [8] 朱炎铭,秦勇,范丙恒,等. 渤海湾盆地三叠系沉积厚度恢复及其意义[J]. 中国矿业大学学报,2001,30(2):195-198.
- [9] 周章保. 渤海湾盆地临清坳陷构造—热演化与上古生界煤成气成藏[D]. 北京:中国地质大学,2002.
- [10] 吴智平,金强. 声波时差用于沉积间断及剥蚀厚度研究的新探讨[J]. 石油实验地质,1999,21(增刊):90-95.
- [11] 宋国奇,徐春华,王世虎,等. 胜利油区古生界地质特征及油气潜力[M]. 北京:中国地质大学出版社,2000.
- [12] 缪九军,张欣国. 渤海湾盆地胜利油区石炭—二叠系赋存特征及意义[J]. 石油实验地质,2008,30(2):127-132.
- [13] 余和中,韩守华,谢锦龙,等. 华北板块东南缘原型沉积盆地类型与构造演化[J]. 石油与天然气地质,2006,27(2):244-252.
- [14] 王荣新,赵刚. 南华北上古生界烃源岩有机地球化学特征[J]. 石油实验地质,2008,30(5):484-488.

(编辑 韩 或)

(上接第 57 页)

- [12] KISCH H J. Dlite crystallinity: Recommenadtions on sample preprartion, X-ray diffraction setting, and interlaboratory samples[J]. Journal of Metamorphic Geology,1991,9(6):665-670.
- [13] 丰国秀,陈盛吉. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系[J]. 天然气工业,1988,8(2):20-25.
- [14] 毕先梅,莫宣学. 成岩—极低级变质—低级变质作用及有关矿产[J]. 地学前缘,2004,11(1):287-294.
- [15] 曹学伟,胡文瑄,金之钧,等. 临盘油田夏 38 井区辉绿岩热效应对成烃作用的影响[J]. 石油与天然气地质,2005,26(3):317-322.
- [16] 孙永革,傅家谟,刘德汉,等. 火山活动对沉积有机质演化的影响及其油气地质意义[J]. 科学通报,1995,40(11):1019-1022.
- [17] 钟建华. 剪切作用对有机质光学各向异性体发育的控

制[J]. 地质力学学报,1997,3(3):39-40.

- [18] 董亨茂,张生根,胡远清. 断层作用热模型及其对烃源岩热演化的影响[J]. 地质力学学报,2006,12(4):445-453.
- [19] 胡善亭,杨起,潘治贵,等. 鸡西煤田煤的热液变质作用[J]. 煤炭学报,1996,21(4):343-347.
- [20] 郝芳,孙永传,李思田,等. 活动热流体对有机质热演化和油气生成作用的强化[J]. 地球科学:中国地质大学学报,1996,21(1):68-72.
- [21] 袁玉松,朱传庆,胡圣标. 江汉盆地热流史、沉积构造演化与热事件[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):934-939.
- [22] 薄冬梅,姜林,唐艳军,等. 热流体活动与油气成藏[J]. 西南石油大学学报,2007,29(5):38-41.
- [23] 叶加仁,杨香华. 沉积盆地热流体活动及其成藏动力学意义[J]. 沉积学报,2001,19(2):214-218.

(编辑 韩 或)