

东海西湖凹陷浙东中央背斜带
烃源岩生排烃史研究叶加仁¹, 顾惠荣²⁽¹⁾ 中国地质大学 石油系, 武汉 430074; ⁽²⁾ 上海海洋石油局 规划设计研究院, 上海 200120

摘要: 为了深化西湖凹陷浙东中央背斜带油气成藏过程的研究, 优化勘探目标选择, 在烃源岩特征分析的基础上, 应用动态数值模拟技术, 定量恢复了研究区主要烃源岩层系的生排烃历史。研究表明, 浙东中央背斜带主要发育4套烃源岩系, 其中始新统平湖组泥岩与煤层为主力烃源岩, 具有较高的有机质丰度、生烃强度与排烃效率; 烃类排出具阶段性、多期次幕式排烃的特点; 以平湖组为源岩的油气系统应是本区油气勘探的主要目标。

关键词: 烃源岩; 数学模型; 生烃史; 排烃史; 浙东中央背斜带

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2001)03-0075-06

西湖凹陷位于东海陆架盆地的东北部, 面积约4.6万km², 新生代最大沉积厚度超过10 000 m^[1]; 现有勘探与地质研究成果充分证实其为一个天然气资源十分丰富的凹陷, 是东海陆架盆地油气勘探的主战场。浙东中央背斜带位于西湖凹陷的中央部位, 其东邻白堤深凹, 西接三潭深凹, 主体呈NNE向展布, 自北往南由玉皇、龙井、西泠及苏堤等4个呈雁行排列的构造带组成(图1), 已发现了苏堤和西泠两个油气富集带, 是目前西湖凹陷寻找油气的主要场所之一^[2,3]。研究区新生代地层自下而上分别由古新统(?) (E₁)、始新统平湖组(E₂P)、渐新统花港组(E₃h)、中新统龙井组(N₁l)、玉泉组(N₁y)和柳浪组(N₁liu)、上新统三潭组(N₂s)及第四系东海群(Qd)组成。以始新世末的玉泉运动和中新世末的龙井运动为标志, 本区历经断陷、拗陷和区域沉降3个构造发展阶段, 并分别发育拉张性正断裂、压性断裂及剪切平移断裂为主的断裂系统^[4]; 研究区局部构造发育, 具备良好的石油地质条件, 是油气运移与聚集的理想场所。但由于区内钻井较少, 缺乏系统的油气地质资料, 基础研究相对较薄弱, 对烃源岩生、排烃特征的认识尚待进一步深化。

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目(99-110-04-01-04); 高等学校骨干教师资助计划(GG-170-10491-1460)

作者简介: 叶加仁(1966—), 男, 博士, 副教授, 主要从事石油地质学和数学地质学的教学与科研, E-mail: jrye@cug.edu.cn

收稿日期: 2000-11-24, 2001-06-18 改回。 周立君编辑

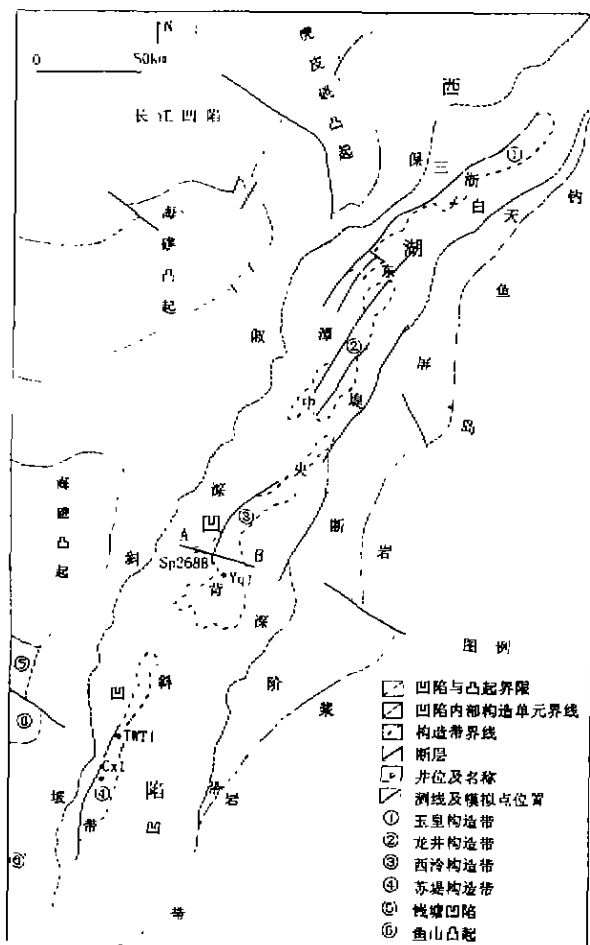


图1 西湖凹陷浙东中央背斜带构造位置

Fig.1 Location of Zhedong central anticline belt, Xihu depression

烃类生成是油气运移、聚集及成藏的物质基础,更是油气系统存在的前提条件。烃类只有在排出母岩后才有可能聚集成具工业开采价值的油气藏,烃源岩中的油气最初呈分散状态,要形成具工业价值的油气藏,首先必须进行初次运移,但烃类的排出是一个极其复杂的动力学过程。本次研究应用数值模拟技术,定量地恢复了研究区主要烃源岩层系的生排烃历史,以深化油气系统的研究,更好地为油气勘探服务。

1 烃源岩特征

1.1 烃源岩发育

西湖凹陷在盆地性质上属陆缘裂谷盆地^[5]。从区域上看,西湖凹陷纵向上发育古新统、始新统、渐新统及中新统四大烃源岩系,烃源岩类型有泥岩与煤两种。已有钻探成果表明,对浙东中央背斜带而言,其烃源岩主要发育于盆地发展的裂谷期和反转期,烃源岩以平湖组为主,花港组为次,主要有泥岩和煤两种,煤的沉积厚度与分布范围比泥岩薄且小。另外,根据已获油气的有机地球化学性质和东海陆架盆地成盆及沉积演化史等方面的研究成果,推测在平湖组以下地层(中、下始新统和古新统)还可能存在有机质类型较好的源岩。

1.2 有机质丰度

丰富的有机质是油气形成的物质基础。研究区

始新统平湖组和中中新统玉泉组泥岩中的有机质丰度属中或中偏高级别,是较好的烃源岩系(表1),渐新统花港组下部泥岩的有机质丰度也达到烃源岩标准,且自南向北有机质丰度有变低的趋势。平湖组与花港组内赋存的煤大部分为潮坪沼泽相沉积,有机质保存条件良好,其有机质丰度高;中新统中的煤主要为滨湖沼泽相与河漫滩的岸后沼泽相沉积,其有机质丰度相对较低。此外,根据地震、重力等资料解释表明,本区平湖组之下存在有一大套可能为古新世—早始新统的地层层序,同处于东海陆架盆地的长江凹陷与甌江凹陷内的钻井已证实古新统为一套重要的烃源岩系,前人研究认为,该套地层具有较高的生烃潜力。

1.3 有机质类型

干酪根元素分析表明本区烃源岩的有机质类型主要属含腐泥的腐殖型(Ⅱ1)和腐殖型(Ⅱ2)两种,其中煤的有机质类型比泥岩好,以Ⅱ1型为主^[6]。干酪根的类型决定了有机质热演化的产物特点,本区的有机质主要转化产物为气态烃和低比重的液态烃,是形成天然气的重要物质基础,并由此决定了本区油气勘探方向应以寻找优质天然气为主。

从有机岩石学的观点看,烃源岩的有机质类型主要取决于其中的有机显微组分种类及相对含量。有机显微组分分析(表2)表明,本区烃源岩中脂镜组与镜质组含量最为丰富,为主要组分;类脂组为次要成分,腐泥组与惰质组含量最少,为微量组分。在纵向分布上,自平湖组至柳浪组泥岩镜质组含量逐

表1 浙东中央背斜带钻井暗色泥岩有机质丰度

Table 1. Statistical abundance of organic matter in dark shale at boreholes in Zhedong central anticline belt

层位	YQ1 井			TWT1 井		
	TOC/%	"A"/%	HC/($\times 10^{-6}$)	TOC/%	"A"/%	HC/($\times 10^{-6}$)
柳浪组	$\frac{0.68-0.87}{0.75(2)}$	$\frac{0.022-0.035}{0.029(2)}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0.45(5)}{0.45(5)}$	$\frac{0.021(5)}{0.021(5)}$	$\frac{36.39(2)}{36.39(2)}$
玉泉组	$\frac{0.65-2.94}{1.28(10)}$	$\frac{0.024-0.219}{0.076(10)}$	$\frac{0-259}{46.05(10)}$	$\frac{1.32(5)}{1.32(5)}$	$\frac{0.07(5)}{0.07(5)}$	$\frac{269.22(2)}{269.22(2)}$
龙井组	$\frac{0.04-0.63}{0.27(21)}$	$\frac{0.001-0.025}{0.013(21)}$	$\frac{0-113}{16.62(21)}$	$\frac{0.32(3)}{0.32(3)}$	$\frac{0.023(8)}{0.023(8)}$	$\frac{114.2(2)}{114.2(2)}$
花港组 上部	$\frac{0.05-0.55}{0.30(8)}$	$\frac{0.001-0.042}{0.0169(3)}$	$\frac{0-160}{39.95(8)}$	$\frac{0.57(36)}{0.57(36)}$	$\frac{0.032(36)}{0.032(36)}$	$\frac{52.89(12)}{52.89(12)}$
花港组 下部	$\frac{0.38-1.39}{0.74(9)}$	$\frac{0-0.053}{0.031(9)}$	$\frac{0-187}{65.56(9)}$			
平湖组	$\frac{0.36-2.00}{1.04(18)}$	$\frac{0-0.087}{0.047(18)}$	$\frac{0-289}{68.5(18)}$	$\frac{1.01(41)}{1.01(41)}$	$\frac{0.079(37)}{0.079(37)}$	$\frac{256.86(16)}{256.86(16)}$

注: 最小值—最大值
平均值(样品数)

表2 浙东中央背斜带泥岩与煤有机显微组分含量

Table 2. Statistical content of organic micro-component of shale and coal in Zhedong central anticline belt

地 层	腐泥组/%		类脂组/%		脂镜组/%		镜质组/%		惰质组/%	
	泥岩	煤	泥岩	煤	泥岩	煤	泥岩	煤	泥岩	煤
柳浪组			1.12	16.17	6.58	22.1	91.6	60.4	0.70	0.42
玉泉组	0.35	0.83	9.02	10.47	26.51	16.6	63.2	71.8	0.88	0.23
龙井组	0.50		7.73	20.64	43.95	12.0	47.3	67.1	0.82	0.17
花港组	0.57	0.33	3.38	11.91	42.60	39.7	52.2	47.9	0.80	0.05
平湖组	0.05	0.40	3.19	10.43	60.80	31.9	35.4	57.1	0.66	0.15
平均值	0.02	0.28	5.02	11.71	46.77	28.8	46.7	59.1	0.80	0.20

渐增加,而脂镜组含量则逐渐减小;煤的有机显微组分的纵向变化也有相似的规律,这说明下第三系平湖组和花港组烃源岩的有机显微组分优于上第三系龙井组、玉泉组和柳浪组。

1.4 有机质成熟度

西湖凹陷烃源岩有机质当 $R_o = 0.55\%$ 时,进入生油门限;当 $R_o = 1.3\%$ 时,进入湿气门限;当 $R_o = 2.2\%$ 时,进入干气门限。

从区域上看,中新统柳浪组没进入生油门限,玉泉组仅在龙井构造带以西的三潭深凹完全进入生油门限,在此处龙井组开始进入湿气门限;渐新统花港组在三潭深凹、浙东中央背斜带和白堤深凹大部分处于生油窗内,在龙井构造带以西的三潭深凹则已全部进入湿气带;始新统的热演化程度较高,在龙井构造带及其以西的三潭深凹内已处于干气带;预计古新统绝大部分已进入干气带。

2 模型

2.1 生烃史模型

据不完全统计,目前国内外有关油气资源定量评价的方法多达上百种,常用的也有二三十种^[7],如体积法、残留烃法、岩石热模拟实验法、物质平衡法、化学动力学法等,各种方法互有优劣,分别适用于不同的油气勘探阶段和资料状况。本次研究主要采用岩石热模拟实验法来研究本区烃源岩的生烃历史,其基本思路为:在地史、热史和烃类成熟史模拟的基础上,根据源岩生烃热解模拟的实验资料,建立起源岩产烃率与成熟度之间的关系,进而定量恢复烃源岩的生烃历史,并可计算出不同层系源岩在不同时期的生烃量。其主要数学模型为:

$$E(t) = \text{TOC} \times C_f[R_o(t)] \times R[R_o(t)] \times d(t)$$

式中, $E(t)$ 为单位体积烃源岩在不同地质时期(t)的生烃强度; TOC 为源岩的现今有机碳含量; C_f [$R_o(t)$] 为不同成熟度下有机碳的恢复系数; R [$R_o(t)$] 为不同成熟度下单位有机碳的产烃率; $d(t)$ 为地质历史时期烃源岩的密度。

2.2 排烃史模型

目前用于模拟烃源岩排烃量史的方法主要有残留烃法、压实法、压差法和渗流力学法等^[8]。本次研究主要应用渗流力学法来定量恢复浙东中央背斜带的源岩排烃史。认为油气主要呈独立相运移,含烃饱和度和破裂压力是控制烃类运移的两个主要因素,运移通道为微裂缝^[9],可称为“含烃饱和度与破裂压力双因素联合控制下的微裂缝排烃”模式,其遵循“压力增长—岩石微破裂—烃类排出一微裂缝弥合”这一往复过程,即排烃后流体压力降低,微裂缝闭合,再积累烃类与压力,为下一期排烃作准备。排烃作用是多期次、间歇性或幕式的,烃类排出的数量取决于排烃期源岩孔隙系统中多相流体之间的压力平衡。表述上述排烃过程的动力学模型可综合为:

$$\begin{cases} P \geq P_f \\ S_{HC} \geq S_{SO} \\ V_E = V_G - V_R \end{cases}$$

式中, P_f 为岩层的破裂压力,为破裂压力系数 P_c 与静水压力的乘积; S_{SO} 为烃源岩排烃的临界含烃饱和度; V_E 、 V_G 、 V_R 分别为排烃强度、生烃强度和残烃量。排烃强度计算的数学模型为:

$$V_E(t) = C(T, P) \times d(T, P) \times V_o \times [P(t) - P_f]$$

式中, $V_E(t)$ 为地质历史时期(t)源岩的排烃强度; $C(T, P)$ 为地下温压状态下烃类的压缩系数; $d(T, P)$ 为地下温压条件下烃类的密度; V_o 为排烃开始前烃类所占的孔隙体积; $P(t)$ 为地质历史时期的孔隙流体超压。

3 生排烃史

根据上述原理和数学模型,编制相应的软件系统,选取若干代表性的井点,输入各参数,在计算机上定量恢复中央背斜带源岩的动态生排烃历史。

3.1 生烃史

纵向上,平湖组的生烃强度最高,最大可达 10 kg/m^3 以上,为本区主要的生烃岩系(图 2);中、下始新统与古新统源岩的生烃强度次之,花港组源岩的生烃强度相对最小,其中花下段($E_3\text{hd}$)的生烃强度大于花上段($E_3\text{hu}$)的生烃强度。横向上,靠近凹陷深部位源岩的生烃强度大于背斜带中心部位源岩的生烃强度;在中央背斜带上,南部源岩的生烃能力优于北部源岩的生烃能力。总体上,平湖组源岩在渐新世末期即已进入成烃期,中、下始新统与古新统源岩整体在渐新世末期进入生烃高峰期,花港组源岩进入主生烃期的时间较晚,大致在 15 Ma 左右。

3.2 排烃史

就层位而言,始新统平湖组源岩的排烃强度最高,为研究区主要排烃层位,中、下始新统与古新统源岩排烃强度次之,其排烃开始时间早(图 3);渐新统花港组源岩排烃强度最小,且有效排烃源岩分布范围较小,烃类排出仅具局部意义。

单位时间的排烃曲线表现为“多峰型”,烃类排出具阶段性、多期次幕式排烃的特点,遵循“压力增长—岩石微破裂—烃类排出—微裂缝弥合”这一往复过程;从排烃强度曲线中可明显地划分出两期主排烃事件(图 4),不同层位烃源岩的排烃期有所差异;中、下始新统与古新统源岩的排烃期为 $40 \sim 10 \text{ Ma}$,始新统平湖组的排烃期为 $25 \sim 5 \text{ Ma}$,渐新统花港组源岩的排烃主期自 10 Ma 左右开始,并一直延续至今。

3.3 排烃效率

从计算结果表中可知(表 3),浙东中央背斜带上各烃源岩层的排烃效率存在较大的差别。其中,中、下始新统与古新统烃源岩的排烃效率较高,可达 62% 左右,但由于其热演化历史较长,影响油气运聚的因素较复杂,其最终油气生成聚集效率可能不会太高;始新统平湖组烃源岩的排烃效率在不同的地理位置基本相同,大致为 65% 左右,计算结果较为可信,且由于其保存时间适中,油气运聚条件良好,

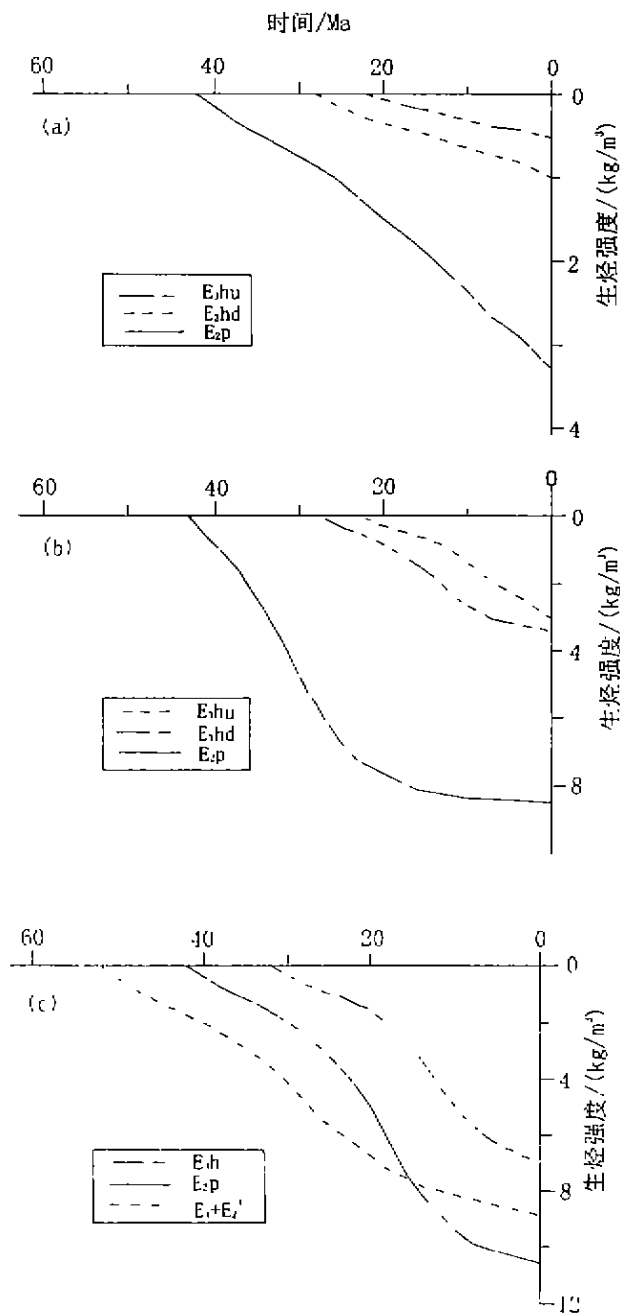


图 2 浙东中央背斜带源岩生烃历史
(a) TWT1 井; (b) CX1 井; (c) AB 测线 SP2688

Fig. 2 Hydrocarbon generation history of source rock in Zhedong central anticline belt
(a) Well TWT1; (b) Well CX1; (c) SP2688 in Line AB

故其可以保持较高的油气生成聚集效率;渐新统花港组源岩的排烃效率在平面上变化较大,在靠近生烃深凹处具有较高的排烃效率,可达 70% 左右,而在构造高部位处的排烃效率则急剧下降,甚至无烃类的排出,故其综合油气生成聚集效率相对较低;中新统烃源岩的有机质受热时间较短,源岩具较低

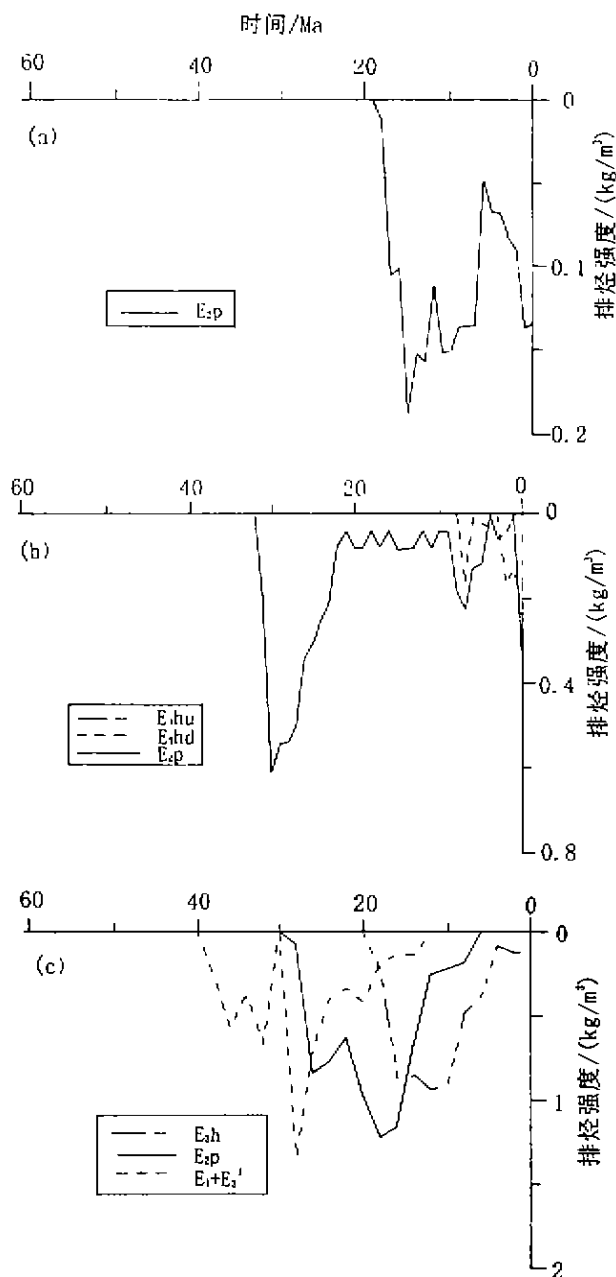


图 3 浙东中央背斜带源岩单位时间排烃史

(a)TWT1 井; (b)CX1 井; (c)AB 测线 SP2668

Fig. 3 Hydrocarbon expulsion history of source rock at per unit time in Zhedong central anticline belt

(a)Well TWT1; (b)Well CX1; (c)SP2668 in Line AB

的成熟度, 生烃能力受到极大的限制, 推测其排烃效率和油气生成聚集效率较低。

总之, 西湖凹陷浙东中央背斜带烃源岩发育, 各套烃源岩具有自身独特的生排烃特征, 其中始新统

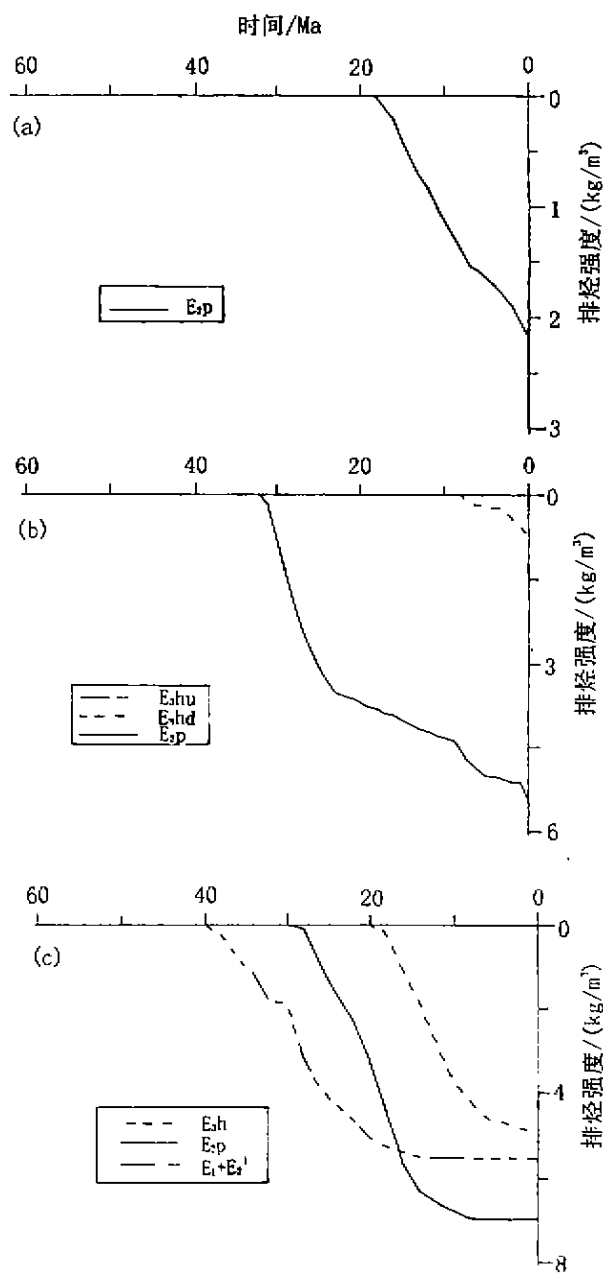


图 4 浙东中央背斜带源岩累积排烃史

(a)TWT1 井; (b)CX1 井; (c)AB 测线 SP2668

Fig. 4 Accumulative hydrocarbon expulsion history of source rock in Zhedong central anticline belt

(a)Well TWT1; (b)Well CX1; (c)SP2668 in Line AB

平湖组具有较高的有机质丰度、生烃强度和排烃效率。显然, 以平湖组为烃类来源的油气系统是本区油气勘探的主要目标。

表 3 浙东中央背斜带烃源岩排烃效率

Table 3. Hydrocarbon expulsion efficiency of source rock in Zhedong central anticline belt

点 位	层 位	生 烃 量 /(kg/m ³)	排 烃 量 /(kg/m ³)	排 烃 效率 /%
AB 测线 SP2688	E ₁ +E ₂	8.875	5.533	62.34
	E ₂ p	10.584	6.965	65.81
	E ₃ h	6.996	4.949	70.74
CX1 井	E ₂ p	8.498	5.466	64.32
	E ₃ hd	3.449	0.762	22.09
	E ₃ hu	3.039	0.027	0.89
TWT1 井	E ₂ p	3.285	2.168	66.00
	E ₃ hd	1.012	/	/

参 考 文 献

[1] 郭振轩. 东海地质构造特征及油气远景[J]. 海洋地质与第四纪

地质, 1988, 8(3): 35-41.

- [2] 顾惠荣, 李上卿, 邬庆良. 东海西湖凹陷苏堤区大中型气田目标评价[J]. 海洋石油, 1998, (4): 1-5.
- [3] 任征平, 王坚勇. 东海春晓构造藏条件分析[J]. 海洋石油, 1999, (1): 7-11.
- [4] 许薇龄, 乐俊英. 东海的构造运动及演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1988, 8(1): 9-21.
- [5] 杨兆宇. 东海新生代沉积盆地的类型和成盆期[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1992, 12(1): 8-12.
- [6] 李贤庆, 钟宁宁, 熊波, 等. 西湖凹陷煤系烃源岩的有机质热演化研究[J]. 中国煤田地质, 1997, 9(1): 33-36.
- [7] 叶加仁, 赵鹏大, 陆明德. 鄂尔多斯盆地地下古生界油气地质动力学研究[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(1): 40-46.
- [8] 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [9] 叶加仁, 陆明德. 鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐岩烃源岩排烃动力学研究[A]. 见: 费琪, 戴世昭, 朱水安, 主编. 成油体系与成藏动力学论文集[C]. 北京: 地震出版社, 1999.

A STUDY ON HYDROCARBON GENERATION HISTORY AND EXPULSION HISTORY OF SOURCE ROCK IN THE ZHEDONG CENTRAL ANTICLINE BELT, XIHU DEPRESSION

YE Jia-ren¹, GU Hui-rong²

⁽¹⁾Department of Petroleum Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

⁽²⁾Plan, Design and Research Institute of Shanghai Marine Petroleum Survey, Shanghai 200120, China)

Abstract: In order to deepen the research of hydrocarbon accumulation process and choose the optimum exploration targets, the hydrocarbon generation history and expulsion history in the Zhedong central anticline belt were reconstructed quantitatively by use of the technique of dynamic numerical modeling, based on the analysis of source rock characteristics. It is shown that there are four source rocks in the study area, that the Eocene Pinghu Formation is the principal source rock, which had a high organic matter abundance, hydrocarbon generation intensity and hydrocarbon expulsion efficiency, that the process of expelled hydrocarbon appeared in multi-stages and multiperiods, and that the petroleum system from the Pinghu Formation source rock should be the major exploration target in the study area.

Key words: source rock; mathematical model; hydrocarbon generation history; hydrocarbon expulsion history; Zhedong central anticline belt