

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019061403

中国近海断—坳转换期煤系烃源岩特征——以西湖凹陷平湖组烃源岩为例

刁慧¹, 刘金水¹, 侯读杰², 蒋一鸣¹, 张涛¹, 曾文倩¹

1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

摘要: 西湖凹陷是东海陆架盆地最重要的含油气凹陷, 古近系晚始新统平湖组烃源岩是西湖凹陷主力烃源岩, 晚始新世平湖组沉积时期西湖凹陷处于断—坳转换时期, 平湖组为一套海陆过渡相煤系地层, 形成于半封闭海湾沉积环境。本文对断坳转换平湖组煤系烃源岩的分布、母质来源和生烃特征进行系统分析。结果表明: 断—坳转换下的煤系烃源岩广覆式分布, 平湖组煤系烃源岩富含反映干燥针叶类裸子植物来源的异海松烷和潮湿蕨类植物来源的 β -扁植烷等二萜类化合物, 从斜坡带向凹陷中央具有 β -扁植烷增加的特征。从显微结构上表现为富含树脂体的煤系烃源岩, 其具有“早期利于生油、晚期持续生气”的生烃模式。正是这种分布格局、母质来源和生烃特征决定了西湖凹陷油气藏具有“东气西油”的分布格局。

关键词: 煤系烃源岩; 树脂体; 二萜类化合物; 西湖凹陷

中图分类号: P744.4 文献标识码: A

Coal-bearing source rocks formed in the transitional stage from faulting to depression nearshore China—— A case from the Pinghu Formation in the Xihu Sag

DIAO Hui¹, LIU Jinshui¹, HOU Dujie², JIANG Yiming¹, ZHANG Tao¹, ZENG Wenqian¹

1. Shanghai Branch Company of CNOOC (China) Ltd, Shanghai 200335, China

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The Xihu Sag is the most important oil-bearing sag in the East China Sea Continental Shelf Basin, in which prevailed the Late Eocene source rocks of the Pinghu Formation, which was formed while the sag was situated in a transitional stage from faulting to depression. The Pinghu Formation is a set of marine-continental transitional coal-bearing sequence deposited in a semi-enclosed depositional environment of a bay. The authors systematically studied the distribution pattern, source of parent material and hydrocarbon generation characteristics of the coal-bearing source rocks. The results show that the coal-series source rocks were distributed widely in the sag and formed in a faulting-depression transitional stage. They are rich in iso-seasones and wet fern-derived β -bentane, reflecting a source from dried coniferous gymnosperms, in which diterpenoids are characterized by an increase in β -flatane from the slope zone to the center of the depression. From the microstructure, it is a kind of resin-rich coal-based source rock, which generated oil in early stage but gas in late-stage. The distribution pattern of “Gas in the East and Oil in the West” in the Xihu Sag is also determined by the distribution pattern, parent material source and hydrocarbon generation characteristics of the source rocks.

Key words: source rock; resinite; diterpanes; the Xihu Sag

西湖凹陷是目前东海陆架盆地中规模最大的新生代含油气凹陷, 多年来勘探实践和研究已证明始新统平湖组烃源岩是主力烃源岩。前人对平湖组烃源岩做过研究, 认为它是一套海陆过渡相煤系烃源岩, 煤层具有单层厚度薄、层数多、横向变化快等特征, 煤组分以镜质组为主^[1-2]。煤系泥岩烃源岩有机质类型均为腐泥腐殖型和腐殖型, 饱和烃中

富含二萜烷类化合物, 生气为主, 具有中国古新近系煤系烃源岩一般的特征^[3-7]。前人认为西湖凹陷平湖组烃源岩在凹陷中央埋藏太深, 早已进入高过成熟阶段(23 Ma 之前), 而圈闭形成较晚^[8], 后期生烃能力不足, 不利于油气成藏。然而, 随着近年来西湖凹陷油气勘探的不断突破, 对平湖组烃源岩的特征取得新认识。古新世平湖组煤系烃源岩发育

资助项目: “十三五”国家科技重大专项“东海深层低渗-致密天然气勘探开发技术”(2016ZX05027-001)

作者简介: 刁慧(1984—), 男, 工程师, 现主要从事石油地质研究, E-mail: diaohui@cnooc.com.cn

收稿日期: 2019-06-14; 改回日期: 2019-08-08. 蔡秋蓉编辑

于断—拗转换背景下^[9], 本文系统分析了其烃源岩特征, 明确平湖组烃源岩不同层段的差异, 探讨平湖组烃源岩母质及形成环境, 建立平湖组煤系烃源岩生烃模式, 指明了西湖凹陷巨大勘探潜力。

1 地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部, 在地质构造上, 其东为钓鱼岛隆褶带, 西为海礁隆起, 南临钓北凹陷, 北与福江凹陷毗邻。该凹陷是中生代末热隆

起背景上形成的裂陷, 具有先断后拗的演化特征。整个凹陷呈 NNE 向展布, 东西宽约 80 km, 南北长约 360 km, 面积为 4.27×10⁴ km²。西湖凹陷总体构造格架具有东西分带、南北分块的特点, 凹陷从西往东可分成 5 个二级构造单元带, 即西部斜坡带、西次凹、中央反转构造带、东次凹和东部断阶带。凹陷沉积岩厚约万米, 自下而上为古新统, 中下始新统宝石组, 中上始新统平湖组, 渐新统花港组, 中新统龙井组、玉泉组、柳浪组, 上新统三潭组和第四系东海群^[10-13](图 1)。

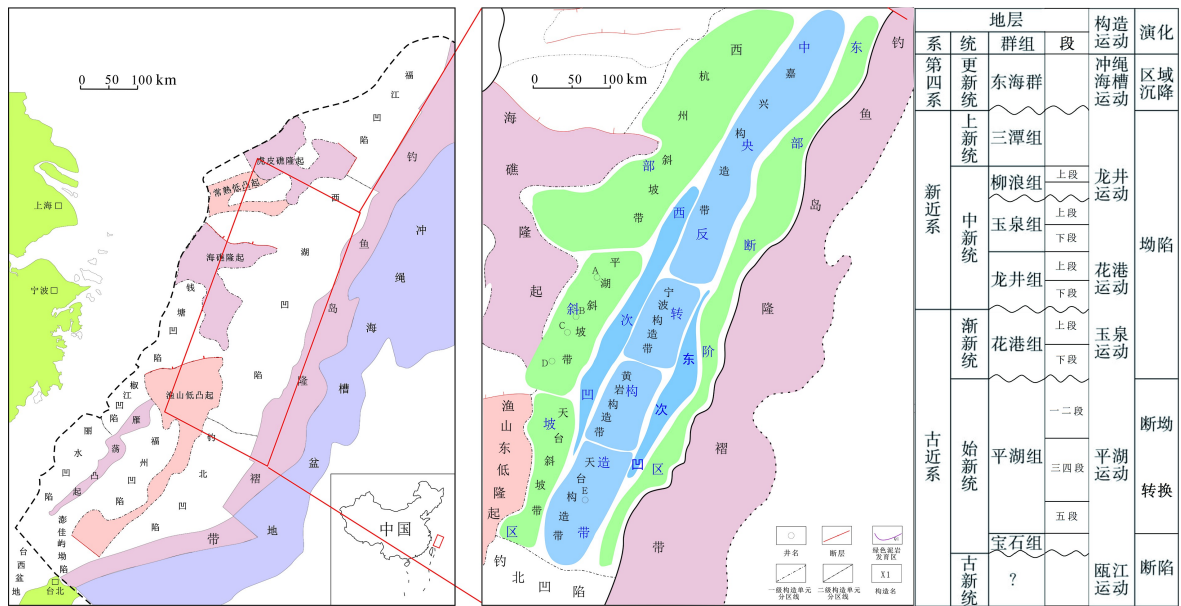


图 1 西湖凹陷构造—地层划分

Fig.1 Division of tectonic and stratigraphic units in the Xihu Sag

2 平湖组烃源岩分布特征

西湖凹陷平湖组发育于断—拗转换期的整体抬升阶段, 其受钓鱼岛隆褶带限制, 主要为海陆过渡相沉积环境, 表现为水进再到水退沉积, 经历了海湾—潮坪—潮汐影响三角洲沉积发育。岩性以砂泥岩不等厚互层为主, 其间夹有多层 0.5~2 m 不等的煤层^[14-15], 灰—深灰色泥岩、碳质泥岩和煤层发育。西湖凹陷煤按照煤阶划分属于烟煤, 普遍具有沥青质光泽和条带状结构。

3 平湖组烃源岩生烃潜力评价

3.1 有机质丰度

西湖凹陷不同构造带平湖组烃源岩有机质丰

度存在较大差异。钻遇地层的层位情况来看, 在西部斜坡带区所有井均已钻到平湖组四段及以下, 甚至钻穿平湖组五段, 中央反转构造带中南部部分井钻到平湖组二段, 而在中央反转构造带中北部和西次凹地区均未钻遇平湖组地层。

纵向上来看, 泥岩以平湖组三、四段有机质丰度最高, TOC 平均值为 1.96%, (S₁+S₂) 平均值为 4.69 mg/g, 氯仿沥青 A 平均值为 0.16%, 总烃平均值为 866×10⁻⁶; 其次是平湖组一、二段, TOC 平均值为 1.68%, (S₁+S₂) 平均值为 3.97 mg/g, 氯仿沥青 A 平均值为 0.108%, 总烃平均值为 633×10⁻⁶; 平湖组五段 TOC 平均值为 1.26%, (S₁+S₂) 平均值为 2.45 mg/g, 氯仿沥青 A 平均值为 0.127%, 总烃平均值为 432×10⁻⁶。煤本身属于是有机质的富集体, 平湖组一、二段和三、四段煤丰度相当, 好于平湖组五段的煤(表 1, 图 2)。

横向上来看, 平湖斜坡带泥岩有机质丰度综

表1 西湖凹陷烃源岩丰度统计表
Table 1 Organic matter abundance in source rocks of Pinghu Formation in Xihu Sag

岩性 层段	TOC/%	(S ₁ +S ₂) / (mg/g)	HI/ (mgHC/gTOC)	氯仿沥青A/%	HC/10 ⁻⁶
一、二段	0.5~9.7	0.22~27.0	31.4~656.3	0.0033~0.624	157.6~5 884
	1.68 (336)	3.97 (336)	222.5 (311)	0.108 (44)	633.84 (43)
泥岩三、四段	0.5~9.8	0.21~44.4	21.7~840.2	0.0142~0.619	110.7~2 834
	1.96 (389)	4.69 (387)	193.2 (383)	0.16 (26)	866.73 (21)
五段	0.5~6.59	0.34~9.79	30.8~453.3	0.0276~0.5074	351.1~1 298.2
	1.26 (98)	2.45 (98)	11.7 (98)	0.127 (4)	432.7 (3)
一、二段	13.99~72.9	18.3~219.2	114~868.9	0.2261~3.3928	755.4~10 677.1
	46.01 (36)	123.16 (36)	260.7 (22)	1.53 (18)	474.2 (15)
煤三、四段	20.8~57.5	51.4~215.8	192.9~403.3	1.81~1.93	8 203~10 998
	38.95 (21)	123.6 (21)	261.8 (17)	1.87 (2)	9 600.5 (2)
五段	12.65~61.9	37.3~193.8	92.3~326.0	0.313 (1)	1 447.62 (1)
	41.72 (5)	91.43 (5)	226.3 (5)		

注: 最小值~最大值
平均值(样品数)

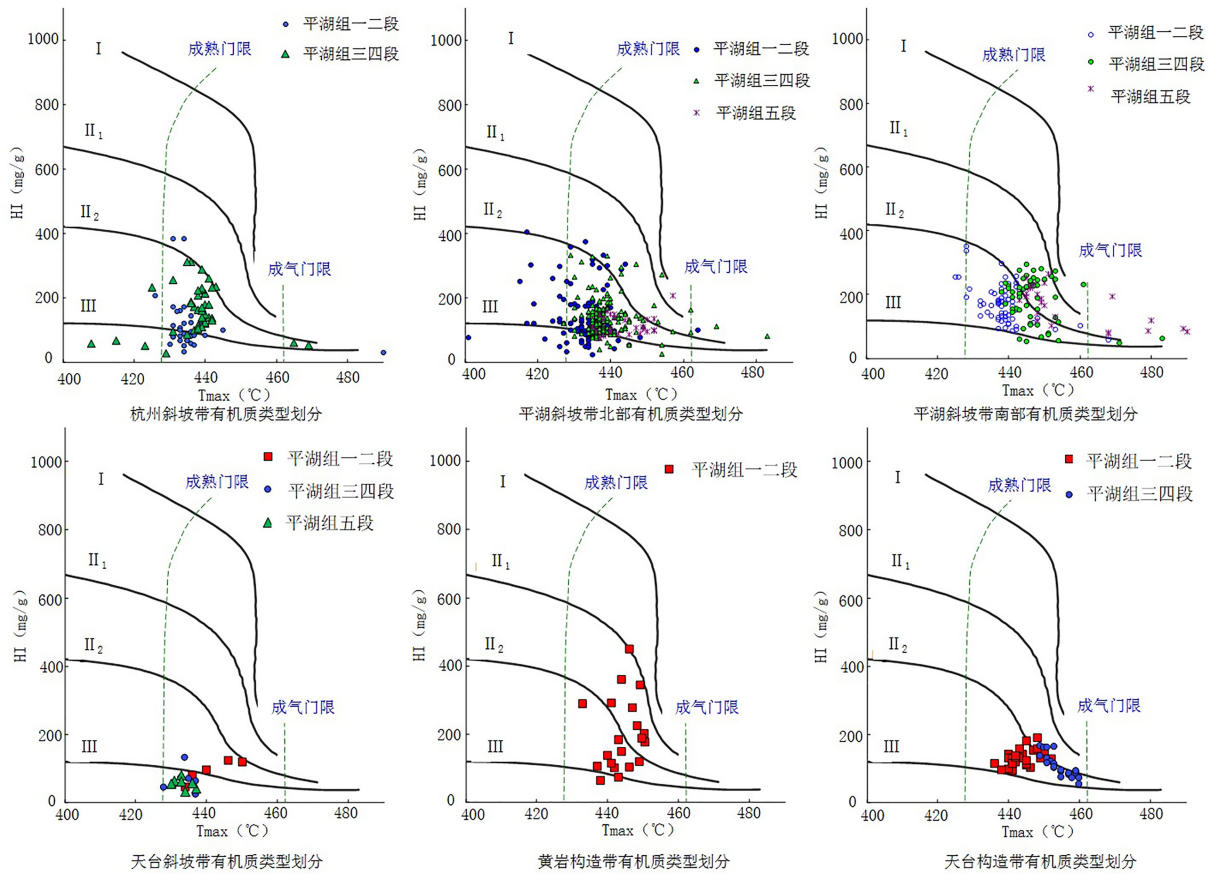


图2 不同构造带泥岩 Tmax-HI 有机质类型判识图

Fig.2 Polts of Tmax versus HI showing the kerogen types of mudstones from different tectonic units

合最高, TOC平均值为1.79%, (S₁+S₂)平均值为4.32 mg/g, 氯仿沥青A平均值为0.168%, 总烃平均值为772×10⁻⁶;其次是黄岩构造带和天台构造带;杭州斜坡带和天台斜坡带泥岩有机质丰度最低,但其样品数较少(表2)。煤不同构造带差别不是太大,西部斜坡带的煤略好于中央反转带(表3)。

3.2 有机质类型

3.2.1 热解有机质类型

从热解 Tmax-HI 图版(图2)判断有机质类型来看,西湖凹陷泥岩有机类型以Ⅲ型为主,部分Ⅱ₂型,其中平湖斜坡带南部和黄岩构造带烃源岩类型最好,其次是平湖斜坡带北部、杭州斜坡带和

表 2 不同构造带平湖组泥岩丰度统计表

Table 2 Organic matter abundance in mudstones of Pinghu Formation from different tectonic units in Xihu Sag

构造带	TOC/%	(S ₁ +S ₂) / (mg/g)	HI/ (mgHC/gTOC)	氯仿沥青A/%	HC/10 ⁶
杭州斜坡带	0.51~3.9 1.4 (39)	0.28~14.9 2.75 (39)	51.6~382.8 155.9 (35)	0.003 3~0.687 0.032 (12)	126.3~2 400 672.2 (5)
平湖斜坡带	0.5~9.84 1.79 (593)	0.22~44.4 4.32 (590)	21.9~840.2 199.1 (587)	0.034 5~0.624 0.168 (47)	110.7~5 884 771.9 (47)
天台斜坡带	0.59~9.18 2.02 (20)	0.21~12.6 1.72 (20)	21.65~130.5 67.6 (20)	—	—
黄岩构造带	0.52~3.3 1.38 (109)	0.51~12.3 4.39 (109)	63.4~656.3 334 (88)	0.028 3~0.288 6 0.082 (15)	167~1 653 474.2 (15)
天台构造带	0.51~8.37 2.34 (62)	0.3~16.5 3.44 (62)	44.9~191.3 112.1 (62)	—	—

注: $\frac{\text{最小值}-\text{最大值}}{\text{平均值}}$ (样品数)

表 3 不同构造带平湖组煤丰度统计表

Table 3 Organic matter abundance in coals of Pinghu Formation from different tectonic units in Xihu Sag

构造带	TOC/%	(S ₁ +S ₂) / (mg/g)	HI/ (mgHC/gTOC)	氯仿沥青A/%
平湖斜坡带	20.8~61.9 41.01 (29)	51.36~215.75 122.55 (29)	92.27~403.32 255.52 (24)	0.248~1.93 1.35 (4)
天台斜坡带	53.29 (1)	159.7 (1)	277 (1)	—
黄岩构造带	12.65~72.95 42.76 (26)	18.29~219.15 115.32 (26)	114~869 278.1 (13)	0.226 1~3.392 8 1.542 (17)
天台构造带	42.4~67.8 54.78 (6)	104.49~164.56 129.22 (6)	180.3~239.5 215.3 (6)	—

注: $\frac{\text{最小值}-\text{最大值}}{\text{平均值}}$ (样品数)

天台构造带;煤的有机质类型主要为 II₂(图 3),煤的有机质类型好于泥岩,这与传统认为煤为 III 型干酪根的认识不同,与煤中富含富氢树脂体有关。

3.2.2 显微组分特征

西湖凹陷泥岩干酪根类型主要以 III 型为主,其干酪根显微组分有 3 种类型,第 1 种以镜质组为主,镜质组含量 75%~95%,壳质组+腐泥组含量 5%~15%,惰质组 5%~20%,主要以生气为主;第 2 种以高含量壳质组+腐泥组为特点,含量为 20%~60%,镜质组 40%~80%,惰质组 10%~40%,这种泥岩具有较好的生油能力;第 3 种以惰质组为主,惰质组含量大于 70%,这种泥岩生烃能力差(图 4)。

煤的显微组分以镜质组为主,镜质组含量平均大于 85%,壳质组含量较高平均大于 10%,惰质组含量低,约为 2%(表 4,表 5)。镜质组中以基质镜质体为主,其次是均质镜质体;壳质组中则以树脂体为主,其次是孢子体。研究表明,树脂体、孢子体主要来源于针叶类高大植物,藻类体主要来源于低矮蕨类植物。树脂体生油潜力大并且具有早生烃的特征,均质镜质体和基质镜质体是较好的生气母质,均质镜质体还有一定生油能^[16-19]。西湖凹陷煤的显微组分中发现大量树脂体(图 5),这是其独特的地

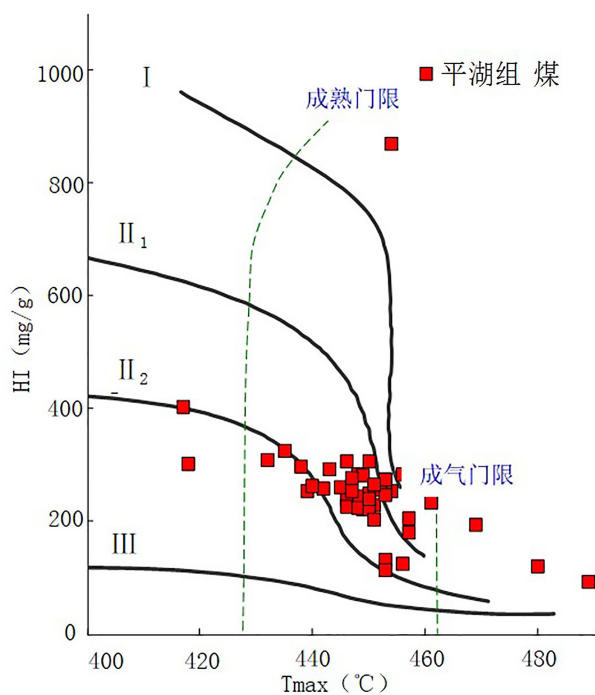


图 3 煤 Tmax-HI 有机质类型判别图

Fig.3 Polts of Tmax versus HI showing the kerogen types of coals from different tectonic units

方,不同于国内外大型煤成油气盆地。这种特征表明西湖凹陷煤系烃源岩以生气为主,并有利于生油。

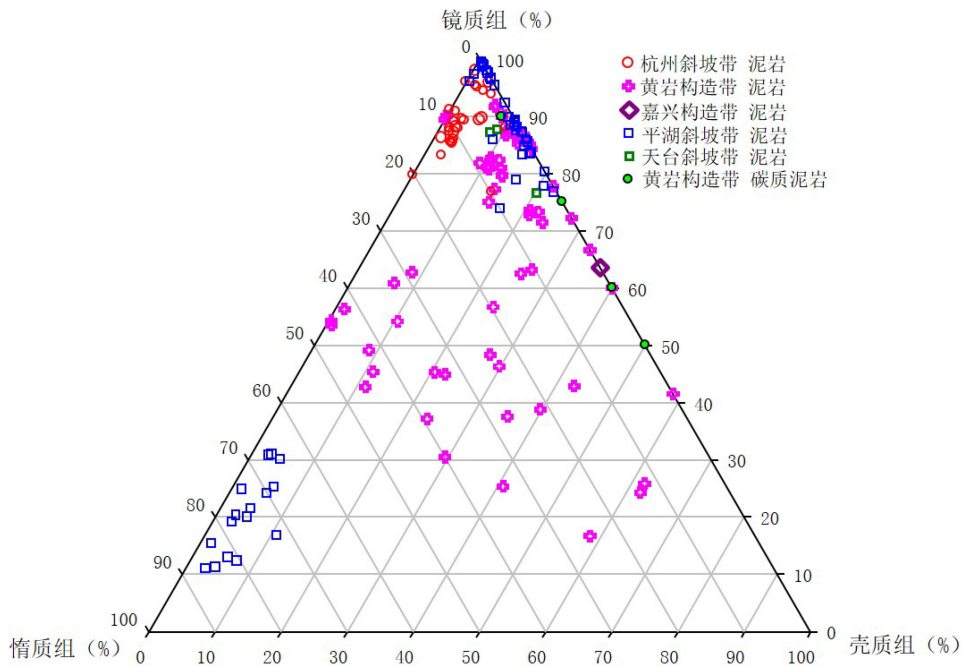


图4 泥岩显微组分三角图

Fig.4 Ternary plot showing the maceral composition of mudstones

表4 平湖组煤显微组分统计表

Table 4 Distribution of maceral composition in coals in the members of Pinghu Formation

组段	C1/%	C2/%	V/%	I/%	Al/%	Cu/%	Sp/%	Re/%	E/%	样品数
一段	5.0~21.6	3.0~84.4	77.5~93.5	0~7.7	0~1.9	0~3.3	0~6.6	2.6~9.9	6.2~16.5	6
	13.5	48.3	86.5	2.8	0.8	1.3	1.6	6.8	10.7	
二段	2.8~30.8	14.2~78	73.1~92	0~24.6	0~2.5	0.2~5.6	0.2~5.4	1.2~14	2.3~20.3	23
	14.5	57.8	85.9	1.7	0.8	2.1	2.4	6.6	12.4	
三段	0~40.9	12.8~95.8	77.7~99.6	0~14	0~8.8	0~13.8	0~8.8	0~19.7	0.4~21.7	34
	15.6	53.9	87	1.4	0.4	2.1	2.1	5.9	11.6	
四段	1.6~57.6	14.7~87.9	73.9~98.4	0~6.8	0~7.7	0~8.9	0~9.7	0~17.3	0.8~23.2	48
	15.0	58.8	88.8	1.3	0.7	1.9	2.1	3.8	9.8	
五段	1.7~21.2	37.2~80.9	74.6~97.7	0~8.5	0~15.1	0.3~5.4	0~4.7	0~17.7	1.5~23	19
	9.9	63.3	87.2	2.1	1.9	2	1.3	4.5	10.6	

注：C1为均质镜质体；C2为基质镜质体；V为镜质组；I为惰质组；Al为藻类体；Cu为角质体；Sp为孢子体；Re为树脂体；E为壳质组；各有机显微组分总和为100%。

表5 不同构造带煤显微组分统计表

Table 5 Maceral composition of coals from different tectonic units

构造带	C1/%	C2/%	V/%	I/%	Al/%	Cu/%	Sp/%	Re/%	E/%	数量(件)
杭州斜坡带	0.5~82.4	2.5~83.6	79.4~90.9	0~3.1	0~0.9	0.4~4.3	0.3~9.1	0~11	8.7~19.2	14
	18.6	61.0	86.4	0.7	0.2	1.5	3.3	7.1	13.0	
平湖斜坡带	0~57.6	3~95.8	64.3~99.6	0~14	0~15.1	0~13.8	0~9.7	0~19.7	0.4~33.1	115
	14.6	54.4	87.1	1.7	0.9	2.1	2.1	4.9	11.1	
黄岩构造带	0.7~38.9	35.2~84.4	73.1~93.5	0~24.6	0~11	0~6.6	0~5.4	0.4~13.8	2.3~16.6	43
	16	63.9	87.6	1.4	1.2	1.6	1.2	6.6	10.9	
嘉兴构造带	5.5~36.8	35.1~86.3	86~95.5	0~3.2	0~2	0~1	0~2.2	2.6~10.9	3.8~13.7	8
	15.3	70.7	91	0.8	70.9	0.4	1.1	5.8	8.2	
天台构造带	0~67	9.9~98.3	77.6~98.7	0~6.4	0~6.1	0~6.3	0~0.3	0~15.1	1.3~16.4	9
	22.6	63.1	90.9	2.0	1.3	1.0	0.1	3.2	7.1	

注：中央反转构造带北部的为花港组煤样

3.3 有机质热演化

西湖凹陷大量实测镜质组反射率数据表明,不

同井 Ro 随深度变化的总体趋势比较一致,表明其有机质热演化特征与埋藏深度有关。西湖凹陷以腐殖型烃源岩为主,腐殖型烃源岩大量生排烃比腐

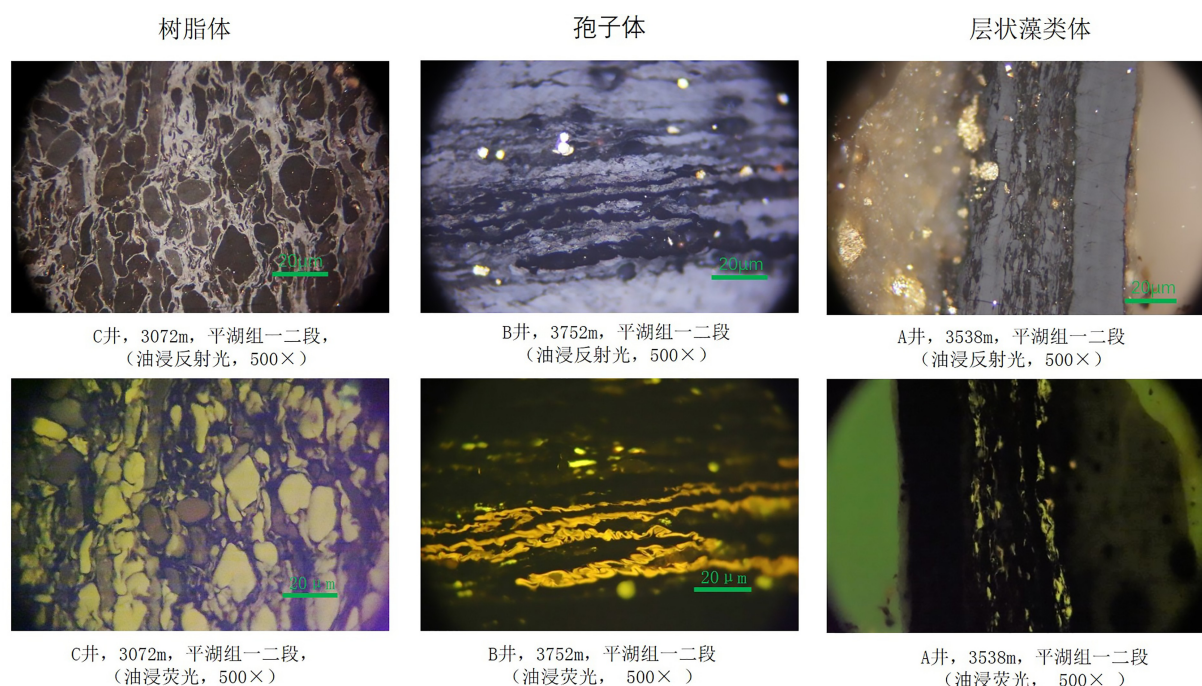


图 5 煤显微组分照片

Fig.5 Photographs showing different macerals of coals

泥型烃源岩要较滞后,其生排烃高峰 R_o 往往大于 0.7%,但西湖凹陷大量生排烃的 R_o 大约为 0.6%~0.7%,早于 R_o 值 0.7%,这于烃源岩中富含的树脂体早期生烃密切相关^[16,18]。

西部斜坡带,平湖构造带烃源岩的生烃门限较深, R_o 在 3 000 m 达到 0.5%,根据 $(S_1+S_2)/TOC$ 推断的排烃门限在 3 000 多米。杭州斜坡带 R_o 在 2 300 m 达到 0.5%,排烃门限在约 3 200 m。天台斜坡带烃源岩的数据相对较少,有限的资料显示在 2 700 m 时, R_o 达到了 0.5%,在深度为 3 500 m 时 R_o 达到了 0.7%(图 6)。

中央反转构造带相对地温梯度较高,其进入生、排烃高峰越早。嘉兴构造带烃源岩的生烃门限 R_o 达到了 0.5%,深度为 2 000 m,排烃门限在约 2 300 m。宁波构造带烃源岩生烃门限 2 000 m,排烃门限在 R_o 为 0.7%,对应埋深约 2 500 m。黄岩构造带烃源岩生烃门限 2 500 m,排烃门限在 3 000 m。天台构造带生烃门限在 2 400 m,排烃门限在 2 500 m(图 6)。

西湖凹陷地温梯度分布特征为凹陷中央地温梯度高,洼陷边缘斜坡地温梯度低^[20-22]。这决定了西部斜坡带比中央反转构造带烃源岩进入生排门限需要更大埋藏深度。而黄岩构造带是中央反转构造带地温梯度最低的位置,抬升剥蚀也是中央反转构造带最小的地方^[21-24],受其影响黄岩构造带烃源岩进入生排门限需要更大埋藏深度。

4 烃源岩分子化学特征

前人研究表明,西湖凹陷平湖组煤系烃源岩饱和烃中富含源于针叶树脂的二萜烷类生物标志物,甾烷中普遍以 C_{29} 化合物占优势($>45\%$),煤系烃源岩的 Pr/Ph 值大多分布在 3~9,这些结果反映该煤系烃源岩的成烃母质主要来源于陆源高等植物^[7-8,25]。

西湖凹陷烃源岩二萜类化合物中以降异海松烷、异海松烷和 β -扁植烷为主,它们都与树脂体来源有关,其中降异海松烷、异海松烷来源于岸上干燥针叶类裸子植物树脂体,而 β -扁植烷来源于近岸带潮湿低矮的蕨类植物树脂体^[25-27]。

平湖斜坡带北部宝云亭地区来源于蕨类植物与裸子植物的二萜含量最高,甚至高于正构烷烃含量,来源于水生生物的低碳数正构烷烃与 C_{27} 甾烷含量低,富含高等植物生源的 C_{29} 甾烷与奥利烷,表明沉积时水体相对较浅;不同层段异海松烷与 β -扁植烷含量的差异反映水体的往复变化,从平湖组五段、平湖组四段、平湖组三段水体深度逐渐变深,平湖组二段水体变浅(图 7)。

平湖斜坡带南部平湖地区二萜类化合物总体含量降低,低于正构烷烃,从平湖组四段、平湖组三段到平湖组二段,降异海松烷和异海松烷优势向 β -扁植烷优势变化反映水体变深、从平湖组二段到平

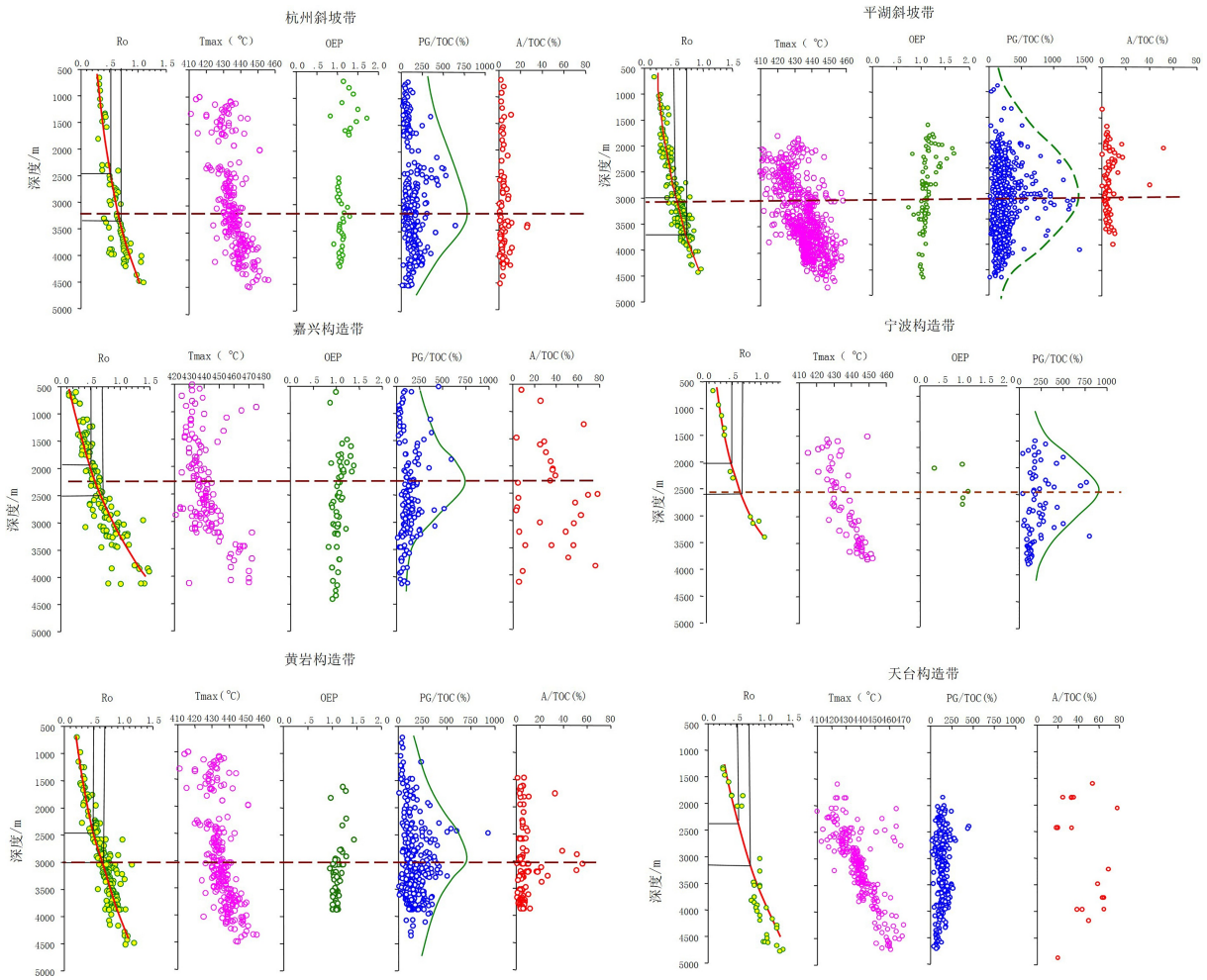


图6 不同构造带烃源岩热演化剖面

Fig.6 Thermal evolution profile of source rocks in different tectonic units

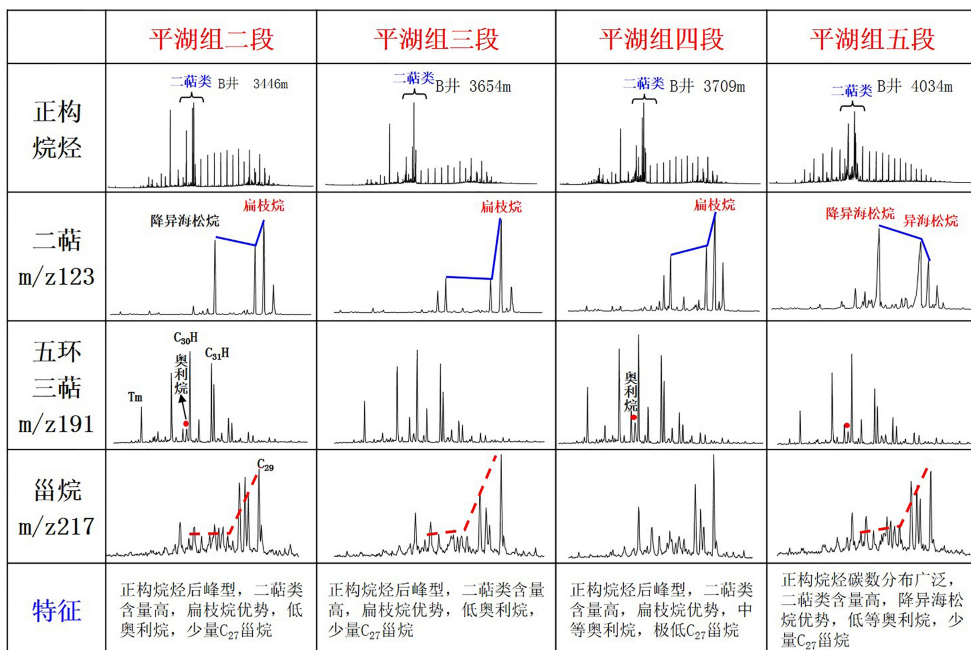


图7 平湖斜坡带北部典型井生标剖面图

Fig.7 Biomarker assemblage of Pinghu Formation in a typical well in northern Pinghu slope

湖组一段水体深度逐渐变浅(图 8)。

中央反转构造带南部二萜类化合物总体含量又更低, 表现为来源于蕨类植物的 β -扁枝烷优势, 同时来源于水生生物的低碳数正构烷烃与 C_{27} 甾烷

开始丰富, 反映中央反转构造带处于凹陷中央, 沉积水体较深的特点。不同层段异海松烷与扁枝烷含量的差异反映水体往复变化的特征(图 9)。

从同一层位不同构造带来看, 宝云亭地区正构

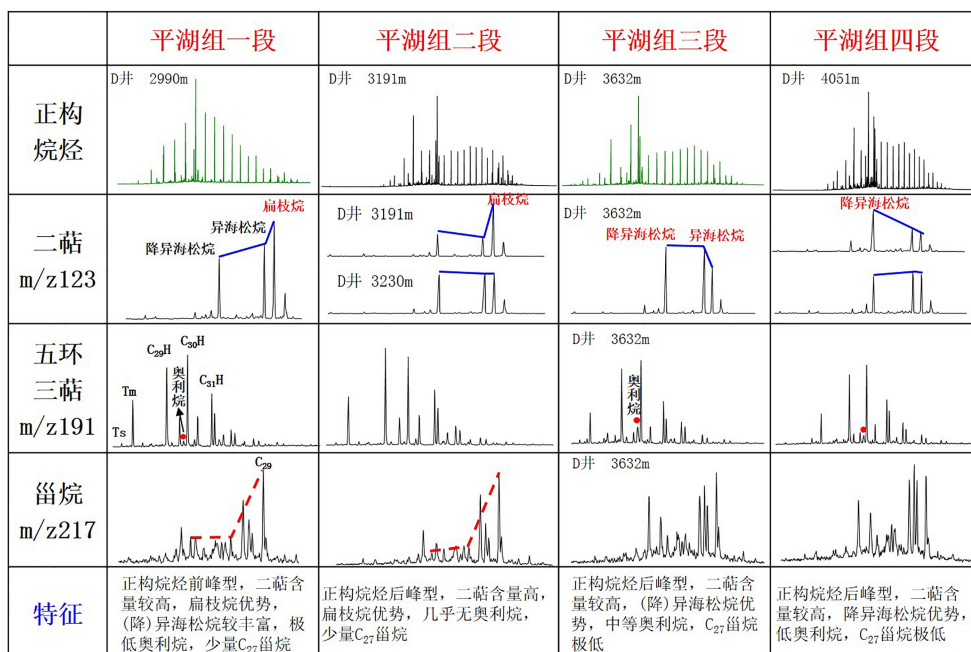


图 8 平湖斜坡带南部典型井生标剖面图

Fig.8 Biomarker assemblage of Pinghu Formation in a typical well on southern Pinghu slope

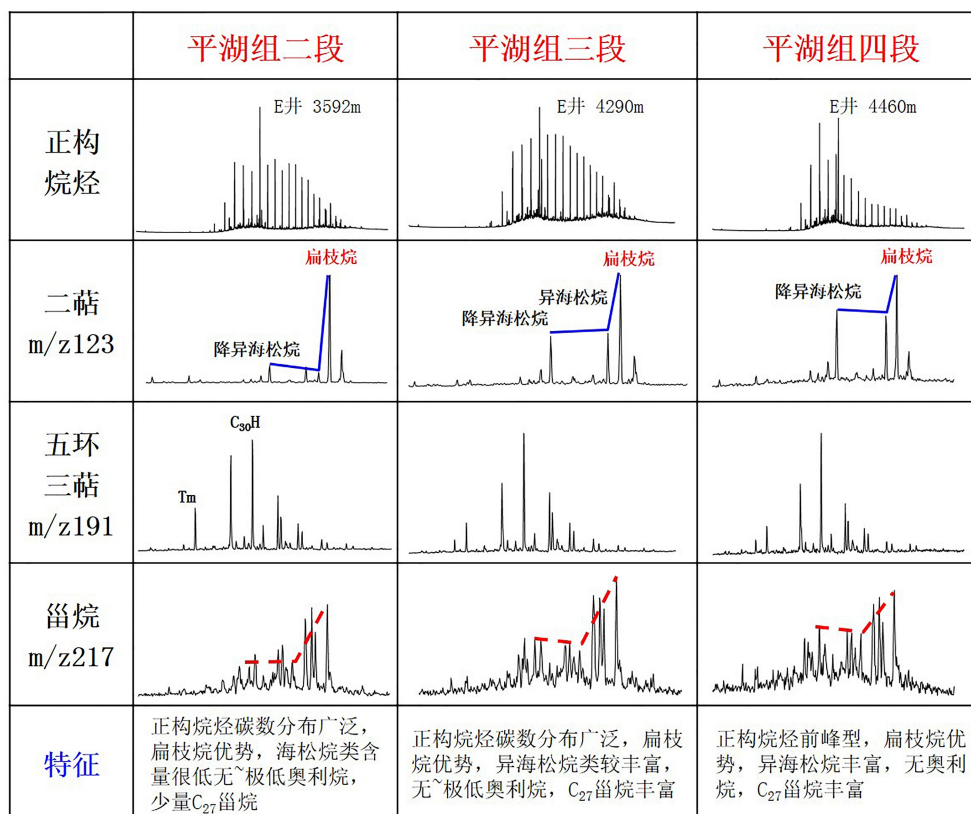


图 9 天台构造带典型井生标剖面图

Fig.9 Biomarker assemblage of Pinghu Formation in a typical well in Tiantai tectonic belt

烷烃为后峰型,降异海松烷、异海松烷含量高,反映沉积水体浅、单一高等植物来源;平湖地区正构烷烃为双峰型,降异海松烷、异海松烷含量下降,反映水体较宝云亭深,植物来源既有高等植物也有水生生物;天外天地区正构烷烃双峰型、偏前峰,降异海松烷、异海松烷含量低,β-扁植烷绝对优势,代表藻类来源的C₂₇甾烷更丰富,反映水体较深,处于远岸

带,植物来源既有高等植物也有水生生物(图10,图11)。

5 烃源岩生烃模式

依据评价烃源岩热解资料,建立西湖凹陷烃源岩综合演化剖面(图12),可以看出,油具有两个生

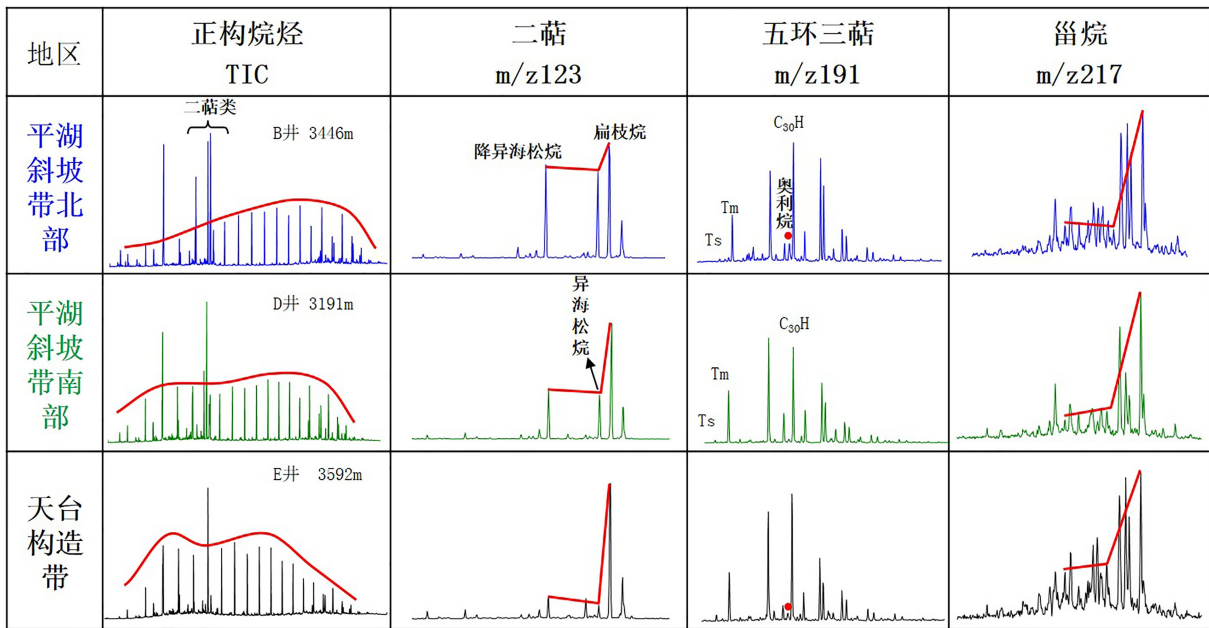


图10 不同构造带平湖组一、二段烃源岩生标对比图

Fig.10 Compositional comparison of the biomarkers in source rocks of the 1st and 2nd Member of Pinhu Formation from different tectonic units

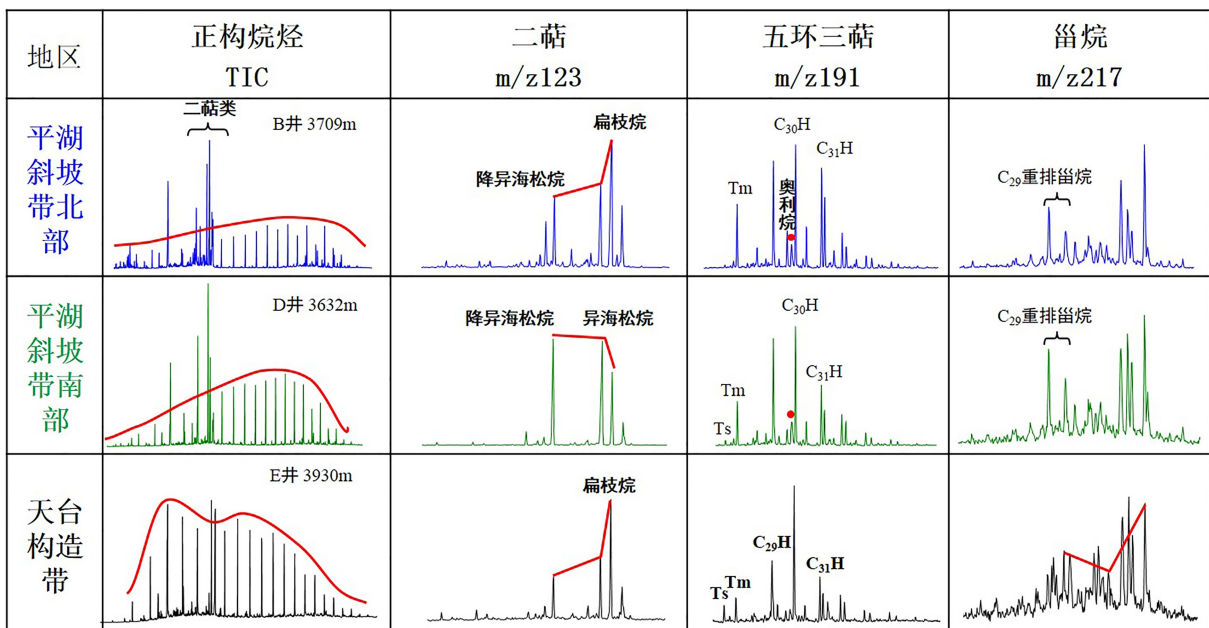


图11 平湖组三、四段烃源岩对比

Fig.11 Compositional comparison of the biomarkers in source rocks of the 3rd and 4th member of Pinhu Formation from different tectonic units

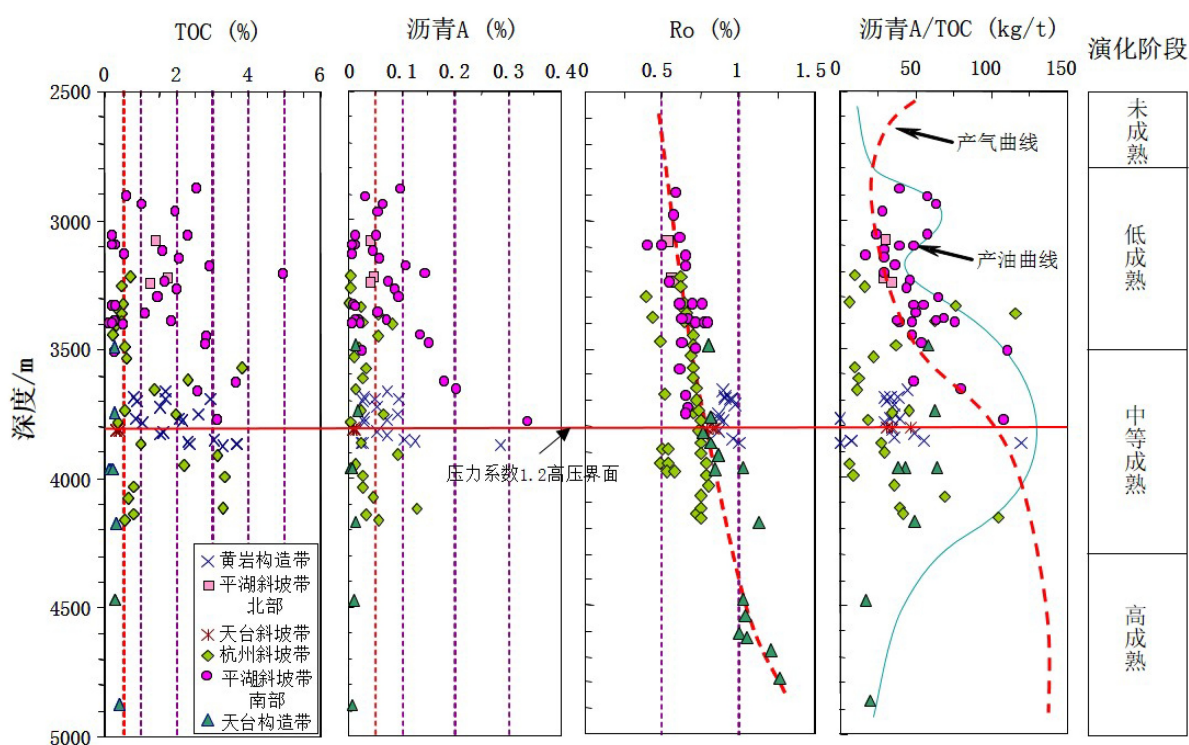


图 12 西湖凹陷烃源岩生烃演化地球化学剖面图

Fig.12 Hydrocarbon generation profile for the source rock in Pinghu Formation

油高峰,气只有一个生气高峰,并且晚期持续生气。

从西湖凹陷平湖组烃源岩生烃模拟实验来看,从泥岩和煤的产烃率曲线来看,天然气生烃高峰在 R_o 约为 1.3%,煤的生气高峰略早于泥岩,天然气晚期持续生烃,甚至 R_o 在 3.5% 之后仍然持续生烃;油的生烃高峰 R_o 约为 0.9%,煤的生油量远大于泥岩生油量, R_o 为 0.7%~1.5% 是生油的主要时期, R_o 值 0.9% 之后烃源岩生油量持续递减,由于烃源岩模拟样品的 R_o 已经达到 0.7%,树脂体早期生烃无法模拟出来(图 13)。

综合以上分析,建立了西湖凹陷泥岩生烃模式(图 14)。在 R_o 为 0.4% 时期,烃源岩进入生烃门限; R_o 约为 0.4%~0.7%,西湖凹陷烃源岩存在一个树脂体生成低熟油生成阶段,该阶段划分在低成熟阶段早期; R_o 为 0.7%~1.2%,深度为 3 500~4 500 m,液态烃开始大量生成,烃源岩进入主生油带,同时有大量的凝析气和湿气生成; R_o 达到 1.2%,烃源岩埋深接近 5 000 m,以生成湿气和干气为主,少量凝析气; R_o 大于 2.0%,烃源岩以生干气为主。

6 结论

(1) 西湖凹陷始新世平湖组烃源岩为断—坳转换期发育的一套海陆过渡相煤系烃源岩,其厚度

大,从斜坡带到洼陷中央分布广。

(2) 平湖组烃源岩丰度不同构造带存在差异,总体有机质丰度高。泥岩干酪根类型以 III 型为主,主要生气,煤为 II₂ 型干酪根,其中富含树脂体,油气兼生。热演化来看,西部斜坡带 3 500 m 烃源岩已大规模排烃,中央反转构造带 3 000 m 已大规模排烃。平湖组烃源岩树脂体早期生烃,平湖组烃源岩排烃门限等于或略早于 R_o 为 0.7% 的经典排烃门限。

(3) 平湖组烃源岩中富含树脂体,与平湖组烃源岩具有富含二萜类化合物的特征一致。远离洼陷中央的西部斜坡带表现高降异海松烷、异海松烷,反映发育高大干燥环境针叶类裸子植物特点。近洼陷中心的中央反转带表现高 β -扁植烷,反映发育低矮覆水潮湿的蕨类植物。平湖组不同层位两类化合物含量的变化反映平湖组水体往复变化的特点。

(4) 结合模拟实验结果与平湖组煤系烃源岩特征,认为平湖组烃源岩为水体往复变化频繁环境下富含树脂体的煤系烃源岩,为“早期利用生油、晚期持续生气”的生烃模式。

(5) 一方面,西部斜坡带烃源岩树脂体含量高于中央反转构造带;另一方面,依据西湖凹陷“早期利于生油、晚期持续生气”的生烃模式与烃源岩热演化分布,西部斜坡带烃源岩处于早—中期(低熟—成熟)生烃阶段,中央反转构造带烃源岩处于

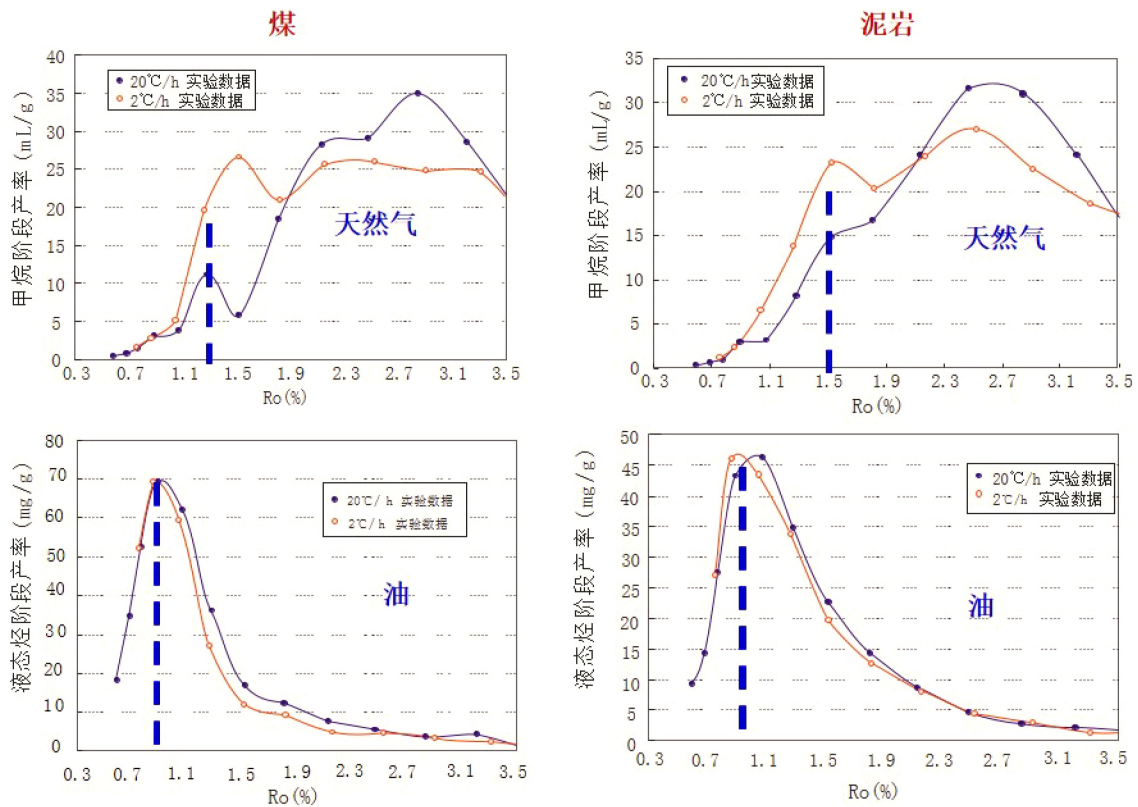


图 13 西湖凹陷平湖组煤和泥岩生烃模拟实验产烃率曲线图

Fig.13 Hydrocarbon yields of coal and mudstone of Pinghu Formation during pyrolysis experiments

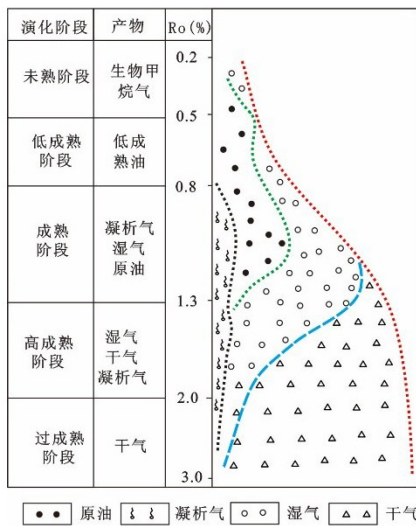


图 14 西湖凹陷平湖组烃源岩生烃模式图

Fig.14 Model of hydrocarbon generation for Pinghu source rock in the Xihu Sag

晚期(高熟—过熟)生烃阶段^[21-22]。这决定了西湖凹陷油气藏具有“东气西油”的分布格局。

参考文献 (References)

[1] 刘道燕. 东海陆架盆地烃源岩及其烃类特点[M] // 姜亮. 东海陆架

盆地油气资源勘探论文集. 北京: 石油工业出版社, 2004: 181-187.

[LIU Daoyan. Characteristics of Source Rocks and Their Hydrocarbons in East China Sea Continental Shelf Basin [M] // JIANG Liang. Proceedings of Petroleum Resources Exploration in East China Sea Shelf Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 181-187.]

[2] 蒋一鸣, 周倩羽, 李帅, 等. 西湖凹陷西部斜坡带平湖组含煤岩系沉积环境再思[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(8): 18-25. [JIANG Yiming, ZHOU Qianyu, LI Shuai, et al. Reconsideration of Pinghu Formation coal-bearing rock series sedimentary environment in western slope of Xihu Depression [J]. Coal Geology of China, 2016, 28(8): 18-25.]

[3] 熊斌辉, 王春红, 张锦伟, 等. 西湖凹陷古近系平湖组煤层分布及油气意义[J]. 海洋石油, 2007, 27(3): 27-33, 40. [XIONG Binhui, WANG Chunhong, ZHANG Jinwei, et al. The distribution and exploration implications of coal beds of Pinghu Formation, Paleogene in Xihu Sag [J]. Offshore Oil, 2007, 27(3): 27-33, 40.]

[4] 周倩羽, 沈文超, 张信, 等. 西湖凹陷古近系平湖组聚煤环境特征及模式[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(1): 105-107, 112. [ZHOU Qianyu, SHEN Wenchao, ZHANG Xin, et al. The coal-accumulating environments characteristics and coal-forming pattern of Pinghu Formation(Paleogene) in Xihu Depression [J]. Journal of Hebei University of Engineering: Natural Science Edition, 2016, 33(1): 105-107, 112.]

[5] 李贤庆, 钟宁宁, 王铁冠, 等. 东海西湖凹陷早第三纪烃源岩生烃组分剖析[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(6): 24-31. [LI Xianqing, ZHONG Ningning, WANG Tieguan, et al. The study on hydrocarbon-

- generating macerals of Lower Tertiary source rocks in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1995, 23(6): 24-31.]
- [6] 傅宁. 东海盆地西湖凹陷煤系烃源岩及凝析油中的二萜化合物[J]. *中国海上油气(地质)*, 1994, 8(1): 21-28. [FU Ning. Diterpenoid compounds in coal measures and condensates in Xihu Sag of East China Sea Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1994, 8(1): 21-28.]
- [7] 朱杨明, 周洁, 顾圣啸, 等. 西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 32-39. [ZHU Yangming, ZHOU Jie, GU Shengxiao, et al. Molecular geochemistry of Eocene Pinghu Formation coal-bearing source rocks in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 32-39.]
- [8] 陈斯忠, 宋建民, 陈伟煌. 对海上找气的思考[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(3): 153-159. [CHEN Sizhong, SONG Jianmin, CHEN Weihuang. Pondering upon offshore gas exploration in China [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17(3): 153-159.]
- [9] 周心怀, 蒋一鸣, 唐贤君. 西湖凹陷成盆背景、原型盆地演化及勘探启示[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(3): 1-10. [ZHOU Xinhui JIANG Yiming, TANG Xianjun. Tectonic setting, prototype basin evolution and exploration enlightenment Of Xihu Sag in East China Sea Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(3): 1-10.]
- [10] 叶加仁, 顾惠荣, 贾健谊. 东海西湖凹陷油气地质条件及其勘探潜力[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(4): 111-116. [YE Jiaran, GU Huirong, JIA Jianyi. Petroleum geological condition and exploration potential of Xihu Depression, East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(4): 111-116.]
- [11] 张建培, 徐发, 钟韬, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花港组层序地层模式及沉积演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1): 35-41. [ZHANG Jianpei, XU Fa, ZHONG Tao, et al. Sequence stratigraphic models and sedimentary evolution of Pinghu and Huagang Formations in Xihu Trough [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(1): 35-41.]
- [12] 杨传胜, 杨长清, 李刚, 等. 东海陆架盆地中—新生界油气勘探研究进展与前景分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(2): 136-147. [YANG Chuansheng, YANG Changqing, LI Gang, et al. Prospecting of Meso-cenozoic hydrocarbon in the East China Sea Shelf Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(2): 136-147.]
- [13] 蔡佳, 祁鹏, 宋双. 东海盆地西湖凹陷花港组下段沉积相分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(2): 56-65. [CAI Jia, QI Peng, SONG Shuang. Sedimentary facies of the lower Huagang Formation in Xihu Depression of Donghai Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(2): 56-65.]
- [14] 周心怀, 高顺莉, 高伟中, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(2): 153-164. [ZHOU Xinhui, GAO Shunli, GAO Weizhong, et al. Formation and distribution of marine-continental transitional lithologic reservoirs in Pingbei slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(2): 153-164.]
- [15] 秦兰芝, 徐志星, 刁慧, 等. 西湖凹陷烃源岩地震反演评价与预测[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2017, 37(16): 66-67, 69. [QIN Lanzhi, XU Zhixing, DIAO Hui, et al. Seismic inversion evaluation and prediction of source rocks in Xihu Sag [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2017, 37(16): 66-67, 69.]
- [16] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 低熟油气形成机理与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 175-181. [WANG Tieguan, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. Immature Oils Forming Mechanism and Distribution[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 175-181.]
- [17] 钱门辉, 侯读杰, 蒋启贵, 等. 西湖凹陷煤系烃源岩显微组分组成特征及地质意义[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(2): 182-185. [QIAN Menhui, HOU Dujie, JIANG Qigui, et al. Features and geologic significance of maceral composition of coal-bearing source rocks in Xihu Sag [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(2): 182-185.]
- [18] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 中国低熟油的几种成因机制[J]. *沉积学报*, 1997, 15(2): 75-83. [WANG Tieguan, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. Several genetic mechanisms of immature crude oils in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(2): 75-83.]
- [19] 李贤庆, 钟宁宁, 王铁冠, 等. 东海盆地西湖凹陷下第三系烃源岩显微组分组成和成烃组剖析[J]. *中国海上油气(地质)*, 1995, 9(1): 19-25. [LI Xianqing, ZHONG Ningning, WANG Tieguan, et al. The study on maceral composition and hydrocarbon-generating macerals of Lower Tertiary source rocks in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1995, 9(1): 19-25.]
- [20] 李贤庆, 钟宁宁, 熊波, 等. 西湖凹陷煤系源岩的有机质热演化研究[J]. *中国煤田地质*, 1997, 9(1): 33-36. [LI Xianqing, ZHONG Ningning, XIONG Bo, et al. A study on thermal evolution of organic matter in coal-bearing source rocks of Xihu Sag [J]. *Coal Geology of China*, 1997, 9(1): 33-36.]
- [21] 全志刚, 贺清, 何仕斌, 等. 东海西湖凹陷地温场及其对烃源岩的作用[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(5): 466-471, 484. [TONG Zhigang, HE Qing, HE Shibin, et al. Geothermal field and its effect on source rock in the Xihu Sag, the East China Sea Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(5): 466-471, 484.]
- [22] 何将启. 东海西湖凹陷构造—热历史分析[D]. 上海: 同济大学, 2004: 92. [HE Jiangqi. Tectono—thermal history of Xihu Depression, East China Sea[D]. Shanghai: Tongji University, 2004: 92.]
- [23] 刘景彦, 林畅松, 肖建新, 等. 东海西湖凹陷第三系主要不整合面的特征、剥蚀量的分布及其意义[J]. *现代地质*, 1999, 13(4): 432-438. [LIU Jingyan, LIN Changsong, XIAO Jianxin, et al. Characteristics and erosions of the major Tertiary unconformities and their significance to petroleum exploration in the Xihu Trough, the East China Sea [J]. *Geoscience*, 1999, 13(4): 432-438.]
- [24] 周祖翼, 贾健谊, 李家彪, 等. 东海西湖凹陷反转构造定量研究: 来自裂变径迹分析数据的约束[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(1): 63-67. [ZHOU Zuyi, JIA Jianyi, LI Jiabiao, et al. Quantitative study on inversion structures in Xihu Depression, East China Sea: constraints from fission track analysis data [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(1): 63-67.]
- [25] 许婷, 侯读杰, 曹冰. 东海盆地西湖凹陷凝析油和轻质油生源母质剖析[J]. *地球化学*, 2015, 44(3): 289-300. [XU Ting, HOU Dujie, CAO Bing. Study of precursors for Condensates and light oils in Xihu

- Sag of East China Sea Basin [J]. *Geochimica*, 2015, 44 (3): 289-300.]
- [26] 彼得斯 K E, 莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南——古代沉积物和石油中分子化石的解释 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 120-124. [Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 120-124.]
- [27] 侯读杰, 张林晔. 实用油气地球化学图鉴 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 146-148. [HOU Dujie, ZHANG Linye. Illustrated Handbook of Oil and Gas Geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 146-148.]