

朱茂林, 刘震, 张枝焕, 等. 西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩分布地震预测 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 170-183.

ZHU Maolin, LIU Zhen, ZHANG Zhihuan, et al. Seismic prediction of source rock distribution in the Lower Member of Pinghu Formation in the Pingbei area of Xihu Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 170-183.

西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩分布地震预测

朱茂林¹, 刘震¹, 张枝焕¹, 刘畅¹, 杨鹏程², 李佳阳¹, 崔凤珍¹

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2. 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司勘探开发研究院, 上海 200120

摘要: 西湖凹陷平北地区现有钻井稀少且分布不均, 采样分析资料缺乏, 不同层段烃源岩非均质性极强, 导致烃源岩分布特征尚不明确。针对上述难题, 基于地化、测井、录井、地震等资料, 运用地震相-沉积相-有机相转化法和地震速度-岩性分析法对西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩有机相特征及厚度分布进行了研究, 并对有利烃源岩的分布进行了预测。结果表明: ①平湖组下段烃源岩有机相可划分为潮控三角洲前缘 A 相、潮间带 B 相和局限海 C 相三种类型, 其中平下上亚段潮控三角洲前缘 A 相最为发育, 位于研究区的中部区域, 而平下下亚段潮间带 B 相最为发育, 主要位于研究区的西部区域; ②平下下亚段烃源岩具有东西分带、西薄东厚的特征, 最大厚度可达 500 余米; 而平下上亚段烃源岩总体上具有西北薄东南厚的特征, 向东南方向厚度最高可达 1000 余米; ③烃源岩综合评价分析认为, 平下下亚段有利烃源岩主要分布在研究区的中东部区域, 平下上亚段有利烃源岩主要分布在研究区的东南部区域。

关键词: 烃源岩; 地震相; 有机相; 平湖组; 地震预测; 西湖凹陷

中图分类号: P744.4, TE122.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021072901

Seismic prediction of source rock distribution in the Lower Member of Pinghu Formation in the Pingbei area of Xihu Sag

ZHU Maolin¹, LIU Zhen¹, ZHANG Zhihuan¹, LIU Chang¹, YANG Pengcheng², LI Jiayang¹, CUI Fengzhen¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China

Abstract: Drilling wells are rarely and unevenly distributed in the Pingbei area of the Xihu sag and sample analysis data are also lacking. However, the heterogeneity of source rocks is very strong in different layers, which has made it unclear the distribution pattern of source rocks. In order to solve the problem, this paper studied the characteristics of the organic facies and the thickness distribution patterns of the source rocks in the Lower Member of Pinghu Formation taking the Pingbei area as a case, based on the integration of geochemical, logging and seismic data. The method of seismic facies-sedimentary facies-organic facies transformation and the method of seismic velocity and lithology analysis are adopted for prediction of favorable source rocks. The results show that: (1) The organic facies of source rocks in the Lower Member of the Pinghu Formation can be classified into three facies types, i.e. tidal delta front A, intertidal zone B and confined sea C. The tidal delta front A facies, located in the center of the study area, is the most developed one in the Second Member of Lower Pinghu Formation, while the intertidal B facies is the most developed in the First Member of Lower Pinghu Formation, which is mainly located in the western region of the study area. (2) The thickness distribution pattern of the source rocks in the Lower Pinghu Formation are clarified. The source rocks in the Second Member of Lower Pinghu Formation are zoned from east to west, thinner in the west and thicker in the east, and the maximum thickness may be over 500 meters; while the source rocks in the First Member of Lower Pinghu Formation are generally thin in the northwest and thick in the southeast, with a maximum thickness more than 1 000 meters in the southeast; (3) The integrated evaluation and analysis of source rocks suggest that the favorable source rocks in the Second Member of Lower Pinghu Formation are mainly distributed in the southeast of the study area, and the favorable source rocks in the First Member of Lower Pinghu Formation are mainly distributed in the middle east of the study area. The research results are significant to the early prediction and evaluation of source rocks in the study area and other depressions.

Key words: source rock; seismic facies; organic facies; Pinghu Formation; seismic prediction; Xihu sag

资助项目: 中海石油(中国)东海西湖石油天然气作业公司项目“平北地区优质烃源岩生烃潜力评价”(HX20200148)

作者简介: 朱茂林(1993—), 男, 在读博士, 主要从事油气藏形成机理与分布研究, E-mail: maolin_zhu@163.com

通讯作者: 刘震(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事石油地质学基础及应用研究, E-mail: liuzhenjr@163.com

收稿日期: 2021-07-29; 改回日期: 2021-11-25. 周立君编辑

经过近 40 年的油气勘探, 东海盆地西湖凹陷平湖构造带北部和中部地区已发现丰富的油气资源, 其中主要以天然气和凝析油为主, 还有一部分轻质油^[1-4]。目前, 前人已对西湖凹陷平北地区不同层位烃源岩的类型、地球化学特征、形成环境以及空间分布特征等方面进行了研究, 取得了许多成果。如陆俊泽等^[5]研究发现西湖凹陷主要分布有宝石组、平湖组、花港组和龙井组等 4 套烃源岩, 其中平湖组煤系烃源岩为该区主力供烃层系, 岩性主要为煤、炭质泥岩和灰色—深灰色泥岩; 宋春刚等^[6]认为西湖凹陷平湖组下段烃源岩大多处于石油生成的中—高成熟阶段($R_o=1.0\% \sim 1.3\%$), 部分进入湿气生成阶段($R_o=1.3\% \sim 2.2\%$); 陆俊泽等^[5]、朱扬明等^[7]发现平湖组暗色泥岩有机碳含量的平均值为 1.03%, 生油潜量(S_1+S_2)分布较分散, 平均值为 1.86 mg/g, 有机质类型主要为 II₂—III 型, 为一般至中等烃源岩。陆俊泽等^[5]、朱扬明等^[7]、孙伯强等^[8]认为平湖组炭质泥岩和煤的 TOC 平均值分别为 12.6% 和 51.3%, 生油潜量平均值分别为 35 mg/g 和 143.3 mg/g, 有机质类型以 III 型为主。关于西湖凹陷平湖组烃源岩的成因与形成环境方面, 前人也有不同认识。刘晓晨等^[9]认为平湖组总体上沉积于海退背景下的海陆过渡相的半封闭海湾环境, 平北斜坡带平湖组沉积总体属于半封闭的海湾环境, 海陆过渡相三角洲是最主要的沉积体系类型。田杨等^[10]发现西湖凹陷平湖组沉积早期为浅海环境, 沉降速率相对较低; 中期为局限海和潟湖环境, 主要发育潮坪、河口湾与潟湖沉积体系, 沉降速率较高; 晚期为海退背景下的河流相沉积, 主要发育淡化潟湖与潮控三角洲沉积体系, 沉降速率相对减弱。而于水等^[3]认为平湖组含煤岩层系为海陆过渡沉积环境的产物, 主要沉积相为受潮汐影响的三角洲、障壁海岸潮坪—潟湖和海湾等沉积体系。有关烃源岩分布特征方面, 已有研究结果表明平湖组暗色泥岩呈凹陷中心区厚、向隆起和斜坡区以环带状减薄的趋势, 累计厚度为 200~1800 m, 煤及炭质泥岩主要分布于凹陷周缘, 具有单层厚度薄、层数多、分布广的特点, 累计厚度一般可达 30~50 m^[1, 11-14]。

可以发现, 前人对西湖凹陷平北地区烃源岩的研究更多的集中在岩性、地球化学特征及形成环境方面, 而对烃源岩的分布特征研究整体上较为薄弱。考虑到研究区钻井整体偏少, 井位分布不均, 且主要分布在构造高部位, 东部深凹区钻井稀少或未钻穿目的层, 总体取样分析资料缺乏的现状, 认为仅依靠少量样品资料对全区烃源岩进行评价往

往具有局限性; 其次, 不同层段烃源岩的非均质性强, 仅仅依靠少量的钻井和测井资料无法对工区稀井或无井区烃源岩的分布进行有效预测。

针对上述问题, 研究中首先充分调研了稀井无井区烃源岩早期预测的方法, 发现国内一些学者已尝试利用少量的钻井、测井、取芯测试资料同时结合地震资料开展烃源岩的早期评价预测, 并且取得了一定的效果^[15-20]。因此, 本文在借鉴前人研究方法的基础上, 运用地质—地震结合的思路, 结合烃源岩地球化学特征, 采用地震相—沉积相—有机相转化法、地震速度—岩性分析法预测西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩的有机相和厚度分布特征, 并对有利烃源岩的分布进行了综合预测, 以期对低勘探程度盆地的烃源岩评价和预测提供方法支持。

1 地质概况

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部的浙东拗陷内, 东邻钓鱼岛隆褶带, 西部以海礁凸起、渔山凸起为界, 是一个呈 NNE 向展布的古近系含油气凹陷, 面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。西湖凹陷构造具有“东西分带、南北分块、纵向多叠合”的特点, 由西向东可划分为西湖斜坡带、西次凹、中央反转带、东次凹及东部断阶带等次级构造单元^[21-22](图 1)。自新生代以来, 西湖凹陷主要经历了古新世—始新世的断陷期、渐新世—中新世的拗陷期、上新世以后的区域沉降 3 个阶段, 具有先断后拗的演化特征^[23-26], 沉积地层自下而上可划分为古新统, 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^[27-30](图 2)。其中平湖组与花港组是西湖凹陷现阶段油气主要发现层段, 而宝石组、平湖组被认为是凹陷内两套重要的烃源岩^[31-34]。

研究区平北地区位于西湖凹陷平湖斜坡带北部(图 1), 是西湖凹陷重要的油气聚集区。目前, 在平北地区相继发现了宝云亭、武云亭、孔雀亭和团结亭等 4 个油气田, 揭示了平北地区具有丰富的油气资源, 从油气分布特征来看, 平北地区油气主要集中分布在始新统平湖组^[4, 23]。本文重点研究层位为平北地区平湖组下段, 具体包括平湖组下段上亚段和下亚段两个层位。在综合了研究区 300 余件烃源岩样品地球化学测试数据、30 余口探井的测录井资料以及约 2000 km^2 的 3D 地震资料基础上, 开展了平湖组下段烃源岩有机相特征和烃源岩厚度分布研究。

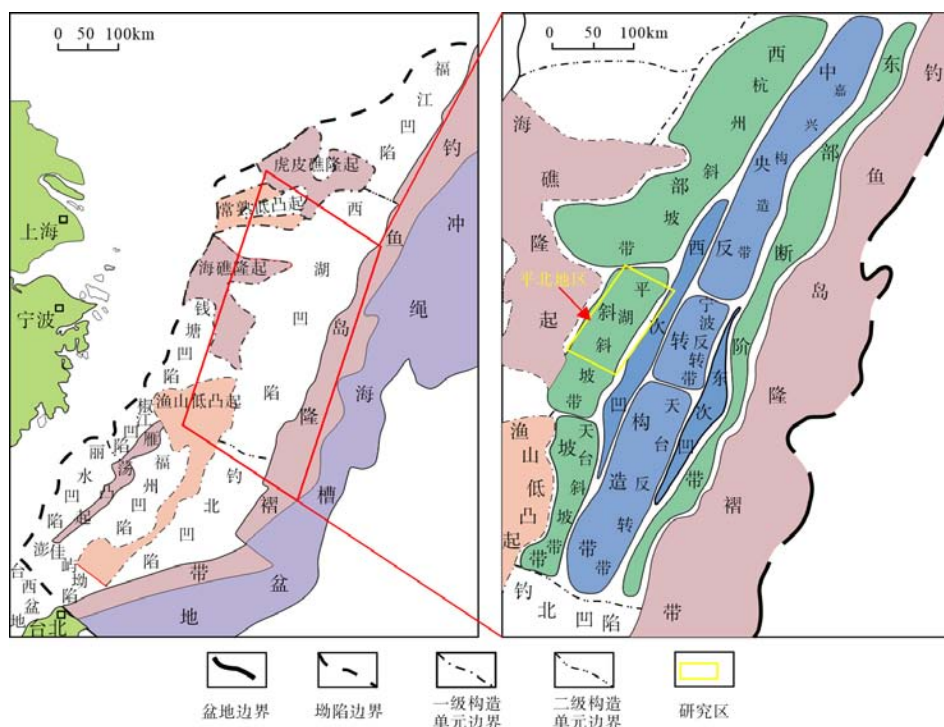


图1 研究区概况图^[22]

Fig.1 The tectonic map of the study area^[22]

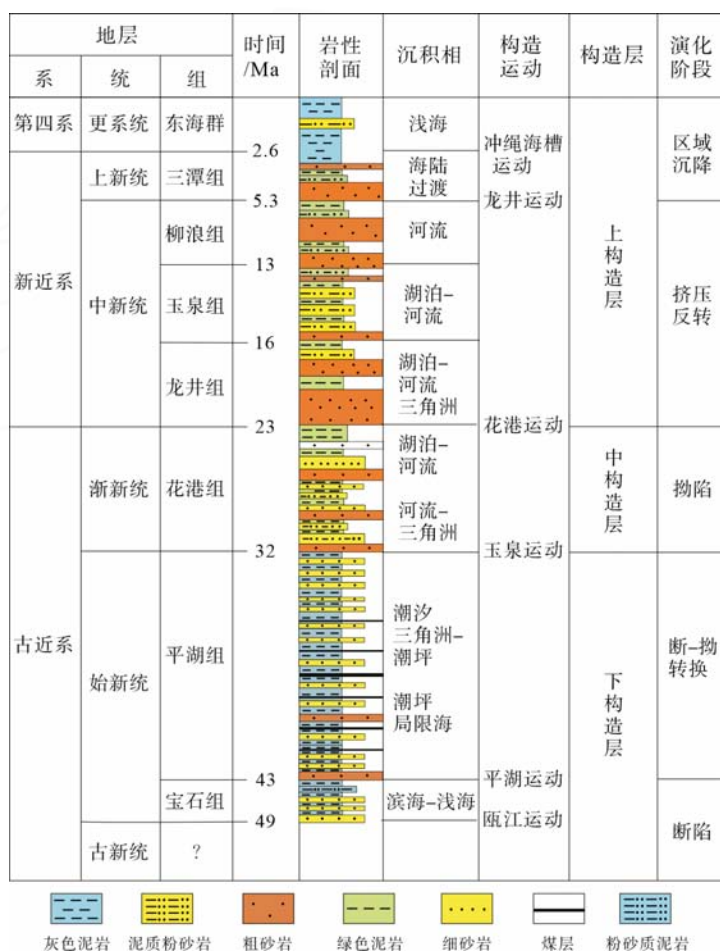


图2 研究区地层综合柱状图^[22, 27]

Fig.2 Integrated stratigraphic column in the study area^[22, 27]

2 地震相-沉积相-有机相转化法预测 烃源岩有机相

有机相是近十余年来在海洋学、沉积学、微生物学、有机地球化学和有机岩石学等学科的基础上发展起来的有机地层学概念。其研究主要包括有机质类型及来源环境, 它将沉积相、生物相和地球化学结合起来, 能够很好地反映有机质的空间分布及成因联系。此外, 有机相研究的基础资料可以源自多种学科的研究成果, 这就使得在资料较少的情况下也可以进行有机相研究。目前, 国内外学者已从不同的角度提出了有机相划分的方法和标准^[35-37], 建立了陆相烃源岩沉积有机相和海相碳酸盐岩烃源岩沉积有机相的识别方案^[38-40], 在油气勘探中发挥了重要的作用。

本文主要依据西湖凹陷平北地区有限的地球化学资料, 将烃源岩有机相类型引入到研究工区, 通过沉积相这个过渡环节, 运用地震相转沉积相再转有机相的方法对研究区的烃源岩有机相进行预测。此种方法不仅弥补了工区内仅依靠数量稀少的有机地球化学资料统计结果开展油气资源评价的不足, 另外还可以更为有效地预测评价三维空间中烃源岩的质量和分布情况。

2.1 烃源岩地球化学特征

对研究区多口探井的录井资料进行了分析, 发现西湖凹陷平湖斜坡带分布有泥岩、炭质泥岩和煤三类烃源岩。在此基础上对平湖组下段(上亚段和下亚段)300余件烃源岩样品的地球化学特征进行了研究, 结果表明, 平湖组平下上亚段泥岩的总有机碳含量(TOC)为 0.01%~5.45%, 平均值为 1.01%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 0.1~23 mg/g, 平均值为 2.2 mg/g, 泥岩有机质类型主要以 II₂-III 型为主; 炭质泥岩大部分为差—中等烃源岩, 总有机碳含量(TOC)为 6.7%~14%, 平均值为 10.1%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 9.6~69 mg/g, 平均值为 34 mg/g, 炭质泥岩有机质类型主要以 II₁-II₂ 型为主; 煤的总有机碳含量(TOC)为 26%~70%, 平均值为 43.8%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 38~240 mg/g, 平均值为 116.8 mg/g, 其有机质类型主要以 II₁-II₂ 型为主; 而平湖组平下下亚段不同岩性烃源岩的地球化学特征与平下上亚段存在差异, 平下下亚段泥岩的总有机碳含量(TOC)为 0.01%~5.86%, 平均值为 0.96%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 0.1~14 mg/g, 平均值为 1.96 mg/g, 有机质类型主要以 II₂-III 型为主; 炭质泥岩质量非均质性较大, 非、差和好烃源岩均有分布, 总有机碳含量(TOC)为 3.4%~35%, 均值为 13.2%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 5.5~75 mg/g, 平均值为 39.9 mg/g, 有机质类型主要以 II₁-II₂ 型为主; 煤的总有机碳含量(TOC)为 19%~65%, 平均值为 42.6%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 65~200 mg/g, 平均值为 143.7 mg/g, 有机质类型主要以 II₂-III 型为主(表 1)。从烃源岩热解生烃潜量和总有机碳含量角度看, 煤层的生烃能力最好, 炭质泥岩次之, 而暗色泥岩最差。从烃源岩分布层位来看, 平下下亚段烃源岩地球化学特征总体上较平下上亚段好, 生烃潜力更大。

机碳含量(TOC)为 0.01%~5.45%, 平均值为 1.01%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 0.1~23 mg/g, 平均值为 2.2 mg/g, 泥岩有机质类型主要以 II₂-III 型为主; 炭质泥岩大部分为差—中等烃源岩, 总有机碳含量(TOC)为 6.7%~14%, 平均值为 10.1%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 9.6~69 mg/g, 平均值为 34 mg/g, 炭质泥岩有机质类型主要以 II₁-II₂ 型为主; 煤的总有机碳含量(TOC)为 26%~70%, 平均值为 43.8%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 38~240 mg/g, 平均值为 116.8 mg/g, 其有机质类型主要以 II₁-II₂ 型为主; 而平湖组平下下亚段不同岩性烃源岩的地球化学特征与平下上亚段存在差异, 平下下亚段泥岩的总有机碳含量(TOC)为 0.01%~5.86%, 平均值为 0.96%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 0.1~14 mg/g, 平均值为 1.96 mg/g, 有机质类型主要以 II₂-III 型为主; 炭质泥岩质量非均质性较大, 非、差和好烃源岩均有分布, 总有机碳含量(TOC)为 3.4%~35%, 均值为 13.2%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 5.5~75 mg/g, 平均值为 39.9 mg/g, 有机质类型主要以 II₁-II₂ 型为主; 煤的总有机碳含量(TOC)为 19%~65%, 平均值为 42.6%, 热解生烃潜量(S_1+S_2)为 65~200 mg/g, 平均值为 143.7 mg/g, 有机质类型主要以 II₂-III 型为主(表 1)。从烃源岩热解生烃潜量和总有机碳含量角度看, 煤层的生烃能力最好, 炭质泥岩次之, 而暗色泥岩最差。从烃源岩分布层位来看, 平下下亚段烃源岩地球化学特征总体上较平下上亚段好, 生烃潜力更大。

2.2 烃源岩地震相类型与分布

进行地震相研究的关键就是建立工区骨架地震相, 寻找易于识别、反射特征清晰的典型地震相。建立骨架地震相后, 再对一般地震相进行识

表 1 西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩特征

Table 1 Characteristics of source rocks in the Lower Member of Pinghu Formation in Pingbei area, Xihu sag

层位	统计值	泥岩		炭质泥岩		煤	
		TOC/%	S_1+S_2 /(mg/g)	TOC/%	S_1+S_2 /(mg/g)	TOC/%	S_1+S_2 /(mg/g)
平下上亚段	最小值	0.01	0.1	6.7	9.6	26	38
	最大值	5.45	23	14	69	70	240
	平均值	1.01	2.2	10.1	34	43.8	116.8
	样本数	145	145	4	4	9	9
平下下亚段	最小值	0.01	0.1	3.4	5.5	19	65
	最大值	5.86	14	35	75	65	200
	平均值	0.96	1.96	13.2	39.9	42.6	143.7
	样本数	143	143	10	10	11	11

别,从而确定地震相平面分布特征。需要指出的是,在地震相分析的过程中,应该严格遵循能量匹配原则、沉积体系匹配原则、沉积演化史匹配原则,从而确定地震相代表的沉积相类型。

2.2.1 地震相类型

通过对西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩地震相进行识别,认为平湖组下段烃源岩主要发育低频强振幅相、低频中振幅相、中频中振幅—中振幅波状相、变振幅低连续相四种类型。

(1) 低频强振幅相

低频强振幅相主要表现为地震反射同相轴较粗、振幅能量较强(图3a),代表一种低能稳定的沉积环境,连续性较差。一般代表局限海湾、滨岸沼泽、泥坪的富含泥岩的沉积环境,发育的规模相对有限。

(2) 低频中振幅相

该种地震相表现为地震反射同相轴的频率很低,同相轴很粗,数量较少,地震同相轴的振幅能量中等(图3b)。该种地震相的发育总体上是一种相对低能环境的产物,一般代表了潟湖、局限海湾沉积环境。

(3) 中频中振幅—中振幅波状相

中频中振幅—中振幅波状相采用主测线和联络测线综合命名法,该种地震相表现为地震反射同相轴的频率明显提高,同相轴较细,数量较多,地震同相轴的振幅能量中等,同相轴的形态主要表现为波状,受潮汐波浪的改造作用明显(图3c)。该种地震相的发育是一种相对高能环境的产物,一般代表了潮坪沉积环境。

(4) 变振幅低连续相

变振幅低连续相最典型的特征为地震反射同相轴振幅能量有强有弱,能量不均一,存在强—中振幅反射和弱振幅反射共存的现象,其中弱振幅反射的同相轴连续性比较低,而强—中振幅反射的同相轴连续性相对较好(图3d)。该种地震相的反射特征表明其沉积环境在发生变化,整体处于一种不稳定的沉积体系。主要代表了潮控三角洲前缘沉积,是砂岩和泥岩沉积相互作用的结果。

2.2.2 地震相分布

地震相分布特征研究对于工区沉积相预测、烃源岩分布评价和储层预测等石油地质条件分析具有重要意义。基于此,研究中对平湖组下段烃源岩地震相的平面分布进行了预测。

平湖组平下下亚段中频中振幅—中振幅波状相主要分布在研究区的西部地区,东西向展布的范围较宽,为平湖组平下下亚段最发育的相类型;低频中振幅相主要发育在研究区的东部,东西向展布较宽,南北呈明显的带状特征,为平湖组平下下亚段第二发育的相类型;变振幅低连续地震相主要分布在研究区的中部区域,东西向展布较窄,南北向条带状展布特征明显;低频强振幅相主要在研究区北部局部地区发育,发育的范围较小(图4a)。

平湖组平下上亚段中频中振幅—中振幅波状相、变振幅低连续相和低频中振幅相为主要地震相类型,分布面积广泛。变振幅低连续地震相主要分布在研究区的中部区域,东西向展布较宽,南北向条带状展布特征明显,为平湖组平下上亚段面积最大的一种相类型;中频中振幅—中振幅波状相主要分

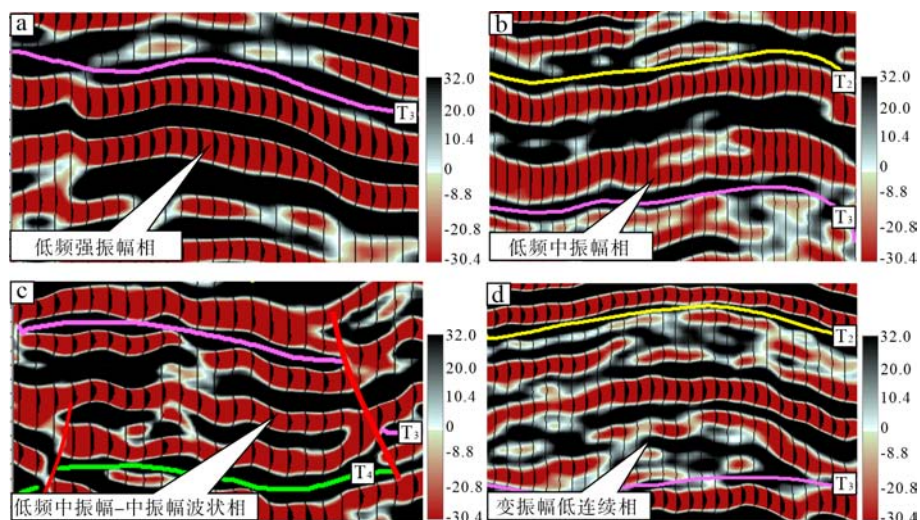


图3 西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩地震相类型

Fig.3 Seismic facies types of source rocks in the Lower Member of Pinghu Formation in Pingbei area of Xihu sag

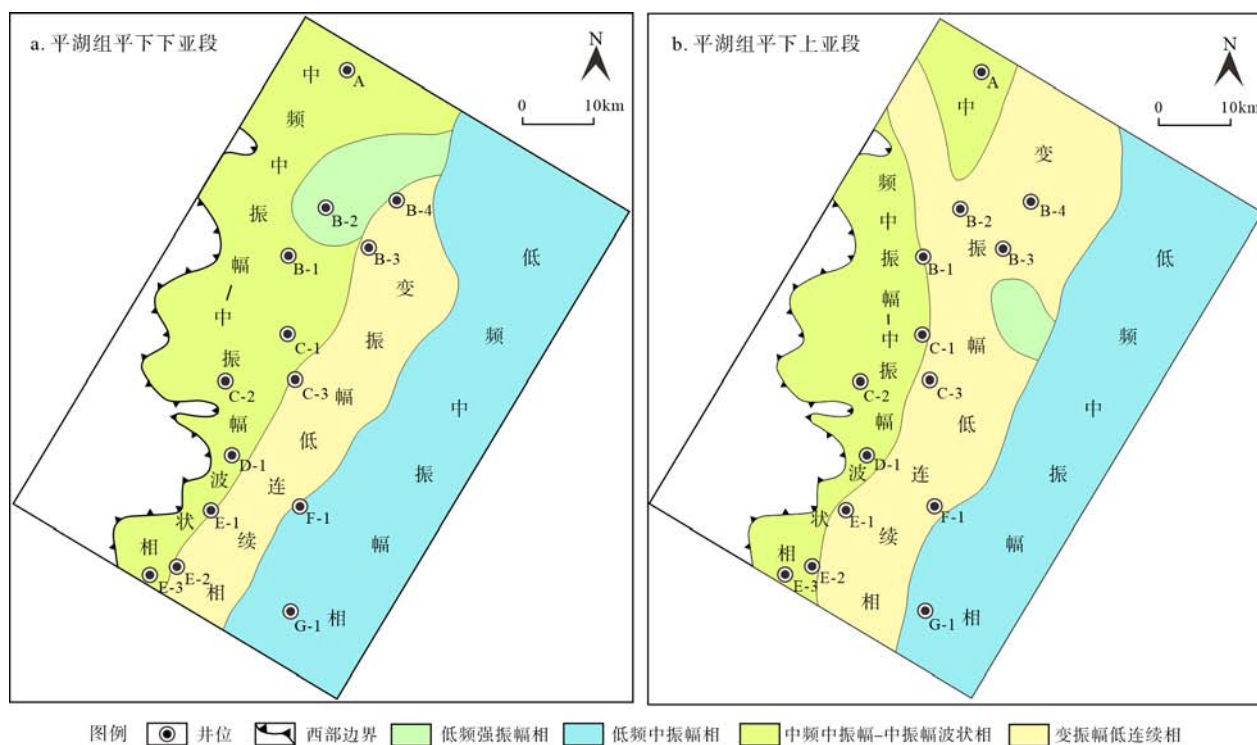


图 4 西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩地震相平面分布图

Fig.4 Distribution of seismic facies of source rocks in the Lower Member of Pinghu Formation in Pingbei area of Xihu sag

布在研究区的西部地区, 东西向展布较宽, 为平湖组平下上亚段较为发育的相类型; 低频中振幅相主要发育在研究区的东部, 东西向展布较宽, 南北呈明显的带状特征; 而低频强振幅相在该目的层段发育局限, 分布面积较小, 仅在研究区的中部发育(图 4b)。

2.3 烃源岩地震相与沉积相对应关系

研究区平湖组沉积环境属于海陆过渡相沉积, 主要发育潮坪、潮控三角洲、海湾等^[14, 41-44], 在前人研究的基础上, 结合工区单井沉积相划分结果, 进行了地震相与单井沉积相标定(图 5), 建立了地震相与沉积相对应关系模式(表 2)。从表 2 中可以发现, 沉积相与地震相并不完全一一对应, 存在一种沉积环境对应多种地震相的现象。低频强振幅相和中频中振幅—中振幅波状相都对应着潮间带, 而变振幅低连续相对应潮控三角洲前缘沉积, 低频中振幅相则对应局限海沉积。在此基础上, 总结出研究区平湖组下段烃源岩的沉积分布特征。

2.4 烃源岩有机相划分与分布

沉积环境决定烃源岩的类型和分布规律, 不同沉积环境往往形成不同的有机相类型。综合利用研究区 15 口井地化分析检验报告和单井沉积相解释成果, 以沉积环境、总有机碳含量、干酪根类型、

生烃潜力、氢指数和对应的主要产物 6 个参数作为有机相划分标准, 对西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩沉积有机相的类型进行了划分。

2.4.1 烃源岩有机相划分

表 3 所示为西湖凹陷平北地区平湖组平下下亚段和平下上亚段有机相类型划分方案。从表 3 中可以发现, 平湖组平下段发育 3 种有机相类型, 分别为潮控三角洲前缘 A 相、潮间带 B 相和局限海 C 相。其中局限海 C 相主要发育厚层的暗色泥岩, 夹薄层煤层, 有机质丰度及生烃潜力较高, 同时, 由于水体相对较深, 泥岩水动力作用弱, 为有机质保存提供了良好的条件; 潮间带 B 相有机质丰度及生烃潜力较好, 主要发育暗色泥岩, 薄煤层和薄层粉砂岩, 这里水动力作用有增强的趋势, 开始发育薄层的粉砂岩, 潮控三角洲前缘 A 相砂体较发育, 表现为厚层砂岩和泥岩互层, 这里水动力较强, 有机质保存条件较差, 导致有机质丰度和生烃潜力差异性很大, 不利于烃源岩的形成。

2.4.2 烃源岩有机相分布

在有机相类型划分的基础上, 笔者运用地震相转沉积相再转有机相的方法对平湖组平下下亚段和平下上亚段烃源岩有机相的分布特征进行了研究。图 6a 表明平下下亚段潮间带 B 相最为发育, 主要分布在西部斜坡带, 南北向条带状分布特征明

表 2 西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩地震相与沉积相对应关系

Table 2 Correlations between seismic facies and sedimentary facies of source rocks in the Lower Member of Pinghu Formation in Pingbei area, Xihu sag

层段	沉积相类型	地震反射特征
平下上亚段	潮间带	低频强振幅反射 中频中振幅—中振幅波状反射
	潮控三角洲前缘	变振幅低连续反射
	局限海	低频中振幅反射
平下下亚段	潮间带	低频强振幅反射 中频中振幅—中振幅波状反射
	潮控三角洲前缘	变振幅低连续反射
	局限海	低频中振幅反射

部位置则主要发育局限海 C 相。显然, 沉积环境对有机相的控制作用非常明显, 综合考虑, 认为平下上亚段优势有机相为局限海 C 相和潮间带 B 相。

3 地震速度-岩性分析法预测烃源岩厚度

目前, 烃源岩厚度预测方法, 主要包括钻井采样计算和地震资料预测两种。钻井采样计算是直接统计已钻遇井中烃源岩层厚度, 该方法精度最

高, 但是需要大量的实测钻井资料。利用地球物理方法实现烃源岩厚度预测, 一般情况下, 已知某层段的地层厚度, 求解烃源岩厚度的问题即转化为求解泥岩含量的问题, 常用的有三种: 第一种是基于地震波阻抗反演分析, 预测烃源岩厚度^[47-49]; 第二种是基于特定的地震属性参数提取烃源岩厚度信息^[50-54]; 第三种是基于测井声波速度和地震速度进行烃源岩厚度预测^[55-58]。

西湖凹陷平北地区大部分区域处于油气勘探的早期阶段, 仅在部分区域钻遇了少量钻井, 利用这些钻测井或取心资料无法了解全区烃源岩厚度情况。同时这些钻井都分布于平湖斜坡中高带, 统计其泥岩厚度显然不能代表深凹区的烃源岩质量。但研究区已经实现了三维地震全覆盖, 地震速度资料也比较齐全, 由于不同岩性介质中地震波的传播速度不同, 因此可以依据地层的层速度确定砂泥岩地层的岩性组成, 从而求取地层砂、泥岩指数, 进而计算泥岩总厚度。基于此, 研究中采用地震速度-岩性分析法预测烃源岩厚度, 虽然分辨率低于钻(测)井统计厚度方法, 但是该方法预测烃源岩厚度还是能够满足少井和无井等低勘探情况下的烃源岩评价。

3.1 制作压实模型

研究中选取了 11 口单井的声波时差数据制作

表 3 西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩有机相划分

Table 3 Organic facies division for source rocks in the Lower Member of Pinghu Formation in Pingbei area, Xihu sag

有机相	A相	B相	C相
沉积相	潮控三角洲前缘	潮间带	局限海
TOC/%	<u>1.2~3.43</u> 2.32(2)	<u>0.11~64.99</u> 20.13(26)	2~4
干酪根类型	II ₁ -II ₂	II ₂ -III	II ₂ -III
S ₁ +S ₂ (mg/g)	<u>1.83~5.57</u> 3.7(2)	<u>0.29~190.56</u> 122.59(25)	<u>9.8~139.18</u> 73.99
HI/(mg/g)	<u>143.81~147.07</u> 145.4(2)	<u>61.09~290.34</u> 158.3(15)	150~250
主要产物	油、气混合	油、气混合	油、气混合
沉积相	潮控三角洲前缘	潮间带	局限海
TOC/%	<u>0.44~60.98</u> 12.78(8)	<u>0.06~39.74</u> 13.23 (29)	2~4
干酪根类型	II ₂ -III	II ₂ -III	II ₂ -III
S ₁ +S ₂ (mg/g)	<u>0.59~235.73</u> 36.73(8)	<u>0.12~93.75</u> 35.82(27)	<u>9.8~139.18</u> 73.99
HI/(mg/g)	<u>82.58~355.84</u> 165.58(8)	<u>30.59~395.75</u> 167.52(18)	150~250
主要产物	油、气混合	油、气混合	油、气混合

注: C相(局限海)有机地化参数来源于文献[3, 45-46], 表中横线下方数据为平均值和样品数量。

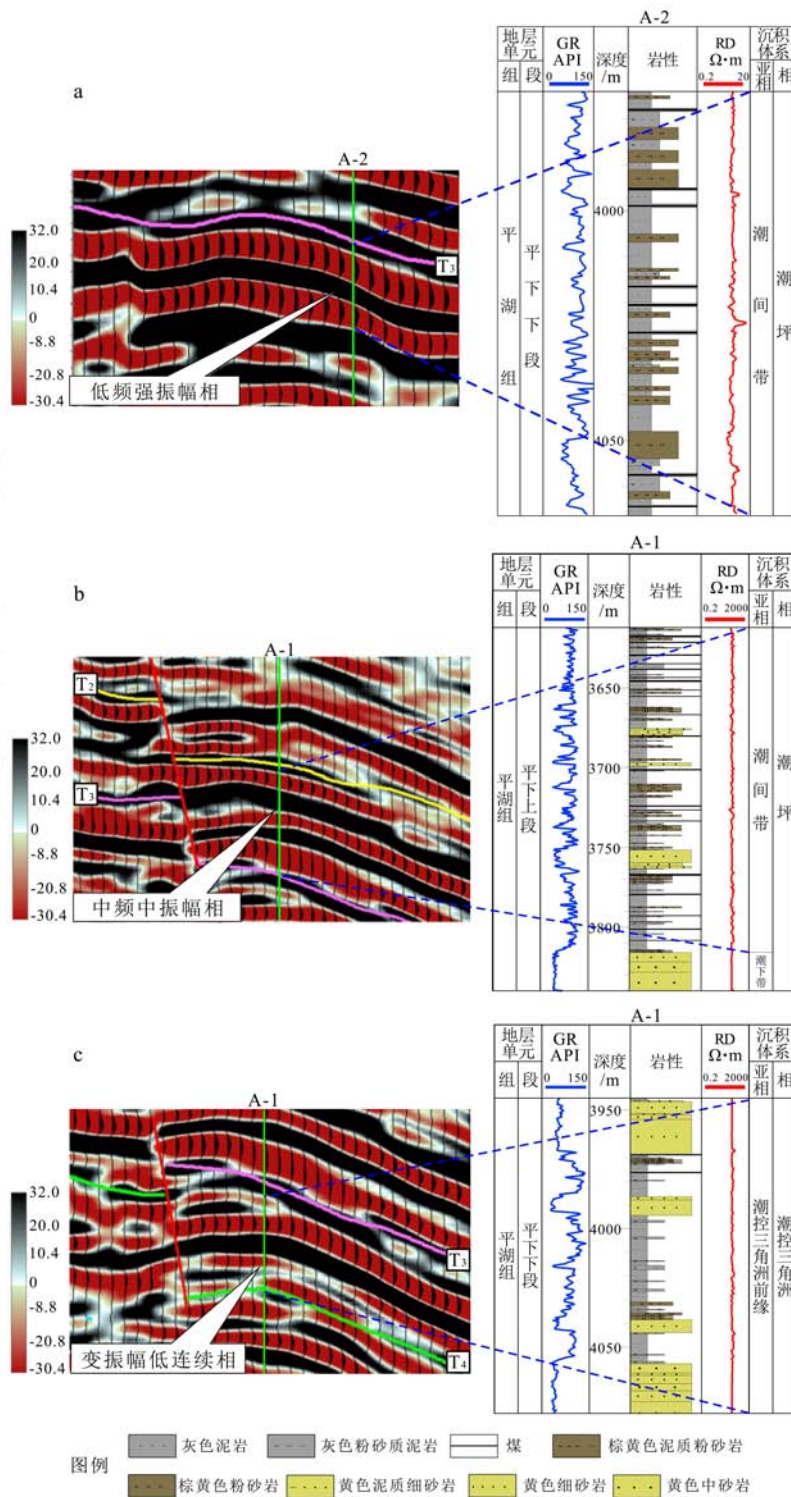


图5 西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩地震相与单井沉积相标定

Fig.5 Calibration of seismic facies and single well sedimentary facies of source rocks in the Lower Member of Pinghu Formation in Pingbei area, Xihu sag

显,是暗色泥岩发育的主要环境,夹薄层煤层和砂岩,潮控三角洲前缘A相主要分布在中部位置,这里砂岩较发育,主要表现为厚层砂岩与泥岩互层;局限海C相则主要分布在东部区域,位于构造深凹部位,这里水体较深,泥岩层厚度较大,综合考虑有

机相的分布范围和质量,认为平下下亚段沉积时期局限海C相和潮间带B相为优势有机相;图6b显示平下上亚段沉积时期潮控三角洲前缘A相和潮间带B相分布面积相当,三角洲前缘A相主要发育在中部位置,潮间带B相则分布在西部位置,东

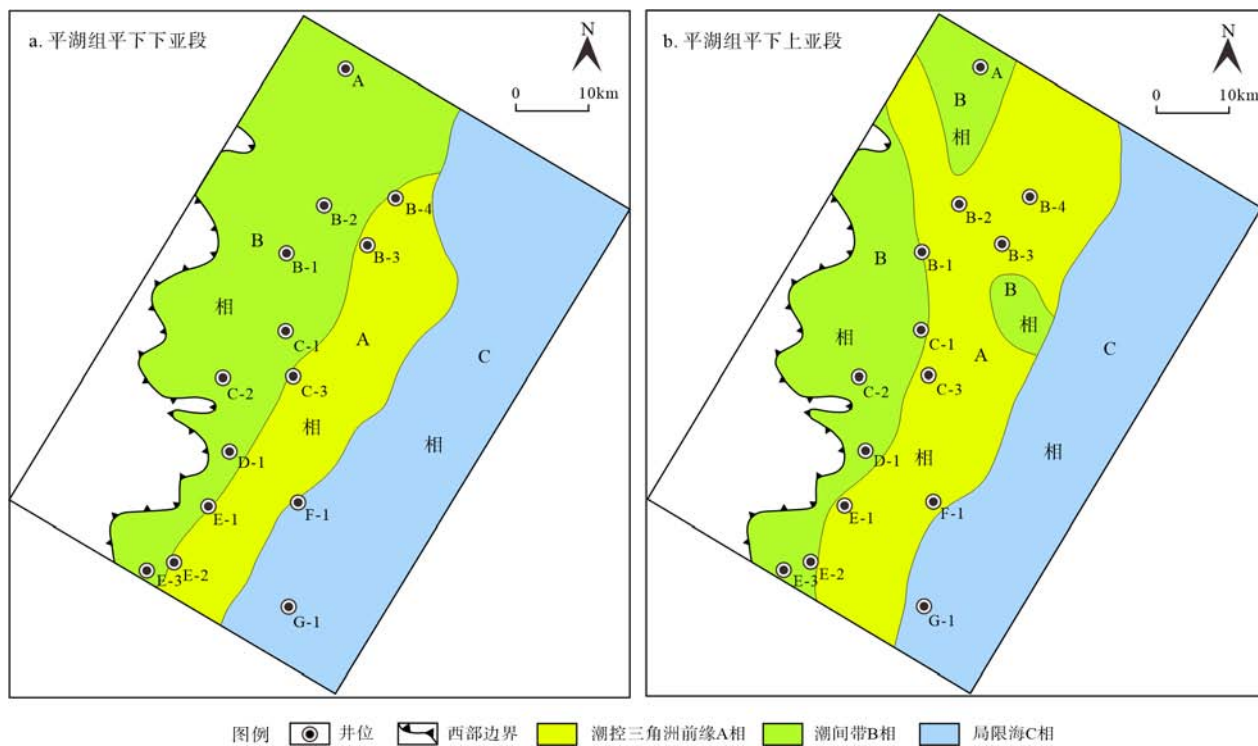


图6 西湖凹陷平北地区平湖组下段烃源岩有机相平面分布图

Fig.6 Distribution of organic facies of source rocks in the Lower Member of Pinghu Formation in Pingbei area of Xihu sag

砂泥岩压实模型, 分别得到纯砂岩和纯泥岩的速度-深度关系(图7), 从图中可以发现, 绿色曲线代表纯砂岩的速度-深度关系, 而红色曲线则表示纯泥岩的速度-深度关系。在此研究的基础上进行地震速度-岩性分析。

3.2 地震层速度计算

地震资料处理获得的速度数据属于叠加速度, 不可直接用于泥岩厚度的计算。研究中首先将获取的叠加速度转化为均方根速度, 再将求取的均方根速度通过Dix公式转化为层速度数据, 进而利用层速度数据对泥岩厚度进行计算。需要指出的是, 在叠加速度转化为均方根速度的过程中, 受地层产状的影响, 均方根速度与叠加速度往往不相等, 需要对地震速度谱提供的叠加速度进行校正, 从而求取均方根速度。

3.3 泥岩指数求取

时间平均方程中, 砂泥岩地层的层速度与泥岩相对含量以及纯砂岩和纯泥岩的速度之间存在函数关系。因此, 在已求得纯砂岩和纯泥岩声波时差压实模型及目的层层速度的前提下, 对于地下给定的任一深度点, 就可以根据时间平均方程求得相应的泥岩百分含量。

3.4 泥岩厚度计算

目的层段中泥岩的总厚度由目的层段的地层总厚度乘以该层段的泥岩指数获得, 其中目的层段地层总厚度由时深关系转化而来, 利用上述关系求取研究区平下段泥岩总厚度。图8为平湖组下段泥岩厚度分布图。

平下下亚段泥岩层厚度具有东西分带、西薄东厚特征。在西部区域, 泥岩厚度总体上在150 m以下, 仅局部地区厚度超过200 m。沿东部方向, 泥岩厚度逐渐增加, 在东部深凹区, 预测泥岩厚度最高达500余米(图8a)。结合平下下亚段沉积环境和构造特征, 发现东部深凹带主要发育局限海沉积, 这里一方面位于构造低部位, 具备厚层沉积物沉积的地质条件, 另一方面, 该位置紧邻潮控三角洲前缘, 可以接收陆源碎屑物沉积, 是很好的泥岩发育位置, 而在中西部位置, 主要发育潮间带和潮控三角洲前缘沉积, 砂岩的含量相对增加, 泥质含量有所下降, 同时由于处于构造的高部位, 地层的总厚度相比凹陷区也明显减薄, 从而导致泥岩层的总厚度相对较薄。

平下上亚段泥岩层厚度总体上具有西北薄东南厚的特征。在西北区域, 泥岩层的平均厚度大约在80 m以下, 向东南方向, 随着构造埋深的增加,

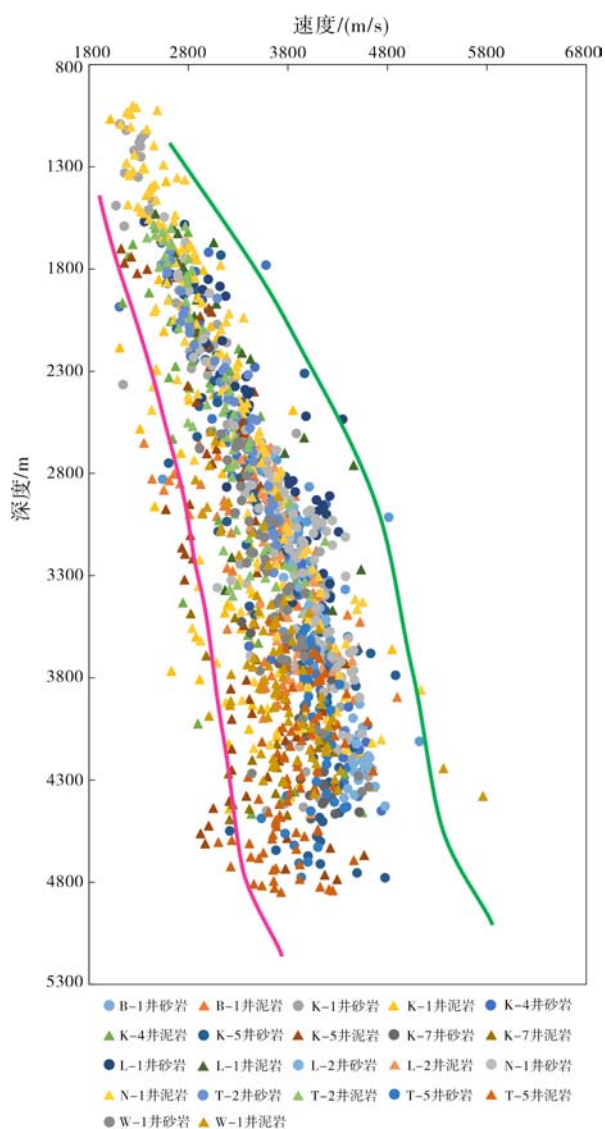


图 7 西湖凹陷平北地区砂泥岩压实模型

Fig.7 Compaction model of mud and sand in Pingbei area of Xihu Sag

泥岩层的厚度也随着增大,在东南部位置,泥岩层预测厚度最高达到 1000 余米(图 8b)。综合分析平下上亚段沉积环境,发现东部厚层泥岩沉积环境主要对应局限海沉积,这里水体较深,水动力条件较弱,适合泥岩层的沉积,而中西部位置,潮控三角洲前缘和潮坪环境发育,砂岩厚度有所增加,导致泥质含量下降,泥岩厚度有所降低,具有沉积物源从西北向东南推进的特征。

4 有利烃源岩综合预测

为了能更全面地预测烃源岩的空间分布特征,研究中往往需要对表征烃源岩特征的各种参数进行综合分析。郝芳^[59]认为烃源岩评价需要有有机

质丰度、有机质类型和有机质成熟度多种指标的相互配合。本文在综合分析烃源岩地球化学特征、厚度和有机相分布特征的基础上,对西湖凹陷平北地区平湖组下段有利烃源岩的分布进行了预测。

研究区烃源岩的分布直接受到构造和沉积作用的影响。一方面,构造沉降直接影响沉积可容纳空间变化,是影响烃源岩发育的先决条件;另一方面,沉积环境直接影响烃源岩的类型和有机质的丰度。在上述研究的基础上,对西湖凹陷平北地区平湖组平下上亚段有利烃源岩分布进行了预测,认为平湖组平下上亚段有利烃源岩主要分布在研究区东南部区域,该位置处于构造深凹带,沉积水体相对较深,岩性主要为暗色泥岩,煤层厚度较薄。从烃源岩厚度分布来看,预测厚度最大可达 1000 余米;从有机相类型看,主要发育局限海 C 相,水动力条件较弱,同时紧邻斜坡带汇入的陆源沉积有机质,为烃源岩的发育提供了良好条件。此外,关于平湖组烃源岩的成熟度,前人研究发现三潭深凹与中央背斜带内平湖组烃源岩现今多处于成熟—过成熟阶段,而东南区域正处于三潭深凹带,烃源岩已达到成熟阶段。综合分析确定平湖组平下上亚段有利烃源岩位于研究区东南部区域,而平湖组平下下亚段有利烃源岩主要发育在研究区中东部区域,烃源岩厚度分布于 250~500 m,而中西部斜坡带上烃源岩厚度较薄,厚度在 200 m 以下。从有机相类型看,东部区域主要发育局限海 C 相,具有广阔的可容纳空间和相对安静的沉积环境,同时紧邻斜坡带,可以接收潮控三角洲带来的丰富的陆源沉积物,为有利烃源岩的发育提供了丰富的物质基础。综合分析认为中东部区域为平湖组平下下亚段有利烃源岩发育区。

5 结论

(1) 西湖凹陷平湖组烃源岩主要为煤、炭质泥岩和暗色泥岩。从烃源岩热解生烃潜量和总有机碳含量角度看,煤层的生烃能力最好,炭质泥岩次之,而暗色泥岩最差;从烃源岩分布层位来看,平湖组平下下亚段烃源岩地球化学特征总体上较平下上亚段好,生烃潜力更大。

(2) 平湖组下段烃源岩有机相可划分为潮控三角洲前缘 A 相、潮间带 B 相和局限海 C 相三种类型。运用地震相转沉积相再转有机相的方法对烃源岩有机相进行了预测,认为平下上亚段潮控三角洲前缘 A 相最为发育,位于研究区的中部区域,而平下下亚段潮间带 B 相最为发育,主要位于研究区

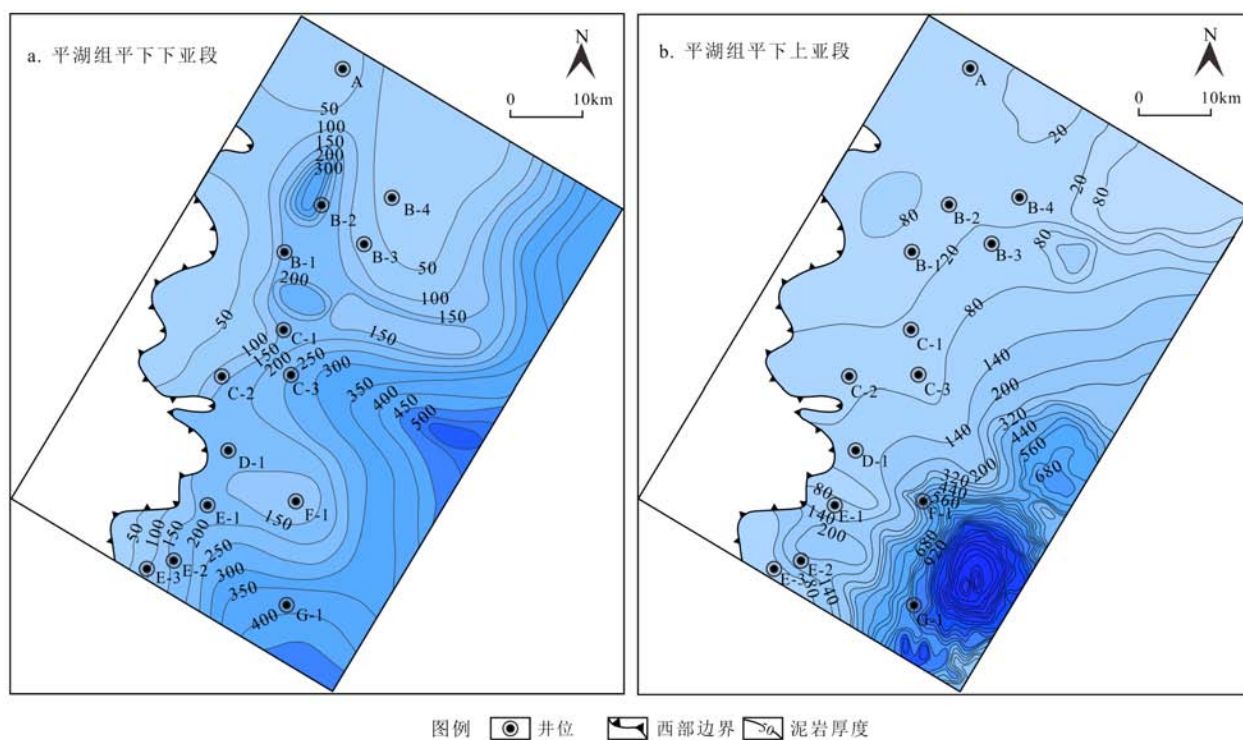


图8 西湖凹陷平北地区平湖组下段泥岩厚度平面分布图

Fig.8 Distribution of mudstone thickness of the Lower Member of Pinghu Formation in the Pingbei area of Xihu Sag

的西部区域,局限海C相始终位于研究区东部深凹区域。

(3) 基于地震速度-岩性分析法明确了平湖组下段烃源岩厚度分布特征。平下上亚段烃源岩厚度总体上具有西北薄东南厚的特征,其中西北方向烃源岩的平均厚度大约在80 m以下,向东南方向,烃源岩的厚度逐渐增大,最高可达1 000余米;平下下亚段烃源岩厚度具有东西分带、西薄东厚特征。在西部区域,烃源岩厚度总体上分布在150 m以下,向东部方向,烃源岩厚度逐渐增加,最高达500余米,构造和沉积环境对烃源岩控制作用明显。

(4) 综合分析烃源岩地球化学特征、厚度和有机相分布特征,确定了平湖组下段有利烃源岩分布。认为平湖组平下上亚段有利烃源岩位于研究区东南部区域,对应局限海C相沉积,烃源岩沉积厚度很大,最高可达1 000余米,而中东部区域为平湖组平下下亚段有利烃源岩发育区,主要对应局限海C相沉积,厚度分布于250~500 m,发育范围广泛。

参考文献 (References)

- [1] 李上卿,李纯洁. 东海西湖凹陷油气资源分布及勘探潜力分析[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 721-728. [LI Shangqing, LI Chunjie. Analysis on the petroleum resource distribution and exploration potential of the Xihu depression, the east China sea [J]. Petroleum
- Geology & Experiment, 2003, 25(6): 721-728.]
- [2] 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 Jiaren, 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.]
- [3] 于水. 西湖凹陷西斜坡平湖组烃源岩沉积成因分析[J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1722-1736. [YU Shui. Depositional genesis analysis of source rock in Pinghu formation of western Slope, Xihu depression [J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1722-1736.]
- [4] 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 Xinhuai, 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.]
- [5] 陆俊泽,叶加仁,黄胜兵,等. 西湖凹陷平北地区烃源岩特征及生排烃史[J]. 海洋石油, 2009, 29(4): 38-43. [LU Junze, YE Jiaren, HUANG Shengbing, et al. Characteristics and hydrocarbon generation-expulsion histories of source rocks of Pingbei area in Xihu Depression [J]. Offshore Oil, 2009, 29(4): 38-43.]
- [6] 宋春刚,曹强,叶加仁,等. 东海盆地西湖凹陷主力烃源岩特征及分布[J]. 石油学报, 2016, 37(8): 962-974. [SONG Chungang, CAO Qiang, YE Jiaren, et al. Characteristics and distribution of main source rocks in Xihu sag, East China Sea Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(8): 962-974.]
- [7] 朱扬明,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] 孙伯强, 陈剑新. 东海西湖凹陷保俶斜坡下第三系煤成油的研究[J]. 海洋石油, 2000(1): 1-7. [SUN Boqiang, CHEN Jianxin. Preliminary study on coal-generating oil of Eogene system in the Baochu slope of Xihu sag, east china sea [J]. *Offshore Oil*, 2000(1): 1-7.]
- [9] 刘晓晨. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组砂体精细刻画及时空演化研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2018. [LIU Xiaochen. Fine characterization and evolution of sand body of Pinghu Formation in Pinghu Slope, Xihu Sag[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2018.]
- [10] 田杨, 叶加仁, 雷闯, 等. 断陷盆地海陆过渡相烃源岩发育模式: 以西湖凹陷平湖组为例[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 898-908. [TIAN Yang, YE Jiaren, LEI Chuang, et al. Development model for source rock of marine - continental transitional face in faulted basins: a case study of Pinghu formation in Xihu sag [J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 898-908.]
- [11] 贾健谊, 顾惠荣, 曾广东, 等. 东海西湖凹陷天然气勘探开发前景分析[C]//21世纪中国油气勘探国际研讨会. 杭州: 中国石油学会, 2002. [JIA Jianyi, GU Huirong, ZENG Guangdong, et al. Prospect analysis of natural gas exploration and development in Xihu Sag, East China Sea[C]// International Symposium on China's oil and gas exploration in the 21st century. Hangzhou: China Petroleum Society, 2002.]
- [12] 傅宁, 李友川, 陈桂华, 等. 东海西湖凹陷油气“蒸发分馏”成藏机制[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 39-42. [FU Ning, LI Youchuan, CHEN Guihua, et al. Pooling mechanisms of “evaporating fractionation” of oil and gas in the Xihu depression, East China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(2): 39-42.]
- [13] 姜亮. 东海陆架盆地油气资源勘探论文集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. [JIANG Liang. Selected papers on oil and gas exploration in East China Sea Shelf Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.]
- [14] 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.]
- [15] 刘震, 常迈, 赵阳, 等. 低勘探程度盆地烃源岩早期预测方法研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 159-167. [LIU Zhen, CHANG Mai, ZHAO Yang, et al. Method of early prediction on source rocks in basins with low exploration activity [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 159-167.]
- [16] 王方雄, 侯英姿, 夏季. 烃源岩测井评价新进展[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 89-93. [WANG Fangxiong, HOU Yingzi, XIA Ji. New advances in hydrocarbon source rocks evaluation [J]. *Well Logging Technology*, 2002, 26(2): 89-93.]
- [17] 米立军, 刘震, 张功成, 等. 南海北部深水白云凹陷古近系烃源岩的早期预测[J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 139-146. [MI Lijun, LIU Zhen, ZHANG Gongcheng, et al. Early forecast and evaluation study on chief source rock in Baiyun depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(1): 139-146.]
- [18] 张寒, 朱光有. 利用地震和测井信息预测和评价烃源岩: 以渤海湾盆地富油凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 55-59. [ZHANG Han, ZHU Guangyou. Using seismic and log information to predict and evaluate hydrocarbon source rocks: An example from rich oil depressions in Bohai Bay [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(1): 55-59.]
- [19] 张艳, 王璞珺, 陈文礼, 等. 低程度勘探区有效烃源岩的识别与平面成图: 以塔里木盆地孔雀河地区为例[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(3): 463-468. [ZHANG Yan, WANG Pujun, CHEN Wenli, et al. Identification and mapping of the effective source rocks: Take the Kongquehe area of the Tarim Basin as an example [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2007, 37(3): 463-468.]
- [20] 曹强, 叶加仁, 石万忠, 等. 低勘探程度盆地烃源岩早期评价: 以南黄海南部盆地东北凹为例[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 522-529. [CAO Qiang, YE Jiaren, SHI Wanzhong, et al. Preliminary prediction and evaluation of source rocks in low-exploration basins: A case study on the northeast sag of the Northern South Yellow Sea Basin in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(4): 522-529.]
- [21] 殷世艳, 叶加仁, 雷闯, 等. 西湖凹陷平北地区平湖组原油地球化学特征[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 542-546. [YIN Shiyan, YE Jiaren, LEI Chuang, et al. Geochemical characteristics of Pinghu crude oils in Pingbei area of Xihu sag [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(5): 542-546.]
- [22] 徐波. 东海盆地西湖凹陷天台反转带花港组地层水地球化学特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(3): 62-71. [XU Bo. Geochemistry and genesis of the formation water in Huagang Formation of the Tiantai Inversion Zone, the Xihu depression of the East China Sea Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(3): 62-71.]
- [23] 杨鹏程, 刘峰, 沈珊, 等. 西湖凹陷平北地区平湖组煤系烃源岩生烃潜力研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(4): 139-147. [YANG Pengcheng, LIU Feng, SHEN Shan, et al. A study on the hydrocarbon generation potential of the coal-bearing source rocks in the Pinghu Formation of Pingbei area, the Xihu depression [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(4): 139-147.]
- [24] 张建培, 张涛, 刘景彦, 等. 西湖凹陷反转构造分布与样式[J]. 海洋石油, 2008, 28(4): 14-20. [ZHANG Jianpei, ZHANG Tao, LIU Jinyan, et al. Distribution and style of inverted structures in Xihu Depression [J]. *Offshore Oil*, 2008, 28(4): 14-20.]
- [25] 杨鹏程, 李浩, 刘峰, 等. 西湖凹陷X构造凝析油与蜡质油的形成机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(6): 177-187. [YANG Pengcheng, LI Hao, LIU Feng, et al. Formation mechanism of condensate oil and waxy oil in Structure X of Xihu Depression [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(6): 177-187.]
- [26] 李昆, 张沛, 张萍, 等. 东海西湖凹陷中央背斜带花港组成藏条件及主控因素分析: 以H3气藏为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(5): 127-135. [LI Kun, ZHANG Pei, ZHANG Ping, et al. Analysis of reservoir-forming conditions and key controlling factors of Huagang Formation in the central anticlinal belt of Xihu Sag of East China Sea:

- Taking the reservoir H3 for example [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(5): 127-135.]
- [27] 刘凯旋, 陈践发, 朱心健. 西湖凹陷平北地区天然气地球化学特征、成因类型及来源分析[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(5): 42-52. [LIU Kaixuan, CHEN Jianfa, ZHU Xinjian. Geochemical characteristics, genetic types and sources analysis of natural gas in Pingbei area, Xihu sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(5): 42-52.]
- [28] 章超, 陈践发, 朱心健, 等. 东海盆地西湖凹陷平北地区有机质热演化特征及其主控因素[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(4): 376-383. [ZHANG Chao, CHEN Jianfa, ZHU Xinjian, et al. Characteristics of organic matter thermal evolution and its main controlling factors in Pingbei area of Xihu Sag [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25(4): 376-383.]
- [29] 姜玉涵, 侯读杰, 刁慧, 等. 东海盆地西湖凹陷不同构造带原油陆源生物标志化合物特征及其指示意义[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(3): 89-98. [JIANG Yuhan, HOU Dujie, DIAO Hui, et al. Characteristics and indication of terrestrial biomarkers of crude oil in different local structures of Xihu Depression, East China Sea Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(3): 89-98.]
- [30] 王超, 唐贤君, 蒋一鸣, 等. 西湖凹陷天台斜坡带北部构造变换带特征及油气地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(6): 93-105. [WANG Chao, TANG Xianjun, JIANG Yiming, et al. Characteristics of the structural transfer zone of northern Tiantai slope in Xihu Sag of the East China Sea Basin and their petroleum geological significances [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(6): 93-105.]
- [31] Zhu Y M, Li Y, Zhou J, et al. Geochemical characteristics of tertiary coal-bearing source rocks in Xihu Depression, East China Sea Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 35(1): 154-165.
- [32] 魏恒飞, 陈践发, 陈晓东, 等. 西湖凹陷平湖组滨海型煤系烃源岩发育环境及其控制因素[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 487-497. [WEI Hengfei, CHEN Jianfa, CHEN Xiaodong, et al. The controlling factors and sedimentary environment for developing coastal coal-bearing source rock of Pinghu Formation in Xihu depression [J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 487-497.]
- [33] 苏奥, 陈红汉, 王存武, 等. 东海盆地西湖凹陷天然气来源探讨[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(1): 157-162. [SU Ao, CHEN Honghan, WANG Cunwu, et al. Source of natural gas in Xihu depression of the east china sea basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(1): 157-162.]
- [34] 蒋一鸣. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组碎屑锆石U-Pb年龄及米兰科维奇旋回: 对源-汇系统及沉积演化的约束[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(6): 133-140. [JIANG Yiming. Detrital zircon U-Pb age and milankovitch cycles of Pinghu formation in the Pinghu slope of Xihu depression: constraints on source-sink system and sedimentary evolution [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 133-140.]
- [35] Jones R W. Organic facies[C]//Brooks J, Welte D H. *Advances in Petroleum Geochemistry*. London: Academic Press, 1987: 1-90.
- [36] 郝芳, 陈建渝, 孙永传, 等. 有机相研究及其在盆地分析中的应用[J]. *沉积学报*, 1994, 12(4): 77-86. [HAO Fang, CHEN Jianyu, SUN Yongchuan, et al. Organic facies studies and their use in sedimentary basin analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(4): 77-86.]
- [37] Pepper A S, Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part I: oil and gas generation from kerogen [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(3): 291-319.
- [38] 郭迪孝, 胡民. 陆相盆地沉积有机相分析[M]//地质矿产部石油地质研究所. *石油与天然气地质文集*. 北京: 地质出版社, 1989: 191-199. [GUO Dixiao, HU Min. Analysis of sedimentary organic facies in continental basin [M]//Institute of Petroleum Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources. *Oil & Gas Geology*. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 191-199.]
- [39] 金奎勋, 李荣西. 烃源岩组合规律及其意义[J]. *天然气地球科学*, 1998, 9(1): 23-29. [JIN Kuili, LI Rongxi. Composition and association of source rocks and its significance [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1998, 9(1): 23-29.]
- [40] 朱创业. 陕甘宁盆地奥陶统马家沟组层序沉积有机相特征及其烃源岩分布[J]. *沉积学报*, 2000, 18(1): 57-62. [ZHU Chuangye. Characteristics of sequence sedimentary organic facies and distribution of source rocks of Majiagou formation, Lower Ordovician, Ordos basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(1): 57-62.]
- [41] 赵丽娜, 陈建文, 张银国, 等. 东海西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积特征[J]. *世界地质*, 2008, 27(1): 42-47. [ZHAO Li'na, CHEN Jianwen, ZHANG Yinguo, et al. Sedimentary characteristics of Pinghu formation in Pinghu structural belt of Xihu depression, East China Sea [J]. *Global Geology*, 2008, 27(1): 42-47.]
- [42] 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考[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.]
- [43] 吴嘉鹏, 万丽芬, 张兰, 等. 西湖凹陷平湖组岩相类型及沉积相分析[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(1): 27-34. [WU Jiapeng, WAN Lifan, ZHANG Lan, et al. Lithofacies types and sedimentary facies of Pinghu formation in Xihu depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(1): 27-34.]
- [44] 钟锴, 朱伟林, 高顺莉, 等. 东海陆架盆地形成演化及油气成藏关键地质问题[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3485-3497. [ZHONG Kai, ZHU Weilin, GAO Shunli, et al. Key geological questions of the formation and evolution and hydrocarbon accumulation of the East China Sea Shelf Basin [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3485-3497.]
- [45] 何伊南. 海相烃源岩不同有机相生烃动力学研究: 以西非被动大陆边缘为例[D]. 中国石油大学(北京)硕士学位论文, 2018. [HE Yi'nan. The study of Marine source rock hydrocarbon-generating kinetics: West Africa passive margin basins as examples [D]. Master Dissertation of China University of Petroleum (Beijing), 2018.]
- [46] 沈文超. 西湖凹陷古近系煤的聚集模式及沉积有机相研究[D]. 中国矿业大学(北京)博士学位论文, 2018. [SHEN Wenchao. The coal accumulation model and sedimentary organic facies of Paleogene coal in the Xihu depression [D]. Doctor Dissertation of China University of Mining & Technology, Beijing, 2018.]
- [47] 彭刘亚, 崔若飞, 任川, 等. 利用岩性地震反演信息划分媒体结构[J].

- 煤炭学报, 2013, 38(S2): 410-415. [PENG Liuya, CUI Ruofei, REN Chuan, et al. Classification of coal body structure using seismic lithology inversion information [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S2): 410-415.]
- [48] 陈治军, 任来义, 刘护创, 等. 地球物理方法在哈日凹陷烃源岩预测和评价中的应用[J]. 石油地质与工程, 2016, 30(6): 30-35. [CHEN Zhijun, REN Laiyi, LIU Huchuang, et al. Geophysical methods in hydrocarbon source rock prediction and evaluation of Hari sag [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(6): 30-35.]
- [49] 王翔宇. 渤海湾盆地渤中凹陷渐新统东营组三段烃源岩预测及评价[D]. 长江大学硕士学位论文, 2019. [WANG Xiangyu. Prediction and evaluation of the source rocks of the third member of the Oligocene Dongying formation in the Bozhong sag, Bohai bay basin[D]. Master Dissertation of Yangtze University, 2019.]
- [50] 王永刚, 谢东, 乐友喜, 等. 地震属性分析技术在储层预测中的应用[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2003, 27(3): 30-32. [WANG Yonggang, XIE Dong, YUE Youxi, et al. Application of seismic attribute analysis technology in reservoir prediction [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2003, 27(3): 30-32.]
- [51] 王永刚, 乐友喜, 刘伟, 等. 地震属性与储层特征的相关性研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(1): 26-30, 35. [WANG Yonggang, YUE Youxi, LIU Wei, et al. Relativity between seismic attributes and reservoir characters [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2004, 28(1): 26-30, 35.]
- [52] 曹强, 叶加仁. 南黄海北部盆地东北凹陷烃源岩的早期预测[J]. 地质科技情报, 2008, 27(4): 75-79. [CAO Qiang, YE Jiaren. Prediction of source rock of northeast sag in north depression in South Yellow Sea Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(4): 75-79.]
- [53] 沈玉林, 秦勇, 郭英海, 等. 基于米氏聚煤旋回划分的西湖凹陷平湖组煤系烃源岩发育特征[J]. 石油学报, 2016, 37(6): 706-714. [SHEN Yulin, QIN Yong, GUO Yinghai, et al. Development characteristics of coal-measure source rocks divided on the basis of Milankovich coal accumulation cycle in Pinghu Formation, Xihu sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 706-714.]
- [54] 殷杰, 王权. 利用测井和地震信息识别和预测优质烃源岩: 以渤海湾盆地饶阳凹陷沙一段为例[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(11): 1761-1770. [YIN Jie, WANG Quan. Using seismic and log information to identify and predict high-quality source rocks: A case study of the first member of Shahejie Formation in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(11): 1761-1770.]
- [55] 刘震, 高先志, 曾洪流. 辽东湾地区下第三系地震速度: 岩性预测模型研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1993, 13(4): 25-34. [LIU Zhen, GAO Xianzhi, ZENG Hongliu. Research on seismic velocity-lithology prediction model for Eogene of the Liaodong bay [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1993, 13(4): 25-34.]
- [56] 王子嵩, 刘震, 孙志鹏, 等. 琼东南深水区乐东-陵水凹陷渐新统烃源岩早期预测及评价[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2014, 45(3): 876-888. [WANG Zisong, LIU Zhen, SUN Zhipeng, et al. Preliminary prediction and evaluation of oligocene source rocks in Ledong-Lingshui Sag in deep-water area of Qiongdongnan Basin [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(3): 876-888.]
- [57] 黄艳辉, 刘震, 吕福亮, 等. 琼东南深水区华光凹陷渐新统崖城组烃源岩早期预测[J]. 地质学报, 2015, 89(4): 805-816. [HUANG Yanhui, LIU Zhen, LYU Fuliang, et al. Early prediction on source rocks of the oligocene Yacheng formation in the Deepwater area of Huaguang depression, Qiongdongnan basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(4): 805-816.]
- [58] 孙哲, 彭靖淞, 江尚昆, 等. 渤海海域庙西中南洼围区烃源岩有机相与测井评价[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(1): 102-110. [SUN Zhe, PENG Jingsong, JIANG Shangkun, et al. Organic facies and well logging evaluation of source rocks in Central-South Sag of Miaoxi Depression and its surrounding areas, Bohai Sea [J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(1): 102-110.]
- [59] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [HAO Fang. Dynamics of hydrocarbon generation and mechanism of hydrocarbon accumulation in overpressure basins[M]. Beijing: Science Press, 2005.]