

doi:10.3799/dqkx.2014.078

低勘探程度盆地成藏动力学过程： 以西湖凹陷中部地区为例

雷 闯^{1,2}, 叶加仁^{1,2*}, 吴景富³, 单 超^{1,2}, 田 杨^{1,2}, 殷世艳⁴

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

3. 中海石油研究中心, 北京 100027

4. 河北联合大学矿业工程学院, 河北唐山 063009

摘要: 基于地质类比方法, 综合运用地质、地球物理、地球化学等资料及盆地模拟技术恢复了西湖凹陷中部地区油气成藏动力学过程。结果表明: 研究区内沉积充填和构造沉降具有幕式演化特征, 并以始新世地层沉积厚度最大、沉积—沉降速率最高; 烃源岩有机质热演化具有成熟时间短、生油窗窄、生气窗宽的特点; 主力烃源岩平湖组进入成熟生烃门限的时间早, 生排烃能力强, 且生排烃过程发生在晚渐新世至早—中中新世期间; 研究区油气运移和油气聚集主要受控于古构造面, 保斜斜坡带和天屏断裂陡坡带以平行流为主, 中央背斜带以汇聚流为主, 存在多个有利油气聚集区, 油气聚集作用主要发生在龙井运动(7 Ma)以来。

关键词: 成藏动力学; 盆地模拟; 地质类比; 低勘探程度盆地; 石油地质; 西湖凹陷。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2014)07-0837-11

收稿日期: 2013-12-21

Dynamic Process of Hydrocarbon Accumulation in Low-Exploration Basins: A Case Study of Xihu Depression

Lei Chuang^{1,2}, Ye Jiaren^{1,2*}, Wu Jingfu³, Shan Chao^{1,2}, Tian Yang^{1,2}, Yin Shiyan⁴

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. CNOOC Research Center, Beijing 100027, China

4. College of Mining Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China

Abstract: This paper re-constructs and analyzes dynamic process of hydrocarbon accumulation in the central part of Xihu depression by using the geological data, geophysical and geochemical techniques of basin modeling in accordance with geological comparison principles. It is found that the depositional filling and tectonic subsidence experienced episodic evolution in study area with its sedimentation thickness and subsidence rate reaching the biggest value in Eocene. The organic matter evolution of source rock is characterized by short maturation, narrow zone of oil generation and broad zone of gas generation. The main source rock of Pinghu Formation reached oil threshold earlier with strong hydrocarbon generation-expulsion capacity, and the generation-expulsion process occurred in early Late Oligocene and Early-Miocene to Mid-Miocene. The petroleum migration and accumulation are controlled by the paleo-structure surface, and the confluence flowing mainly occurs in the Baochu gentle slope zone and Tianping fault steep slope zone while the planar flowing occurs in the central anticline belt. There are several favorable zones of petroleum accumulation in the study area, and the major accumulation of oil and gas occurred over the Longjing movement (7 Ma).

Key words: dynamic process of hydrocarbon accumulation; basin modeling; geological comparison principle; low-exploration basin; petroleum geology; Xihu depression.

基金项目: 国家科技重大专项(No.2011ZX05023-001)。

作者简介: 雷闯(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事油气地质研究。E-mail: leichuang119@163.com

* **通讯作者:** 叶加仁, E-mail: jrye@cug.edu.cn

随着油气整体勘探程度逐步提高,我国陆上中浅层、海域浅水等成熟探区的勘探难度日益加大,其储量和产量难以满足经济建设和发展的需要.因此,扩大勘探领域是我国油气勘探发展的必然趋势(赵政璋等,2002;金庆焕,2006).我国深层、深水 and 新区等低勘探程度领域油气资源丰富(石昕等,2005;何家雄等,2006;张功成等,2007),探明率低,是今后油气储量增长的重要领域,也是目前勘探的热点之一.

西湖凹陷油气资源丰富,是中国近海重要的含油气凹陷之一(姜亮,2003).目前西湖凹陷仍处于低勘探程度阶段,油气探井密度仅 0.001 口/km²,且钻井分布极不均衡,现有钻井主要分布在保俶斜坡平湖构造带和中央背斜苏堤构造带,同时也以这两个构造带油气成藏机理研究最为深入(傅宁等,2003;胡芬等,2003;张忠民等,2005;叶加仁等,2006;赵兰全,2011).由于受到勘探程度及资料情况的限制,西湖凹陷大部分构造带油气成藏机理研究比较薄弱,尚未开展过油气生成、运移和聚集过程的研究.基于地质类比方法,从地震相—沉积相—地质条件的对应关系出发,通过地质模型的建立和关键参数的选取,采用盆地数值模拟技术恢复了西湖凹陷中部地区的成藏动力学过程,为低勘探程度地区油气生成、运移和聚集过程的分析提供一种思路,从而认识油气成藏过程和富集规律,为油气勘探实践服务.

1 区域地质概况

东海陆架盆地位于我国大陆东部边缘,是我国近海面积最大的含油气盆地.西湖凹陷位于东海陆架盆地的东北部,呈 NNE 向展布,面积约 5.9 × 10⁴ km².在构造上,西湖凹陷具有“东西分带,南北分块”的特点,自西向东可分为保俶斜坡带、三潭深凹、中央背斜带、白堤深凹和天屏断裂带 5 个次级构造单元(图 1).西湖凹陷具有我国东部典型的新生代断陷盆地特点,经历了断陷、拗陷和区域沉降 3 个阶段,沉积盖层自下而上由古新统(E₁)、中下始新统宝石组(E_{2b})、中上始新统平湖组(E_{2p})、渐新统花港组(E_{3h})、中新统龙井组(N_{1lj})、玉泉组(N_{1y})、柳浪组(N_{1l})、上新统三潭组(N_{2s})和第四系东海群(Qd)组成,其中平湖组为凹陷主力烃源岩层系,花港组为次要烃源岩层系;储集层以花港组最为重要,平湖组次之.

本次研究区位于西湖凹陷中部(图 1),涵盖了

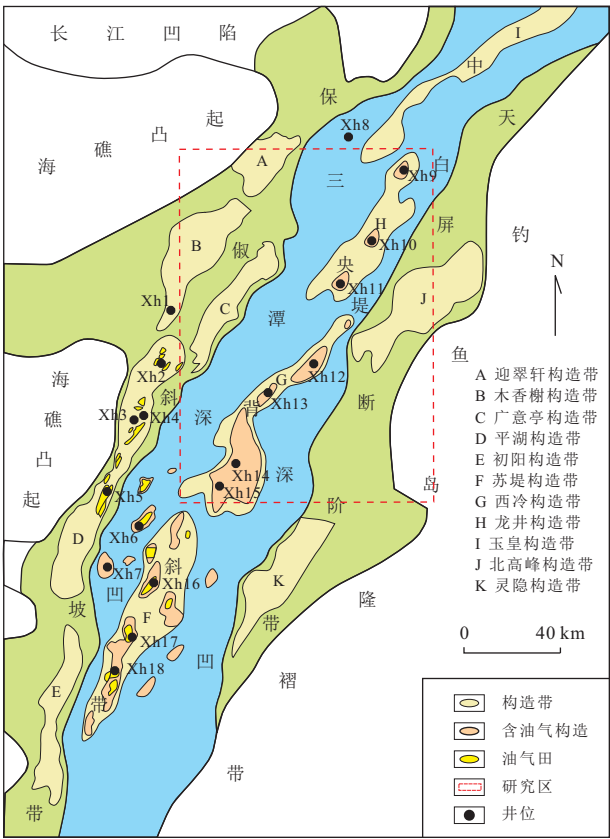


图 1 西湖凹陷构造单元及油气田分布
Fig.1 The distribution of tectonic units and oil & gas fields in Xihu depression

木香榭、广义亭、龙井、西冷等构造带.前期地质研究表明,西湖凹陷中部地区沉积厚度大、圈闭发育,具备有利于油气藏形成的基本地质条件,勘探前景广阔,是西湖凹陷“增储上产”的重要后备区.目前研究区油气勘探程度低,面积约 2.1 × 10⁴ km²,已钻探井仅 7 口(仅花港 1 井钻遇到平湖组),但有数千公里的二维地震测线且局部为三维地震覆盖,并发现了玉泉、龙二、龙四、花港、古珍珠等含油气构造.

2 方法和原理

2.1 类比分析的基础

地质类比是一种最古老同时也是最基本和最常用的研究方法,它适用于任何勘探阶段和勘探条件,贯穿于整个油气地质研究过程,尤其在低勘探程度地区的地质研究中是一种行之有效的方法.

在低勘探程度地区,以地震相和沉积相模式为指导是进行地质类比分析的一种途径(Yilmaz, 2001;郭建宇等,2006;曹强等,2009),其基本思想

表 1 西湖凹陷地震相特征及发育情况

Table 1 The characteristics and development of seismic facies in Xihu depression

地震相	地震亚相	沉积相	空间分布
前积结构	前积、强—中—中弱振幅、低—中频、较连续—连续反射	扇三角洲、辫状河三角洲、三角洲前缘	保俶斜坡带和天屏断裂带, N_1l 、 N_{1y} 、 N_{1lj} 、 E_3h 、 E_2p 层位
	平行亚平行、强—中强振幅、低频、连续反射	滨浅湖—半深湖相	中央背斜带, E_3h 层位
平行亚平行结构	平行亚平行、强—中振幅、低—中频、较连续—连续反射	潮间—潮下带、浅湖—半深湖、河流—平原相	三潭深凹、中央背斜带、白堤深凹, E_3h 、 E_2p 层位
	平行亚平行、中强—中振幅、中—高频、较连续—连续反射	海湾相	中央背斜带, E_2p 层位
	平行亚平行、中强—中振幅、中频、断续—较连续—连续反射	潮间带、滨浅湖、河流—平原相	三潭深凹, E_3h 、 E_2p 层位
	平行亚平行、中强—中振幅、高—中频、断续—较连续—连续反射	滨浅湖、河流—平原相	区域性见于 N_1l 、 N_{1y} 、 N_{1lj} 、 E_3h 层位
	平行亚平行、中强—中—中弱振幅、中—高频、断续—较连续—连续反射	河流—平原相	保俶斜坡带和天屏断裂带, N_1l 、 N_{1y} 、 N_{1lj} 、 E_3h 、 E_2p 层位
	平行亚平行、强—中振幅、断续—较连续反射	河流—平原相	保俶斜坡带和天屏断裂带, N_1l 、 N_{1y} 、 N_{1lj} 、 E_3h 、 E_2p 层位
	平行亚平行、中—中弱振幅、中—低频、断续—较连续反射	河流—平原相	保俶斜坡带和天屏断裂带, N_1l 、 N_{1y} 、 N_{1lj} 、 E_3h 、 E_2p 层位
丘状结构	丘状、中强—中弱振幅、中频、断续—较连续反射	三角洲沉积	保俶斜坡带, E_3h 、 E_2p 层位
透镜状结构	透镜状、中—弱振幅、中—低频、断续发射	河道充填沉积	保俶斜坡带, E_3h 层位

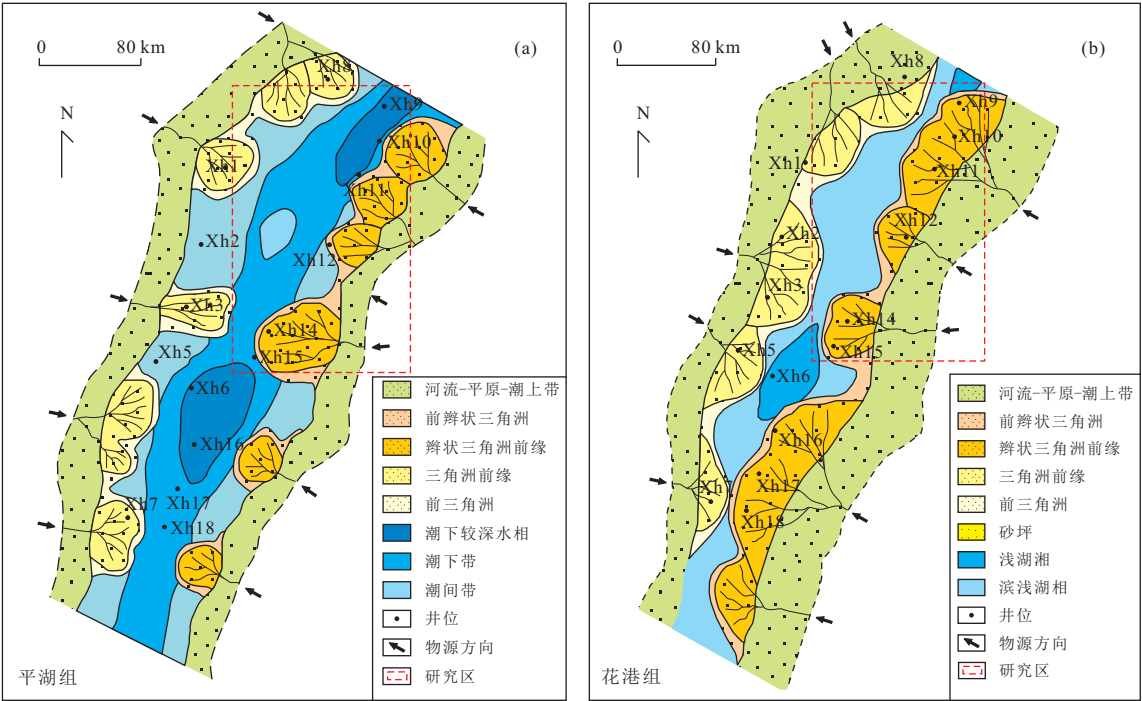


图 2 西湖凹陷平湖组(a)和花港组(b)平面沉积相展布

Fig.2 Sedimentary facies distribution map of Pinghu Formation (a) and Huagang Formation (b) in Xihu depression

为:在分析区域地震反射特征的基础上,对比勘探和研究程度较高的周边地区或中浅层的地震相—沉积相—地质条件的对应关系,从而确定低勘探程度地区的地质条件.

地震相是由特定的地震反射参数所限定的三维空间地震反射单元,它是特定的沉积体在地震反射剖面上各种特征的综合反映.陈建文等根据内部反射结构和外部几何形态将西湖凹陷地震相划分为 4 大类(陈建文,2007.东海西湖凹陷层序地层学和沉积体系研究.中国石油有限公司上海分公司勘探部.上海),在此基础上,根据振幅强弱、频率高低及连续性进行地震亚相的划分,具体划分结果见表 1.在区域沉积相类型分析、物源分析和地震相分析的基础上,根据瓦耳特定律,结合单井沉积相分析及连井沉积相对比分析,可以将地震相转换为沉积相(图 2).具体来看,西湖凹陷在新生代沉积时期是一个没有被隆起分割的统一的沉积凹陷(姜亮,2003),其中,断陷期发育的平湖组以滨岸沼泽、潮控三角洲、潮坪、泻湖海湾沉积为主,坳陷期充填的花港组、龙井组、玉泉组、柳浪组以河流—湖泊相沉积为特征,区域沉降期发育的三潭组和东海群则过渡为浅海相碎屑沉积.在这些地层中识别出的沉积相带发育特征可以进行区域性追踪和对比,表明西湖凹陷整体上具有相似的地质条件发育背景.因此,在西湖凹陷中部地区地质条件分析和盆地模拟参数选取过程中可以借鉴周边地区的相关地质资料和研究成果.

2.2 盆地数值模拟技术的应用

成藏动力学过程研究的方法有很多,其中盆地数值模拟方法可以定量、动态地刻画各种因素相互作用的历史过程,从而更深刻地揭示其内在规律性,是成藏动力学过程研究的一项关键技术(Hermans *et al.*, 1992; Hindle, 1997; 王英民等, 1998; Keym *et al.*, 2006; Peters *et al.*, 2006).

本次盆地数值模拟中采用美国 Platte River 公司开发的 BasinMod 软件,其中,地质模型中应用到的层位数据有 Sea-bottom、 T_0 、 T_{10} 、 T_{11} 、 T_{13} 、 T_{20} 、 T_{21} 、 T_{30} 、 T_{32} 、 T_{34} 、 T_{35} ,对应的地层顶界面及地质年代为东海群(Qd)0 Ma,三潭组(N_2s)1.65 Ma,柳浪组(N_1l)5.2 Ma,玉泉组(N_1y)10.2 Ma,龙井组(N_1lj)16.2 Ma,花港组上段(E_3h_2)25.2 Ma,花港组下段(E_3h_1)30 Ma,平湖组上段(E_2p_3)36 Ma,平湖组中段(E_2p_2)36.5 Ma,平湖组下段(E_2p_1)38.1 Ma,古新统(E_1)41.2 Ma;输入的模拟参数主要包括地层岩性、烃源岩属性、地质边界条件和地层剥蚀量等.对于缺少实测地质资料的低勘探程度地区而言,能否合理的选取模拟参数是决定模拟结果精度和可信度的关键(Lerche, 1992; Thomsen, 1998; 石广仁, 2004).根据研究区的地质条件和地质特征,

确定各模拟参数的具体方案如下:

(1)地层岩性.从单井沉积相出发,统计了研究区及其周边单井的岩性数据(表 2),为不同层位、不同相带岩性参数的选取提供参考.具体原则为:对于有钻井分布的地区,井深范围内的地层岩性根据实际统计的岩性数据进行指定;对于井深范围外或无钻井分布地区的地层岩性,在参考区域沉积相展布特征的基础上,根据周边单井的岩性数据进行指定,其中,顺物源方向的岩性采用差值法进行确定,而垂直于物源方向的岩性则采用近似对称的差值.

(2)烃源岩属性.烃源岩属性主要包括总有机碳含量(TOC)、氢指数(HI)和有机质类型等.同样,以统计的研究区及其周边单井的烃源岩地化测试资料为参考,按不同层位、不同相带给定了地质模型中烃源岩各属性参数的取值范围(表 2).由表 2 可以看出,在层位上,平湖组有机碳含量最高,花港组下段有机碳含量次之,其他层段有机碳含量较低;在沉积相带上,平湖组以三角洲前缘相、前三三角洲相、潮间带相和海湾相有机碳含量较高,花港组下段以三角洲前缘相、滨浅湖相有机碳含量较高.考虑到现今实测的 TOC 值实际上是有机质经过漫长热演化阶段后的残余值,所以模拟输入时对实测 TOC 值进行了恢复校正,恢复系数的大小主要取决于各烃源岩层系的沉积相带和热成熟演化程度(秦建中等, 2007; 李松峰等, 2013).

需要指出的是,三潭组和东海群埋深尚浅、有机质丰度低,对于研究区可勘探油气的供烃作用很小,因而在模型中忽略了三潭组和东海群的烃源岩属性,仅给定了柳浪组以下地层的烃源岩属性.

(3)地质界面条件.地质界面条件主要包括古水深(PWD)、古热流(HF)和古沉积—水界面温度(SWIT),其中古热流参数最为重要,对模拟结果的影响较大.

一般认为,不同沉积相形成于不同的沉积环境与沉积水深(康安等, 2000; 张世奇和任延广, 2003),其中海湾相、滨浅湖相、中深湖相、滨浅海相、中深海相对应的古水深分别为 2~20 m、>20 m、20~200 m、200~500 m.本次研究在沉积相精细识别的基础上,依据上述沉积相与沉积水深的对应关系,估算了研究区在不同时期的水深(图 3a).

现今热流主要取决于地温梯度和岩石热导率,本次研究中地温梯度由实测地层温度获得,岩石热导率采用模拟软件中相应岩相的默认值.西湖凹陷实测地层温度与深度关系表明现今的地温梯度为

表 2 研究区周边单井不同层位不同相带的岩性、烃源岩属性统计

Table 2 The lithologic and hydrocarbon source rocks statistics table of different layers and phase belts of a single well around the study area

地层	单井相	岩性					烃源岩属性		
		泥岩含量 (%)	粉砂含量 (%)	砂岩含量 (%)	煤层 (%)	岩性参 考单井	TOC(%) 平均值	HI(mg/g) 平均值	干酪根 类型
Qd	浅海相	53.0	38.1	8.9	/	Xh14	0.30	33	Ⅲ
	浅海相	34.1	60.8	5.1	/	Xh4	0.27	30	Ⅲ
N _{2s}	滨浅海	42.3	41.2	15.9	0.6	Xh14	0.52	55	Ⅲ
	滨浅海	37.5	36.6	25.6	0.3	Xh4	0.47	49	Ⅲ
N _{1ll}	河流相	55.0	34.0	11.0	/	Xh4	0.22	53	Ⅲ
	滨浅湖	79.5	8.1	9.9	2.5	Xh14	0.46	61	Ⅲ
N _{1y}	河流相	48.2	38.2	12.9	0.8	Xh4	0.42	78	Ⅲ
	滨浅湖	70.5	10.9	14.7	3.8	Xh14	0.85	110	Ⅲ
N _{1lj}	河流相	21.2	44.9	33.9	/	Xh3	0.43	88	Ⅲ
	三角洲前缘	56.7	29.8	13.5	/	Xh14	0.75	143	Ⅲ
E _{3h2}	三角洲前缘	77.0	19.9	3.1	/	Xh3	0.57	123	Ⅲ
	滨浅湖	49.2	26.7	23.2	0.9	Xh12	0.66	179	Ⅲ-Ⅱ ₂
E _{3h1}	河流平原相	25.9	44.8	29.3	/	Xh3	0.44	144	Ⅲ
	三角洲前缘	51.6	12.1	35.1	1.2	Xh12	0.97	127	Ⅲ
	前三角洲	81.1	10.8	8.1	/	Xh16	0.77	135	Ⅲ
	滨浅湖	81.7	11.0	7.3	/	Xh6	0.85	172	Ⅲ-Ⅱ ₂
	三角洲前缘	57.2	16.6	24.0	2.2	Xh3	1.21	192	Ⅲ-Ⅱ ₂
E _{2p3}	潮间带	68.9	13.3	11.1	6.7	Xh5	1.15	202	Ⅲ-Ⅱ ₂
	潮下带	71.8	14.4	8.4	5.5	Xh12	1.21	233	Ⅲ-Ⅱ ₂
E _{2p2}	海岸平原	73.6	7.6	7.9	10.9	Xh3	0.52	140	Ⅲ
	三角洲前缘	65.1	9.3	20.9	4.7	Xh3	1.16	187	Ⅲ-Ⅱ ₂
	潮间带	68.4	13.2	10.5	7.9	Xh5	1.04	191	Ⅲ-Ⅱ ₂
	海湾相	76.4	9.1	10.9	3.6	Xh18	1.32	245	Ⅲ-Ⅱ ₂
	潮间带	76.1	10.6	8.3	5.0	Xh7	0.96	236	Ⅲ-Ⅱ ₂
E _{2p1}	潮下带	74.3	4.7	12.3	8.7	Xh3	0.89	248	Ⅲ-Ⅱ ₂
	海湾相	86.2	8.5	3.1	2.3	Xh17	1.42	275	Ⅲ-Ⅱ ₂

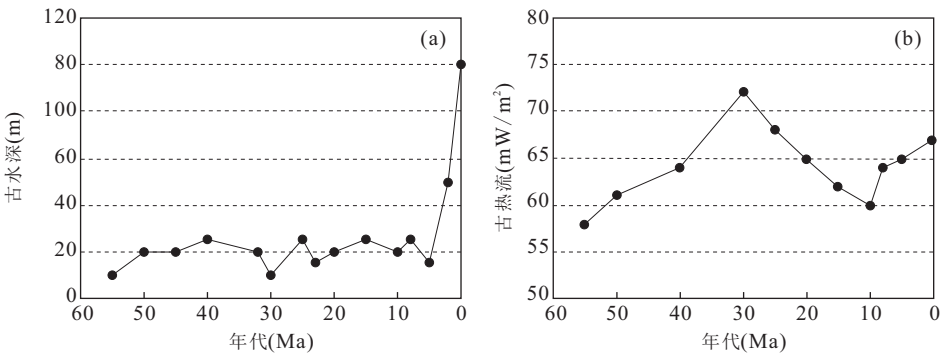


图 3 研究区古水深(a)和古热流(b)变化曲线

Fig.3 The variation curves of palaeo-water depth (a) and palaeo-heat flow (b) in study area

3.74 ℃/100 m,地表温度为 23 ℃(图 4).由此利用 BasinMod 模拟软件中的瞬态热流模型计算了西湖凹陷中部地区 Xh12 井现今的热流值为 67.2 mW/m².根据西湖凹陷构造演化特征,又采用 McKenzie (1978)提出的“瞬时均匀伸展模型”恢复了古热流值(图 3b),模拟结果利用实测地层温度和镜质体反射

率(R_o)进行校正.由图 5 可以看出,模拟的地层温度曲线和镜质体反射率曲线与实测资料吻合程度高,反映了所选模拟参数的有效性和模拟结果的可靠性.

假设水深的变化不影响沉积—水界面温度,并认为古、今沉积—水界面温度大致相同,将该参数统

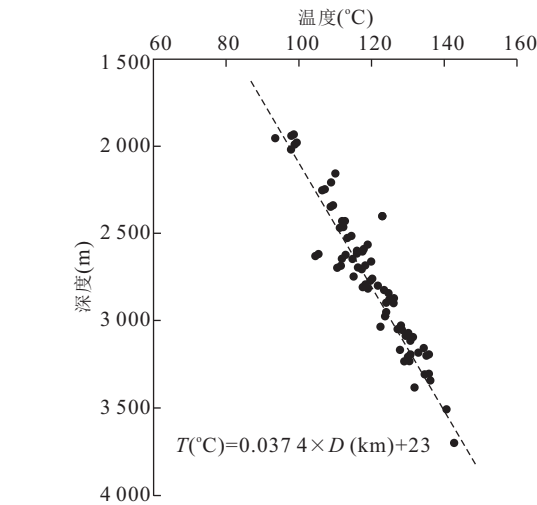


图 4 西湖凹陷实测地层温度与深度关系

Fig. 4 Plot of measured temperatures versus depth in Xihu depression

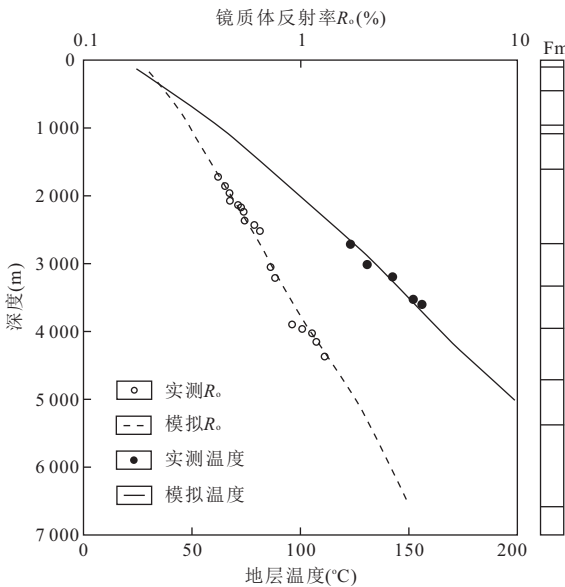


图 5 西湖凹陷 Xh12 井模拟温度和成熟度与实测值对比

Fig. 5 Correlation between modelling temperatures, maturity and measured data for Wells Xh12 in the Xihu depression

一取值为 23℃。

(4)地层剥蚀量.前人对西湖凹陷主要不整合界面的剥蚀厚度进行了系统研究(王震等,2005;王子煜和张明利,2005),认为 T_{30} 、 T_{20} 、 T_{10} 反射界面的剥蚀厚度分别在 0~600 m、0~800 m 和 0~2 000 m 范围,且明显受到构造带走向的控制.本文则选取了 12 条二维地质剖面利用地层趋势延伸法对研究区内 3 个主要不整合界面的剥蚀厚度进行了恢复,结果表明研究区内 T_{30} 、 T_{20} 、 T_{10} 反射界面的剥蚀厚度分别在 0~200 m、0~600 m 和 0~1 200 m 范围,这

与前人研究成果相一致.

此外,模拟计算中应用到的岩石物理学参数(如岩石热导率、岩石密度、岩石热容等)和流体力学参数(如流体密度、流体粘度)则采用模拟软件中相应岩相或流体相的默认值.

3 成藏动力学过程

在相关参数合理选取的基础上,本次研究对西湖凹陷中部地区(Xh12 井)进行了构造沉降史、埋藏史、生烃史、排烃史及运移聚集史模拟.模拟计算中所采用的模型和方法如表 3 所列.

3.1 构造沉降史

构造沉降史模拟结果表明(图 6),西湖凹陷中部地区构造沉降速率和沉积速率曲线显示为“三段式”,表明了其沉积充填具有“幕式”演化特征.总体上与盆地构造演化阶段相一致,“三段式”构造沉降期分别为始新世裂陷期(41.2~36.0 Ma)、渐新世—中中新世坳陷期(36.0~10.2 Ma)和晚中新世—第四纪区域沉降期(10.2~0 Ma),对应的构造沉降速率和沉积速率分别为 320 和 520 m/Ma、65 和 172 m/Ma 以及 110 和 245 m/Ma.西湖凹陷中部地区具有非常明显的早期快速沉降过程,反映了裂陷期该凹陷经历的构造作用较为强烈.重要的是,始新世快速沉降有利于烃源岩的发育,而晚中新世—第四纪相对较高的沉降速率则为烃源岩的快速成熟创造了地质条件.

3.2 地层埋藏史及烃源岩成熟史

地层埋藏史模拟结果表明(图 7),纵向上以始新统/渐新统、渐新统/下中新统和中中新统/上中新统 3 个区域性不整合(面)为界,西湖凹陷中部地区地层埋藏表现为多幕“渐近式”的演化特征.其中,始新世期间沉积的地层厚度较大,渐新世和下一中中

表 3 油气成藏动力学过程模拟中采用的主要模型与方法

Table 3 The models and methods used in dynamic simulation of petroleum reservoirs

系统模块	本次研究选用的方法	
构造沉降史	Airy 均衡模型	
地层埋藏史	压实模型	联合流体流动压实方法
	渗透率模型	Modified Kozeny-Carman
生烃史	有机质成熟度史	LLNL:Easy R_o 法
	生烃量史	化学动力学法
排烃史	R_o :排烃率法	
运移聚集史	古流体势恢复流线法	

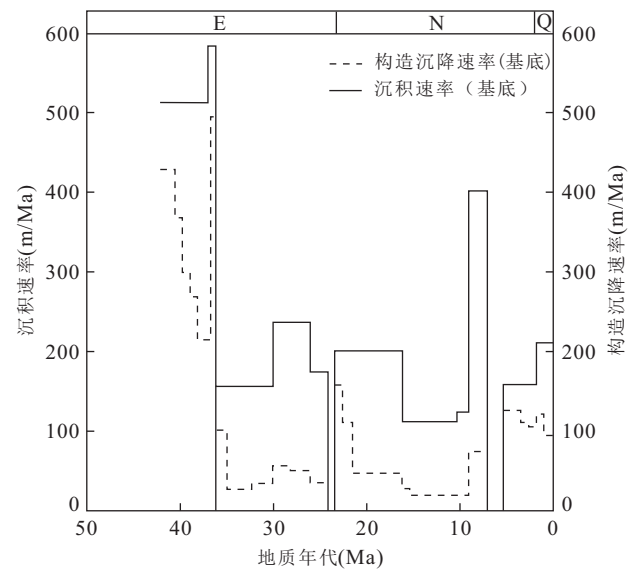


图 6 西湖凹陷中部地区沉积速率和构造沉降速率

Fig.6 Sedimentation rate and tectonic subsidence rate in the central part of Xihu depression

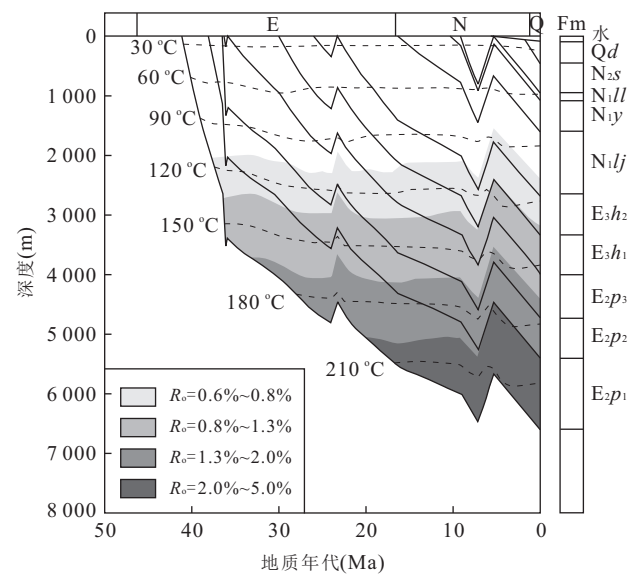


图 7 西湖凹陷中部地区地层埋藏史及热成熟史

Fig.7 Burial and thermal maturation histories in the central part of Xihu depression

新世期间沉积的地层厚度次之,晚中新世以来沉积的地层厚度较小;各地层的现今埋深为地质历史时期的最大埋深。

烃源岩成熟史模拟结果表明(图 7),平湖组(底部)大约分别在距今 36 Ma、34 Ma、32 Ma、20 Ma 开始进入低成熟阶段($0.6\% < R_o < 0.8\%$)、中成熟阶段($0.8\% < R_o < 1.3\%$)、高成熟阶段($1.3\% < R_o < 2.0\%$)和过成熟阶段($R_o > 2.0\%$);花港组(底部)大

约分别在距今 20 Ma、13 Ma 开始进入低成熟阶段($0.6\% < R_o < 0.8\%$)、中成熟阶段($0.8\% < R_o < 1.3\%$);现今,平湖组主要处于高成熟—过成熟度阶段($R_o > 1.3\%$),而花港组主要处于低成熟—中成熟阶段($0.6\% < R_o < 1.3\%$)。可以看出,西湖凹陷中部地区主力烃源岩平湖组有机质具有成熟时间短、生油窗窄而生气窗宽的特点,这主要与研究区具有较高的基底热流和较大的沉降幅度有关。

3.3 烃源岩生排烃史

生烃史模拟结果表明(图 8),在生成烃类的类型上,受到有机质类型和成熟度等因素的控制,平湖组 and 花港组两套烃源岩系的生气率均明显高于生油率,即以生气为主。在生烃层位上,平湖组烃源岩(底部)生烃强度相对较高,花港组烃源岩(底部)生烃强度相对较低,对应的现今累计生气率和生油率分别为 164 和 69 mg/g TOC、52 和 29 mg/g TOC,显然,平湖组为研究区内的主力生烃岩系,而花港组烃源岩的生烃作用大大扩展了西湖凹陷的勘探领域。在生烃历史上,平湖组烃源岩(底部)大约距今 32 Ma 进入生烃高峰(图 7d),而(顶部)大约距今 8 Ma 才进入生烃高峰(图 7c),反映了平湖组烃源岩生烃高峰期整整持续了 24 Ma 的时间跨度;花港组烃源岩进入生烃高峰的时间略晚(图 7b),为距今 8 Ma 以来。

排烃史模拟结果表明(图 8),平湖组、花港组烃源岩累计排气率和排油率分别为 126 和 50 mg/g TOC、34 和 14 mg/g TOC,总排烃效率分别达到 75% 和 59%,反映了两套烃源岩具有较高的排烃能力,而对应的排烃高峰期约滞后于其生烃高峰期 1 Ma,因此研究区内渐新世和中新世所形成的构造圈闭及地层岩性圈闭均具有油气勘探潜力。

3.4 运移聚集史

油气运聚是发生在地质历史时期的作用过程,本次研究模拟对象选择已被西湖凹陷油气勘探实践所证实的最具勘探意义的 $E_2p \rightarrow E_3h$ 生储系统(平湖组作为烃源岩、花港组作为储集层),模拟时间选择距今 7 Ma 和 0 Ma,这是因为距今 7 Ma 为平湖组烃源岩大量排烃阶段末期,而且是龙井运动发生时期(王闯等,2008)。

在上述的地史、热史、生排烃史的计算结果的基础上,以不同时期的花港组顶面古构造为模拟对象,采用基于古流体势恢复的流线法模拟了其油气运移聚集史(乔永富等,2005;郭小文等,2010;万涛等,2013)。模拟结果表明(图 9),在龙井运动时期

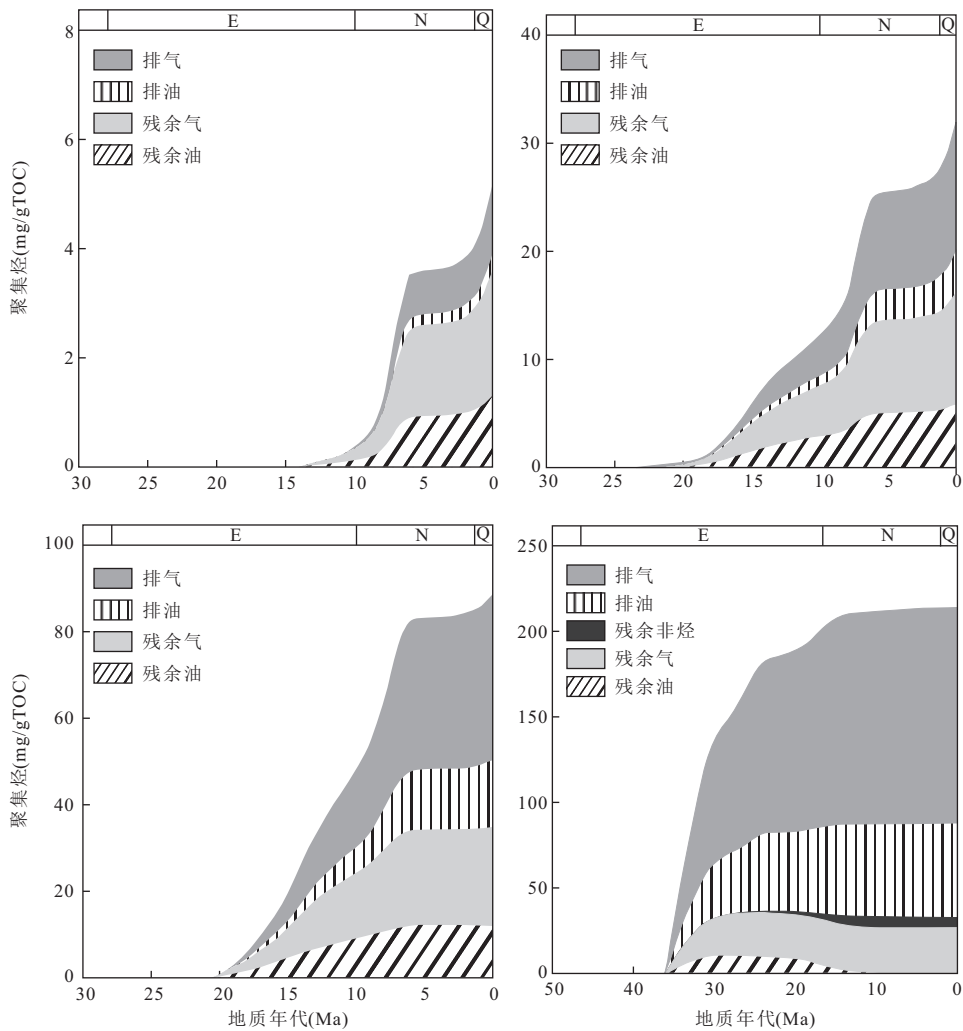


图 8 西湖凹陷中部地区主要烃源岩生烃史

Fig.8 Hydrocarbon generation history for main source rock in the central part of Xihu depression

(7 Ma), 平湖组烃源岩已发生了大规模的生烃和排烃过程, 油气运移作用较为活跃. 研究区内高势区位于沉降中心, 油气的优势运移方向为垂直于流体势等值线的流体势能降低梯度最大的方向, 由高势区向相对低势区运移. 其中, 西部保俶斜坡带和东部天屏断裂带流体势平面等值线近似平行, 油气主要以平行流方式运移, 汇聚能力中等; 汇聚流主要分布在中央背斜带, 流体势平面等值线为内凹形, 油气由大面积向小面积汇聚运移, 有利于油气大规模聚集. 此后至今(0 Ma), 区域油气运聚格局没有发生大的改变, 具有较好的继承性, 不同的是流体势数值急剧减小, 运移动力和强度也随之减小, 说明了龙井运动时期是研究区油气系统形成的关键时期.

油气运移和聚集模拟结果还显示研究区存在多个有利的油气聚集区, 且大部分位于构造圈闭发育带, 说明了油气运移和油气聚集主要受古构造的控

制. 其中, 聚集区Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ由于圈闭规模大、近源、油气运移动力强, 是研究区内最有利的油气聚集区.

4 认识与结论

(1) 西湖凹陷在新生代沉积时期是一个没有被隆起分割的统一的沉积凹陷, 不同层位中识别出的沉积相带发育特征可以进行区域性追踪和对比. 因此, 可以借鉴周边地区成藏地质条件与参数类比分析西湖凹陷中部地区成藏地质条件与参数.

(2) 西湖凹陷中部地区具有优越的油气生成与聚集条件, 油气勘探前景广阔. 始新世沉积一沉降速率较高有利于烃源岩的形成, 而较高的基底热流和较大的沉降幅度导致了烃源岩有机质热演化具有成熟时间短、生油窗窄、生气窗宽的特点; 主力烃源岩平湖组进入成熟生烃门限的时间早, 生排烃能力强,

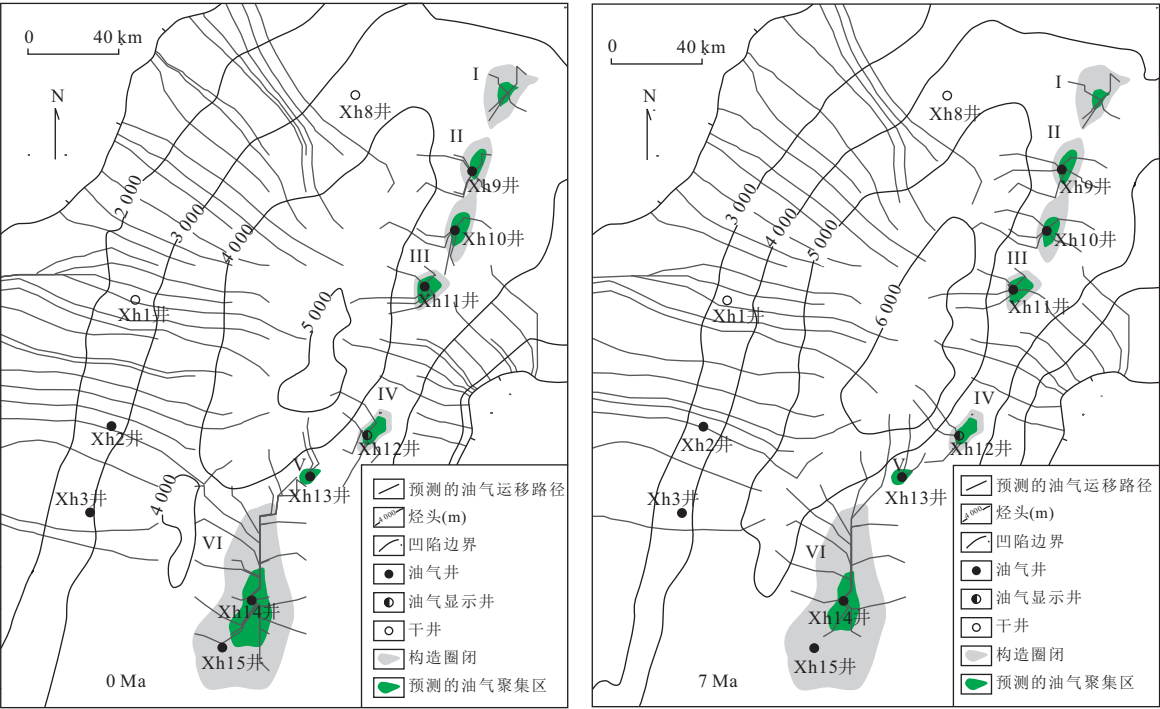


图 9 西湖凹陷中部地区 $E_2p \rightarrow E_3h$ 生储系统油气运移路径

Fig.9 The petroleum migration pathways of $E_2p \rightarrow E_3h$ system in the central part of Xihu depression

且生排气强度大于生排油强度,研究区油气勘探应以寻找天然气为主;研究区内存在多个有利油气聚集区,且油气聚集作用主要发生在龙井运动(7 Ma)以来。

(3)在与相对高勘探程度地区成藏地质条件类

比的基础上,合理选取相关参数,应用含油气盆地数值模拟技术,是动态重建低勘探程度地区油气成藏动力学过程的有效方法和途径。

References

Cao, Q., Ye, J. R., Shi, W. Z., et al., 2009. 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. *Acta Petrolei Sinica*, 30(4): 522–529 (in Chinese with English abstract).

Fu, N., Li, Y. C., Chen, G. H., et al., 2003. Pooling Mechanisms of “Evaporating Fractionation” of Oil and Gas in the Xihu Depression, East China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 30(2): 39–42 (in Chinese with English abstract).

Guo, J. Y., Zhang, D. L., Deng, H. W., et al., 2006. Resource Assessment Methodology of Oil and Gas in the Areas of Low-Degree Prospecting. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 13(6): 43–45 (in Chinese with Eng-

lish abstract).

Guo, X. W., He, S., Hou, Y. G., 2010. Numerical Simulation of Petroleum Generation, Migration and Accumulation of the E_{s3} Formation in Banqiao Depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(1): 115–124 (in Chinese with English abstract).

He, J. X., Xia, B., Shi, X. B., et al., 2006. Prospect and Progress for Oil and Gas in Deep Waters of the World, and the Potential and Prospect Foreground for Oil and Gas in Deep Waters of the South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 17(6): 747–752, 806 (in Chinese with English abstract).

Hermans, I., van Kuyk, A. D., Lehner, F. K., et al., 1992. Modeling Secondary Hydrocarbon Migration on Haltenbanken, Norway. In: Larsen, R. M., Brekke, H., Larsen, B. J., eds., *Structural and Tectonic Modeling and Its Applications to Petroleum Geology. Norwegian Petroleum Society (Special Publication)*, 1: 305–323.

Hindle, A. D., 1997. Petroleum Migration Pathways and Charge Concentration: A Three-Dimensional Model. *AAPG Bulletin*, 81(9): 1451–1481.

Hu, F., Ye, J. R., Liu, J. H., 2003. Characteristics of Oil and Gas Migration and Accumulation in the Pinghu Structural Belt, Xihu Depression, East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(1): 95–102 (in Chinese with English abstract).

- Jiang, L., 2003. Exploration Status and Perspective of Petroleum Resources in East China Sea Shelf Basin, *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q. H., 2006. Petroleum in Deep Water is Major Prospecting Hotspot Nowadays, *Scientific Chinese*, 11: 18–20 (in Chinese).
- Kang, A., Zhu, X. M., Wang, G. W., et al., 2000. Application of Paleobathymetric Curve in the Sequence Stratigraphy of Well-Logging Data, *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(1): 63–67 (in Chinese with English abstract).
- Keym, M., Dieckmann, V., Horsfield, B., et al., 2006. Source Rock Heterogeneity of the Upper Jurassic Draupne Formation, North Viking Graben, and Its Relevance to Petroleum Generation Studies, *Organic Geochemistry*, 37(2): 220–243. doi:10.1016/j.orggeochem.2005.08.023
- Lerche, I., 1992. Oil Exploration: Basin Analysis and Economics, Academic Press Inc, San Diego.
- Li, S. F., Xu, S. H., Shi, H. S., et al., 2013. Characteristics of Paleogene Source Rocks and Prediction of Petroleum Resources in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin, *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(1): 112–120 (in Chinese with English abstract).
- Mckenzie, D., 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basin, *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1): 25–32. doi:10.1016/0012–821X(78)90071–7
- Peters, K. E., Magoon, L. B., Bird, K. J., et al., 2006. North Slope, Alaska: Source Rock Distribution, Richness, Thermal Maturity, and Petroleum Charge, *AAPG bulletin*, 90(2): 261–292. doi:10.1306/09210505095
- Qiao, Y. F., Mao, X. P., Xin, G. Z., 2005. Quantitative Simulation of Hydrocarbon Migration, *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 617–622 (in Chinese with English abstract).
- Qin, J. Z., Zheng, L. J., Teng, G. E., 2007. Study on the Restitution Coefficient of Original Total Organic Carbon for High Mature Hydrocarbon Source Rocks, *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 853–860 (in Chinese with English abstract).
- Shi, G. R., 2004. Numerical Methods of Petroliferous Basin Modeling, Petroleum Industry Press, Beijing, 10–12 (in Chinese).
- Shi, X., Dai, J. X., Zhao, W. Z., 2005. Analysis of Deep Oil and Gas Reservoirs Exploration Prospect, *China Petroleum Exploration*, 10(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Thomsen, R. O., 1998. Aspects of Applied Basin Modeling: Sensitivity Analysis and Scientific Risk, Geological Society, London, Special Publications, 141: 209–221. doi:10.1044/GSL.SP.1998.141.01.13
- Wan, T., Jiang, Y. L., Dong, Y. X., et al., 2013. Reconstructed and Traced Pathways of Hydrocarbon Migration in Nanpu Depression, Bohai Bay Basin, *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(1): 173–180 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Yan, J., Wang, L. S., 2008. Feature of Pool-Forming Dynamics and Mechanism in Central and Southern Part of Xihu Depression, *Offshore Oil*, 28(4): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. M., Qian, Y. Z., Deng, L., et al., 1998. The Study Methods about Dynamic Petroleum Accumulation Progress of Residual Basins, *Journal of Chengdu University of Technology*, 25(3): 385–393 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z., Zhang, M. L., Wang, Z. Y., et al., 2005. Erosion Thickness Restoration of Unconformities in the Xihu Sag, the Shelf Basin of East China Sea, *Petroleum Geology & Experiment*, 27(1): 90–93 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Y., Zhang, M. L., 2005. Erosion Restoration of the Major Cenozoic Unconformities in the Xihu Depression of the East China Sea, *Geological Review*, 51(3): 309–318 (in Chinese with English abstract).
- Ye, J. R., Chen, H. H., Chen, J. Y., et al., 2006. Fluid History Analysis in the Xihu Depression, East China Sea, *Natural Gas Industry*, 26(9): 40–43 (in Chinese with English abstract).
- Yilmaz, O., 2001. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data, Society of Exploration Geophysics, Tulsa.
- Zhang, G. C., Mi, L. J., Wu, S. G., et al., 2007. Deepwater Area—The New Prospecting Targets of Northern Continental Margin of South China Sea, *Acta Petrolei Sinica*, 28(2): 15–21 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Ren, Y. G., 2003. The Study of Base Level Changes of the Songliao Basin in Mesozoic, *Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)*, 25(2): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Wu, N. Q., Zhou, J., 2005. Hydrocarbon Accumulation Mode in the Central Anticlinal Zone of Xihu Depression, Donghai Basin, *Natural Gas Industry*, 25(10): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. Q., 2011. Analysis on Hydrocarbon Source and Influence on Reservoir Formation, Pinghu Area, Xihu Depression, *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*,

18(1):26—29(in Chinese with English abstract).
Zhao, Z.Z., Zhao, X.Z., He, H.Q., 2002. PetroChina's Recent Oil and Gas Exploration Results in New Area and Prospect for Future Development. *China Petroleum Exploration*, 7(3):1—6(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹强, 叶加仁, 石万忠, 等, 2009. 低勘探程度盆地烃源岩早期评价——以南黄海北部盆地东北凹为例. *石油学报*, 30(4):522—529.
傅宁, 李友川, 陈桂华, 等, 2003. 东海西湖凹陷油气“蒸发分馏”成藏机制. *石油勘探与开发*, 2003, 30(2):39—42.
郭建宇, 张大林, 邓宏文, 等, 2006. 低勘探程度区域油气资源评价方法. *油气地质与采收率*, 13(6):43—45.
郭小文, 何生, 侯宇光, 2010. 板桥凹陷沙三段油气生成、运移和聚集数值模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(1):115—124.
何家雄, 夏斌, 施小斌, 等, 2006. 世界深水油气勘探进展与南海深水油气勘探前景. *天然气地球科学*, 17(6):747—752, 806.
胡芬, 叶加仁, 刘俊海, 2003. 东海西湖凹陷平湖构造带油气运聚特征. *海洋地质与第四纪地质*, 23(1):95—102.
姜亮, 2003. 东海陆架盆地油气资源勘探现状及含油气远景. *中国海上油气(地质)*, 17(1):1—5.
金庆焕, 2006. 深水油气是当今海洋油气勘探的主要热点. *科学中国人*, 11:18—20.
康安, 朱筱敏, 王贵文, 等, 2000. 古水深曲线在测井资料层序地层分析中的应用. *沉积学报*, 18(1):63—67.
李松峰, 徐思煌, 施和生, 等, 2013. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩特征及资源预测. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(1):112—120.
乔永富, 毛小平, 辛广柱, 2005. 油气运移聚集定量化模拟. *地*

球科学——中国地质大学学报, 30(5):617—622.
秦建中, 郑伦举, 腾格尔, 2007. 海相高演化烃原岩总有机碳恢复系数研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(6):853—860.
石广仁, 2004. 油气盆地模拟数值方法. 北京: 石油工业出版社, 10—12.
石昕, 戴金星, 赵文智, 2005. 深层油气藏勘探前景分析. *中国石油勘探*, 10(1):1—10.
万涛, 蒋有录, 董月霞, 等, 2013. 渤海湾盆地南堡凹陷油气运移路径模拟及示踪. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(1):173—180.
王闯, 闫洁, 王丽顺, 2008. 西湖凹陷中南部油气成藏动力学特征及成藏机理. *海洋石油*, 28(4):1—5.
王英民, 钱奕中, 邓林, 等, 1998. 残余盆地成藏动力学过程研究方法. *成都理工学院学报*, 25(3):385—393.
王震, 张明利, 王子煜, 等, 2005. 东海陆架盆地西湖凹陷不整合面剥蚀厚度恢复. *石油实验地质*, 27(1):90—93.
王子煜, 张明利, 2005. 东海西湖凹陷新生界主要不整合面地层剥蚀厚度恢复. *地质评论*, 51(3):309—318.
叶加仁, 陈海红, 陈景阳, 等, 2006. 东海西湖凹陷成藏流体历史分析. *天然气工业*, 26(9):40—43.
张功成, 米立军, 吴时国, 等, 2007. 深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域. *石油学报*, 28(2):15—21.
张世奇, 任延广, 2003. 松辽盆地中生代沉积基准面变化研究. *长安大学学报(地球科学版)*, 25(2):1—5.
张忠民, 吴乃芩, 周瑾, 2005. 东海西湖凹陷中央背斜带油气成藏模式研究. *天然气工业*, 25(10):8—10.
赵兰全, 2011. 西湖凹陷平湖地区油气源分析及其对成藏的影响. *油气地质与采收率*, 18(1):26—29.
赵政璋, 赵贤正, 何海清, 2002. 中国石油近期新区油气勘探成果及面临的挑战与前景展望. *中国石油勘探*, 7(3):1—6.