

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.282



东海陆架盆地形成演化及油气成藏关键地质问题

钟 锴^{1,2}, 朱伟林^{1,2*}, 高顺莉³, 付晓伟^{1,2}

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
2. 同济大学海洋资源研究中心, 上海 200092
3. 中海石油有限公司上海分公司, 上海 200335

摘要: 东海陆架盆地是中国近海规模最大的边缘海盆地, 历次资源评价均认为其具有丰富的油气资源潜力, 但迄今为止, 其油气探明程度仍相对较低, 因此, 有必要对东海陆架盆地从区域构造背景、盆地形成机制到烃源潜力、沉积储层等油气成藏关键问题展开全面的重新研究和认识。通过对东海及其周缘构造单元基础地质资料、研究现状及存在问题的梳理, 提出东海陆架盆地中生代盆地原型及其与周边区域构造演化、晚中生代—新生代裂谷盆地差异演化及其成因、沉积充填特征及其控制因素是研究东海陆架盆地形成演化的 3 个关键的科学问题。因各次级沉降单元差异演化, 造成各区域油气成藏的关键地质要素也存在明显差异, 其中储层因素是以始新统一渐新统沉积为主的东部坳陷带油气成藏的关键, 而烃源岩条件是解答古新统一始新统沉积为主的西部坳陷带油气成藏的基础性问题。

关键词: 东海陆架盆地; 丽水凹陷; 西湖凹陷; 油气成藏; 石油地质。

中图分类号: P541

文章编号: 1000-2383(2018)10-3485-13

收稿日期: 2018-05-01

Key Geological Questions of the Formation and Evolution and Hydrocarbon Accumulation of the East China Sea Shelf Basin

Zhong Kai^{1,2}, Zhu Weilin^{1,2*}, Gao Shunli³, Fu Xiaowei^{1,2}

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. Center for Marine Resources, Tongji University, Shanghai 200092, China
3. Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: The East China Sea Shelf Basin (ECSSB) is the largest basin in the offshore China. However, there are not many progresses in oil and gas exploration due to the poor understanding of key issues of the hydrocarbon accumulation because of the lack of clear recognition of some basic geological problems, though it has been considered to be rich in hydrocarbon resources by all previous resource assessments. According to the geological data, previous studies, and existing problems of ECSSB and its adjacent regions, we propose in this paper that three key problems concerning the formation and evolution of the ECSSB are the Mesozoic basin archetype and the tectonic evolution of its peripheral regions, the differential evolution and essential reasons of the Late Mesozoic to Cenozoic rift, sedimentary filling characteristics and its controlling factors. Because of the different evolution histories of subbasins in ECSSB, there are significant differences of the key geological factors related to hydrocarbon accumulation. Thus the reservoir problem is the critical factor to affect the oil and gas accumulation in the east depression zone which mainly deposits Eocene—Oligocene sediments and the hydrocarbon potential of the source rock is the essential question

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41702228); 国家科技重大专项 (No. 2016ZX05027-001-008); 海洋地质国家重点实验室自主课题 (No. MG20180101)。

作者简介: 钟锴 (1974—), 男, 教授级高工, 主要从事石油地质研究, ORCID: 0000-0003-2885-7690, E-mail: zhongkai@tongji.edu.cn

* **通讯作者:** 朱伟林, ORCID: 0000-0003-2885-7690, E-mail: zhuwl@tongji.edu.cn

引用格式: 钟锴, 朱伟林, 高顺莉, 等, 2018. 东海陆架盆地形成演化及油气成藏关键地质问题. 地球科学, 43(10): 3485—3497.

about the oil-gas exploration.

Key words: East China Sea Shelf Basin; Lishui Sag; Xihu Sag; hydrocarbon accumulation; petroleum geology.

东海陆架盆地是中国近海最大的中—新生代叠合盆地,多轮资源评价结果均显示了巨大的油气潜力,历经了几十年的规模油气勘探后油气探明程度仍然相对较低,勘探面临很大的挑战.重点探区西湖凹陷虽有数个大型气田发现,然而中深层储层由于低孔、低渗难以有效开发;丽水凹陷自上世纪末发现 LS36-1 气田后,勘探陷入停滞,一直未能有新的突破.究其原因,由于盆地形成和演化过程中受到(古)太平洋板块多期洋壳俯冲及其他区域性事件的叠加改造和影响(Northrup *et al.*, 1995; Hall, 2002; Li *et al.*, 2012; Gurnis *et al.*, 2012; Seton *et al.*, 2015),使得对盆地的原型、形成和演化等基础地质问题依旧缺乏足够的了解,进而影响了盆地基本石油地质条件及油气成藏规律的认识.

例如,对东海陆架中生代原型盆地的认识尚不明了.有学者提出其原型盆地在早—中侏罗世为克拉通边缘盆地,白垩世为弧前盆地(冯晓杰等, 2003; 蔡东升等, 2004).然而近期研究表明,古太平洋板块向华南大陆的初始俯冲可能更早(Li *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2017),东海区域早—中侏罗世可能为弧后盆地.对新生代盆地形成机制也存在着弧后盆地(Li *et al.*, 2009; Ren *et al.*, 2002; 孙肇才, 2004)、走滑盆地(Suo and Li, 2013; Xu *et al.*, 2014)及被动陆缘裂谷(李家彪等, 2017)等多种不同观点.需要指出的是,上述成盆模式都难以解释盆地内为何不同凹陷间存在如此显著的构造—沉积演化差异,也难以解答盆地南北分块、东西分带构造格局的控制因素以及盆地沉积充填的变迁.因此,有必要对盆地形成、演化、沉积充填特征,以及基本石油地质条件和油气成藏的关键问题进行梳理和探讨,为东海陆架盆地的油气勘探提供有益启示.

1 地质背景

东海陆架盆地位于欧亚板块东部的陆壳边缘,面积约为 $2.6 \times 10^5 \text{ km}^2$,东以钓鱼岛隆起带将其与冲绳海槽相隔,西为浙闽隆起,南接台湾中生代盆地群,向北延伸至对马海峡附近,总体走向为北东向,呈现出明显东西分带、南北分块的构造格局,可进一步划分为以新生代沉积为主的西部拗陷带和东部拗陷带,及以中生代沉积岩和岩浆岩为主的中部

隆起带(图 1).

中生代盆地可依据 2 次区域不整合面分为下—中侏罗统、上侏罗统一早白垩统及上白垩统 3 个构造层(蔡东升等, 2004)(图 2).中生代地层主要发现于福州凹陷及钱塘凹陷,其他区域的分布尚不清晰,钻井已揭示早侏罗系至晚白垩系为陆相沉积,其地层厚度变化小,属变形弱的拗陷型沉积(蔡东升等, 2004; 杨长清等, 2012).

新生代盆地则主要经历了基隆运动、雁荡运动、瓯江运动、玉泉运动、龙井运动及冲绳海槽运动(图 2),各构造事件的影响也逐渐东移,中新世以来的构造事件使得东部拗陷带形成了一系列的构造反转,如西湖凹陷中央反转构造带,并伴随有强烈的岩浆活动(郭真等, 2015).

新生代盆地分布范围广,在西部拗陷带和东部拗陷带广泛发育.但其沉积环境总体呈现显著的南北差异,具体表现为南海北陆的沉积格局.西部拗陷带以古新世裂陷为主,始新世开始进入拗陷期,其南部的丽水—椒江凹陷为东断西超格局,主要沉积了陆相河湖及浅海相地层(田兵等, 2012);而北部的长江拗陷(含昆山凹陷、金山南凹陷及金山北凹陷),总体呈 NEE 向展布,为陆相沉积拗陷,断拗转换界面可见明显的褶皱和不整合(Su *et al.*, 2014);东部拗陷带由北至南依次为福江凹陷、西湖凹陷及钓北凹陷,裂陷主要发育于始新世,渐新世开始进入拗陷阶段,受中新世及之后强烈改造及盆地埋深的影响,控盆断裂难以识别.

2 关键的地质问题

2.1 中生代盆地原型及其与周边区域构造演化

东海陆架盆地的中生代原型盆地主要发现于盆地西部拗陷带及中央隆起带,其中,福州凹陷及钱塘凹陷的多口探井均揭示了巨厚的中生代碎屑岩地层;据古生物、同位素定年及地层的接触关系可识别出下侏罗统一上白垩统,包括上三叠统(?)—中侏罗统福州组、上侏罗统一下白垩统渔山组、上白垩统闽江组及石门潭组 4 套沉积地层(王可德等, 2000),且地层产状平缓,分布广泛,不受断层的控制(冯晓杰等, 2003),这与南黄海和北黄海受断裂控制的陆相湖盆(蔡东升等, 2004)明显不同.此外,东海地区与

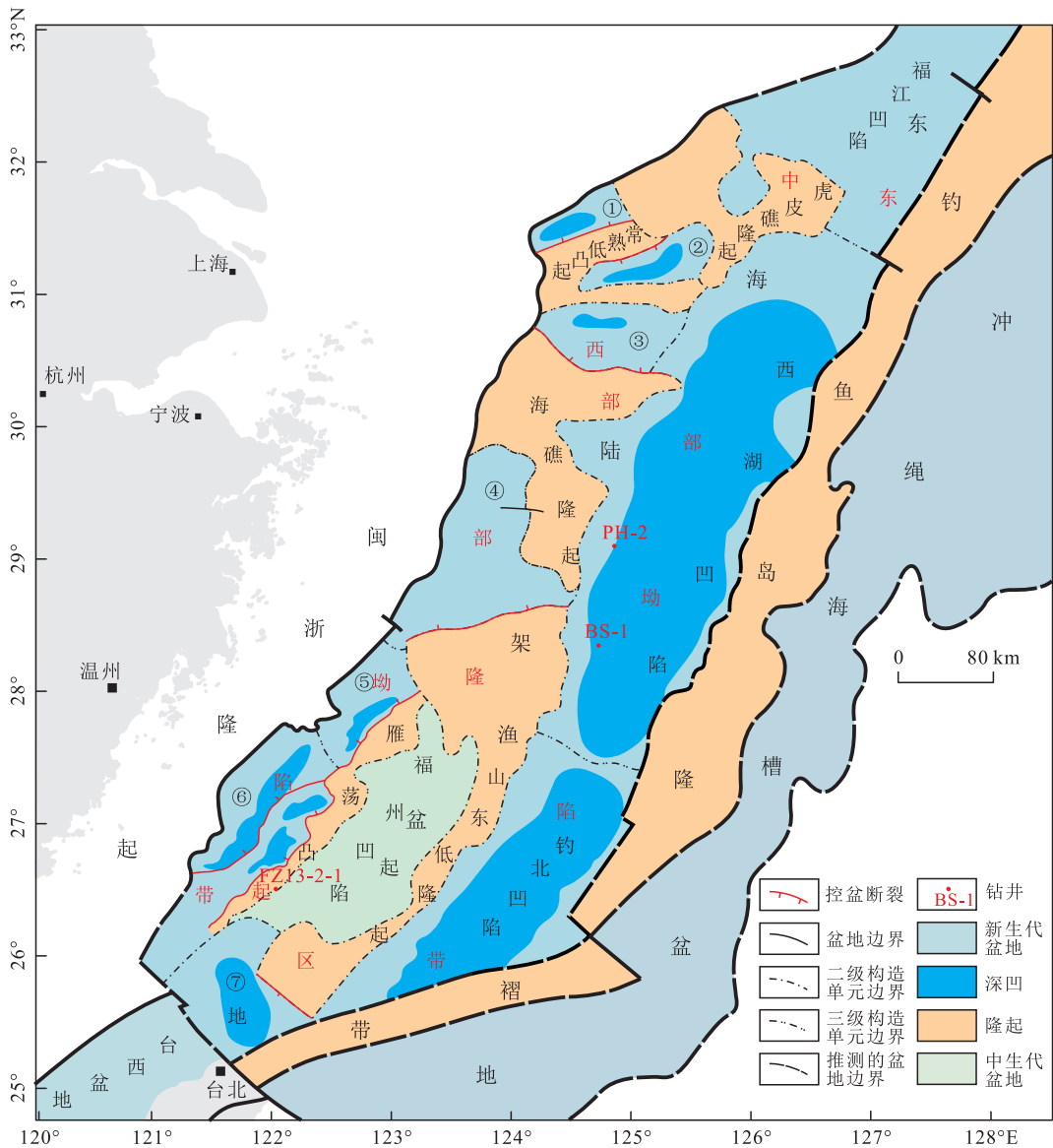


图 1 东海陆架盆地构造划分

Fig.1 Division of tectonic units of East China Sea Basin

①昆山凹陷;②金山北凹陷;③金山南凹陷;④钱塘凹陷;⑤椒江凹陷;⑥丽水凹陷;⑦澎佳屿凹陷.长江拗陷包括昆山凹陷、金山北凹陷及金山南凹陷;东部拗陷带东侧控盆断裂因后期强烈构造反转地震剖面难以识别,未标识为断裂,而改用构造单元界线

南海北部、台湾构成一个广阔的中生代海相—海陆过渡相—陆相沉积区,总体趋势为南海北部—台湾—东海水体逐渐变浅,至东海钱塘凹陷发育巨厚的红色碎屑岩系(Shi and Li, 2012)(图 3).

对此沉积区形成的构造背景存在两种主要观点,一种观点认为东海及南海北部一带曾为独立块体,于中生代某一时期拼贴于华南东侧,但对其拼贴时间存在晚侏罗世—早白垩世(高天钧等,1991)、早白垩世晚期(120~100 Ma)(Lu et al., 1994)及~100 Ma(Niu et al., 2015)等观点.另外一种观点认为东海及南海北部都为华南陆架向海的自然延伸

(刘建华等, 2007; Shi and Li, 2012; Hu et al., 2015),主要受东部俯冲板片的控制,但对俯冲带的形成时间并无统一认识.部分学者认为东亚东部的太平洋主动大陆边缘始于中侏罗世(赵越等,1994),据此认为东海晚三叠世(?)—中侏罗世为克拉通边缘盆地,白垩纪盆地为弧后盆地(冯晓杰等,2003;蔡东升等,2004).据 Dickinson 方法的砂岩组分投点也显示中、下侏罗统物源并无明显的岩浆弧信息(冯晓杰等,2003),然而, Xu et al. (2017) 研究发现了东海西南部早侏罗世(198~187 Ma)岛弧岩浆岩带,并且该岩浆岩带可能一直延续至南海北部.

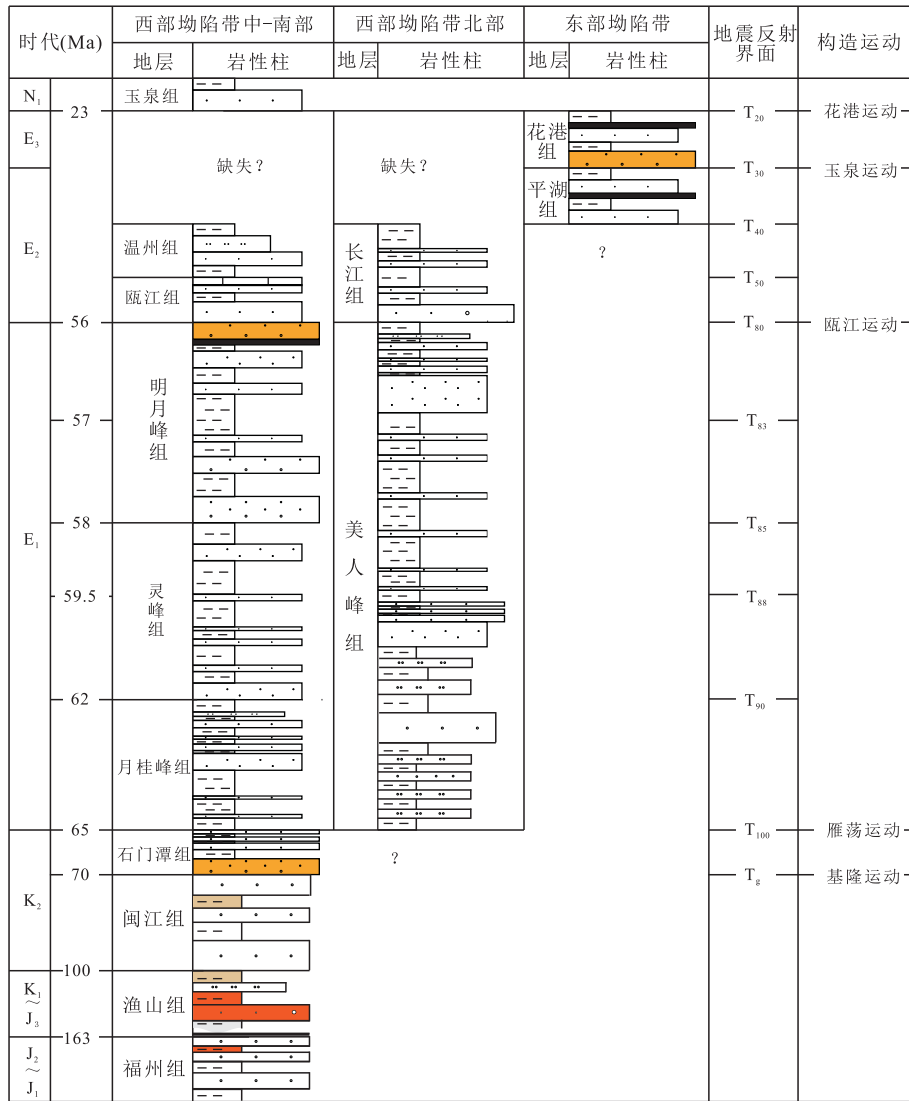


图 2 东海中—新生代盆地综合柱状图

Fig.2 Comprehensive Mesozoic-Cenozoic stratigraphic column of East China Sea Basin

西部拗陷带中—南部包括钱塘凹陷、丽水凹陷、椒江凹陷及福州凹陷；西部拗陷带北部限于长江拗陷；东部拗陷带包括福江凹陷、西湖凹陷及约北凹陷

越来越多的证据表明古太平洋板块的俯冲可能始于晚古生代。Li *et al.* (2006) 发现海南晚古生代 (267~262 Ma) 岛弧型花岗岩，结合同时期华南沉积环境的突变，提出古太平洋的俯冲始于晚古生代，此外，在东海西南部的丽水凹陷也发现该时期构造热事件形成的锆石记录 (付晓伟等, 2015b)。Li and Li (2007) 进一步提出中三叠世至早侏罗世发生板块俯冲及俯冲板片拆沉，并控制了华南造山事件及造山后沉积展布。Shi and Li (2012) 结合华南陆域及沿海沉积古地理演化分析也认为三叠纪至早侏罗世主要受古太平洋板块俯冲的控制。

俯冲体系形成后，华南大陆经历了多期次挤压、拉伸及岩浆事件。中晚侏罗世受板块俯冲影响，华南大陆

受到强烈的挤压，地壳增厚，诱发大规模熔融岩浆活动 (张岳桥等, 2009; 徐先兵等, 2010)，然而此时东海陆架盆地并未遭受明显挤压 (冯晓杰等, 2003)。白垩世经历了两期地壳伸展及两次挤压抬升历史，分别为 136~118 Ma 以 A 型花岗岩的发育为特征，107~86 Ma 岛弧型 A 型花岗岩及双峰火山岩 (Li *et al.*, 2014)，两次伸展间的挤压可能与西菲律宾板块碰撞有关 (Charvet *et al.*, 1994)，晚白垩世长时期的抬升可能与古太平洋板块俯冲角度的变化 (Li *et al.*, 2014) 或 Okhotmorsk 块体的碰撞有关 (Yang, 2013)。

综上所述，东海中生代盆地属于何种类型的盆地，其与华南大陆是何种关系是首先要回答的问题。该区地层应较为完整地记录了东海基底与华南间可

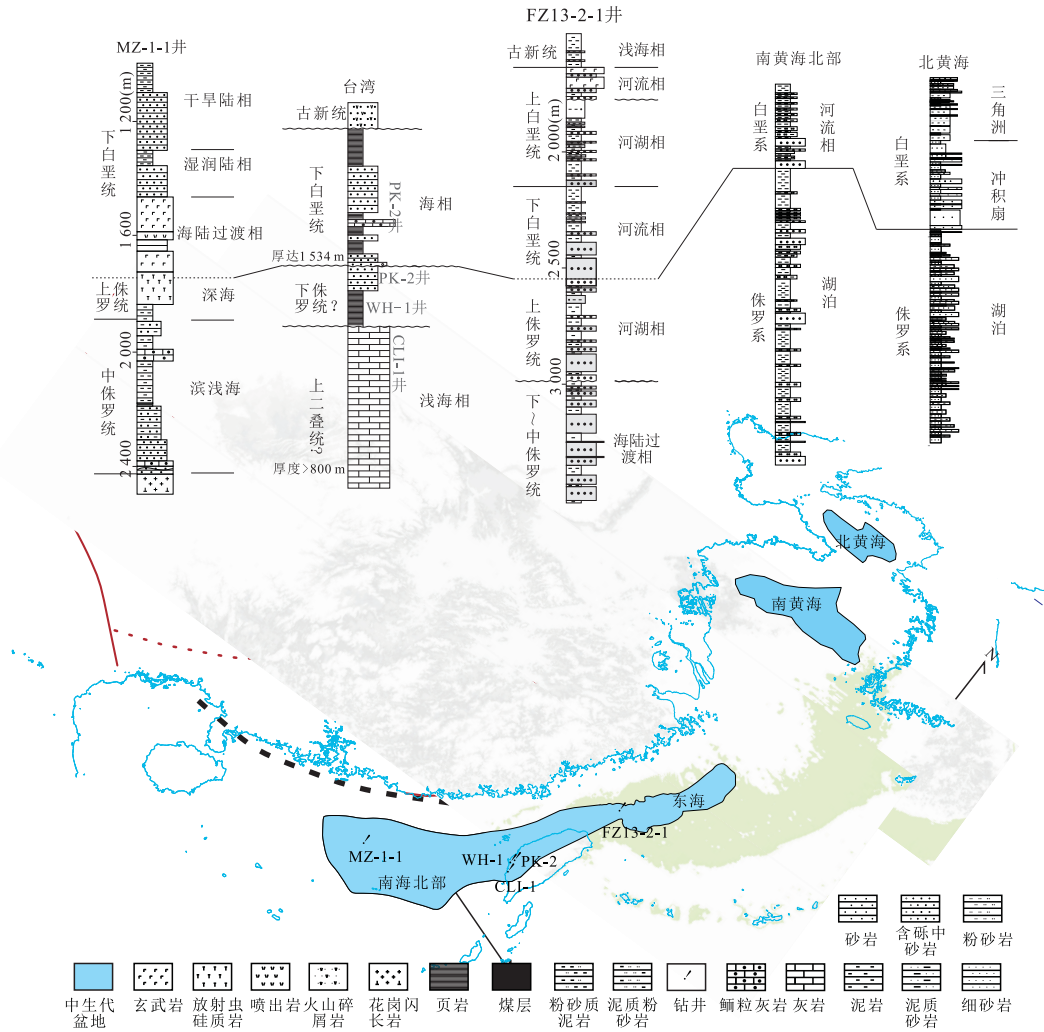


图3 中国近海海域中生代地层分布及地层对比

Fig.3 Distributions of Mesozoic stratigraphy and stratigraphic correlation in China offshore region

MZ-1-1井据吴国璋等(2007);台湾地区据周蒂(2002)修改

能的碰撞或华南中生代岩浆弧发育的过程.如果为弧前盆地,是否发育了完整的弧前盆地充填序列?为什么与南海北部及台湾地区间沉积序列存在很大差异?引起两次大规模不整合的原因是什么?是活动陆缘构造单元迁移的结果还是外来块体碰撞的结果(张传恒和张世红,1998)? 这些都需要寻找更多的地质证据.此外,研究区虽已证实发育分布广泛的中生代沉积,但因缺乏对地层进行详细的划分定年数据,再加上部分地层化石贫乏,只能推测大体时代,因而限制了东海中生代原型盆地的认识.

2.2 晚中生代—新生代盆地差异演化及其成因

东海新生代陆架盆地东西分带、南北分块的格局已为共识,然而对不同地区差异演化特征缺乏足够重视.已有足够的钻井、古生物、同位素等资料表明西部拗陷带南部裂陷始于晚白垩世,盛于古新世,

止于始新世(赵金海, 2004; Su *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016),其北部的长江拗陷虽未能钻穿新生代地层,钻井已揭示与南部丽水—椒江凹陷一样,裂陷期主要发育于古新世,并于始新世进入热沉降阶段(Su *et al.*, 2014)(图 4).

东部拗陷带的形成时间认识欠缺,南部的钓北凹陷已发现最老地层形成于中古新世(钙质超微化石 NP5 带),为海相环境.西湖凹陷开始形成时间难以确定,前平湖组的命名有宝石组、八角亭组及侵入岩基底,火山岩年龄从晚白垩世至始新世都有发现(杨传胜等,2012),钻遇最老的沉积地层被认为是宝石组,典型剖面见于宝石-1 井(顾惠荣和陈琳琳,2003),宝石组与上部平湖组为连续沉积,岩性几乎均为厚层泥岩,取心段见有强烈生物扰动和植物化石,发现稀少的海相微体古生物化石,但丰度和分异

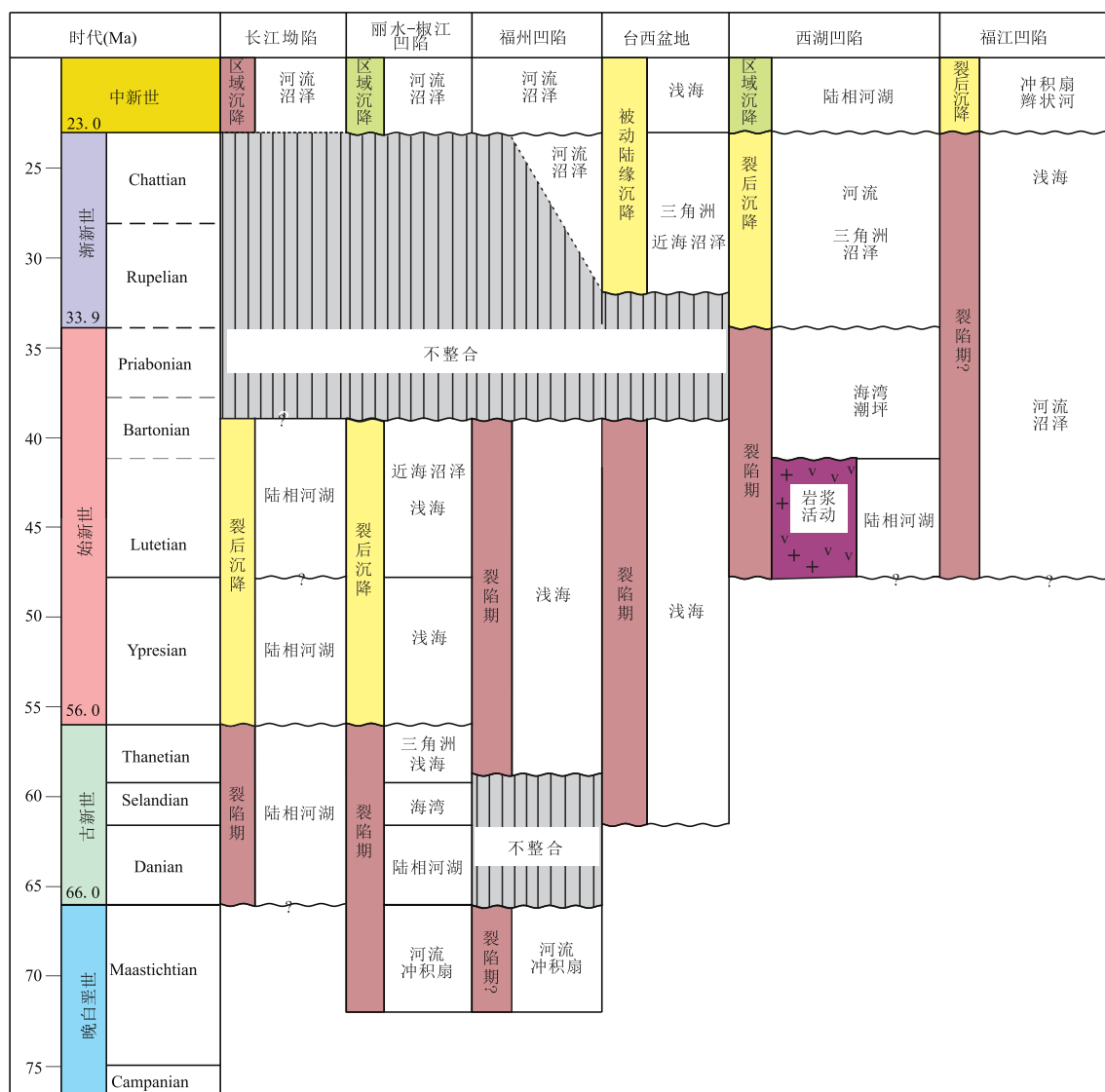


图 4 东海新生代盆地及其台西盆地差异演化特征

Fig.4 The differential evolution features of Cenozoic East China Sea Basin and western Taiwan Basin

度低, 普遍见溶蚀和增生现象, 可能为再沉积产物 (张喜林, 2014), 地层时代的确定主要依据孢粉组合, 但孢粉与其上部的平湖组主要分子基本一致 (李纯洁等, 2004), 因此难以可信的确定其形成时代. 因缺乏确切的裂陷初期沉积记录, 西湖凹陷初始裂陷时间有早古新世 (~65.0 Ma) (Li *et al.*, 2009)、晚古新世 (Su *et al.*, 2014)、始新世 (赵金海, 2004) 等观点, 一般认为结束于始新世末期, 渐新世开始进入裂后热沉降阶段 (赵金海, 2004; Su *et al.*, 2014) (图 4), 此外, Li *et al.* (2009) 提出裂陷期止于中始新世 (~40.4 Ma). 福江凹陷形成时间同样难以确定, Lee *et al.* (2006) 认为存在两期裂陷, 初始裂陷发生于晚白垩世, 延续至晚始新世; 第二期裂陷开始于早渐新世, 止于早中新世; 中新世开始进入热沉降阶段 (图

4). 然而, Lee *et al.* (2006) 错误地将长江坳陷地层的 T80 界面解释为 T30 界面, 该界面 MRF-1 井已经证实为 T80 (Su *et al.*, 2014). 北部 Domi-1 井底部钻遇巨厚的冲积扇沉积, 因化石贫乏, 无法准确定年, Yun *et al.* (2012) 认为可能为始新世地层. 此外, 中新世之后东部拗陷带, 特别是西湖凹陷发生了多次构造反转, 形成了规模巨大的中央反转构造带 (Li and Li, 2007; 郭真等, 2015), 然而该时期西部拗陷带并未受到明显的影响.

东海陆架盆地长期以来基本呈现南海北陆的沉积格局, 其南部丽水-椒江凹陷、钓北及福州凹陷以海相沉积为主 (Kong *et al.*, 2000; 田兵等, 2012; Li *et al.*, 2016), 最大不整合面为盆地西缘 T20 之下的削截面 (Su *et al.*, 2014), 以东海盆地西侧地层掀

斜剥蚀为特征;而中北部以陆相河流—湖泊沉积体系占主导(Kwon and Boggs, 2002; Lee *et al.*, 2006; Su *et al.*, 2014),最大不整合面表现为 T30,该界面之下地层发生强烈褶皱变形。在盆地发育过程中,东海南部古新世—始新世断拗转换界面缺乏明显的挤压构造,而北部长江拗陷的昆山凹陷和金山北凹陷发育明显的褶皱,并经历了大范围的剥蚀。此外,东部拗陷带南部的钓北凹陷与台湾周缘盆地群同一时间(NP5, 62~60 Ma)进入海相环境,其南部大范围缺失晚始新统至早渐新统(Kong *et al.*, 2000),北部的福江凹陷和西湖凹陷未发现该期构造事件的影响。

综上所述,东海新生代陆架盆地各个凹陷构造及沉积特征存在明显的差异,然而对这些差异及导致差异的原因却缺乏深入认识。东部拗陷带前平湖组年代不清,极大地制约了对东海陆架新生代盆地的认识。此外,沉积沉降带的依次东移与俯冲体系间的关系,用简单的俯冲板片后撤(Yu and Chow, 1997)或者叠加冲绳海槽弧后扩张的影响(郭真等, 2015)来解释似乎并不合适,这些模型都难以说明为什么会形成如此复杂的区域差异。另外,东海与台湾附近盆地群都存在古新世—始新世的海相沉积(Li *et al.*, 2016),该海相环境与古南海及(古)太平洋是何种关系?为什么能在东海南部形成海相为主的沉积区?这些问题的深入研究将有助于分析东海新生代陆架盆地成盆机制及其影响因素。

2.3 沉积充填特征及其控制因素

裂谷盆地以多物源、近物源为特征,围绕物源体系发育不同程度富砂扇体,远离物源区域则为湖(海)相泥岩发育区(吴崇筠, 1986; Gawthorpe and Leeder, 2010)。东海西部拗陷带南部的丽水—椒江凹陷裂陷期就表现为该特征,发育一系列的近岸扇体,远离物源的区域早期为湖相富泥沉积,而灵峰组和明月峰组沉积期以浅海相泥岩为主,甚至在远离物源区的海底高部位发育碳酸盐岩沉积。明月峰组上段虽在凹陷西侧发育有厚层砂体,但物源分析显示其仍主要来自邻近的华南(付晓伟等, 2015a, 2015b);同时期,东部的福州凹陷由于物源匮乏,主要发育浅海相泥岩。关于北部的长江拗陷的研究较少,已有的钻井揭示主要发育陆相河湖沉积(Su *et al.*, 2014)。

西湖凹陷前平湖组发育情况难以确定,但已有钻井显示存在极大的时空差异,既有宝石 1 井揭示的巨厚的泥岩,又有 PH-2 井揭示的火山岩和沉积岩的互层。平湖组及花港组,平面差异相对较小,砂

岩组分分析显示石英含量占绝对优势,虽然对该时期沉积体系的研究几乎都延续了典型裂谷盆地沉积体系展布模式—周缘扇体及湖泊沉积模式(王果寿和周卓明, 2002; 胡明毅等, 2010; 张绍亮等, 2014),但是近期的物源分析显示可能并非如此。花港组碎屑锆石物源分析表明其碎屑锆石年龄谱近乎一致,且以古老碎屑锆石年龄占绝对优势为特征(秦兰芝等, 2017),碎屑锆石数据也显示相近的年龄谱特征,这与丽水—椒江凹陷中生代岩浆岩占绝对优势的物源组成明显不同(付晓伟等, 2015a, 2015b; 陈春峰等, 2017),也与邻近华南大陆中生代火山广布的特征及西湖西斜坡钻井揭示的前平湖晚中生代—始新世的岩浆岩不一致。

构造因素对东海地区新生代沉积充填特征起明显的控制作用,不同裂谷发育阶段的沉积充填模式不同,然而限于西湖前平湖地层时代的不确定性,目前对东部拗陷带裂陷初期沉积充填了解甚少。此外,构造在南海北陆的沉积环境与相应的构造格局也缺乏研究。

东部拗陷带,特别是西湖凹陷虽然发育巨厚(上千米)的新生代地层,令人困惑的是既未发现典型深湖相沉积,也没发现与丽水—椒江凹陷类似的浅海或半深海厚层泥质沉积。因此,除构造因素外,应还有其他因素控制了该区沉积体系的发育,其中东西部拗陷带迥异的物源组成暗示物源体系的差异可能会起重要的作用。

3 影响成藏的关键地质要素

油气成藏涉及成藏的各个要素及其相互之间的作用与时空匹配关系,关键是厘清思路,找准问题及找到解决问题的切入点和关键点。实际地质条件下的油气藏形成和分布受众多因素的影响和控制,关键地质要素主要有:烃源灶的发育程度、优质储集体的发育程度、封闭并保存油气的致密盖层以及运聚油气的低势区。

虽然中生代盆地中—下侏罗统具有一定的油气潜力,但是至今尚未有油气发现,再加上前述的中生代盆地研究较少,盆地原型有待进一步分析,本文暂不对中生代盆地石油地质条件进行讨论。前述不同区域沉积沉降中心的差异演化形成了不同的石油地质条件,根据现有的认识和勘探实践,具备一定生烃规模及油气运聚条件的主力凹陷主要有东部的西湖、钓北等凹陷以及西部的丽水—椒江等凹陷。

3.1 古新统凹陷油气成藏的关键为烃源条件

与西湖凹陷已证实的主力烃源岩为始新统煤系地层不同,丽水—椒江凹陷的烃源层系主要发育在古新统.纵览中国近海新生代盆地的富生烃凹陷,其主力烃源层系均发生在始新统及之上的地层;古新统的烃源条件及生烃潜力如何,烃源条件是否优越成为丽水—椒江凹陷的油气成藏的关键问题.

早古新世裂陷初期的月桂峰组暗色泥岩被认为是该区的主力烃源岩(葛和平等,2007),其有机质丰度较高(TOC 平均值为 2.1%),以 II₂ 型为主,生烃潜力良好(生烃潜量平均值为 3.5%),主要来源于水生生物,形成于分割性较强、比较封闭的湖泊环境,且已有多口井(WZ26-1-1、WZ4-1-1 及 SMT-1 等井)钻遇(田杨等,2016a,2016b).灵峰组和明月峰组为陆源海相有机质(孙玉梅和席小应,2003),干酪根以 III 型为主,平均有机碳含量约为 1%,地层最厚达 5 000 m(葛和平等,2007).

已发现油气藏的油源对比显示丽水东次凹原油来自月桂峰组湖相烃源岩,灵峰潜山(LF-1 井)原油主要来自月桂峰组,此外还有少量灵峰组烃源岩的贡献(孙玉梅和席小应,2003;葛和平等,2007).然而,作为该区唯一的商业油气藏——丽水 36-1 气田,其天然气生物标志化合物的油源对比显示其为月桂峰组和灵峰组烃源岩混合来源(孙玉梅和席小应,2003;田杨等,2016b).这与目前灵峰组等陆源海相有机质烃源岩样品评价结果普遍显示的丰度低、类型差、生烃潜力有限(孙玉梅和席小应,2003;葛和平等,2007;田杨等,2016b)相矛盾,究其原因,可能与样品少、代表性差有关,另外,只关注有机成分的传统资源量评价方法有其局限性,引入有机和无机矿物的相互作用可能会对烃源岩生烃潜力有更客观的认识(Zhu *et al.*, 2018).此外,考虑到月桂峰组湖相沉积地层分布相对局限,而灵峰组等海相泥岩厚度大、分布范围广.因此,需要对该区烃源岩,特别是古新统陆源海相有机质的生烃潜力进行深入研究,进一步明确其油气资源潜力.

此外,从已钻井分析来看,丽水—椒江凹陷发育上、中、下三套储盖组合,其成藏系统复杂,除丽水西次凹的丽水 36-1 气田在上组合钻遇明月峰组低位盆底扇和海进扇三角洲砂体形成优质气层外,多口井未能实现商业性发现.主要原因为中、下组合中储层不发育,上组合由于厚层泥岩封挡致使下部油气未能运移至其中聚集成藏.因此,寻找良好的运移条件及储层条件也是该区已发现油气田周边继续扩大

储量发现的关键.

3.2 始新统一渐新统凹陷寻找大中型油气藏的关键是是否发育规模优质储层

西湖凹陷发育始新统平湖组、渐新统花港组及中新统龙井组等多套烃源层系.始新统平湖组分布广、泥岩平均厚度为 245 m、生排烃率高,是西湖凹陷的主力烃源岩层系;花港组烃源岩岩性为灰色—深灰色泥岩及薄煤层,以浅湖相和河流相沉积为主,是另一套重要的烃源层系.西湖凹陷不仅烃源岩较为发育,其含煤系烃源岩处于持续富生烃阶段,并具有烃源岩生烃总量高、生烃强度大、供烃能力强的特点,系西湖凹陷主要的供烃单元.中央反转构造带位于生烃中心,烃源岩的生排烃能力强,生气强度较大.“十二五”以来,西湖凹陷已经发现两个探明储量超过千亿方级的大气田,证实了西湖凹陷具有良好的生烃能力和烃源规模具有形成大油气田的基本条件.

西湖凹陷高丰度烃源灶和优质规模储层耦合决定了大中型油气田的发育.西湖凹陷大型储集体主要在两套不同的沉积体系发育.平湖组以受潮汐影响三角洲—潮坪—海湾的沉积体系为主,花港组以河流—三角洲—湖泊沉积体系为主,两大沉积体系决定了大型储集体的分布特征.

当前,西湖凹陷油气勘探的主要目的层是始新统平湖组和渐新统花港组,因此,寻找优质储层、特别是寻找中央反转构造带花港组大规模砂体富集是发现大中型油气田的突破口.

据油气成藏特征,可将西湖凹陷分为西部斜坡带及中央反转构造带两个主要成藏区带.勘探证实西部斜坡带在始新统平湖组缺乏规模储层;中央反转构造带主要目的层为花港组,沉积环境为辫状河三角洲沉积,某井钻探揭示单层砂体厚度超过 100 m,累计厚度为 400~500 m.但总体而言,该区 3 200 m 深度以下砂岩储层的物性条件急剧变差,普遍发育低孔低渗致密储层,成为制约西湖凹陷大中型油气田勘探开发的最大瓶颈.中央反转构造带在中新世及以后经历了超 3 000 m 的巨厚沉积,储层物性受埋藏深度和沉积相带及成岩作用的复杂控制,埋深较浅的花港组上段层系多为渗透率大于 1 μm^2 的常规储层,而下段层系多发育低孔低渗的致密储层.

此外,中央反转构造带受龙井运动造成的挤压反转最为强烈,其圈闭形成期晚,对于下生上储型成藏组合来说,油源断层有效沟通深部烃源和浅部储层也是成藏的另一关键要素.结合发育层位和埋藏

深度,中央反转构造带上部层系常规油气藏的主要控制因素为“源—运—聚”,而下部致密储层段的主要富集因素为“源—储—聚”,即上部寻找沟通油源发育的有效圈闭,下部寻找优势储层发育的“甜点”区,是中央反转构造带寻找大中型油气田的关键。

西部斜坡带主要成藏层系是平湖组,属自生自储型油气藏,油气运移条件好,且区域盖层发育,基本上有圈闭即可成藏。而制约成藏的关键是平湖组缺乏规模储层,砂体横向变化大,勘探开发井钻探实践表明存在“一井一变化,百米难对比”的情况。甚至在保椒斜坡带深部(3 600~4 300 m 及 >4 600 m)发育受异常高压控制的异常高孔隙度带(曹茜等,2017)。西湖凹陷后期构造作用复杂,斜坡带平湖组不同区域的古地貌及微古地貌变化大,物源差异和沉积相带多变,导致其沉积砂体类型和时空展布规律复杂。优质储层发育相带主要为潮汐控制下的辫状河三角洲水下分河道及河口坝等沉积,其砂体横向变化大,岩性圈闭发育。因此,岩性油气藏是该区下步油气勘探的重要领域,是西湖凹陷斜坡带由中小型油气田到“叠合连片,成群成带”规模油气田的决定因素。发展针对性的储层预测技术,对砂体的展布进行有效预测,进行岩性油气藏勘探,是该区油气勘探的关键。

3.3 东海陆架盆地的东西差异及其对成藏的差异控制作用

基于当前勘探认识和进展,对于东海陆架盆地而言,其西部拗陷带和中央拗陷带存在着明显的演化及成藏差异。对西部拗陷带主要断陷期和烃源发育时期为古新统的拗陷而言,其主要勘探区为丽水—椒江拗陷,影响油气富集成藏的关键因素为烃源条件是否充足;而对于主要断陷期和烃源发育为始—渐新世阶段的东部拗陷带而言,当前主要勘探区为西湖拗陷,如何寻找优质规模储层成为在该区发现大中型油气田的关键。

丽水—椒江拗陷古新统裂陷期缺乏大型物源(付晓伟等,2015a;陈春峰等,2017),因此,该阶段发育的湖—海相泥岩的生烃潜力,成为是否具备形成大型油气田的重要物质基础。始—渐新世盆地,主要勘探区为西湖拗陷,充足的物源供给使得本区缺乏典型湖相、海相泥岩,烃源岩以平湖组煤系地层为主(Ye *et al.*, 2007);然而,由于近源物源体系与远源物源体系及受其影响的沉积体系间关系不明,西斜坡平湖组储层预测难度大。此外,充足的物源也有利于花港组发育巨厚的河流相砂岩储层,然而受区域

构造的影响,西湖凹陷差异演化,中新世以来的沉积很厚,特别是中央反转构造带厚度超过 3 000 m,对花港组储层致密化起了主要作用(高伟中等,2016)。受板块俯冲及冲绳海槽张裂的影响,中央反转构造带于晚中新世形成(郭真等,2015),虽然花港组抬升至相对较浅的深度,但深部优质储层的预测依旧是油气勘探开发的重要课题。

总之,东海中生代盆地的形成和演化明显受到太平洋板块俯冲作用的阶段性控制,因此,首先需要对东海陆架盆地及其周缘构造单元构造演化进行系统梳理,并结合盆地内部各个凹陷差异演化分析。此外,结合区域构造演化和系统的源—汇分析,并将有助于明确其东、西拗陷带及各拗陷间沉积充填差异及其控制因素。在明确上述关键地质问题基础上,攻关东海陆架盆地成藏难题,将加快东海油气勘探的突破。

4 讨论和结论

综上所述,东海陆架盆地的下阶段研究应以西太平洋沟—弧—盆体系的区域构造演化为基础,深入分析盆地及周缘构造单元的关系,进而厘清中生代盆地原型。在油气成藏关键问题研究方面,须查明新生代东部拗陷带初始裂陷沉积的古生物和同位素定年证据,明确新生代盆地各个拗陷构造及沉积演化特征,从而解答东海新生代盆地的形成和演化,进而建立新的成因模式。

此外,应充分重视东海新生代陆架盆地东、西拗陷带两期裂陷的沉积充填差异及其对油气富集成藏的差异化控制作用。例如,由于各沉积沉降中心差异演化,西部拗陷带古新统拗陷,成藏关键要素是烃源条件是否充足;而对于东部拗陷带的始—渐新统拗陷,寻找规模优质储层成为发现大中型油气田的关键。

References

- Cai, D. S., Feng, X. J., Gao, L., et al., 2004. Petroleum Potential and Exploration Direction of Pre-Tertiary Remnant Basins in Offshore China. *China Offshore Oil and Gas (Engineering)*, 16(1): 1—17 (in Chinese with English abstract).
- Cao, Q., Zhou, W., Liu, Y., et al., 2017. Characteristics and Origin of Deep High-Porosity Zones in Slope of Xihu Sag. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 48(3): 751—760 (in Chinese with English abstract).

- Charvet, J., Lapierre, H., Yu, Y., 1994. Geodynamic Significance of the Mesozoic Volcanism of Southeastern China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 387–396.
- Chen, C. F., Zhong, K., Zhu, W. L., et al., 2017. Provenance of Sediments and Its Effects on Reservoir Physical Properties in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(5): 963–972 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. J., Cai, D. S., Wang, C. X., et al., 2003. The Mesozoic Tectonic Evolution in East China Sea Shelf Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(1): 33–37 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. W., Zhu, W. L., Chen, C. F., et al., 2015a. Detrital Zircon Provenance Analysis of Upper Mingyuefeng Formation in West Slope of Lishui-Jiaojiang Sag, East China Sea. *Earth Science*, 40(12): 1987–2001 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.178>
- Fu, X. W., Zhu, W. L., Zhong, K., et al., 2015b. Discovery of Late Paleozoic Detrital Zircons in Lishui Sag, East China Sea, and Its Significance. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 43(6): 924–931 (in Chinese with English abstract).
- Gao, T. J., Huang, H., Lin, Z. X., 1991. Two Significant Terrane Boundaries in Southeastern Coast of China. *Geology of Fujian*, 10(1): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Gao, W. Z., Sun, P., Zhao, H., et al., 2016. Study of Deep Reservoirs Characters and Main Control Factors of Huanggang Formation in Xihu Sag, East China Sea. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(4): 396–404 (in Chinese with English abstract).
- Gawthorpe, R. L., Leeder, M. R., 2010. Tectono-Sedimentary Evolution of Active Extensional Basins. *Basin Research*, 12(3–4): 195–218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2000.00121.x>
- Ge, H. P., Chen, J. P., Chen, X. D., et al., 2007. Discussion on Natural Gas Types and Genesis of Lishui Sag in East China Sea Basin. *Science in China (Series D)*, 37(s2): 104–110 (in Chinese).
- Gu, H. R., Chen, L. L., 2003. Microfossils and Chronostratigraphy of the Deep Beds in the Well Baoshi 1 from Xihu Sag, The East China Sea. *Acta Palaeontologica Sinica*, 42(4): 620–623 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z., Liu, C. Y., Tian, J. F., 2015. Structural Characteristics and Main Controlling Factors of Inversion Structures in Xihu Depression in Donghai Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 59–67 (in Chinese with English abstract).
- Gurnis, M., Turner, M., Zahirovic, S., et al., 2012. Plate Tectonic Reconstructions with Continuously Closing Plates. *Computers & Geosciences*, 38(1): 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.04.014>
- Hall, R., 2002. Cenozoic Geological and Plate Tectonic Evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-Based Reconstructions, Model and Animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4): 353–431. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(01\)00069-4](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(01)00069-4)
- Hu, L. S., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2015. Late Paleozoic to Early Mesozoic Provenance Record of Paleo-Pacific Subduction beneath South China. *Tectonics*, 34(5): 986–1008. <https://doi.org/10.1002/2014TC003803>
- Hu, M. Y., Ke, L., Liang, J. S., 2010. The Characteristics and Pattern of Sedimentary Facies of Huanggang Formation in Xihu Depression. *Journal of Oil and Gas Technology*, 32(5): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Kong, F. C., Lawver, L. A., Lee, T. Y., 2000. Evolution of the Southern Taiwan-Sinzi Folded Zone and Opening of the Southern Okinawa Trough. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 325–341. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(99\)00062-0](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(99)00062-0)
- Kwon, Y. I., Boggs, S. Jr., 2002. Provenance Interpretation of Tertiary Sandstones from the Cheju Basin (NE East China Sea): A Comparison of Conventional Petrographic and Scanning Cathodoluminescence Techniques. *Sedimentary Geology*, 152(1–2): 29–43. [https://doi.org/10.1016/s0037-0738\(01\)00284-6](https://doi.org/10.1016/s0037-0738(01)00284-6)
- Lee, G. H., Kim, B., Shin, K. S., et al., 2006. Geologic Evolution and Aspects of the Petroleum Geology of the Northern East China Sea Shelf Basin. *AAPG Bulletin*, 90(2): 237–260. <https://doi.org/10.1306/08010505020>
- Li, J. B., Ding, W. W., Wu, Z. Y., et al., 2017. Origin of the East China Sea. *Science in China (Series D)*, 47(4): 406–411 (in Chinese).
- Li, C. F., Zhou, Z. Y., Ge, H. P., et al., 2009. Rifting Process of the Xihu Depression, East China Sea Basin. *Tectonophysics*, 472(1–4): 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.04.026>
- Li, C. J., Li, S. Q., Xu, H., 2004. Preliminary Research of Stratigraphic Sequence and Paleosedimentary Environments of Tertiary System of Baoshi-1 Well in the East China Sea. *Marine Petroleum*, 24(4): 81–87 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. H., Zhang, Y. Q., Dong, S. W., et al., 2014. Cretaceous Tectonic Evolution of South China: A Preliminary Synthesis. *Earth—Science Reviews*, 134: 98–136. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.008>
- Li, Q. Y., Wu, G. X., Zhang, L. L., et al., 2016. Paleogene Ma-

- rine Deposition Records of Rifting and Breakup of the South China Sea: An Overview. *Science China Earth Sciences*, 60 (12): 2128 — 2140. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-0163-x>
- Li, X. H., Li, Z. X., Li, W. X., et al., 2006. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian Magmatic Arc on Hainan Island. *The Journal of Geology*, 114 (3): 341 — 353. <https://doi.org/10.1086/501222>
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300 km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35 (2): 179 — 182. <https://doi.org/10.1130/g23193a.1>
- Li, Z. X., Li, X. H., Chung, S. L., et al., 2012. Magmatic Switch-On and Switch-Off along the South China Continental Margin since the Permian: Transition from an Andean-Type to a Western Pacific-Type Plate Boundary. *Tectonophysics*, 532 — 535: 271 — 290. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.02.011>
- Liu, J. H., Wu, J. S., Fang, Y. X., et al., 2007. Pre-Cenozoic Groups in the Shelf Basin of the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 29 (1): 66 — 75 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H., Jia, D., Wang, Z., et al., 1994. Tectonic Evolution of the Dongshan Terrane, Fujian Province, China. *Journal of South American Earth Sciences*, 7 (3—4): 349 — 365. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0895-9811(94)90020-5)
- Niu, Y. L., Liu, Y., Xue, Q. Q., et al., 2015. Exotic Origin of the Chinese Continental Shelf: New Insights into the Tectonic Evolution of the Western Pacific and Eastern China since the Mesozoic. *Science Bulletin*, 60 (18): 1598 — 1616. <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0891-z>
- Northrup, C. J., Royden, L. H., Burchfiel, B. C., 1995. Motion of the Pacific Plate Relative to Eurasia and Its Potential Relation to Cenozoic Extension along the Eastern Margin of Eurasia. *Geology*, 23 (8): 719 — 722. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0719: motppr>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0719: motppr>2.3.co;2)
- Qin, L. Z., Liu, J. S., Li, S., et al., 2017. Characteristics of Zircon in the Huagang Formation of the Central Inversion Zone of Xihu Sag and Its Provenance Indication. *Petroleum Geology & Experiment*, 39 (4): 498 — 504 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic Rifting and Its Dynamic Setting in Eastern China and Adjacent Areas. *Tectonophysics*, 344 (3—4): 175 — 205. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(01\)00271-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(01)00271-2)
- Seton, M., Flament, N., Whittaker, J., et al., 2015. Ridge Subduction Sparked Reorganization of the Pacific Plate-Mantle System 60—50 Million Years Ago. *Geophysical Research Letters*, 42 (6): 1732 — 1740. <https://doi.org/10.1002/2015gl063057>
- Shi, H. S., Li, C. F., 2012. Mesozoic and Early Cenozoic Tectonic Convergence-To-Rifting Transition Prior to Opening of the South China Sea. *International Geology Review*, 54 (15): 1801 — 1828. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.677136>
- Su, J. B., Zhu, W. B., Chen, J., et al., 2014. Cenozoic Inversion of the East China Sea Shelf Basin: Implications for Reconstructing Cenozoic Tectonics of Eastern China. *International Geology Review*, 56 (12): 1541 — 1555. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.951004>
- Sun, Y. M., Xi, X. Y., 2003. Petroleum Reservoir Filling History and Oil-Source Correlation in the Lishui Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 30 (6): 24 — 28 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z. C., 2004. Progress of Petroleum Geology Research for the East China Sea and On Tectonic Evolution of Cenozoic Basins in the Continental Margins along the West Pacific Ocean: An Evolutional Model of Ocean-Wards Receding Residual Backarc Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 9 (1): 1 — 17 (in Chinese with English abstract).
- Suo, Y. H., Li, S. Z., Zhao, S. J., et al., 2013. Continental Margin Basins in East Asia: Tectonic Implications of the Meso-Cenozoic East China Sea Pull-Apart Basins. *Geological Journal*, 50 (2): 139 — 156. <https://doi.org/10.1002/gj.2535>
- Tian, B., Li, X. Y., Pang, G. Y., et al., 2012. Sedimentary Systems of the Superimposed Rift-Subsidence Basin: Taking Lishui-Jiaojiang Sag of the East China Sea as an Example. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30 (4): 696 — 705 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Ye, J. R., Lei, C., et al., 2016a. Development Controlling Factors and forming Model for Source Rock of Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag, The East China Continental Shelf Basin. *Earth Science*, 41 (9): 1561 — 1571 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.116>
- Tian, Y., Ye, J. R., Yang, B. L., et al., 2016b. Development controlling Factors and Forming Model for Source Rock of Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag, the East China Sea Continental Shelf Basin. *Earth Science*, 27 (4): 639 — 653 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. S., Zhou, Z. M., Xiao, C. H., et al., 2002. Sedimentary Characteristics of Eocene Pinghu Formation and Huagang Formation in Chunxiao Zone of Xihu Lake Depree-

- sion, *Oil & Gas Geology*, 23(3): 257–261 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K.D., Wang, J.P., Xu, G.Q., et al., 2000. The Discovery and Division of the Mesozoic Strata in the Southwest of Donghai Shelf Basin. *Journal of Stratigraphy*, 24(2): 129–131 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C.J., 1986. Sandbodies in Lake Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 4(4): 1–27 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G.X., Wang, R.J., Hao, H.J., et al., 2007. Microfossil Evidence for Development of Margin Mesozoic in the North of South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(1): 79–85 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C.H., Zhang, L., Shi, H.S., et al., 2017. Tracing an Early Jurassic Magmatic Arc from South to East China Seas. *Tectonics*, 36(3): 466–492. <https://doi.org/10.1002/2016TC004446>
- Xu, J.Y., Ben-Avraham, Z., Kelty, T., et al., 2014. Origin of Marginal Basins of the NW Pacific and Their Plate Tectonic Reconstructions. *Earth – Science Reviews*, 130: 154–196. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.002>
- Xu, X.B., Zhang, Y.Q., Jia, D., et al., 2010. Geochronology of Zircon LA-ICP-MS U-Pb and Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Constrains to Early Yanshanian Event in Southeast China. *Geological Science and Technology Information*, 29(2): 87–94 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C.Q., Yang, C.S., Li, G., et al., 2012. Mesozoic Tectonic Evolution and Prototype Basin Characters in the Southern East China Sea Shelf Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(3): 105–111 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C.S., Li, G., Yang, C.Q., et al., 2012. Temporal and Distribution of the Igneous Rocks in the East China Sea Shelf Basin and Its Adjacent Regions. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(3): 125–133 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.T., 2013. An Unrecognized Major Collision of the Okhotomorsk Block with East Asia during the Late Cretaceous, Constraints on the Plate Reorganization of the Northwest Pacific. *Earth – Science Reviews*, 126: 96–115. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.07.010>
- Ye, J.R., Qing, H.R., Bend, S.L., et al., 2007. Petroleum Systems in the Offshore Xihu Basin on the Continental Shelf of the East China Sea. *AAPG Bulletin*, 91(8): 1167–1188. <https://doi.org/10.1306/02220705158>
- Yu, H.S., Chow, J., 1997. Cenozoic Basins in Northern Taiwan and Tectonic Implications for the Development of the Eastern Asian Continental Margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 131(1–2): 133–144. [https://doi.org/10.1016/s0031-0182\(96\)00124-1](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(96)00124-1)
- Yun, H.S., Byun, H.S., Oh, J.Y., et al., 2012. Stratigraphy and Paleoenvironment of Domi-1 and Sora-1 Wells, Domi Basin. *Economic and Environmental Geology*, 45(4): 407–429. <https://doi.org/10.9719/eeg.2012.45.4.407>
- Zhang, C.H., Zhang, S.H., 1998. Overview of Research Advance on Forearc Basin. *Geological Science and Technology Information*, 17(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.L., Qin, L.Z., Yu, Y.F., et al., 2014. Sedimentary Facies Characteristics and Its Mode of Lower Member of Oligocene Huagang Formation in Xihu Sag. *Petroleum Geology and Engineering*, 28(2): 5–8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.L., 2014. Sedimentary Characteristics of Baoshi Formation of Lower-Middle Eocene in Xihu Sag of East China Sea Basin. *Journal of Earth Science and Environment*, 36(3): 31–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Q., Xu, X.B., Jia, D., et al., 2009. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction-Related Tectonic System in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234–247 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.H., 2004. The Forming Factors and Evolvement of the Mesozoic and Cenozoic Basin in the East China Sea. *Marine Petroleum*, 24(4): 6–14 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Yang, Z.Y., Ma, X.H., 1994. Geotectonic Transition from Paleasian System and Paleotethyan System to Paleopacific Active Continental Margin in Eastern Asia. *Scientia Geological Sinica*, 29(2): 105–119 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., 2002. Mesozoic Strata and Sedimentary Environment in SW Taiwan Basin of NE South China Sea and Peikang High of Western Taiwan. *Journal of Tropical Oceanography*, 21(2): 50–57 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.J., Cai, J.G., Wang, G.L., et al., 2018. Role of Organo-Clay Composites in Hydrocarbon Generation of Shale. *International Journal of Coal Geology*, 192(5): 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.04.002>

附中文参考文献

- 蔡东升, 冯晓杰, 高乐, 等, 2004. 中国近海前第三纪残余盆地及其勘探潜力与方向. *中国海上油气(工程)*, 16(1): 1–17.
- 曹茜, 周文, 刘岩, 等, 2017. 西湖凹陷斜坡带深层异常高孔隙层特征及成因. *中南大学学报(自然科学版)*, 48(3): 751–760.

- 陈春峰,钟楷,朱伟林,等,2017.东海丽水凹陷物源及其对储层物性影响.石油与天然气地质,38(5):963-972.
- 冯晓杰,蔡东升,王春修,等,2003.东海陆架盆地中新生代构造演化特征.中国海上油气(地质),17(1):33-37.
- 付晓伟,朱伟林,陈春峰,等,2015a.丽水—椒江凹陷西斜坡明月峰组上段碎屑锆石物源.地球科学,40(12):1987-2001.https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.178
- 付晓伟,朱伟林,钟楷,2015b,等.东海丽水凹陷晚古生代碎屑锆石的发现及其意义.同济大学学报(自然科学版),43(6):924-931.
- 高天钧,黄辉,林知勋,1991.中国东南沿海两条重要的地体边界.福建地质,10(1):1-15.
- 高伟中,孙鹏,赵洪,等,2016.西湖凹陷花港组深部储层特征及控制因素.成都理工大学学报(自然科学版),43(4):396-404.
- 葛和平,陈建平,陈晓东,等,2007.东海盆地丽水凹陷天然气类型及其成因探讨.中国科学(D辑),37(s2):104-110.
- 顾惠荣,陈琳琳,2003.东海陆架西湖凹陷宝石一井深层微体化石及地层意义.古生物学报,42(4):620-623.
- 郭真,刘池洋,田建锋,2015.东海盆地西湖凹陷反转构造特征及其形成的动力环境.地学前缘,22(3):59-67.
- 胡明毅,柯岭,梁建设,2010.西湖凹陷花港组沉积相特征及相模式.石油天然气学报(江汉石油学院学报),32(5):1-5.
- 李纯洁,李上卿,许红,2004.西湖凹陷中一下始新统宝石组油气地质与勘探潜力.海洋地质与第四纪地质,24(4):81-87.
- 李家彪,丁巍伟,吴自银,等,2017.东海的来历.中国科学(D辑),47(4):406-411.
- 刘建华,吴健生,方银霞,等,2007.东海陆架盆地的前新生界.海洋学报(中文版),29(1):66-75.
- 秦兰芝,刘金水,李帅,等,2017.东海西湖凹陷中央反转带花港组锆石特征及物源指示意义.石油实验地质,39(4):498-504.
- 孙玉梅,席小应,2003.东海盆地丽水凹陷油气源对比与成藏史.石油勘探与开发,30(6):24-28.
- 孙肇才,2004.从东海石油地质重要进展看西太平洋大陆边缘新生代盆地的构造演化——一种海沟向洋后退的残余弧后盆地演化模式.海相油气地质,9(1):1-17.
- 田兵,李小燕,庞国印,等,2012.叠合断陷盆地沉积体系分析——以东海丽水—椒江凹陷为例.沉积学报,30(4):696-705.
- 田杨,叶加仁,雷闯,等,2016a.东海陆架盆地丽水—椒江凹陷月桂峰组烃源岩发育控制因素及形成模式.地球科学,41(9):1561-1571.https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.116
- 田杨,叶加仁,杨宝林,等,2016b.东海陆架盆地丽水凹陷油气成藏规律及区带优选.天然气地球科学,27(4):639-653.
- 王果寿,周卓明,肖朝辉,等,2002.西湖凹陷春晓区带下第三系平湖组,花港组沉积特征.石油与天然气地质,23(3):257-261.
- 王可德,王建平,徐国庆,等,2000.东海陆架盆地西南部中生代地层的发现.地层学杂志,24(2):129-131.
- 吴崇筠,1986.湖盆砂体类型.沉积学报,4(4):1-27.
- 吴国璋,王汝建,郝沪军,等,2007.南海北部海相中生界发育的微体化石证据.海洋地质与第四纪地质,27(1):79-85.
- 徐先兵,张岳桥,贾东,等,2010.锆石 LA-ICP-MS U-Pb 与白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学及其对中国东南部早燕山事件的制约.地质科技情报,29(2):87-94.
- 杨传胜,李刚,杨长清,等,2012.东海陆架盆地及其邻域岩浆岩时空分布特征.海洋地质与第四纪地质,32(3):125-133.
- 杨长清,杨传胜,李刚,等,2012.东海陆架盆地南部中生代构造演化与原型盆地性质.海洋地质与第四纪地质,32(3):105-111.
- 张传恒,张世红,1998.弧前盆地研究进展综述.地质科技情报,17(4):1-7.
- 张绍亮,秦兰芝,余逸凡,等,2014.西湖凹陷渐新统花港组下段沉积相特征及模式.石油地质与工程,28(2):5-8.
- 张喜林,2014.东海盆地西湖凹陷中一下始新统宝石组沉积特征.地球科学与环境学报,36(3):31-37.
- 张岳桥,徐先兵,贾东,等,2009.华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录.地学前缘,16(1):234-247.
- 赵金海,2004.东海中、新生代盆地成因机制和演化(上).海洋石油,24(4):6-14.
- 赵越,杨振宇,马醒华,1994.东亚大地构造发展的重要转折.地质科学,29(2):105-119.
- 周蒂,2002.台西南盆地和北港隆起的中生界及其沉积环境.热带海洋学报,21(2):50-57.