



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

田 杨^{1,2}, 叶加仁^{2*}, 雷 闯³, 吴克强⁴, 刘一茗²

1.长江大学非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430100

2.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

3.华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063210

4.中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要: 始新统平湖组是东海盆地西湖富生烃凹陷的主力烃源岩系,也是中国东部断陷盆地海陆过渡相烃源岩的典型代表.利用钻井、地震及烃源岩有机地球化学、古生物等资料,在烃源岩特征及其发育的构造—沉积与古气候背景分析的基础上,探讨了平湖组烃源岩发育的主控因素,并建立了相应的形成模式.平湖组暗色泥岩分布广、厚度大,夹多套薄煤层及碳质泥岩,总体烃源岩质量较高.平湖组烃源岩发育于半封闭的海湾环境和温暖—潮湿亚热带型气候条件,以陆生有机质输入为主.平湖组烃源岩的发育主要受沉积—沉降速率、母质来源及有机质保存条件等因素控制,其形成模式可概括为“快速沉降;气候温暖—潮湿;陆生有机质输入为主;淡水—半咸水;氧化性较强的环境”.

关键词: 平湖组;海陆过渡相;烃源岩;控制因素;发育模式;西湖凹陷;石油地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2019)03-0898-11

收稿日期: 2018-12-26

Development Model for Source Rock of Marine-Continental Transitional Face in Faulted Basins: A Case Study of Pinghu Formation in Xihu Sag

Tian Yang^{1,2}, Ye Jiaren^{2*}, Lei Chuang³, Wu Keqiang⁴, Liu Yiming²

1.Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan 430100, China

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

3.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China

4.CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China

Abstract: Source rock in Pinghu Formation of Eocene is the main source rock series in Xihu hydrocarbon generating sag of the East China Sea shelf basin, and it is also a typical source rock of marine-continental transitional face in the faulted basins of East China. Using drilling, seismic data combined with organic geochemistry and paleontology data of hydrocarbon source rock, the development controlling factors for the Pinghu Formation are discussed and the forming model is established by analyses of characteristics of the hydrocarbon source rock and tectonic-sedimentary-palaeoclimate development background in this study. It is found that source rocks in Pinghu Formation of Xihu Sag are characterized by wide distribution, large thickness and multiple series of thin coal seam with carbonaceous mudstone, relatively high quality of source rocks. The development background of Pinghu Formation is a semi-enclosed bay environment with warm-humid subtropical climate condition, and predomi-

基金项目:“构造与油气资源”教育部重点实验室开放基金(No. TPR201614);油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金(No. PLC20180503);国家科技重大专项子课题(Nos. 2016ZX05024-002-003, 201605027-001-005).

作者简介: 田杨(1989—),男,讲师,博士,主要从事构造年代学、成藏动力学和成藏机理研究. ORCID: 0000-0002-0803-4366.

E-mail: tianyanghappy@126.com

* 通讯作者: 叶加仁, ORCID: 0000-0001-5699-8074. E-mail: jrye@cug.edu.cn

引用格式: 田杨, 叶加仁, 雷闯, 等, 2019. 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. 地球科学, 44(3): 898—908.

nantly terrestrial organic matter contribution. The development of hydrocarbon source rocks in Pinghu Formation is mainly affected by sedimentation-subsidence rate, source material and preservation condition of organic matter, forming model could be concluded with "rapid subsidence, warm-humid climate, terrestrial organic matter, fresh-brackish water, and relatively strong oxidation condition".

Key words: Pinghu Formation; marine-continental transitional face; source rock; controlling factors; forming model; Xihu Sag; petroleum geology.

海陆过渡相烃源岩在全球众多盆地内广泛发育,中国东部断陷盆地中诸多含油气盆地的主力烃源岩也为海陆过渡相,如东海盆地西湖凹陷平湖组、南海盆地珠二坳陷恩平组、琼东南盆地崖南凹陷崖城组等,其总体上具有“海陆双源、平面分布稳定、生烃潜力大”等特征(张功成,2005,2010,2012;傅宁等,2007,2010;邓运华,2009)。40余年来,前人对东海陆架盆地西湖凹陷展开了卓有成效的油气地质综合研究和勘探工作,迄今已钻探井、评价井90余口,已发现20余个油气田和含油气构造,尤其是近年来西湖凹陷中部地区2个超千亿方油气田的发现,进一步证实西湖凹陷为富生烃凹陷。西湖凹陷内钻井较少且平面分布不均衡,钻井取心资料有限,缺乏较完整的烃源岩纵向上和平面上的分析资料;学者们主要围绕平湖组煤系烃源岩开展工作,已经认识了其有机质组成、生烃模式、生烃机理等特征(陶士振和邹才能,2005;朱扬明等,2012)。目前关于该套过渡相烃源岩的形成背景、主控因素、发育模式等的研究比较薄弱。本文利用钻井、地震及烃源岩有机地球化学与古生物学等资料,结合盆地构造演化和沉积充填背景,分析了平湖组烃源岩发育的主控因素,并总结了其形成模式,以期为中国东部断陷盆地的海陆过渡相烃源岩研究提供指导。

1 区域地质背景

西湖凹陷位于东海盆地浙东坳陷的中北部,其东邻钓鱼岛岩浆岩带,西接虎皮礁、海礁及渔山隆起,北端和南端通过一个高鞍部分别过渡到福江凹陷和基隆凹陷,为一总体呈NE-SW向展布的断陷盆地,面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据沉积充填、构造演化、油气分布等特征,西湖凹陷由西向东可划分为西部斜坡带、中央洼陷反转带和东部陡坡断隆带3个次级构造单元(图1),各次级构造单元又可进一步划分为若干个三级构造单元(张国华和张建培,2015;段谟东等,2017;李祥权等,2018)。

西湖凹陷地质演化过程复杂,自晚白垩世发生、

发展以来经历了7次较为重要的构造运动。在纵向上,始新世末的玉泉运动和中新世末的龙井运动区域性作用明显,以此为界可以将西湖凹陷构造演化历史划分为断陷、拗陷和区域沉降3个阶段(张建培等,2014)。由于太平洋板块在晚始新世俯冲角度改变,由之前的NNW向转变为NWW向,导致东海盆地西部地区整体抬升剥蚀,而东部的西湖凹陷开始伸展裂陷,沉积—沉降中心自西往东迁移,开始接受始新统平湖组沉积;始新世末受玉泉运动影响,裂陷作用减弱,逐渐表现出拗陷沉降特点,凹陷内广泛接受海侵沉积。总之,平湖组发育于断拗转换期,为一套典型的海陆过渡相沉积岩。

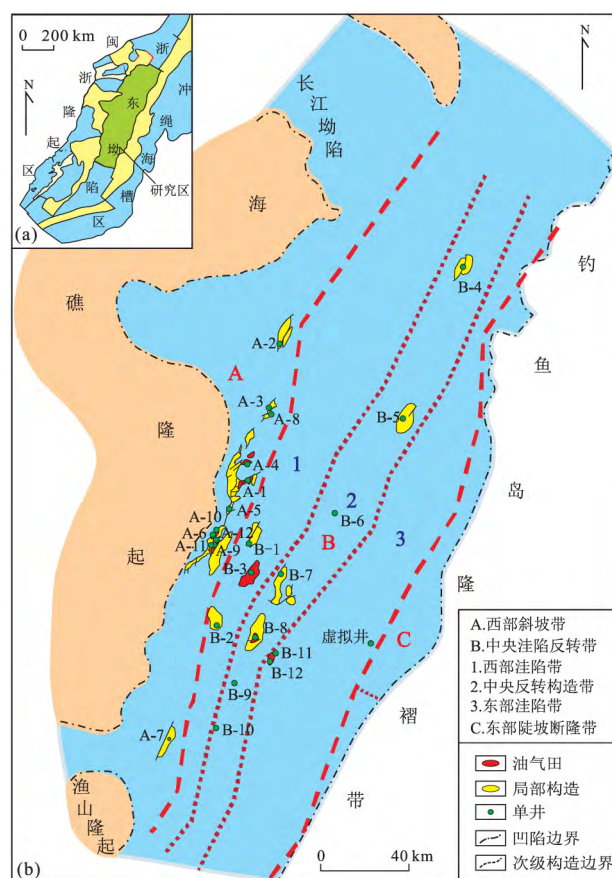


图1 西湖凹陷的位置(a)及构造单元划分(b)

Fig.1 Location (a) and division of tectonic units (b) of Xihu Sag
据钟颖等(2017)

2 地球化学特征

钻井及地震资料揭示,平湖组总体沉积厚度大,分布广泛,平面上具有明显的分区性,岩性以灰色、深灰色泥岩为主夹多套薄煤层及碳质泥岩。西部斜坡带平湖组暗色泥岩厚度一般大于 200 m,最厚可达 860 m;中央洼陷反转构造带暗色泥岩厚度达 1 800 m,且东部洼陷带厚度大于西部洼陷带。煤层及碳质泥岩多为潮坪沼泽沉积的产物,平湖组含煤系数平均为 3.31%,平均厚度为 28 m,主要分布于西部斜坡带中北部。

西湖凹陷内 29 口单井共 1 039 个泥岩及 57 个碳质泥岩/煤样品的地化资料统计分析结果表明,平湖组有机质类型以 II₂、III 型为主(图 2a);暗色泥岩 TOC 平均值为 1.23%,生烃潜量平均值为 3.65 mg/g,而碳质泥岩和煤的有机碳含量(TOC)最高可达 72.95%,平均值为 32.6%,生烃潜量(S_1+S_2)平均值为 98.5 mg/g,总体属中等—好烃源岩(图 2b)。由于平湖组烃源岩埋深相对较大,且凹陷整体地温梯度较高,现今均已进入成熟至高成熟阶段;油气源对比揭示,凹陷内大部分已发现的原油和天然气均来自平湖组高成熟烃源岩(Ye *et al.*, 2007; 苏奥等, 2013)。另外,平湖组有机质来源以陆源高等植物为主(李友川, 2015); A-1 井地球化学综合柱状图揭示平湖组藻类含量较低且有机显微组分以镜质组和惰性组为主(图 3),与前人的观点相符。

3 形成背景

3.1 构造—沉积背景

烃源岩发育与盆地构造演化息息相关,快速沉

降阶段往往形成较好的烃源岩。同时,沉积环境和沉积相也是影响有机质富集的重要因素;前人研究认为,中国近海海陆过渡相烃源岩主要受控于河流—三角洲体系(李友川等, 2014; 赵志刚等, 2016)。

始新统平湖组发育于东海陆架盆地构造沉积史上重要的转折期——断拗转换期,受太平洋板块俯冲作用影响,西湖凹陷在东断西超箕状断陷结构层之上发育中间厚、两边薄的蝶形拗陷构造层。凹陷内 19 口单井及 1 口虚拟井的构造沉降史模拟结果表明,平湖组沉积时期,总体上具有较高的沉降速率(图 4),为烃源岩的发育提供了足够的可容纳空间。由于东海陆架盆地沉降中心由西向东迁移,海水不断后退,且钓鱼岛隆升加剧,西湖凹陷平湖组沉积早期为浅海环境,沉降速率相对较低,平均约为 300 m/Ma;中期为局限海、泻湖环境,主要发育潮坪、河口湾与泻湖沉积体系,沉降速率较高,平均约为 500 m/Ma;晚期为海退背景下的河流相沉积,主要发育淡化泻湖与潮控三角洲沉积体系,沉降速率相对减弱,平均约为 400 m/Ma。

3.2 古气候背景

目前,古气候研究方法有孢粉相组合分析、微量元素分析和粘土矿物分析等(Pedersen and Calvert, 1990; 李天义等, 2008)。本次研究基于单井古生物资料,统计孢粉组合中喜热、喜温、湿生、中生 4 种生态类型,恢复了西湖凹陷平湖组沉积时期古气候特征。如 A-8 井孢粉古生物资料统计表明(图 5),在指示温度特征的孢粉中,平湖组以喜热类型的植物化石为主,含量占比在 50%~83%之间;喜温类型植物化石次之,含量在 17%~50%之间,喜热/喜温比值在 1.9~4.8 之间;未出现喜寒类型植物化石。在指示湿度特征的孢粉中,平湖组中以中生类型植物化石

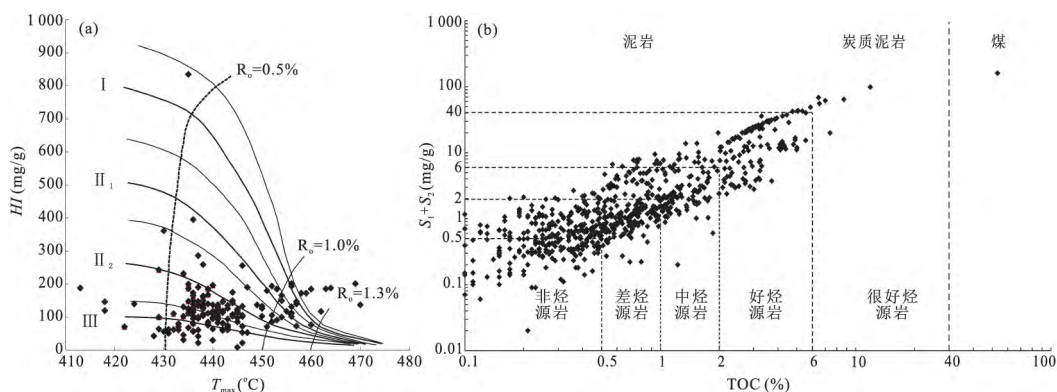


图 2 平湖组烃源岩有机质类型(a)和丰度(b)判别图

Fig.2 Organic matter type(a) and abundance(b) for source rock of Pinghu Formation

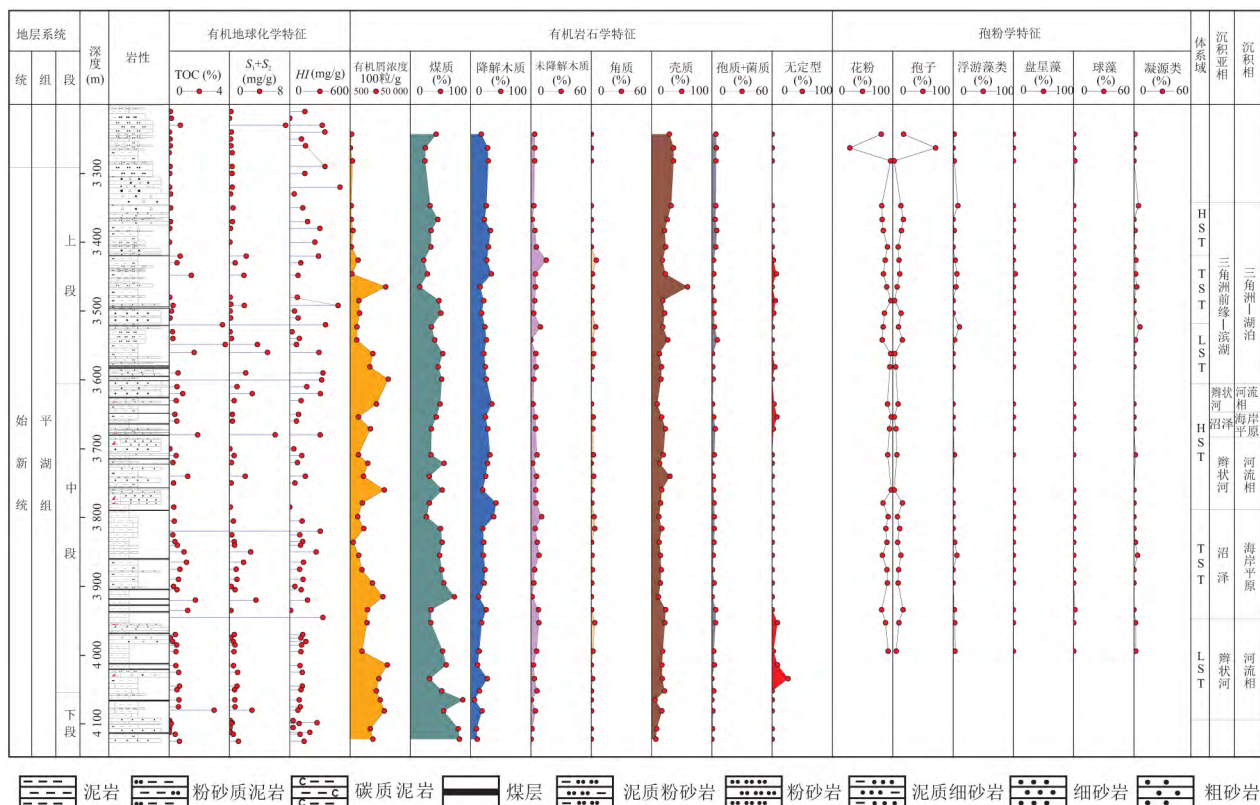


图 3 A-1 井沉积与地球化学综合分析图

Fig.3 Integrated sedimentary and geochemical section of Well A-1

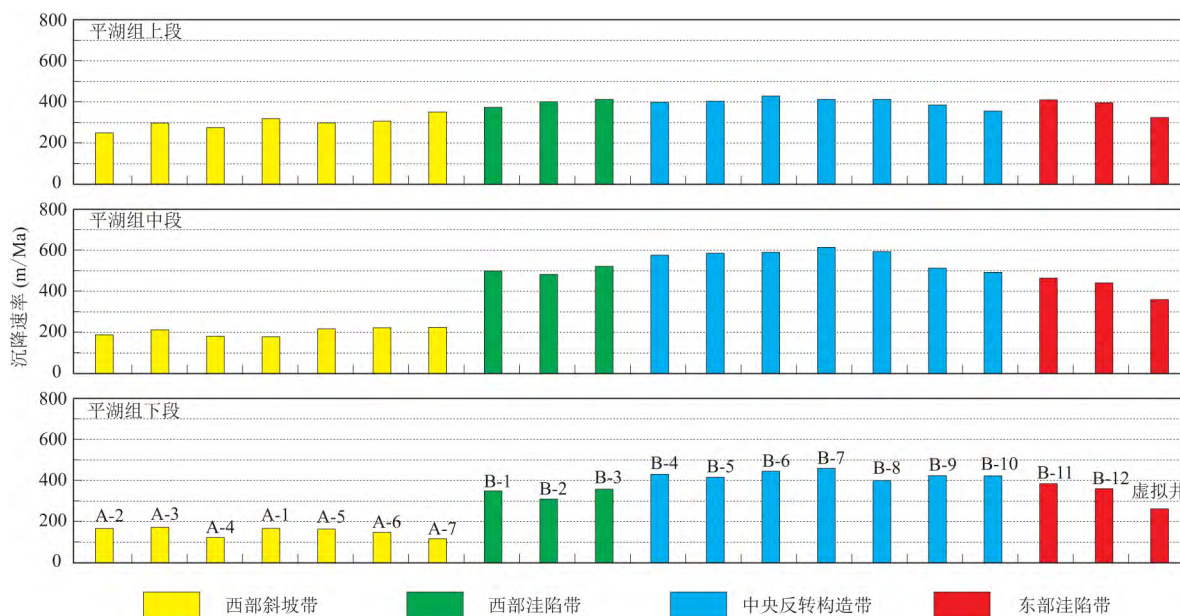


图 4 西湖凹陷平湖组沉积时期基底沉降速率

Fig.4 Subsidence rate of basement during the sedimentary period of Pinghu Formation in Xihu Sag

为主,含量占比在 52%~100% 之间;湿生类型植物化石次之,含量在 0~48% 之间,湿生/中生比值在 0~1.2 之间;几乎见不到旱生类型植物化石.根据赵秀兰等(1992)提出的孢粉气候带类型和干湿度类型

划分模式可判断,平湖组沉积时期西湖凹陷整体处于温暖—潮湿亚热带型气候,纵向上具有“温—热—温”交替变化的趋势.在该气候背景下,西湖凹陷在该时期降雨充沛、河流纵横、湿地广布,周缘地

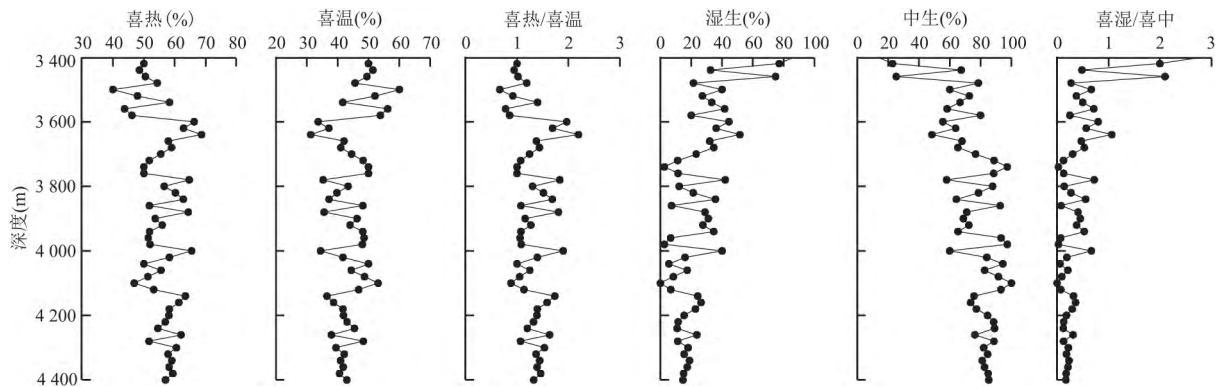


图 5 A-8 井平湖组孢粉组合特征

Fig.5 Characteristics of pollen assemblage in Pinghu Formation of Well A-8

区植被异常发育,陆源有机质和营养物质经河流搬运作用进入盆地,同时使水生浮游植物得以繁荣,为平湖组海陆过渡相烃源岩的形成奠定了物质基础。

4 主控因素

控制沉积盆地烃源岩发育的因素主要有两个方面,即控制有机质输入的因素和控制有机质保存的因素,前者包括古气候、古生产力、营养物质、水体环境、海洋上升洋流、水底热液活动和火山活动等,后者包括氧化—还原条件、水体分层、沉积—沉降速率、沉积矿物类型、沉积环境和水平面变化等(Ingall and Cappellen, 1990; 蔡雄飞, 1994; 刘春莲等, 2001; 李友川等, 2012; 魏恒飞等, 2013)。根据前文对平湖组烃源岩地化特征及发育背景的分析,笔者总结出控制其发育的主要因素为沉积—沉降速率、母质来源以及有机质保存条件。

4.1 沉积—沉降速率

西湖凹陷平湖组沉积时期接受断陷阶段海陆过渡相沉积,典型单井沉积—沉降史重建结果揭示(图 6),沉积—沉降速率总体较高,其中构造沉降速率分布在 50~280 m/Ma 之间,沉积速率分布在 100~550 m/Ma 之间。但是,平面上平湖组烃源岩分布格局明显受到差异构造沉降作用的控制,具体表现为:(1)早期强烈的断陷作用导致区域上差异沉降,凹陷边缘剥蚀作用相对较强,而凹陷中心继续接受沉积;中后期拗陷沉降阶段,由于西部斜坡带地势相对平坦,且短时间内海平面周期性变化,在泻湖、潮坪环境控制下的一些低洼区域往往形成泥炭沼泽沉积,这与较好级别烃源岩(暗色泥岩和煤层的交互式沉积)发育特征相吻合。(2)由西向东(西部斜坡

带→西部洼陷带→中央反转构造带→东部洼陷带)沉积速率和沉降速率具有较为明显的差异。西部斜坡带沉降速率和沉积速率中等,是煤层发育的有利地带;中央洼陷—反转构造带沉降速率和沉积速率较大,为烃源岩的发育提供了较大可容纳空间,其暗色泥岩厚度最大。显然,区域上快速沉降为沉积物提供了充足的容纳空间,而较高的沉积速率有利于有机质富集。

4.2 母质来源

西湖凹陷受海水影响的陆相至海陆过渡相沉积环境中水生有机质和陆生有机质并存,有机质来源的二元性非常明显。A-2 井平湖组浮游藻类含量与有机质丰度对比分析表明(图 7),3 940~4 000 m 层段浮游藻类含量高达 25%,与之相对应的 TOC 达 4.3%,HI 为 286 mg/g, $S_1 + S_2$ 为 13.04 mg/g,说明水生浮游藻类的生产力在一定程度上控制着有机质的富集。需要指出的是,平湖组内缺乏浮游藻类的层段同样可以发育优质烃源岩,这主要与陆生高等植物有机质输入有关(图 3)。

三环、四环萜烷的热稳定性好,抗降解能力强,是反映有机质来源的重要参数之一。西湖凹陷大部分样品三环萜烷比值 C_{19}/C_{23} 、 C_{20}/C_{23} 、 C_{21}/C_{23} 、 C_{19-22}/C_{23-26} 与 TOC 具有较为明显的正相关关系(图 8),说明陆生高等植物生产力也在一定程度上控制着有机质富集。需要指出的是,虽然个别样品三环萜烷比值不高,但同样具有较高的有机碳含量,这主要与水生浮游藻类有机质输入有关。

总之,陆生有机质高效输入与水生有机质有效补充的特征决定了平湖组烃源岩形成时期沉积物中有机质的富集程度。

4.3 有机质保存条件

目前,分析氧化—还原条件的方法主要有古生

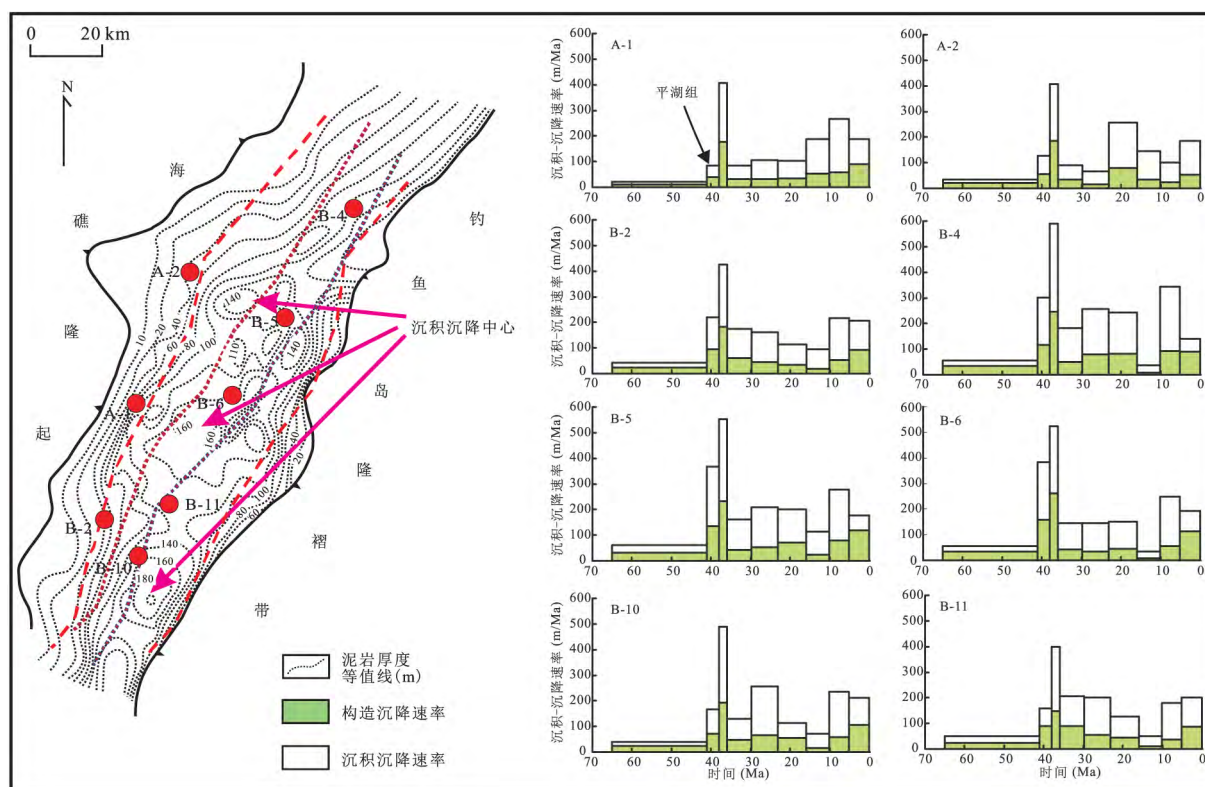


图6 西湖凹陷沉积—沉降速率分布

Fig.6 Spatial-temporal characteristics of subsidence rate of Xihu Sag

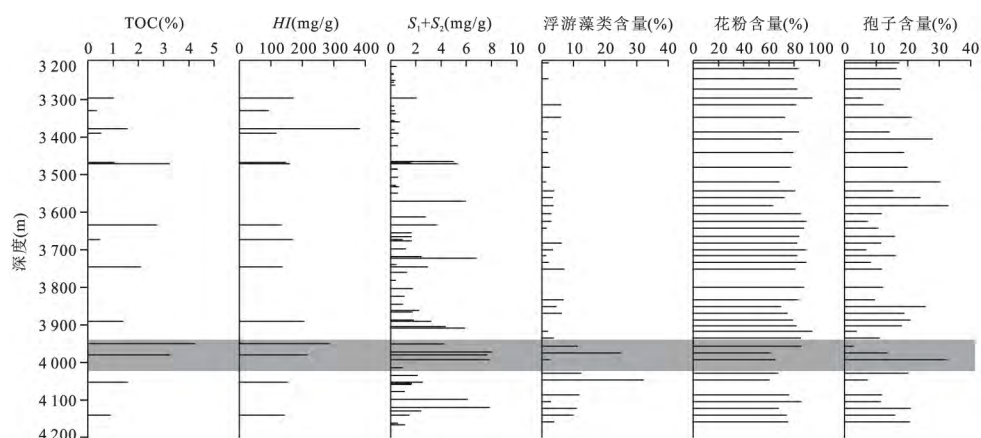


图7 A-4井平湖组有机质丰度及孢藻含量随深度的变化

Fig.7 Variations of the TOC with the content of pollen and phytoplankton in Pinghu Formation of Well A-4

物、微量元素、稀土元素和生物标志化合物等 (Tyson and Pearson, 1991; 陈践发等, 2006; 钱焕菊等, 2009). 本次研究主要利用微量元素及有机地球化学指标来判别平湖组沉积时期的水介质氧化—还原条件.

52 个样品微量元素测试结果统计表明 (图 9a, 9b), 平湖组烃源岩主要形成于弱氧化—弱还原或氧化性的沉积环境, 其中钒铬比值 (V/Cr) 分布范围为 0.39~1.66; 钒镍比值 ($V/(V+Ni)$) 分布范围为

0.44~0.89; 镍钴比值 (Ni/Co) 分布范围为 0.61~14.0. 具体来看, Ni/Co 与 V/Cr 交汇图判别结果倾向于平湖组形成在氧化性沉积环境, 而钒镍比值 ($V/(V+Ni)$) 判别结果倾向于平湖组形成在弱氧化—弱还原沉积环境. 由于在强还原环境或氧化环境下有机质的快速沉降均可以造成上述元素的富集 (胡修棉和王成善, 2001), 因此平湖组沉积时期较高的沉积速率可能是导致上述判别结果存在差异的原因. 另外, 基于生物标志化合物参数判别的氧化—还

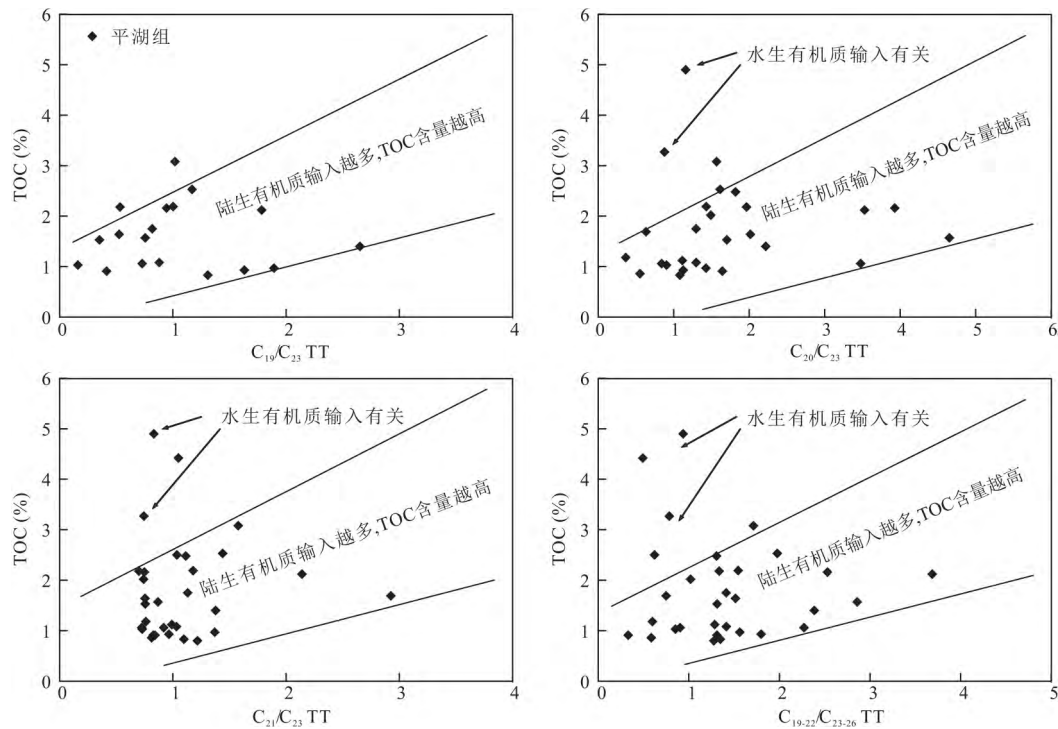


图 8 平湖组烃源岩 TOC 与三环萜烷比值交会图

Fig.8 Intersection diagram of the TOC and tricyclic terpene ratio in Pinghu Formation

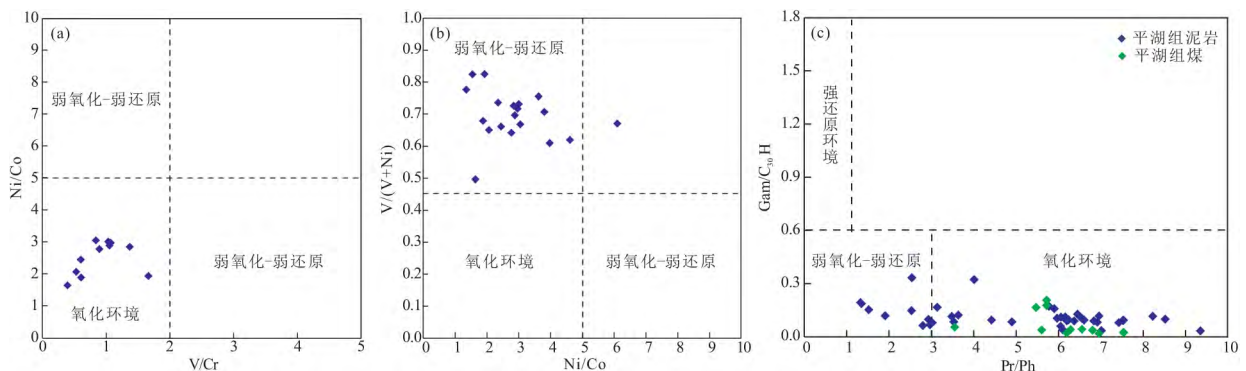


图 9 平湖组烃源岩氧化—还原环境判别图

Fig.9 Discrimination diagram of oxidation-reduction environment of Pinghu Formation

原条件结果表明(图 9c),平湖组烃源岩除少数样品处于弱氧化—弱还原沉积环境外,大部分样品均表现为强氧化性的沉积特征,即较高的 Pr/Ph 值和较低的 $Gam/C_{30}H$ 。西湖凹陷平湖组有机质在氧化性较强的沉积环境中可以有效保存,主要是因为其主要母质来源陆生高等植物有机质性质较稳定、耐氧化和耐分解能力强以及较高的沉积速率背景,但是性质不稳定、耐氧化和耐分解能力弱的浮游藻类有机质能否在氧化沉积环境中较高沉积速率背景下得到有效保存有待进一步研究。

浮游藻类含量代表了初始水生有机质的数量,无定形有机质含量代表了最终保存下来的水生有机

质的数量,若有机质在沉积过程中得到了很好保存,两者将存在明显的线性关系。图 10 显示,西湖凹陷 8 口单井中平湖组浮游藻类含量与无定形有机质含量之间的关系大致可以划分为 A、B、C 三种类型。其中,类型 A 为浮游藻类含量和无定形有机质含量存在明显的线性关系(图 10 中 A-10 井),指示浮游藻类有机质得到了有效保存;类型 B 为浮游藻类含量远远高于无定形有机质含量(图 10 中 A-12 井),指示浮游藻类有机质部分遭到降解,部分得以保存;类型 C 为见不到无定形有机质(图 10 中 A-7 井),指示浮游藻类有机质全部遭到降解,未能保存下来。也就是说,在平湖组较高沉积速率背景下,一部分浮游

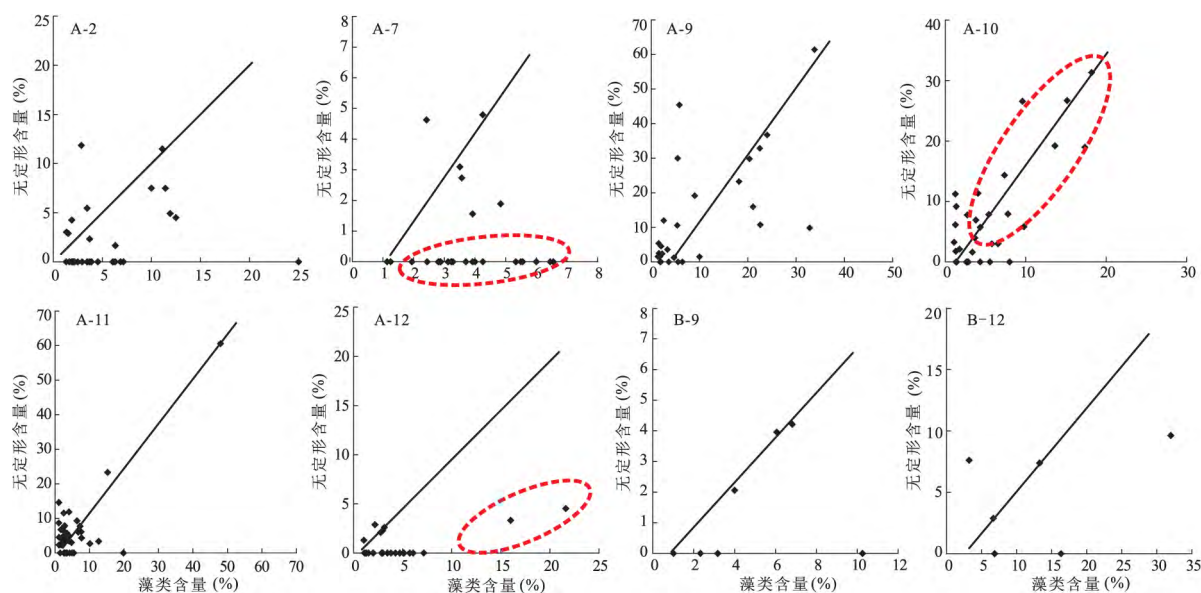


图10 平湖组藻类含量和无定形含量交会图

Fig.10 Intersection diagram of algae content with the amorphous content from Pinghu Formation

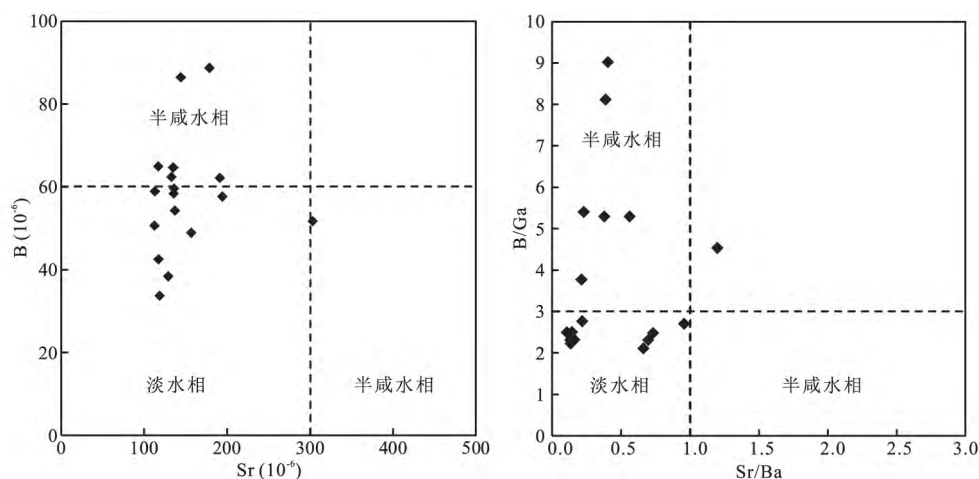


图11 西湖凹陷水介质条件判别图

Fig.11 Discrimination diagram of water medium conditions in Xihu Sag

藻类有机质得到保存,一部分浮游藻类有机质遭到降解,这主要与平湖组沉积过程中氧化—还原条件存在较强的波动性有关,同时也说明氧化—还原条件在一定程度上控制着平湖组水生有机质富集程度。

另外,水体的含盐度影响着生物群落的发育,在一定程度上控制着有机质的富集。基于8口单井微量元素测试数据,笔者绘制微量元素关系图(图11)发现,平湖组锶钡比值(Sr/Ba)分布范围在0.05~1.98之间,平均值为0.28,说明平湖组既有淡水沉积环境也有咸水沉积环境,但表现为以前者为主的沉积环境;硼镓比值(B/Ga)分布范围为2.11~9.02,

平均值为3.37,同样说明平湖组沉积时期处于海陆过渡相环境。西湖凹陷淡水—半咸水的水介质条件为水生生物的发育创造了得天独厚的地质条件,淡水生物与半咸水、咸水生物在这里混合,如蓝藻、绿藻、硅藻等。

5 发育模式

研究表明,中国东部断陷盆地中的过渡相烃源岩主要发育于东海陆架盆地明月峰组和平湖组、珠江口盆地恩平组、以及琼东南盆地和莺歌海盆地崖城组。过渡相烃源岩发育时期,盆地构造演化一般处

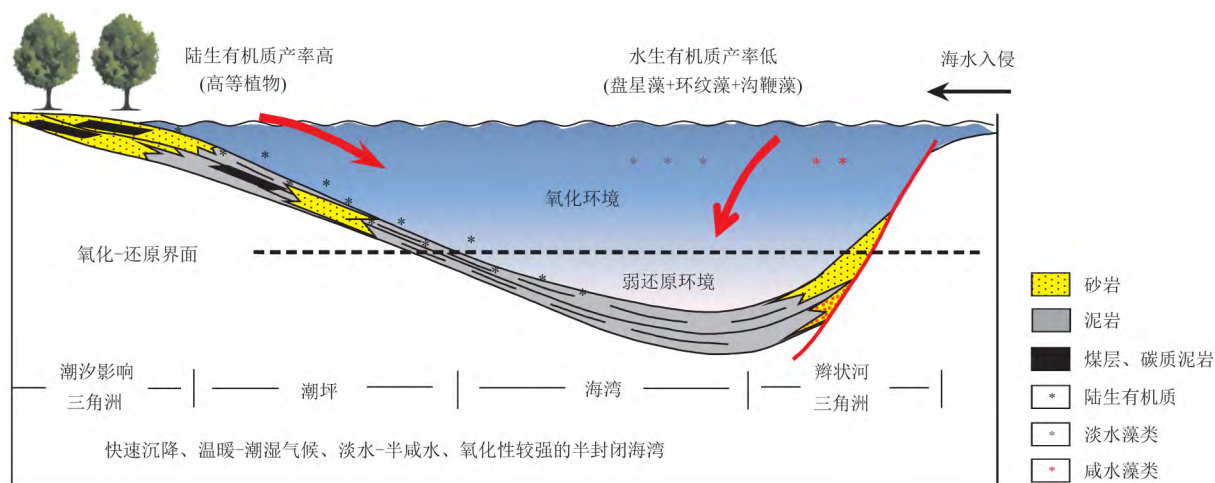


图12 平湖组烃源岩发育模式

Fig.12 Development model for source rock of Pinghu Formation

于裂陷晚期阶段,沉降和沉积补偿关系为平衡补偿,可容纳空间与沉积物供给相平衡,气候类型以热带、亚热带潮湿温暖气候为主,植被成分以针叶类和草木类较常见,海湖平面频繁周期性升降变化,有机母质输入以高等植物为主,高等植物生产力高即陆源母质供应充足、沉积环境为氧化—弱还原条件,海陆过渡相烃源岩形成模式为有机质输入为主导的控制模式(戴金星等,2007;朱伟林,2010;张功成等,2014)。

综上所述,平湖组海陆过渡相烃源岩发育于西湖凹陷断拗转换期,与中国东部多数断陷盆地过渡相烃源岩发育时期类似,在温暖—潮湿亚热带型气候影响下,其形成主要受控于沉积—沉降速率、母质来源以及有机质保存条件中的氧化还原条件,建立其发育模式为:快速沉降;气候温暖—潮湿;陆生有机质输入为主;淡水—半咸水,有机质保存在氧化性较强的环境(图12)。

6 结论

(1)平湖组形成于盆地构造断—拗转换期,沉积厚度大,平面分布广,沉积时处于半封闭的海湾环境和温暖—潮湿的亚热带型气候,陆源有机质和营养物质经河流搬运作用进入盆地,同时使水生浮游植物得以繁荣,为平湖组过渡相烃源岩形成奠定了物质基础。

(2)平湖组海陆过渡相烃源岩的发育主要受沉积—沉降速率、母质来源及有机质保存条件等因素控制,其形成模式可概括为“快速沉降,温暖—潮湿

气候,陆生有机质输入为主,淡水—半咸水,氧化性较强的环境”。

References

- Cai, X.F., 1994. Palaeoclimates as a Necessary Factor in Basin Analysis. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 14(2): 42—46 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.F., Zhang, S.C., Sun, S.L., et al., 2006. Main Factors Influencing Marine Carbonate Source Rock Formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 467—472 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J.X., Zou, C.N., Tao, S.Z., et al., 2007. Formation Conditions and Main Controlling Factors of Large Gas Fields in China. *Natural Gas Geoscience*, 18(4): 473—484 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Y.H., 2009. Analysis on Differences of Petroleum Type and Geological Conditions between Two Depression Belts in China Offshore. *Acta Petrolei Sinica*, 30(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Duan, M.D., Ye, J.R., Wu, J.F., et al., 2017. Overpressure Formation Mechanism in Xihu Depression of the East China Sea Shelf Basin. *Earth Science*, 42(1): 119—129 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.009>
- Fu, N., Deng, Y.H., Zhang, G.C., et al., 2010. Transitional Source Rock and Its Contribution to Hydrocarbon Accumulation in Superimpose Rift-Subsidence Basin of Northern South China Sea: Taking Baiyun Sag of Zhu II Depression as an Example. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4): 559—565 (in Chinese with English abstract).
- Fu, N., Mi, L.J., Zhang, G.C., et al., 2007. Source Rocks and Origin of Oil and Gas in the Northern Baiyun Depres-

- sion of Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 28(3):32—38 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. M., Wang, C. S., 2001. Summarization on the Studying Methods of the Palaeo-Ocean Dissolved Oxygen. *Advances in Earth Sciences*, 16(1):65—71 (in Chinese with English abstract).
- Ingall, E. D., Cappellen, P. V., 1990. Relation between Sedimentation Rate and Burial of Organic Phosphorus and Organic Carbon in Marine Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(2):373—386. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90326-g](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90326-g)
- Li, T. Y., He, S., Yang, Z., et al., 2008. The Marine Source Rock Formation Conditions and Control Factors. *Geological Science and Technology Information*, 27(6):63—70 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. Q., Liu, J. S., Lu, Y. C., et al., 2018. Prototype Basin Characterization of Huagang Formation of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin. *Earth Science*, 43(2):502—513 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.596>
- Li, Y. C., 2015. Main Controlling Factors for the Development of High Quality Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Offshore China. *China Offshore Oil and Gas*, 27(3):1—9 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. C., Deng, Y. H., Zhang, G. C., 2012. Zoned Distribution of Source Rocks and Hydrocarbon Offshore China. *China Offshore Oil and Gas*, 24(1):6—12 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. C., Deng, Y. H., Zhang, G. C., 2014. Gas-Rich Zone and Main Controlling Factors of Gas Source Rock in Offshore China. *Natural Gas Geoscience*, 25(9):1309—1319 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Yang, J. L., Hans-Joachim, R., et al., 2001. Factors Influencing Organic Carbon Distribution in Lacustrine Sediments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(1):113—116 (in Chinese with English abstract).
- Pedersen, T. F., Calvert, S. E., 1990. Anoxia vs. Productivity: What Controls the Formation of Organic-Carbon-Rich Sediments and Sedimentary Rock? *AAPG Bulletin*, 74(4):454—466. <https://doi.org/10.1306/0c9b232b-1710-11d7-8645000102c1865d>
- Qian, H. J., Lu, X. C., Zhang, X. F., et al., 2009. Spatial Paleosalinity Distribution and Element Geochemistry of Argillaceous Source Rocks in the Upper Part of 4th Member of Tertiary Shahejie Formation in Dongying Sag. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(2):161—168 (in Chinese with English abstract).
- Su, A., Chen, H. H., Wang, C. W., et al., 2013. Genesis and Maturity Identification of Oil and Gas in the Xihu Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(5):521—527 (in Chinese with English abstract).
- Tao, S. Z., Zou, C. N., 2005. Accumulation and Distribution of Natural Gases in Xihu Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4):103—110 (in Chinese with English abstract).
- Tyson, R. V., Pearson, T. H., 1991. Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia. *Geological Society of Special Publication*, 58(1):1—24.
- Wei, H. F., Chen, J. F., Chen, X. D., et al., 2013. The Controlling Factors and Sedimentary Environment for Developing Coastal Coal-Bearing Source Rock of Pinghu Formation in Xihu Depression. *Geology in China*, 40(2):487—497 (in Chinese with English abstract).
- 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>
- Zhang, G. C., 2005. Geological Features and New Exploration Realms of Offshore Gas in China. *China Offshore Oil and Gas*, 17(5):289—296 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., 2010. Tectonic Evolution of Deepwater Area of Northern Continental Margin in South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4):528—533, 541 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., 2012. Co-Control of Source and Heat. *Acta Petrolei Sinica*, 33(5):723—738 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Wang, Q., Miao, S. D., et al., 2014. The Duality Distribution Pattern of Marine-Continental Transitional Hydrocarbon Source Rocks: A Case Study from Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin, China Offshore. *Natural Gas Geoscience*, 25(9):1299—1308 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. H., Zhang, J. P., 2015. A Discussion on the Tectonic Inversion and Its Genetic Mechanism in the East China Sea Shelf Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(1):260—270 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. P., Zhang, T., Tang, X. J., 2014. Basin Type and Dynamic Environment in the East China Sea Shelf Basin. *Acta Geologica Sinica*, 88(11):2033—2043 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. L., Zhao, C. B., Guan, X. T., et al., 1992. The Application of Spore-Pollen Data in a Quantitative Explanation of Tertiary Palaeoclimate in Our Country. *Acta Petrolei Sinica*, 13(2):215—225 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. G., Wang, P., Qi, P., et al., 2016. Regional Background and Tectonic Evolution of East China Sea Basin. *Earth Science*, 41(3):546—554 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.045>

- Zhong, T., Cao, B., Liu, J. S., et al., 2017. Genesis of Chlorite Rims and Its Significance to Low Porosity and Low Permeability Sandstone Reservoir of Huagang Formation in North Central Xihu Sag, East Sea of China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 44(6): 708–716 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., 2010. Advancements of Oil and Gas Exploration in China Offshore Area: Overview and Perspective. *Engineering Sciences*, 12(5): 18–24 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. M., Zhou, J., Gu, S. X., et al., 2012. Molecular Geochemistry of Eocene Pinghu Formation Coal-Bearing Source Rocks in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 33(1): 32–39 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡雄飞, 1994. 古气候条件是盆地分析不可缺少的因素. 岩相古地理, 14(2): 42–46.
- 陈践发, 张水昌, 孙省利, 等, 2006. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素. 地质学报, 80(3): 467–472.
- 戴金星, 邹才能, 陶士振, 等, 2007. 中国大气田形成条件和主控因素. 天然气地球科学, 18(4): 473–484.
- 邓运华, 2009. 试论中国近海两个坳陷带油气地质差异性. 石油学报, 30(1): 1–8.
- 段谋东, 叶加仁, 吴景富, 等, 2017. 东海陆架盆地西湖凹陷超压成因机制. 地球科学, 42(1): 119–129. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.009>
- 傅宁, 邓运华, 张功成, 等, 2010. 南海北部叠合断陷盆地海陆过渡相烃源岩及成藏贡献——以珠二坳陷白云凹陷为例. 石油学报, 31(4): 559–565.
- 傅宁, 米立军, 张功成, 等, 2007. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩及北部油气成因. 石油学报, 28(3): 32–38.
- 胡修棉, 王成善, 2001. 古海洋溶解氧研究方法综述. 地球科学进展, 16(1): 65–71.
- 李天义, 何生, 杨智, 等, 2008. 海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析. 地质科技情报, 27(6): 63–70.
- 李祥权, 刘金水, 陆永潮, 等, 2018. 东海陆架盆地西湖凹陷花港组原型盆地性质厘定. 地球科学, 43(2): 502–513. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.596>
- 李友川, 2015. 中国近海湖相优质烃源岩形成的主要控制因素. 中国海上油气, 27(3): 1–9.
- 李友川, 邓运华, 张功成, 2012. 中国近海海域烃源岩和油气的分带性. 中国海上油气, 24(1): 6–12.
- 李友川, 邓运华, 张功成, 2014. 中国近海天然气富集带及气源岩形成的主要控制因素. 天然气地球科学, 25(9): 1309–1319.
- 刘春莲, 杨建林, Hans-Joachim, R., 等, 2001. 影响湖相沉积岩中有机碳分布的主要因素——以三水盆地为例. 沉积学报, 19(1): 113–116.
- 钱焕菊, 陆现彩, 张雪芬, 等, 2009. 东营凹陷沙四段上部泥质烃源岩元素地球化学及其古盐度的空间差异性. 岩石矿物学杂志, 28(2): 161–168.
- 苏奥, 陈红汉, 王存武, 等, 2013. 东海盆地西湖凹陷油气成因及成熟度判别. 石油勘探与开发, 40(5): 521–527.
- 陶士振, 邹才能, 2005. 东海盆地西湖凹陷天然气成藏及分布规律. 石油勘探与开发, 32(4): 103–110.
- 魏恒飞, 陈践发, 陈晓东, 等, 2013. 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. 中国地质, 40(2): 487–497.
- 张功成, 2005. 中国近海天然气地质特征与勘探领域. 中国海上油气, 17(5): 289–296.
- 张功成, 2010. 南海北部陆坡深水构造演化及其特征. 石油学报, 31(4): 528–533, 541.
- 张功成, 2012. 源热共控论. 石油学报, 33(5): 723–738.
- 张功成, 王琪, 苗顺德, 等, 2014. 中国近海海陆过渡相烃源岩二元分布模式——以珠江口盆地白云凹陷为例. 天然气地球科学, 25(9): 1299–1308.
- 张国华, 张建培, 2015. 东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探讨. 地学前缘, 22(1): 260–270.
- 张建培, 张田, 唐贤君, 2014. 东海陆架盆地类型及其形成的动力学环境. 地质学报, 88(11): 2033–2043.
- 赵秀兰, 赵传本, 关学婷, 等, 1992. 利用孢粉资料定量解释我国第三纪古气候. 石油学报, 13(2): 215–225.
- 赵志刚, 王鹏, 祁鹏, 等, 2016. 东海盆地形成的区域地质背景与构造演化特征. 地球科学, 41(3): 546–554. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.045>
- 钟韬, 曹冰, 刘金水, 等, 2017. 西湖凹陷花港组低孔低渗砂岩储层中绿泥石环边的成因及其意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 44(6): 708–716.
- 朱伟林, 2010. 中国近海油气勘探进展. 中国工程科学, 12(5): 18–24.
- 朱扬明, 周洁, 顾圣啸, 等, 2012. 西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征. 石油学报, 33(1): 32–39.