马瑞罡, 刘传联. 海相烃源岩发育的古海洋模式及对南海北部的指示意义[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(8): 11-18.

海相烃源岩发育的古海洋模式及对南海北部的指示意义

马瑞罡, 刘传联
(同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘　要: 通过汇总全球几个主要的优质海相烃源岩的古海洋-古气候特征以及相应的沉积环境, 从有机质的生产、来源和保存条件 3 个维度将海相烃源岩发育的古海洋模式概括为: ①三角洲-陆源海相模式, 如西非陆缘盆地发育的烃源岩; ②强蒸发-上升流模式, 如墨西哥湾中生界烃源岩; ③滞留静海-湿润气候模式, 如北海盆地钦莫里阶烃源岩。结合现有资料分析认为, 南海北部深水区恩平-珠海组(始新统—渐新统)处于半封闭局限海环境, 普遍发育三角洲沉积体系, 陆源有机质供应充足, 气候条件适宜, 具备发育优质海相烃源岩的古海洋条件。

关键词: 海相烃源岩; 古海洋模式; 海洋生产力; 缺氧环境; 南海北部
中图分类号: P736.2; TE122.113　　**文献标识码:** A　　**DOI:** 10.16028/j.1009-2722.2019.164

0　引言

对于海相烃源岩发育的古海洋模式, 国际上于 20 世纪 80、90 年代产生了烃源岩形成的“生产力与保存条件”之争[1-2]; 1983 年, 伦敦召开地质学会特别会议, 总结出海水中有机质在沉积物中保存的 3 个因素: 海洋初级生产力、沉积速率和底层水含氧量[3]; 1995 年, 美国石油地质学家协会利用大量模拟手段系统讨论了不同时间尺度、不同板块和盆地中气候和海洋环境对烃源岩形成的重要作用[4], 其中重点讨论了海洋有机质产生和保存的物理海洋学机制[5]。国内学者近年来也取得了一些成果: 张宝民等[6]归纳了中国新元古—下古生界的海相烃源岩热水活动-上升洋流-缺氧事件、碳酸盐缓坡-上升洋流等 4 种发育模式; 梁狄刚等[7]总结我国南方 4 套海相烃源岩的形成, 划分为 7 种有利沉积相和 3 种形成模式: 上升流模式、大洋缺氧事件模式、黑海滞留盆地模式; 李文浩等[8]将影响海相烃源岩形成的因素归纳为古气候、生物生产力、陆源有机质、还原环境、沉积速率和盆地类型 6 个因素; 戴娜等[9]主要通过干酪根的显微组分以及生物标志化合物的分布特征, 将中生代—新生代海相烃源岩的成因分成了内源、陆源和海陆混源 3 种类型; 邓运华[10]则重点强调了海湾对海相石油的控制作用, 认为海湾既提供了相对封闭的沉积环境, 也保障了海洋浮游藻类的生长; 朱伟林等[11]进行一系列湖相烃源岩发育模式的研究, 对本文也具有一定的借鉴意义。

收稿日期: 2019-12-20
资助项目: 国家重大科技专项(2016ZX05026007-03); 国家自然科学基金项目(41876046, 41930536)
作者简介: 马瑞罡(1992—), 男, 在读博士, 主要从事古环境、钙质超微化石方面的研究工作. E-mail: ruigangma@163.com

1　烃源岩发育的古海洋条件

1.1　有机质来源

有机质来源是研究烃源岩发育时的首要问题。海相烃源岩的生烃母质包括海生浮游藻类和陆生植物。海生浮游藻类通过光合作用固定二氧化碳形成颗粒有机碳, 这些有机碳在不断沉降的过程中被持续氧化, 加之微生物的分解作用, 最终保留下来的有机质不及海水表层的 1%。陆源有机质则主要是陆生植物搬运至沉积盆地留存下来。海

陆有机质供给均受到古气候和古环境的影响：一般当气候温暖湿润时，适宜陆地植被的生长；当气候干旱时，风化作用增强使得陆地的营养物质更多的被输入海洋中，造成在海陆过渡—滨海环境中海洋浮游生物的繁盛。另外在开阔外海上升流发育的区域，为海水表层带来丰富营养盐条件，生物的生产力随之升高。Parrish[12-13] 通过大气环流模型推测从白垩纪到新近纪，全球 2/3 的海相富有机质沉积与上升流的发育有关。在局限海或滨海环境中，陆源营养盐的输入会导致生物生产力较高，因此，陆架区虽然只占海洋面积的 5%，却贡献了 1/4 以上的有机质输入量[14]。而陆地向海洋输送沉积物的能力，主要包括河流和风力搬运，决定了陆源有机质的占比。

1.2 缺氧环境

Demaison 和 Moore[15] 将海洋中厌氧环境分为 3 大类：受区域性的构造运动和海平面的升降控制，形成海底山脊产生隔断，使得底层水不流通形成厌氧环境；在开阔外海，氧气在最小含氧层以下浓度不断升高，底层水为弱氧化环境；上升流带来的深层的缺氧水体。另外，沉积速率也影响了有机质的保存：一般认为，在沉积速率慢及无机物质填充较少的欠补偿盆地易造成有机质的富集，形成烃源岩。但另外一些研究表明，在氧化的开阔外海，快速沉积缩短了有机质在生物扰动层滞留的时间，降低了有机质被氧化分解的程度，有利于其沉降和保存[3, 16]；Muller 和 Suess[17] 研究其定量关系表明，沉积速率每升高 10 倍，则保存下来的有机碳含量升高 2 倍。另外，在一些事件性的、快速沉积下来的浊积体储层内，形成了较好的缺氧环境，也可能发育烃源岩，例如，在印尼的库泰盆地发现了深水浊积型烃源岩[18]。

近岸海水在淡盐水交汇形成的密度梯度驱动下形成垂向的环流，Hay[5] 用淡水平衡理论描述在径流输入、降水和蒸发的共同作用下，海水盐度的变化：当径流输入和降水总量大于蒸发量时，海水盐度会降低，而这种盐度的变化集中在海水表层至次表层，因此在强蒸发环境下，表层盐度较高的水体会下沉（图 1，灰色箭头方向），形成高温-高密度的海水分层，同时蒸发盐岩的形成经常造成底层水的隔断，造成底层水因停滞而形成相对厌氧环境，同时高盐度水体还会造成海生动植物的大量死亡；反之，当降水充足，表层水体盐度/密度较小，近岸的环流形式将会反向，造成底层水通风，不利于缺氧环境的形成（图 1，黑色箭头方向）。在封闭和停滞的局限海环境中，强蒸发产生的盐跃层也会造成海水分层，形成底部缺氧环境。

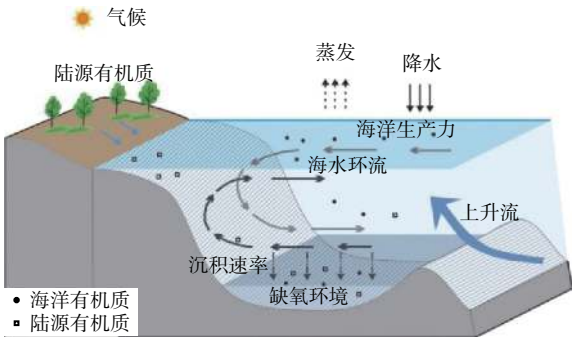

图 1 海相烃源岩发育的影响因素

Fig.1 Factors of the formation of marine source rocks

1.3 海相烃源岩发育模式

从古海洋环境的角度，将海相烃源岩分为三角洲-陆源海相模式、强蒸发-上升流模式和局限海-湿润气候模式（表 1）。晚侏罗世—早白垩世海相烃源岩及其显著的特征如图 2 所示。

表 1 海相烃源岩发育古海洋模式及典例

Table 1 Paleoceanographic patterns of the formation of marine source rocks and examples

模式	典型实例	（区域）古气候特征	有机质来源	缺氧环境	沉积环境
三角洲-陆源海相	西非被动陆缘盆地烃源岩墨西哥湾古近系烃源岩澳大利亚西北陆架盆地烃源岩	温暖湿润	陆源为主	前三角洲等快速沉积形成厌氧环境	三角洲前缘等海陆过渡带
强蒸发-上升流	墨西哥湾中生界烃源岩	干旱、日照强烈	海洋浮游藻类为主	强烈蒸发造成水体盐度高，底层水停滞；大洋缺氧事件	浅海—半深海，受限海湾
滞留静海-湿润气候	北海盆地钦莫里阶烃源岩	温暖湿润/暖湿气候转冷	海陆混源	局限海造成水体不流通形成厌氧环境	受局限的陆表海、潟湖等

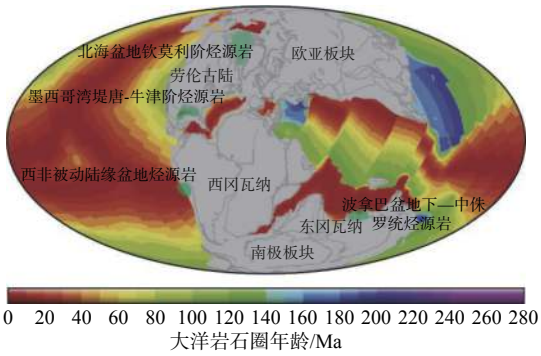

图 2　全球晚侏罗世—早白垩世海相烃源岩分布
（海陆分布图引自文献 [19]）

Fig.2　Distribution of Late Jurassic-Early Cretaceous marine hydrocarbon source rocks (reconstruction of global continental and ocean basin is sited from reference[19])

2　三角洲-陆源海相模式

2.1　有机质表现陆源特征

有机地化特征表现该类烃源岩主要为陆源高等植物输入为主, 具体体现在饱和烃和芳香烃碳同位素偏重; 生物标志物 C_{29} 甾烷相对含量、Pr/Ph 比值和奥利烷指数均较高; 显微组分以镜质组和惰质组为主, 干酪根类型主要为Ⅱ$_2$型和Ⅲ型。例如, 墨西哥湾南部古近—新近系海相硅质页岩形成于三角洲厌氧环境, 干酪根类型为Ⅲ型, 烃源岩干酪根 $\delta^{13}C$ 显著偏重, Pr/Ph 比较高, 藿烷含量较低[20]。C_{29} 甾烷占主导地位, 重排甾烷含量相对较高, C_{30} 甾烷含量较低, 都是陆生高等植物输入的证据。西非下刚果盆地自中生代以来, 在全球海平面持续下降, 流域范围内气候湿热, 植被繁盛, 且河流搬运能力强的条件下, 形成了一系列浊积体, 其中埋藏了大量陆生高等植物碎屑, 成为烃源岩的良好的有机质来源[21-22]。尼日尔盆地 Akata 组的前三角洲相泥岩是该区的主力烃源岩, 有机质属于腐殖质, 含少量腐泥组分, 为Ⅱ型和Ⅲ型干酪根混合, 高生烃潜力的有机质多来源于陆源植物[23]。澳大利亚波拿巴盆地下侏罗统 Plover 组烃源岩气相色谱表现后峰型和双峰型, 表明其陆源高等植物占比较高; 中上侏罗统以双峰型为主, 表明海洋生物贡献增加[24-25]。

2.2　底层水弱氧化

该类烃源岩多形成于滨—浅海环境, 受地表河水注入扰动的影响, 海底氧气含量较高, 海生藻类等有机质被快速降解。但由于沉积速率快, 尤其深水区形成崩塌或浊流形式的搬运, 使得陆源植物碎屑随之快速埋藏而沉积下来, 避免了有机质被大量分解。墨西哥湾南部古近系海相硅质页岩和海陆过渡相富有机质页岩, 烃源岩发育的主要层段 Wilcos 发生 3 次较为短暂的海侵[26], 在海岸平原河流、海陆交替和浅海环境中, 底层水溶解氧含量高, 沉积速率快, 形成了砂岩、粉砂岩及页岩的互层。西非中部下刚果盆地上白垩统—古近系处于被动陆源构造演化阶段, 晚白垩世赛诺曼期发生海退, 发育尼日尔-贝努埃三角洲和一部分单独的深水扇, 随后发生多次海侵, 始新世尼日尔三角洲快速发展, 区域内沉积物来自东北部, 主要由尼日尔河、贝努埃水系和克鲁斯河携带入海[27]。澳大利亚波拿巴盆地海陆过渡相烃源岩发育在大陆边缘裂陷的主裂陷期, 陆源碎屑输入强, 也具有弱氧化的沉积环境[28]。

该类烃源岩有机质来源于大型河流, 因此常发育三角洲沉积。泥、页岩相海相烃源岩常发育于前三角洲。澳大利亚波拿巴盆地海陆过渡相烃源岩以海侵期的河流—三角洲物源体系为主, 总体上分为三角洲平原相、前三角洲相、滨浅海相等 3 个烃源岩发育相带[28]。墨西哥湾南部古近系海相硅质页岩自新生代开始, 盆地西北缘上升, 海岸线后退, 越来越多的碎屑物被带到盆地内, 在盆地边缘以河流三角洲相为主。中—上始新统在还原环境下沉积形成, 直到中始新世晚期, 墨西哥湾山脉抬升提供的碎屑激活的沉积作用导致海滨和三角洲穿过海湾边缘西北部的进积作用, 晚渐新世发生退积, 休斯顿三角洲从陆架边缘后退, 密西西比三角洲面积迅速减小[26]。下刚果盆地的刚果河深水扇、印尼库泰盆地以及文莱-沙巴盆地深水区, 在事件性沉积的浊积岩中还发现有深水浊积型烃源岩的形成[18, 29]。

3　强蒸发-上升流模式

上升流带来的海洋浮游藻类繁盛, 形成以Ⅱ型干酪根为主的海相烃源岩。在蒸发强烈的地区, 海水盐度升高以及蒸发盐岩的形成为有机质的保存提供了好的缺氧环境[30]。侏罗系全球板块大规模裂解, 造成全球范围内火山活动加剧, 释放出大量

酸性和温室气体，使得大量生物死亡，沉降海底后被氧化分解，消耗了大量溶解氧，造成大洋缺氧性事件，也提供了有机质保存的厌氧环境。该类型烃源岩主要发育于中低纬地区侏罗系地层，水温较高、空气湿度大、日照时间长并且上升流发育，有利于浮游藻类的繁殖海洋生产力升高[31]。

3.1 上升流发育造成表层生产力勃发

侏罗纪时期，暖流集中在中低纬，高纬度的高密度低温水体下沉至海底，并向低纬度流动，在中低纬以补偿流的形式上升至海面，形成了上升流。Moore 用气候模型模拟得到墨西哥湾晚侏罗世普遍发育风成上升流[31]。地球化学特征表明有机质主要为海洋浮游藻类墨西哥湾牛津阶马科夫组纹层状藻类灰质泥岩，TOC 含量平均为 1.5%，干酪根类型以藻类无定形生油型为主，仅含有少量的陆源成因。龚建明等[32]认为，墨西哥湾晚侏罗纪烃源岩发育属半深海还原环境，有机质与极端干旱气候条件下的藻类勃发有关。

3.2 蒸发强烈-缺氧环境

蒸发岩一般形成于海陆过渡—浅海环境，被动大陆边缘盆地有利于蒸发岩的发育，尤其是裂谷期晚期，在古气候研究中通常指示高温干旱气候和区域。墨西哥湾盆地裂谷期晚期处于海陆过渡—浅海环境，加上赤道附近的炎热气候，导致墨西哥湾盆地在侏罗纪晚期形成分布广、厚度大的蒸发岩，如卢安盐岩。卢安盐岩形成以后，水体盐度不断增加，下部水体几乎近于停滞，河流及湖泊中的大量藻类死亡，为上侏罗统斯马可夫组烃源岩提供物质基础；大量的盐岩迅速堆积，使下部的暗色泥岩逐渐与氧隔绝，有效防止早期沉积的藻类遗体不断地氧化分解，为有机质保存提供条件；卢安盐层也成为热流屏蔽器，防止热量散失，使其下部地热流局部集中，适宜的温度有利于有机质的成烃转化和烃源岩保存[33]。

晚牛津期，盆地水体开始变浅，沿盆地北翼和西北翼开始发育线状颗粒岩滩坝相沉积，该趋势一直持续到早钦莫利期。因此，钦莫利阶的下部地层所反映出的环境是海陆过渡或浅海环境。在这些环境里沉积了蒸发岩、低能碳酸盐岩和一些细粒陆源碎屑岩，其上倾方向（陆地一侧）沉积了河流和三角洲相的粗碎屑岩，为上侏罗统主要的储集层。提塘阶海相页岩和泥质灰岩优质烃源岩主要形成于超咸化的碳酸盐岩蒸发岩沉积环境，主要证据来自于六藿烷和 17α（H）-29，30-双降藿烷的存在以及 C_{29}/C_{30} 藿烷值较高。

4 滞留静海-湿润气候模式

Graciansky 等[34]和 Nijenhuis 等[35]先后阐释了海洋环境中的滞留静海模式及其与富有机质黑色页岩的关系。该模式以海底地形起伏或障壁岛的形成为特征，造成海水循环和流通受阻，底层水极度缺氧；气候湿润，生物相对繁盛，广海漂浮而来的生物得到繁衍；同时也具有陆源有机质的输入，但一般没有河流的注入或三角洲的形成。烃源岩一般发育于碳酸盐岩台地之上的陆源海湾中。典型实例为北海盆地以及挪威中部陆架区的 More 盆地和 Voring 盆地上侏罗统黑色页岩（钦莫利页岩）烃源岩[36]。

4.1 局限海条件造成海底缺氧

以挪威中陆架和北海盆地为例。随着泛大陆的解体和大西洋的打开，大西洋的东西两侧形成了一系列被动陆源盆地。其中，三叠纪末期到早侏罗世，北海盆地发育初始裂谷，广泛海侵，海水自北边的东格陵兰和挪威之间峡谷进入北海盆地形成海湾峡谷沉积环境，直至晚侏罗世[36]。Langrock 等[37-38]通过 TOC-Fe-S 三角图指示，挪威陆架区 Spekk 组黑色页岩形成于缺氧环境，沉积粒径较小且比较均一的草莓状黄铁矿，指示了底层水的稳定。且由于慢速的稳定沉积，沉积物中常见纹层状层理。

4.2 气候湿热转冷

该类烃源岩发育于水深较浅的局限海或闭塞的深海盆地，无上升流的发育。因此，海水的生产力和丰富的有机质埋藏与气候有着密切的关系。有机质的保存不仅需要高生产力，还需要好的保存环境。气候温暖湿润，生产力高，但有机质的降解速率也非常快，不利于有机质的保存。而在白垩纪时期，全球气候温暖且稳定，热带—亚热带气候延伸至 45°N—70°S[39]，挪威中部陆架 Spekk 统 Volgian 阶气候温暖湿润，利于海洋浮游藻类的生长，而在

Hauterivian 阶气候快速转冷[39-40], 低温导致有机质降解速率降低[41-42], 有利于有机碳的快速聚集。该类烃源岩中有机质的组成有陆源和海源相混合的特征, 干酪根类型为Ⅱ型和Ⅲ型。挪威中陆架的 Voring 盆地上侏罗统 Spekk 页岩平均 TOC 达 5%～8%, 氢指数 HI 最高达 800 mg HCs/gTOC, 干酪根类型为Ⅱ型[42]。通过干酪根显微组分的分析, 有机质组分以海生藻类碎屑壳质组和镜质组为主, 表明有机质为海-陆混合来源[38-39], 北海盆地维京地堑钦莫里页岩分为 2 个层段: 上部层段干酪根以菌藻类腐泥型为主, 干酪根类型为Ⅰ-Ⅱ型, TOC 为 5%～12%, 中央地堑钦莫利页岩 TOC 平均为 3.5%, 显示海陆混源特征; 下部 80% 来自菌藻类, 20% 为受生物降解的陆源有机质[37-38]。

5　南海北部深水区烃源岩发育条件

总体上, 受大陆边缘南海构造旋回控制, 南海北部古近纪由老到新、由陆向海, 呈带状分布和发育了陆相、海陆过渡相和海相 3 类烃源岩[43]。大洋钻探最新成果也揭示出, 南海于早渐新世处于扩张初期阶段, 南海北部深水区在该时期经历了由滨岸向浅海转变的过渡期[44]。而在南海海底扩张之前, 南海东北部及东海南部的钻井揭示出, 古近纪时期南海北部可能发育一个贯通的浅海环境, 称为“古近纪中国海”[45]。

张浩等[46]通过微体化石和有机屑类型鉴定, 指出白云凹陷在恩平组开始接受海相沉积, 海陆相沉积转换的初始时间为晚始新世, 是南海北部最早发生海侵的地区。从沉积环境来看, 钻井结合地震分析以及大洋钻探的资料显示, 恩平组(始新统—下渐新统)发育众多小型辫状河三角洲[47-48], 白云凹陷珠海组(上渐新统)沉积为浅海陆架环境, 发育一套几乎覆盖白云凹陷全区的大型浅水陆架三角洲[49], 该时期南海北部有大型河流汇聚[50], 可以提供充足陆源有机质供给。

现有证据表明, 南海北部珠江口盆地渐新统海相烃源岩的干酪根类型主要为$Ⅱ_2$型和Ⅲ型, 来源于高等植物木质纤维的镜质组和惰质组的含量较高, 指示有机质主要来源于陆生高等植物[51-54]; 南海北部琼东南盆地渐新统泥质烃源岩中, 干酪根类型主要为Ⅲ型和$Ⅱ_2$型; Pr/Ph 比值约为 1.5; C_{29}/C_{27} 甾烷比值约 1.25, 具有海生藻类和陆生高等植物混源的特征[55]。通过沉积学、微体古生物学以及微观沉积特征观察等手段, 部分研究揭示琼东南盆地渐新统沉积环境总体为滨岸到浅海环境, 烃源岩中有大量陆源碎屑有机质供给[56-58]。气候角度看, 始新世—渐新世是全球气候环境由暖湿向干冷转换的重要时期[59-60], 有利于始新世繁盛的陆地高等植物碎屑在相对干冷气候条件下保存。同时, 在南海扩张初期, 由于北部边缘水深较浅, 可能发育沿岸上升流, 有助于海生浮游藻类发育。南海已有部分钻孔中, 如 IODP U1501、1505、LW22-1-1, 琼东南盆地 CC26-1-1、YL19-1-1 均发现有颗石球、五边石等代表高营养盐属种在局部层段勃发的证据(待发表数据)。

综上, 南海北部有较好的沉积环境、陆源有机质输入以及可能由上升流或陆源物质带来的营养盐供给。目前在白云凹陷南洼已有研究认为恩平组可能发育大陆边缘半闭塞-海湾模式烃源岩[61], 结合全球优质海相烃源岩的发育模式来看, 南海北部珠江口—琼东南盆地深水区具备很好的海相烃源岩的发育条件。

6　结语

海相烃源岩的古海洋模式之间并没有绝对的界限。大部分海相烃源岩的有机质来源都是海陆混源的; 上升流对海洋生产力的贡献是广泛的, 一些非典型的上升流模式的烃源岩中也有其对海洋生产力的贡献, 如西非西部岸外广泛发育上升流; 强蒸发条件下的海洋环境对每一种烃源岩的发育都是有利的。本文提出烃源岩发育的古海洋模式旨在为油气勘探提供一种新思路, 即充分考虑区域地质历史和古海洋环境和古气候的变化, 以期对区域内烃源岩发育情况展开预测。

参考文献:

[1] Pedersen T F, Calvert S E. Anoxia versus productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rock[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(4): 454-466.

[2] Calvert S E, Pedersen T F. Organic carbon accumulation and preservation in marine sediments: how important is anoxia?[C]//Whelan J K, Farrington, eds, Productivity, accumulation and preservation of organic matter in recent and ancient sedi-

ments. New York: Columbia University Press, 1992: 231-263.

[3] Brooks J, Fleet A J. Marine petroleum source rocks[M]. Oxford: Blackwell, 1987:1-297.

[4] Huc A Y. Paleogeography, paleoclimate, and source rocks[M].AAPG Studies In Geology, 1995:1-347.

[5] Hay W W. Paleoceanography of marine organic-carbon-rich Sediments[J]. Environmental Science & Technology, 1995, 40(15): 4788-4793.

[6] 张宝民, 张水昌, 边立曾, 等. 浅析中国新元古—下古生界海相烃源岩发育模式[J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 58-69.

[7] 梁狄刚, 郭彤楼, 边立曾, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三)——南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. 海相油气地质, 2009, 14(2): 1-19.

[8] Li W, Zhang Z, Li Y. Some aspects of excellent marine source rock formation: implications on enrichment regularity of organic matter in continental margin basins[J]. Acta Geochimica, 2015, 34(1): 47-54.

[9] 戴 娜, 钟宁宁, 邓运华, 等. 中生代—新生代大陆边缘盆地海相烃源岩成因类型[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 940-953.

[10] 邓运华. 试论海湾对海相石油的控制作用[J]. 石油学报, 2018, 39(1): 1-11.

[11] 朱伟林. 中国近海新生代含油气盆地古湖泊学与烃源条件[M]. 北京: 地质出版社, 2009.

[12] Parrish J T. Upwelling and petroleum source rock beds, with reference to the Paleozoic[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(6): 750-774.

[13] Parrish J T. Palaeo-upwelling and the distribution of organic-rich rocks[J]. Geological Society London Special Publications, 1987, 26(1): 199-205.

[14] Degens E T, Ittekkot V. The carbon cycle--tracking the path of organic particles from sea to sediment[J]. Geological Society London Special Publications, 1987, 26(1): 121-135.

[15] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(8): 1179-1209.

[16] Stein R. Organic content/sedimentation rate relationship and its paleoenvironmental significance for marine sediment[J]. Geo-Marine letters, 1990, 10: 37-44.

[17] Muller P J, Suess E. Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic matter in the oceans. Organic carbon preservation[J]. Deep-Sea Research, 1979, 26A: 1347-1362.

[18] Saller A, Lin R, Dunham J. Leaves in turbidite sands: The main source of oil and gas in the deep-water Kutei Basin, Indonesia[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(10): 1585-1608.

[19] Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 113(3/4): 212-270.

[20] Guzmán-Vega M A, Ortiz L C. Classification and origin of petroleum in the Mexican Gulf Coast Basin : An Overview[J]. AAPG Memoir, 2001, 75: 127-142.

[21] 侯高文, 刘和甫, 左胜杰. 尼日尔三角洲盆地油气分布特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 374-378.

[22] Deniau I, Disnar J R, Baudin F, et al. Characterization of organic mater in the Oligocene(Chatian) turbiditic fine grained deposits, offshore Angola[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2): 135-145.

[23] Evamy B D, Haremboure J, Kamerling P, et al. Hydrocarbon habitat of Tertiary Niger Delta[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(1): 1-39.

[24] Preston J C, Edwards D. The petroleum geochemistry of oil sand source rocks from the Northern Bonaparte Bsain, offshore northern Australia[J]. APPEA Journal, 2000, 40(1): 257-282.

[25] Abbassi S, George S C, Edwards D S, et al. Generation characteristics of Mesozoic syn- and post-rift source rocks, Bonaparte Basin, Australia: New insights from compositional kinetic modelling[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 50: 148-165.

[26] Galloway W E, Ganey-Curry P E, Li X, et al. Cenozoic depositional history of the Gulf of Mexico Basin[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(11): 1743-1774.

[27] Weber K J, Daukoru E. Petroleum geology of the Niger Delta[C]//Proceedings of the 9th World petroleum Congress.London: Elsevier,1978: 209-221.

[28] 侯宇光, 何 生, 杨香华, 等. 澳大利亚波拿巴盆地大陆边缘裂陷期海陆过渡相烃源岩地球化学特征与发育模式[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 374-382.

[29] 张 强, 毛超林, 贺晓苏, 等. 深水浊积型烃源岩的发现与启示[J]. 地质科技情报, 2013, 32(2): 71-76.

[30] Wilson H H. Extensional evolution of the Gulf of Mexico Basin and the deposition of tertiary evaporates[J]. Journal of Petroleum Geology, 2003, 26(4): 403-428.

[31] Moore G T, Barron E J, Hayashida D N. Kimmeridgian (Late Jurassic) general lithostratigraphy and source rock quality for the Western Tethys Sea inferred from paleoclimate results using a general circulation model[C]//Paleogeography, Paleoclimate and Source Rocks. AAPG, 1995:157-172.

[32] 龚建明, 文 丽, 李慧君, 等. 墨西哥湾南部晚侏罗纪主力烃源岩的形成条件[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(3): 1-5.

[33] 谢奋全, 王黎栋, 于炳松, 等. 被动大陆边缘盆地对油气形成的控制作用——以墨西哥湾盆地为例[J]. 东北石油大学学报, 2014, 38(4): 10-16.

[34] Nijenhuis I A, Bosch J S, Sinninghe Damste, et al. Organic matter and trace element rich sapropels and black shales: A geochemical comparison[J]. Earth Planet. Science Letter, 1999, 169(3/4): 277-290.

[35] Graciansky P C, Deroo G, Herbin J P., et al. Ocean-wide stagnation episode in the Late Cretaceous[J]. Nature, 1983, 308(5957): 346-349.

[36] 卢景美, 李爱山, 赵 阳, 等. 北大西洋段演化特征和海相烃源岩研究[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(4): 80-88.

[37] Langrock U, Stein R. Origin of marine petroleum source rocks from the Late Jurassic to Early Cretaceous Norwegian Greenland Seaway—evidence for stagnation and upwelling[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(2): 157-176.

[38] Langrock U, Stein R, Lipinski M, et al. Late Jurassic to Early Cretaceous black shale formation and paleoenvironment in high northern latitudes: Examples from the Norwegian-Greenland Seaway[J]. Paleoceanography, 2003, 18(3): 1-16.

[39] Hallam A. A review of Mesozoic climates[J]. Geololgy Society London, 1985, 142(3): 433-445.

[40] Bottini C, Erba E, Tiraboschi D, et al. Climate variability and ocean fertility during the Aptian Stage[J]. Climate of the Past, 2014, 10(1): 689-738.

[41] Mutterlose J, Brumsack H, Flogel S, et al. The Greenland-Norwegian Seaway: A key area for understanding Late Jurassic to Early Cretaceous paleoenvironments[J]. Paleoceanography, 2003, 18(1): 1-10.

[42] Heum O R, Dalland A, Meisingset K. Habitat of hydrocarbons at Haltenbanken (PVT-modelling as a predictive tool in hydrocarbon exploration)[C]//Spencer A M.Habitat of hydrocarbons on the Norwegian Continental Shelf, Proceedings of an International Conference. London: Granham and Trotman. 1986:259-274.

[43] 张功成, 屈红军, 刘世翔, 等. 边缘海构造旋回控制南海深水区油气成藏[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 533-545.

[44] Jian Z, Larsen H C, Zarikian C A. The Expedition 368 Preliminary Report: South China Sea Rifted Margin. International Ocean Discovery Program. Doi:10.14379/iodp.pr.368.2018.

[45] Li Q, Wu G, Zhang L, et al. Paleogene marine deposition records of rifting and breakup of the South China Sea: An overview[J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 60(12):2128-2140.

[46] 张　浩, 邵　磊, 张功成, 等. 南海始新世海相地层分布及油气地质意义[J]. 地球科学, 2015, 40(4): 660-670.

[47] 苗顺德, 张功成, 梁建设, 等. 南海北部超深水区荔湾凹陷恩平组三角洲沉积体系及其烃源岩特征[J]. 石油学报, 2013, 34(s2): 57-65.

[48] 韩银学, 陈　莹, 杨海长, 等. 白云凹陷恩平组"源—汇"体系及其对油气勘探的影响[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(2): 25-34.

[49] 柳保军, 申　俊, 庞　雄, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组浅海三角洲沉积特征[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 49-56.

[50] Shao L, Cui Y, Stattegger K, et al. Drainage control of Eocene to Miocene sedimentary records in the southeastern margin of Eurasian Plate[J]. GSA Bulletin, 2018, 131(3/4): 461-478.

[51] 朱俊章, 施和生, 舒　誉, 等. 珠江口盆地烃源岩有机显微组分特征与生烃潜力分析[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 301-306.

[52] 傅　宁, 米立军, 张功成. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩及北部油气成因[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 32-38.

[53] 李友川, 张功成, 傅　宁. 珠江口盆地油气分带性及其控制因素[J]. 中国海上油气, 2014, 26(4): 8-14.

[54] 朱俊章, 施和生, 庞　雄, 等. 珠江口盆地白云凹陷深水区珠海组烃源岩评价及储层烃来源分析[J]. 中国海上油气, 2008, 20(4): 223-227.

[55] 李文浩, 张枝焕, 李友川, 等. 琼东南盆地古近系渐新统烃源岩地球化学特征及生烃潜力分析[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 700-708.

[56] 刘传联. 琼东南盆地渐新统烃源岩微观沉积特征与沉积环境[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 573-578.

[57] 邵　磊, 李　昂, 吴国瑄, 等. 琼东南盆地沉积环境及物源演变特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 548-552.

[58] 王子嵩, 刘　震, 黄保家, 等. 琼东南盆地深水区中央坳陷带东部渐新统烃源岩分布及评价[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 360-371.

[59] Liu Z, Pagani M, Zinniker D, et al. Global cooling during the Eocene-Oligocene climate transition[J]. Science, 2009, 323(5918): 1187-1190.

[60] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. Science, 2001, 292(5517): 686-693.

[61] 张义娜, 张功成, 杨海长, 等. 白云南洼恩平组海相烃源岩空间展布规律及发育模式[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(12): 17-24.

PALEOCEANOGRAPHIC PATTERNS OF MARINE HYDROCARBON SOURCE ROCKS AND ITS INDICATING SIGNIFICANCE TO THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA

MA Ruigang, LIU Chuanlian

（State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China）

Abstract: Three patterns of marine hydrocarbon source rocks are established based on previous researches on several prominent marine source rocks around the world. The organic geochemistry feature, paleoenvironmental and paleoceanic conditions are collected to constrain the factors of productivity, sources and preservations of the organic matter. The patterns are as fellows: ①delta -terrestrial sourced marine facies pattern; ②evaporated-ocean upwelling pattern; ③restricted sea-humid climate-pattern. Previous researches have shown that the Enping-Zhuhai formation (Eocene-Oligocene) in the deepwater area of the northern South China Sea was formed under a restricted Marine environment, with developed delta sedimentary system, sufficient supply of terrestrial organic matter. According to this reviews, we suggest that there is a great potential for exploration of the marine hydrocarbon source rocks in the deepwater area in the northern South China Sea.

Key words: marine source rocks; patterns of formation; ocean productivity; anti-oxide; Northern South China Sea