

琼东南盆地陆源海相烃源岩有机质富集机理

侯读杰^{1,2},吴克强³,尤丽³,张自鸣^{1,2},李雅君^{1,2},熊小峰³,徐敏^{1,2},严夏泽^{1,2},陈威合^{1,2},程熊^{1,2}

[1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京100083;2. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验,北京100083;

3. 中海石油(中国)有限公司海南分公司,海南海口570312]

摘要:琼东南盆地渐新统陆源海相烃源岩是深水区的—套重要烃源岩。从盆地构造格局、古气候、沉积相和三角洲规模4个方面对琼东南盆地渐新统陆源海相烃源岩的形成机理进行了分析。结果表明:盆地构造格局整体上控制了烃源岩的发育类型,断陷期的崖城组陆源有机质主要以近岸堆积形式形成煤系烃源岩;而陵水组(E_3l)陆源有机质则以河流-三角洲搬运形式形成陆源海相烃源岩。崖城组三段(崖三段, E_{3y^3})和三亚组二段(三亚二段, N_{1s^2})沉积期陆源高等植物最繁盛;崖二段(E_{3y^2})-崖一段(E_{3y^1})和陵水组二段(陵二段, E_{3l^2})-陵一段(E_{3l^1})沉积期次之,陆源高等植物供给充足。沉积相带控制陆源有机质的差异,同时卸载的不同形成了明显差异的陆源海相烃源岩。陆源海相烃源岩有利的发育区域为三角洲前缘-内浅海以及海底扇。大规模的三角洲可以输送更高生物通量的陆源有机质,提高了烃源岩有机质丰度,从而形成海域最为重要的一类有特色的气源岩。

关键词:构造格局;沉积相;三角洲规模;有机质丰度;陆源海相烃源岩;琼东南盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Organic matter enrichment mechanisms of terrigenous marine source rocks in the Qiongdongnan Basin

HOU Dujie^{1,2}, WU Keqiang³, YOU Li³, ZHANG Ziming^{1,2}, LI Yajun^{1,2}, XIONG Xiaofeng³, XU Min^{1,2}, YAN Xiazhe^{1,2}, CHEN Weihe^{1,2}, CHENG Xiong^{1,2}

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Hainan Branch of CNOOC (China) Limited, Haikou, Hainan 570312, China]

Abstract: The Oligocene terrigenous marine source rocks in the Qiongdongnan Basin serve as a significant suite of source rocks in deep-water areas. We analyze their formation mechanisms from the aspects of the basin's tectonic framework, paleoclimate, sedimentary facies, and delta scale. The results indicate that the tectonic framework of the basin generally determines the source rock types. Specifically, the terrigenous organic matter of the Yacheng Formation, deposited during the rifting stage, predominantly accumulates offshore and forms coal-measure source rocks. In contrast, the terrigenous organic matter from the Lingshui Formation (E_3l) forms terrigenous marine source rocks via fluvial-deltaic transport. The 3rd member of the Yacheng Formation (E_{3y^3}) and the 2nd member of the Sanya Formation (N_{1s^2}) witnessed the most luxuriant terrigenous higher plants, followed by the 1st to 2nd members of both the Yacheng and Lingshui formations (E_{3y^1} to E_{3y^2} , and E_{3l^1} to E_{3l^2}). These contributed significantly to an abundant supply of terrigenous higher plants. Variations in sedimentary facies zones determine the differences in terrigenous organic matter, whose differential deposition leads to the formation of significantly varying terrigenous marine source rocks. Favorable areas for the terrigenous marine source rocks include delta fronts to inner neritic zones, along with submarine fans. Large-scale deltas facilitate the transport of terrigenous organic matter with higher biotic fluxes, thus improving the organic matter abundance of source rocks. As a result, significant and characteristic gas source rocks are formed in the sea area.

Key words: tectonic framework, sedimentary facies, delta scale, organic matter abundance, terrigenous marine source

收稿日期:2023-03-09;修回日期:2023-10-27。

第一作者简介:侯读杰(1964—),男,教授、博士研究生导师,油气地球化学及成藏研究。E-mail: hdj@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41472108,41872131)。

rock, Qiongdongnan Basin

引用格式:侯读杰,吴克强,尤丽,等. 琼东南盆地陆源海相烃源岩有机质富集机理[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 31-43. DOI: 10. 11743/ogg20240103.

HOU Dujie, WU Keqiang, YOU Li, et al. Organic matter enrichment mechanisms of terrigenous marine source rocks in the Qiongdongnan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 31-43. DOI: 10. 11743/ogg20240103.

烃源岩按照相带进行分类,可分为陆源湖相烃源岩、陆源沼泽煤系源岩和海相烃源岩。湖相优质烃源岩主要分布在淡水环境的半深湖-深湖地区。煤系源岩主要与沼泽相带相关,其分布受沼泽分布的区域所限定。海相源岩则主要受限于海相的藻类的发育与保存,因而常常与半封闭的环境有关,而国内目前对陆源海相混相类源岩研究相对薄弱。对于湖相烃源岩,也存在着混相类烃源岩,但其特征与陆源海相烃源岩相比,其规模及研究的意义均有较大的差别。

陆源海相烃源岩主要是指沉积于海洋环境中,同时存在着陆源有机质和海洋有机质双重输入的烃源岩。但是,国内对陆源海相烃源岩的概念并不统一,有学者将其称为海相陆源烃源岩,也有学者把陆源海相烃源岩定义为以陆源有机质输入为主,海相自身生产力相对较低且海洋有机质分布较为分散的海相泥质烃源岩。笔者发现在陆源海相烃源中,陆源和海洋有机

质输入比例变化较大,存在着不同陆源输入比例的陆源海相烃源岩。陆源海相烃源岩广泛分布于中国近海盆地,特别是在我国南海琼东南盆地、莺歌海盆地渐新统-中新统以及东海盆地等区域。该类源岩一般赋存在海相沉积中,绝大多数烃源岩的高等植物有机质输入比例高^[1]。琼东南盆地位于南海北部大陆边缘(图1),为一新生代断陷-准被动大陆边缘背景上发育的大型伸展型沉积盆地^[1-2]。盆地基底主要为前古近系的火成岩、变质岩和沉积岩,经历了古近纪的张裂作用、新近纪的裂后拗陷作用以及晚中新世以来的快速沉降作用,具有典型的“下断上拗”双层结构^[3-9]。受南海拉张作用的影响,南海北部渐新统普遍遭受多期海侵,形成一系列海湾,发育海陆过渡相和滨浅海相沉积^[10]。琼东南盆地在潮坪、潟湖和海岸平原为主的障壁海岸沉积背景下,沿各凹陷边缘发育一系列小型扇三角洲或辫状河三角洲,为南海北部深水区主力烃源岩的发育

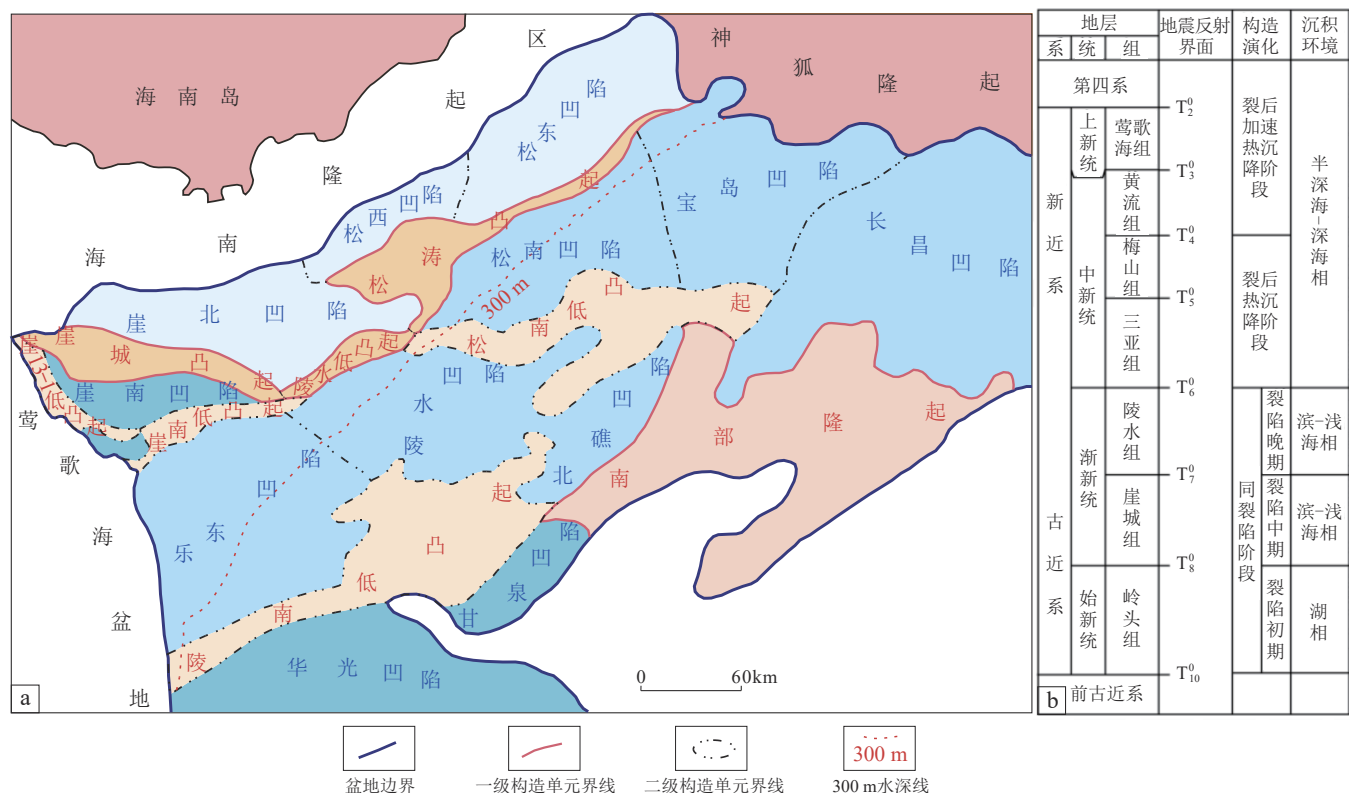


图1 琼东南盆地构造区划(a)与地层柱状图(b)

Fig. 1 Structural zonation map (a) and stratigraphic column (b) of the Qiongdongnan Basin

提供了重要的基础条件,形成了海-陆过渡相煤系和浅海相泥岩两类烃源岩^[11]。

琼东南盆地早期浅水区油气勘探以崖南凹陷及其周边凸起为主要目的区,陆续发现了YC13-1和YC13-4等气田,主力烃源岩被认为是崖城组(E_3y)煤系地层^[12-15]。随着近十年来深水区油气勘探不断取得重大突破,逐渐认识到凹陷中心的浅海相烃源岩对深水区油气田的重要贡献,虽然该类烃源岩有机质丰度普遍偏低,但沉积厚度巨大,在“热盆”背景加持下仍能作为有效烃源岩^[16-19]。与海陆过渡相发育的含煤烃源岩相比,这类浅海相烃源岩中的有机质既有陆源高等植物的贡献,且陆源高等植物贡献占有一定的比例,也存在着海洋浮游植物的贡献,常被称作陆源海相烃源岩。目前研究观点认为渐新统陆源海相烃源岩的形成主要受古构造、古地貌、陆源有机质输入以及沉积相带等多因素的控制,烃源岩的形成模式多样。但关于陆源海相烃源岩内部地球化学特征的变化规律却鲜有报道^[20-23]。

陆源海相烃源岩中有机质的富集主要受控于陆源高等植物输入通量。陆源有机质来自于陆地生长的高等植物,通过水道-三角洲输导体系搬运入海,而物源区植被密度和植物群落组成受到全球及区域古气候的影响。古气候因素诸如区域性增加的降水量有助于陆源有机质通过水道-三角洲体系搬运入海。陆源海相烃源岩与其陆源有机质输入的湖相烃源岩相比,有如下几个差异:①湖相淡水密度较海水密度要低;②入海的河流普遍流经面积广,搬运有机质的强度与规模较湖相要大;③被动大陆边缘背景上发育的河流常常具

有一定的坡度,有机质搬运距离和分异性也较湖相差较大。但陆源海相烃源岩研究程度较低,以琼东南盆地为典型范例,开展陆源海相烃源岩的研究能够更好地促进对中国海域烃源岩富集机理的深入理解。

琼东南盆地渐新统-中新统陆源海相烃源岩富含高等植物来源有机质,是天然气的重要来源。也是中国近海两个盆地,远离陆地的第二盆地始新世-渐新世海相坳陷生气的典型范例^[11]。琼东南盆地地处热带与亚热带区域,其发育的渐新统-中新统陆源高等植物以热带被子植物独具特色。琼东南盆地作为新生代边缘海拆离沉积盆地,经河道-三角洲输入体系长距离陆源输入与搬运既有特色,也对我国陆源海相烃源岩河道-三角洲输入体系有一定的借鉴意义。因而,本研究拟运用地质-地球物理、孢粉学、沉积学以及生物标志物地球化学关键技术,微观与宏观有机结合,对海相陆源烃源岩内部组成的变化规律及控制因素进行了综合探讨,深入分析与研究海相陆源有机质的形成与富集机理。

1 烃源岩地化特征

琼东南盆地渐新统和中新统陆源海相烃源岩主要有崖城组(E_3y)、陵水组(E_3l)和三二段(N_1s^2)。其中崖二段(E_3y^2)和三二段(N_1s^2)有机碳含量(TOC)相对较高,分别达到1.04%和0.74%(图2),是有机质最富集的层段。渐新统和中新统海相陆源烃源岩有机质类型以 II_2 - III 型为主,少量的 II_1 型,整体以生气为主。中

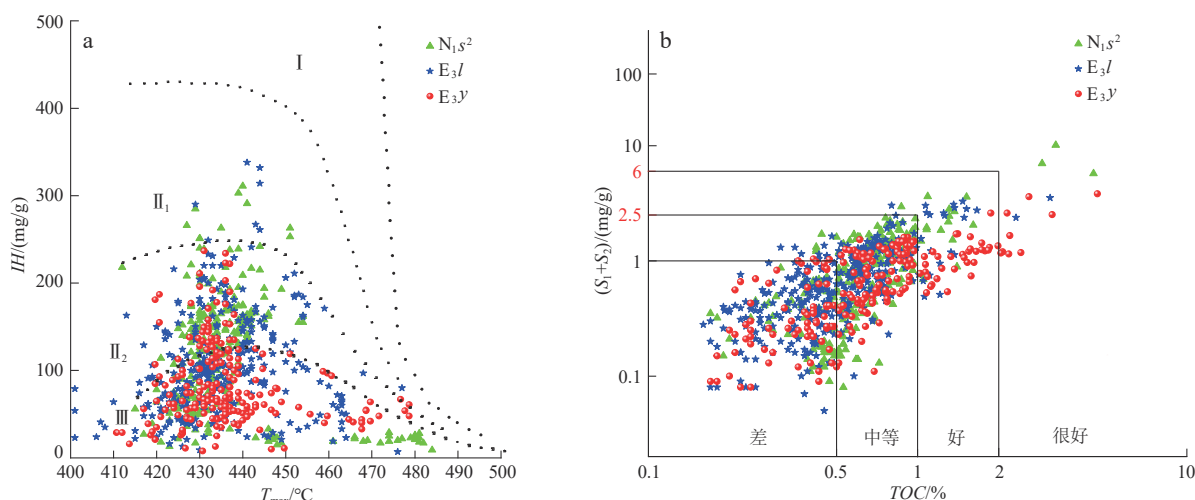


图2 琼东南盆地烃源岩层系岩屑样品校正后有机质类型(a)与有机质丰度评价(b)

Fig. 2 Post-calibration organic matter types (a) and abundance (b) of lithic samples from hydrocarbon source rock sequence in the Qiongdongnan Basin

E_3y . 崖城组; E_3l . 陵水组; N_1s^2 . 三亚组二段

(图中 I, II_1 , II_2 和 III 均为有机质类型。)

央凹陷带的渐新统烃源岩已达到高-过成熟度,是深水主力源岩层。

经过数据筛选,去除受岩屑“优化”效应影响的井位,选取样品连续,数据量较大的8口单井,可以分析单井有机质丰度垂向变化特征。从中发现源岩发育的一个较为普遍的规律,即纵向上三二段(N_1s^2)有机质相对富集,但是有机质丰度的绝对值并不高,TOC小于1.5%(图3)。值得注意的是,钻遇完整崖城组(E_3y)的YC8-2和BD21-1两口井显示其崖三段(E_3y^3)–崖二段(E_3y^2)也是有机质富集层段,且有机质丰度略高于三二段(N_1s^2),但是由于琼东南盆地钻遇完整崖城组(E_3y)并且有连续取样的井位有限,目前尚不能证明崖三段(E_3y^3)–崖二段(E_3y^2)有机质富集在琼东南盆地具有普适性。但结合前文有机质丰度评价结果来看,琼东南盆地的崖三段(E_3y^3)–崖二段(E_3y^2)、陵水组(E_3l)

和三二段(N_1s^2)均可能发育潜在“优质”烃源岩。

2 陆源海相源岩有机质富集机理

2.1 盆地构造格局控制烃源岩类型

陆源有机质按照植被生长区域分为原地堆积型和河流-三角洲搬运型。其中原地堆积型主要分布于滨岸沼泽地带,其陆源有机质主要是近岸的低地雨林和低矮的蕨类植物。河流-三角洲搬运型可以从近岸一直分布到凹陷中心,其陆源有机质主要是离岸较远的山地植被和低地雨林等,被子植物和裸子植物占比高。

琼东南盆地断陷期(崖城组沉积期, E_3y)水体相对浅,凹陷规模受高角度正断层控制,盆地边缘、盆地中的低凸起周缘广泛发育滨岸沼泽和小规模三角洲,提

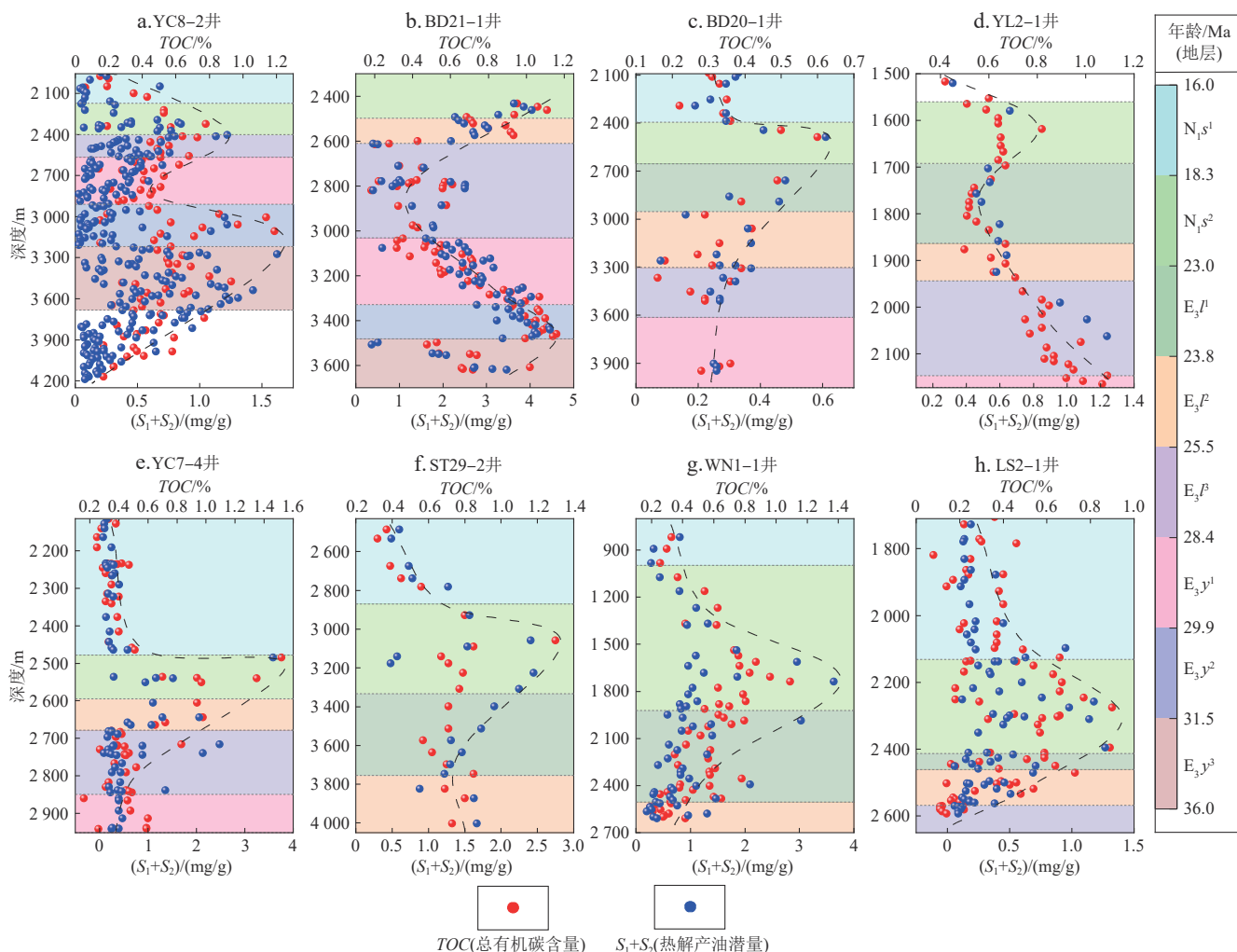


图3 琼东南盆地单井有机质丰度随深度变化特征(深度不包括补心深度和水深)

Fig. 3 Organic matter abundance versus depth of individual wells in the Qiongdongnan Basin

(depth corrected to kelly bushing elevation and water depth)

E_3y^3 . 崖三段; E_3y^2 . 崖二段; E_3y^1 . 崖一段; E_3l^3 . 陵三段; E_3l^2 . 陵二段; E_3l^1 . 陵一段; N_1s^2 . 三二段; N_1s^1 . 三一段

供了有利的成煤条件;乐东、陵水、松南和宝岛凹陷中心缺乏大规模三角洲输入,发育海相泥岩;仅长昌凹陷接受南部隆起和神狐隆起存在着陆源输入,发育陆源海相泥岩。该时期琼东南盆地大部分地区缺乏大型河流-三角洲体系,滨岸、三角洲平原沼泽等原地沉积的有机质主要分布在凹陷边缘。一般情况下,正构烷烃分布模式反映陆源高等植物和水生生物对有机质的贡献程度,陆源高等植物输入高的泥岩中高碳数正构烷烃相对含量较高。引入表征低等水生生物和陆源高等植物输入相对含量的正构烷烃平均链长指数 ACL [$ACL = \sum (n \times C_n) / \sum C_n$] 和陆源/水生生物指数 TAR [$TAR = (C_{27} + C_{29} + C_{31}) / (C_{15} + C_{17} + C_{19})$] 对琼东南盆地烃源岩的正构烷烃纵向变化特征进行分析, ACL 和 TAR 越高则表明陆源高等植物贡献越大(图4)。

崖三段(E_3y^3) ACL_{15-33} 略高于崖二段(E_3y^2), 数据主体分别落在 22.1 ~ 23.6 (平均 23) 和 21.2 ~ 23.2 (平均 22.5), 从崖二段开始, 高碳数正构烷烃含量逐渐增加, 直到三二段(N_1s^2) ACL_{15-33} 平均值增长到 24.3, 继而三一段(N_1s^1) 下降到 23.4, 尤其是全区所有三二段(N_1s^2) 样品中超过 57 % 的样品的 $ACL_{15-33} > 24$ (图4)。 TAR 指

数变化趋势与 ACL_{15-33} 一致, 崖三段(E_3y^3) 陆源输入高于崖二段(E_3y^2), 崖二段(E_3y^2) - 三二段(N_1s^2) 陆源高等植物持续增加, 到三一段(N_1s^1) 发生转折。总之, 三二段(N_1s^2) - 三一段(N_1s^1) 的转折十分清晰, 均说明陆源高等植物对有机质的贡献到三二段(N_1s^2) 沉积时期达到了峰值。其主要原因是因为输送陆源高等植物的水道和大型三角洲从渐新世一早中新世逐渐增多, 到三二段(N_1s^2) 沉积时期达到空前规模, 而且该时期的气候条件属于热带-亚热带气候, 湿润炎热的气候也适宜高等植物的繁盛。

五环三萜类化合物奥利烷、羽扇烷、乌散烷和蒲公英烷均属于来自于被子植物可靠的标志物, 其中较高含量的蒲公英烷及其前身物蒲公英赛醇在热带/亚热带红树林来源的有机质中被报道^[24]。一些来自于奥利烷/羽扇烷或其前身物 β -香树脂醇结构断裂形成的四环化合物如降-A-奥利烷、降-A-羽扇烷和降-A-乌散烷等在三环萜烷保留时间中偶有被报道^[24], 这类化合物也可用来指示被子植物来源。本研究区发现的原油具有极高树脂化合物 W 和 T, 高奥利烷和蒲公英烷, 也同样说明海相烃源岩中陆源的贡献(图5)。

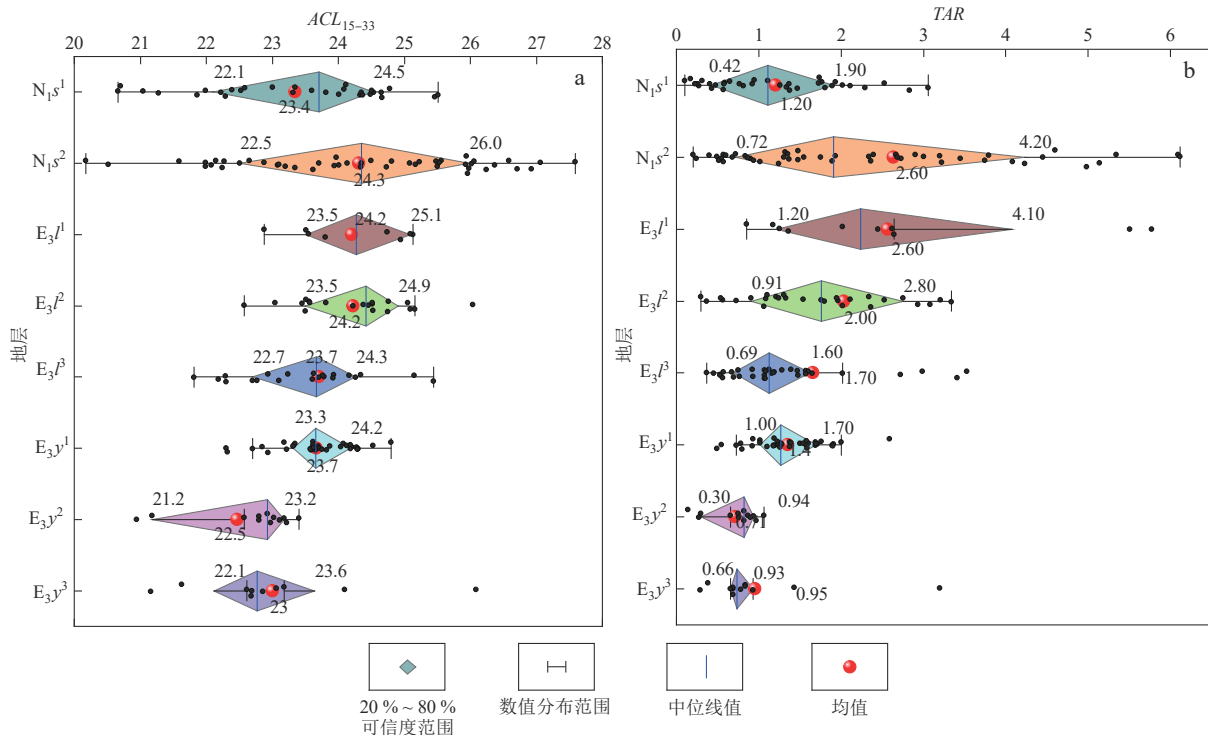


图4 琼东南盆地烃源岩可溶有机质中陆源输入特征

Fig. 4 Terrigenous input in soluble organic matter of source rocks in the Qiongdongnan Basin

a. 不同层段烃源岩的 ACL 分布范围; b. 不同层段烃源岩的 TAR 分布范围

E_3y^3 . 崖三段; E_3y^2 . 崖二段; E_3y^1 . 崖一段; E_3l^3 . 陵三段; E_3l^2 . 陵二段; E_3l^1 . 陵一段; N_1s^2 . 三二段; N_1s^1 . 三一段

($ACL = \sum (n \times C_n) / \sum C_n$ $TAR = (C_{27} + C_{29} + C_{31}) / (C_{15} + C_{17} + C_{19})$); 此为两个公式, 分别表示指数 ACL 和 TAR , 其中 n 为碳数, C_n 为碳数, C_{27} 为碳数 27 正烷烃。)

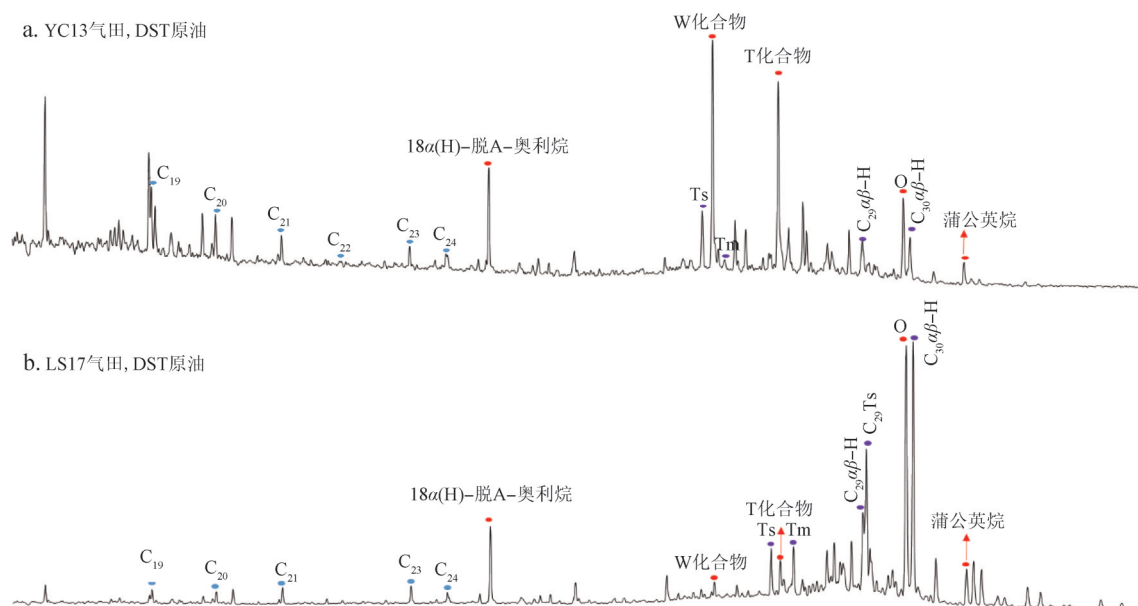


图5 YC13和LS17地区原油饱和烃中主要陆源输入标志物: $m/z=191$ 质量色谱

Fig. 5 Major terrigenous input markers present in $m/z=191$ mass chromatograms of saturated hydrocarbons in crude oil of the YC13 and LS17 gas fields

DST. 钻柱测试原油; $C_{29}\alpha\beta$ -H. $17\alpha(H)21\beta(H)C_{29}$ 藿烷; $C_{30}\alpha\beta$ -H. $17\alpha(H)21\beta(H)C_{30}$ 藿烷

断坳期的陵水组(E_3l)沉积时期水体迅速加深,物源发生改变,松涛凸起和崖南低凸起逐渐隐于水下形成碳酸盐岩台地,海南岛、神狐隆起、南部隆起和中建凸起为大规模三角洲和海底扇提供充足物源,基本完成了下伏断陷期地层的“填平补齐”;宝岛和长昌凹陷受三角洲体系影响较大,发育大规模陆源海相泥岩,乐东和陵水凹陷中心距三角洲较远,则发育藻类为主的海相泥岩。该时期陆源有机质的沉积受河流-三角洲体系控制,形成的原油以陆源海相特征为主,正构烷烃的碳数分布范围广,均存在着W和T化合物和蒲公英烷,且具有奥利烷含量高的特征。

2.2 古气候决定陆源有机质供给

气候变化通过影响物源区植被组合的类型与生物量影响着烃源岩中有机质的富集。琼东南盆地自渐新世以来古地理、古气候和古植被均发生过巨大的变化。整体上来说琼东南盆地崖城组沉积早期气候温暖,崖城组中晚期和陵水组时期气候较凉,三亚组(N_3s)中、下部的气候温暖湿润,三亚组(N_3s)上部和梅山组形成期的气候变化可能总体属于降温过程,至黄流组时期气候变得较温凉干旱,莺歌海组时期温凉干旱的气候持续并加剧^[25],表1总结了烃源岩层段崖三段(E_3y^3)—三二段(N_3s^2)之间不同层段的古气候变化和古植被发育情况。

ODP184航次1148站位孢粉资料表明南海32 Ma(崖三段沉积期, E_3y^3)以前为热带山地雨林和低地雨

林,气候较炎热且湿润。32.0~27.5 Ma(崖二段—陵三段沉积期, E_3y^2 — E_3l^3)以后是一个气温逐渐降低的过程,孢粉组合中裸子植物花粉含量增加,雪松粉、冷杉粉、云杉粉、铁杉粉和榆粉含量陡增,热带低地雨林减少,温带高山针叶林及低山温带阔叶林发育,气候温凉且略干^[26]。这个规律在琼东南盆地也有明显的响应,崖三段(E_3y^3)孢粉组合中以被子植物花粉为主,出现大量热带-亚热带蕨类植物孢子,该阶段的植被类型和沟鞭藻均说明当时的气候属于温暖潮湿的亚热带湿热气候。崖二段(E_3y^2)—陵三段(E_3l^3)沉积期是一个气温逐渐下降的过程,被子植物和蕨类植物逐渐减少,裸子植物逐渐增加,但在崖二段(E_3y^2)和崖一段(E_3y^1)沉积期仍发育有低地雨林,表明其气候为温凉湿润。陵三段(E_3l^3)沉积期是裸子植物最为发育的时期,蕨类植物较少,为温凉但略干燥的气候。陵二段(E_3l^2)—三二段(N_3s^2)沉积期是一个气温逐渐升高的时期,其中陵二段(E_3l^2)和陵一段(E_3l^1)沉积期仍以发育裸子植物为主,但热带-亚热带被子植物和蕨类植物的孢粉含量逐渐增加,裸子植物孢粉含量逐渐减少,气候条件为温凉湿润。南海北部大陆架地区的植被从早中新世开始,山地针叶林及落叶阔叶林大量消失,红树林面积迅速增长,植被类型为低地雨林和热带雨林,气候条件较渐新世温暖、湿润。因此三二段(N_3s^2)沉积期是琼东南盆地气候较温暖的阶段,针叶林或针阔叶混交林分布区退缩,落叶阔叶植物减少,热带、亚热带常绿阔叶林和常绿阔叶落叶阔叶林

表 1 琼东南盆地崖城组—三亚组古气候和古植被特征

Table 1 Paleoclimate and paleovegetation characteristics of the Yacheng to Sanya formations in the Qiongdongnan Basin

地层	孢粉及古植被种类变化	东亚季风强度	气候与环境
三一段	草本植物盛行	中等	干冷
三二段	种类繁多的热带/亚热带阔叶被子植物,分布热带雨林	高	温暖、湿润
陵一段	裸子植物为主,热带/亚热带被子植物和蕨类植物孢粉的含量逐渐增加,裸子植物逐渐减少	中等	温凉、湿润
陵二段		低	
陵三段	裸子植物和被子植物为主,蕨类含量低	—	温凉、略干燥
崖一段	山地针叶林、低地雨林,被子植物为主,蕨类含量减少	—	温凉、湿润
崖二段		—	
崖三段	山地/低地雨林、海岸沼泽沼泽,被子和蕨类植物占优势	—	温暖、湿润

混交林盛行,有热带雨林分布^[25,27-28]。

尽管琼东南盆地古新世—渐新世的古气候存在较大波动,但即使是在相对温凉时期,物源区植被仍以大量高大的乔木为主,这奠定了琼东南盆地烃源岩中陆源有机质为主的气候背景。古气候和古植被的恢复结果表明崖三段(E_3y^3)和三二段(N_1s^2)陆源有机质供给量高,是最有利的烃源岩发育层段。崖一段(E_3y^1)—崖二段(E_3y^2)和陵一段(E_3l^1)—陵二段(E_3l^2)次之,也能形成有效的烃源岩,但陵三段(E_3l^3)陆源有机质供给能力最弱,通常发育砂体储层,泥质沉积较少。

2.3 沉积相控制有利烃源岩发育区域

三角洲是一个巨大的陆源有机质的碳汇,具有强大的有机质搬运能力,沉积相带有有机质形成过程中发挥着重要的作用。三角洲平原作为三角洲的陆上部分,发育分流河道和沼泽,是原地陆源有机质的重要来源。三角洲前缘是河流—海洋水体剧烈交锋的区域,是陆源有机碎屑的主要卸载区,沉积有机质中陆源有机质占主导地位。前三角洲以泥质沉积为主,生源中藻类贡献增加。Hage(2022)对全球大陆架、峡湾和深海扇等海洋沉积物中的陆源有机质研究发现,三角洲水下部分(三角洲前缘和前三角洲)的有机碳埋藏速率高达 $2.3 \sim 15.7 \text{ t/km}^{2[29]}$ 。屈童等(2021)通过水槽实验也发现由物源向深水区方向,陆源有机碳含量呈先增大后减小的趋势,在三角洲前缘—浅海过渡区出现最大值^[23]。

按照相带对研究区 149 个渐新统烃源岩可靠的 TOC 数据进行统计,结果发现(扇)三角洲前缘样品的平均 TOC 最高,可达到 0.84%,前三角洲—内浅海 TOC 有所降低,平均值为 0.78%,外浅海和滨海 TOC 最低,分别为 0.4% 和 0.45%。三角洲前缘和前三角洲—内浅海为海相陆源有机质富集的有利相带。根据琼东南盆地崖城组(E_3y)—三亚组(N_3s)共计 37 口井的 645 个泥岩干酪根显微组分数据统计分析,不同区域及不同

层段的烃源岩干酪根显微组分中镜质组/(腐泥组+镜质组)含量比值差异较大(图 6),具有明显的海洋浮游植物和陆源有机质双源输入特征。宝岛北坡地区最显著的特征是崖二段(E_3y^2)以及部分崖一段(E_3y^1)样品中镜质组/(腐泥组+镜质组)比值明显低于其他层段,指示明显的水生生物贡献(图 6a);其余层段多以高等植物输入为主,不乏藻类的贡献。中央水道崖三段(E_3y^3)明显陆源有机质和藻类贡献势均力敌,崖二段(E_3y^2)到陵二段(E_3l^2)藻类贡献呈增加趋势,到陵一段(E_3l^1)陆源有机质含量再度升高;三亚组(N_3s)藻类贡献略占优势(图 6b)。松涛—松南地区陵水组(E_3l)和三亚组(N_3s)均以陆源有机质为主,由下到上随着盆地水体加深,藻类贡献略有增加(图 6c)。崖城地区除了崖一段(E_3y^1)和陵一段(E_3l^1)显示高等植物输入为主外(样品量较少),其余层段镜质组/(腐泥组+镜质组)比值范围宽泛,均表现为藻类和高等植物对有机质双源贡献(图 6d)。由此可以看出,陆源海相烃源岩在不同的地区、不同的层段均有较大的变化,因而应该考虑到陆源海相源岩的生源组成变化与差异性特征。

生物标志物组成是判断烃源岩生源组成另外一种有效手段与方法,BD19-2c 井的生物标志物分析结果表明(图 7),2 880 m 深度三角洲前缘样品的正构烷烃为后峰型并以 nC_{29} 为主峰,高姥植比,奥利烷含量相对高,三环萜烷和伽马蜡烷,反映了氧化条件下河流搬运陆源有机质的输入,海相藻类贡献较低。3 878 m 深度前三角洲—内浅海样品的正构烷烃主峰前移,姥/植比有所降低,但仍然较高,奥利烷含量降低,三环萜烷含量升高,T 化合物含量较高,反映了弱氧化状态下陆源有机质和海相藻类的混合输入。4 510 m 深度浅海样品正构烷烃呈明显的前峰型,姥/植比中等,奥利烷和 T 化合物含量均较低,三环萜烷和伽马蜡烷含量相对高,反映的是弱还原条件下海相藻类生源输入。BD19-2c 井垂向上生物标志物组合特征反映了随着搬

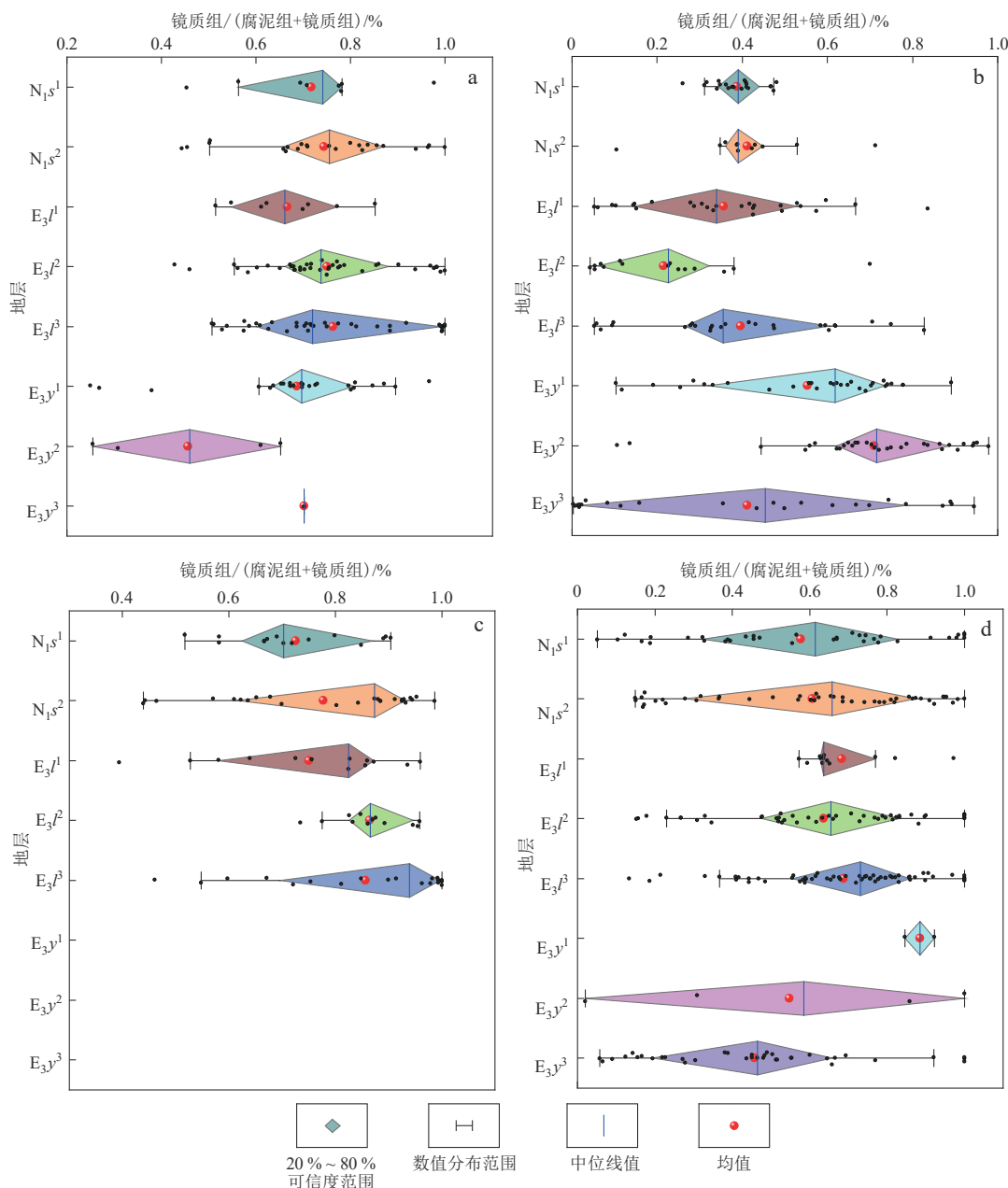


图6 琼东南盆地不同区域烃源岩层段干酪根显微组分镜质组/(腐泥组+镜质组)含量比特征

Fig. 6 Vitrinite/(sapropelinite+vitrinite) ratios of kerogen maceral components at source rock intervals in different areas of the Qiongdongnan Basin

E_{3y}^3 . 崖三段; E_{3y}^2 . 崖二段; E_{3y}^1 . 崖一段; E_3l^3 . 陵三段; E_3l^2 . 陵二段; E_3l^1 . 陵一段; N_{1s}^2 . 三二段; N_{1s}^1 . 三一段

a. 宝岛北坡样品中镜质组/(腐泥组+镜质组)比值; b. 中央水道样品中镜质组/(腐泥组+镜质组)比值; c. 松涛-松南地区样品中镜质组/(腐泥组+镜质组)比值; d. 崖城地区样品中镜质组/(腐泥组+镜质组)比值

运距离的增加,陆源有机质占比减小,海相藻类占比增加的变化规律。

值得注意的是,同为陆源有机质来源的奥利烷和双杜松烷T化合物的含量在不同沉积相带却出现较大的分异,奥利烷的母质碎屑主要沉积在三角洲前缘,而双杜松烷的母质碎屑主要沉积在前三角洲-内浅海。奥利烷作为非藿烷类三萜,主要来源于被子植物树叶、木质部分(树干)、根部和树皮^[30-32]。Reich等(2014)对

全球61个国家超过6 200个森林的研究发现^[33],被子植物和裸子植物森林的根系生物量占总森林生物量的比例约为叶片的10倍,因此可以认为沉积有机质中的奥利烷来源于被子植物的根部。双杜松烷则被认为是来源于低地雨林中的龙脑香科植物分泌的树脂^[34],是壳质组的前身之一。肖贤明(1992)研究发现镜质体密度在1.30~1.35 g/cm³之间,壳质组密度在1.20~1.25 g/cm³之间,镜质体密度大,壳质组密度低^[35]。因而国际上广

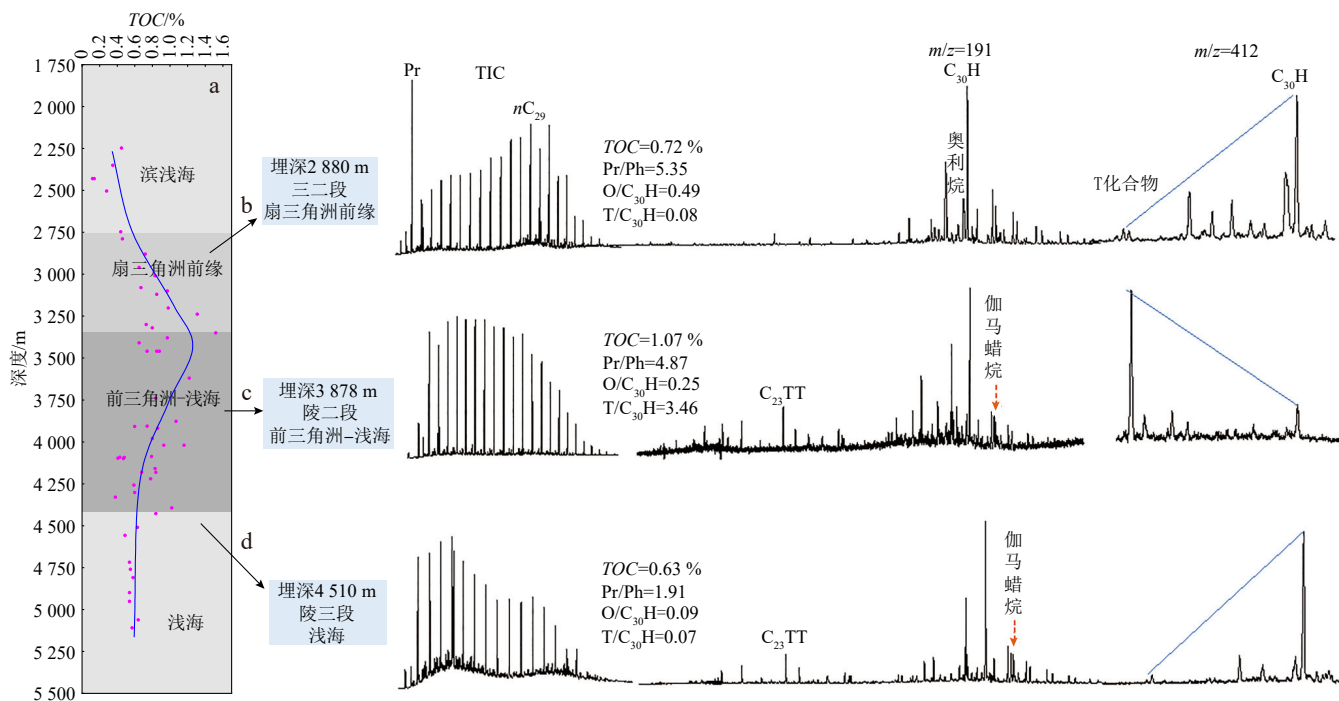


图7 琼东南盆地BD19-2c井不同沉积相带烃源岩生物标志物特征

Fig. 7 Biomarker characteristics of source rocks in different sedimentary facies zones in well BD19-2c in the Qiongdongnan Basin

a. 滨浅海相带; b. 扇三角洲前缘相带; c. 前三角洲-浅海相带; d. 浅海相带

 $C_{30}H$. C_{30} 藿烷; $C_{23}TT$. C_{23} 三环萜烷

泛地应用镜壳比来判定河流搬运的距离。但目前并不完全清楚奥利烷和双杜松烷T化合物来源的确切植物部位,相关的研究尚需要进一步深入。但可以肯定的是,它们分布在植物的部位一定存在差异,作者推测二者在其母质碎屑密度的差异是造成二者分布的主要成因,母源的分布及不同区域水动力条件也对其有一定的影响,从而造成奥利烷和双杜松烷在不同沉积相带含量差异较大。因而,可望利用该二类化合物分布差异作为海洋中的“浮标”对其河流的陆源有机质搬运能力及海洋的动力条件进行综合分析。

除了三角洲体系以外,海底扇作为三角洲沉积体向深水区的延伸,也继承了三角洲前缘-内浅海相对高TOC的特征,但由于有机质在浊流搬运过程中量的限制,整体TOC总体上低于三角洲前缘-前三角洲相带。以WN1-1a井为例,该井在陵一段(E_3l^1)—三二段(N_1s^1)发育大型浊积水道及海底扇,TOC平均值约为0.7%,有机质在长距离快速运移中虽然损失了约20%,但仍然是有效烃源岩的分布区。

2.4 三角洲规模决定有机质富集程度

沉积学研究通常依据河流和海洋作用的相对强度、沉积作用类型对三角洲进行分类。影响三角洲形成和发育的因素主要有以下几种:①河流的流速、

泄水量和搬运泥砂量;②注水和蓄水体的相对密度的大小;③沉积介质作用类型(河流、波浪、潮汐、海流)和强度;④沉积盆地的构造性质,其中包括沉积盆地的稳定性、沉降速度和海水进退等^[36-38]。根据琼东南盆地三角洲发育的实际情况^[39-40],将绝对面积大于200 km²的三角洲划分为大三角洲,小于200 km²则划分为小三角洲。

对宝岛北坡、松涛凸起、崖北凹陷等钻井资料较为丰富且普遍发育三角洲地区钻井的三二段(N_1s^2)和陵一段(E_3l^1)的193个TOC实测数据进行统计分析,依据上述大、小三角洲的分类标准,发现有机质丰度与三角洲规模具有正相关性。大三角洲样品的TOC平均值约为0.74%,小规模三角洲TOC的平均值约为0.60%(图8)。

大、小三角洲TOC的差距实际上与河流量及生源植被类型有直接关系(图9)。大三角洲形成于大规模河流入海口,河流搬运的沉积的有机质主要来源于远离海岸的植被区,主要以高大的被子植物为主,占比达到39%~89%,生物通量高。小三角洲主要通常为扇三角洲,水流小,搬运能力有限,有机质来源于近岸低矮的蕨类植物,占比达到33%~67%,生物通量低。综合沉积相的分析结果,大型三角洲的三角洲前缘-内浅海和海底扇为有利的海相陆源烃源岩发育区

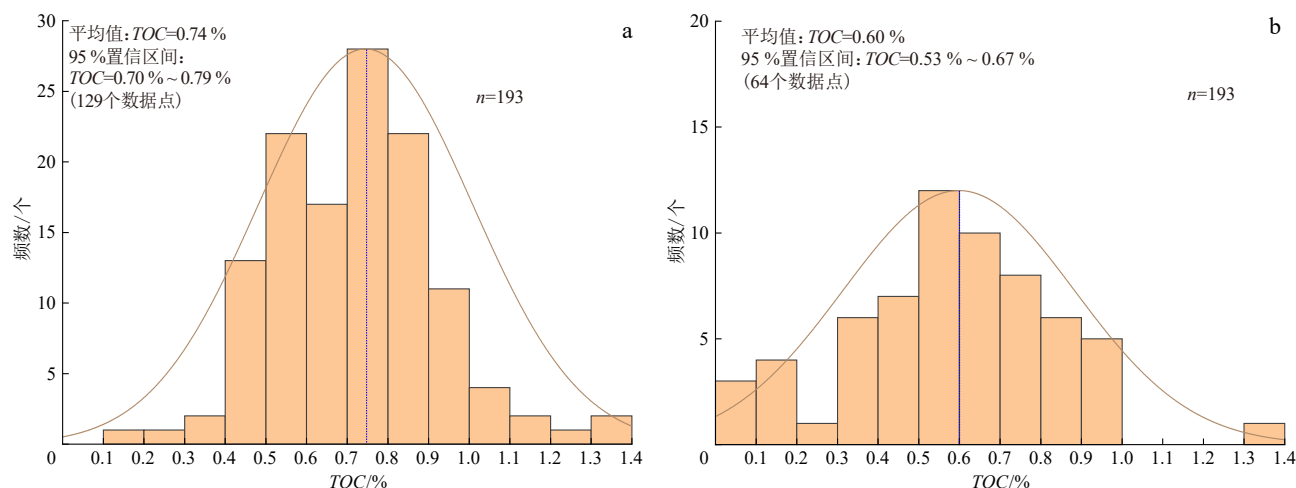


图8 琼东南盆地三角洲规模与烃源岩丰度的关系

Fig. 8 Relationship between the delta scale and the organic matter abundance of source rocks in the Qiongdongnan Basin

a. 大三角洲; b. 小三角洲

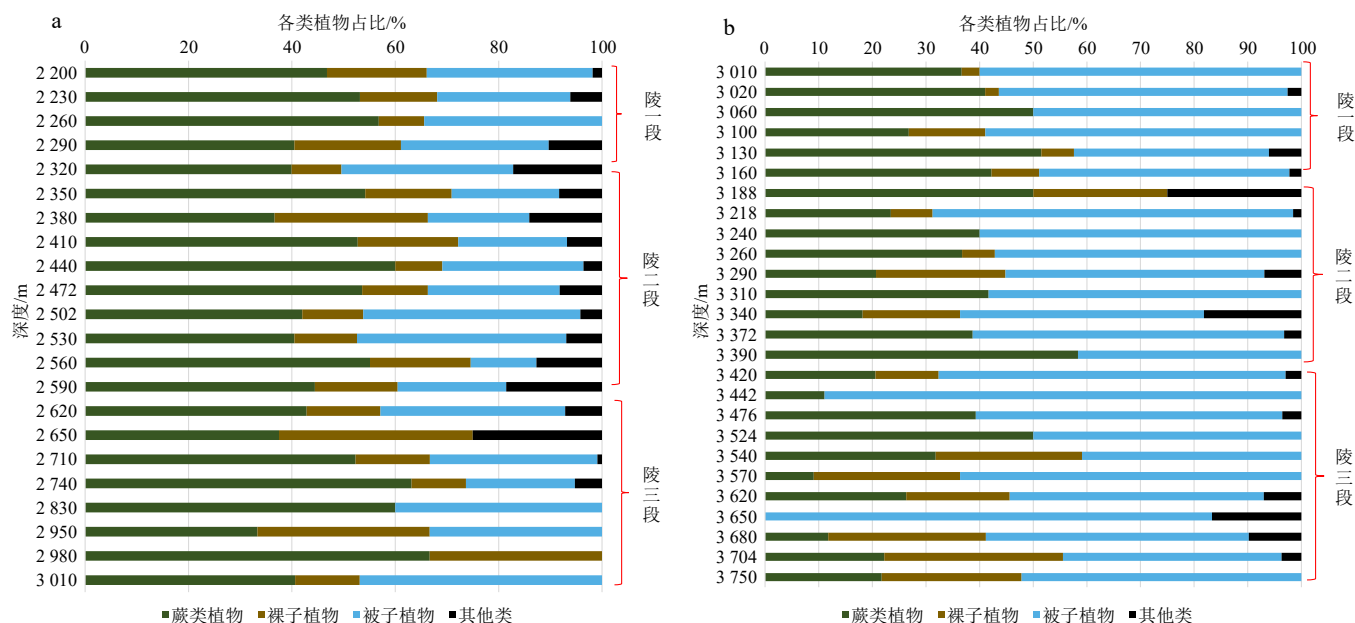


图9 琼东南盆地大、小三角洲代表井单井孢粉组成条形图

Fig. 9 Bar graphs showing the palynological assemblages in representative wells of large- and small-scale deltas in the Qiongdongnan Basin

a. ST31-6a井, 小三角洲; b. BD20-1a井, 大三角洲

(表2)。综合上述分析结果,本文提出陆源海相烃源岩TOC分布规律与富集模式如图10所示。大型三角洲和三角洲前缘带来了丰富的陆源有机搬运与沉积,易于形成潜在的优质烃源岩。

3 结论

琼东南盆地的陆源海相烃源岩是我国海域一类重要的源岩,其分布特征与富集机理对我国其他海域盆地有重要的借鉴与指导意义。陆源海相烃源岩的生源

主要为陆源高等植物,在研究区凹陷中心深水区已达到成熟阶段,具有生油气潜力。研究结果表明,盆地构造格局控制了烃源岩的发育类型,断陷期的崖城组(E_3Y)陆源有机质主要为以近岸堆积形式形成的煤系烃源岩,分布在凹陷和凹中凸起的边缘。陵水组(E_3L)沉积期主要发育以河流-三角洲搬运体系为背景的陆源海相烃源岩,陆源有机质可达到凹陷中心。古气候通过影响植被生长情况影响了陆源海相烃源岩的类型与丰度,崖三段(E_3Y^3)和三二段(N_1s^2)沉积期古气候环境最有利于高等植物生长,有机质丰度相对较高;崖二

表 2 琼东南盆地不同类型烃源岩特征

Table 2 Characteristics of various types of source rocks in the Qiongdongnan Basin

烃源岩发育类型	地质特征			烃源岩数据				奥利烷和 T化合物	陆相生源 比例/%
	有利相带	发育层位	发育区域	平均 TOC/%	类型	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	源岩 等级		
煤系	三角洲平原、 滨岸沼泽、 潮坪-潟湖	崖城组	边缘凹陷的滨岸带、 凸起边缘	0.4 ~ 95.9	Ⅲ型	-28.0 ~ -29.0	好	含量异常高	>90
海相 陆源	大三角洲	陵二段— 三二段	宝岛、长昌、 乐东、崖北	~ 0.8	Ⅱ ₂ —Ⅲ型	-25.5 ~ -27.5	中等-好	含量相对高， 丰度出现分异	50 ~ 90
	小三角洲	各层段均 可发育	盆地边缘、 凸起边缘	~ 0.5	Ⅱ ₂ —Ⅲ型	-25.5 ~ -27.5	差-中等		50 ~ 90
	滨岸体系	—	凹陷边缘、 凸起边缘	~ 0.4	Ⅲ型	-24.5 ~ -26.5	差	低	30 ~ 70
	海底扇体系	—	三二段	~ 0.7	Ⅱ ₂ —Ⅲ型	-25 ~ -27	中等-好	有奥利烷， T化合物含量低	40 ~ 80

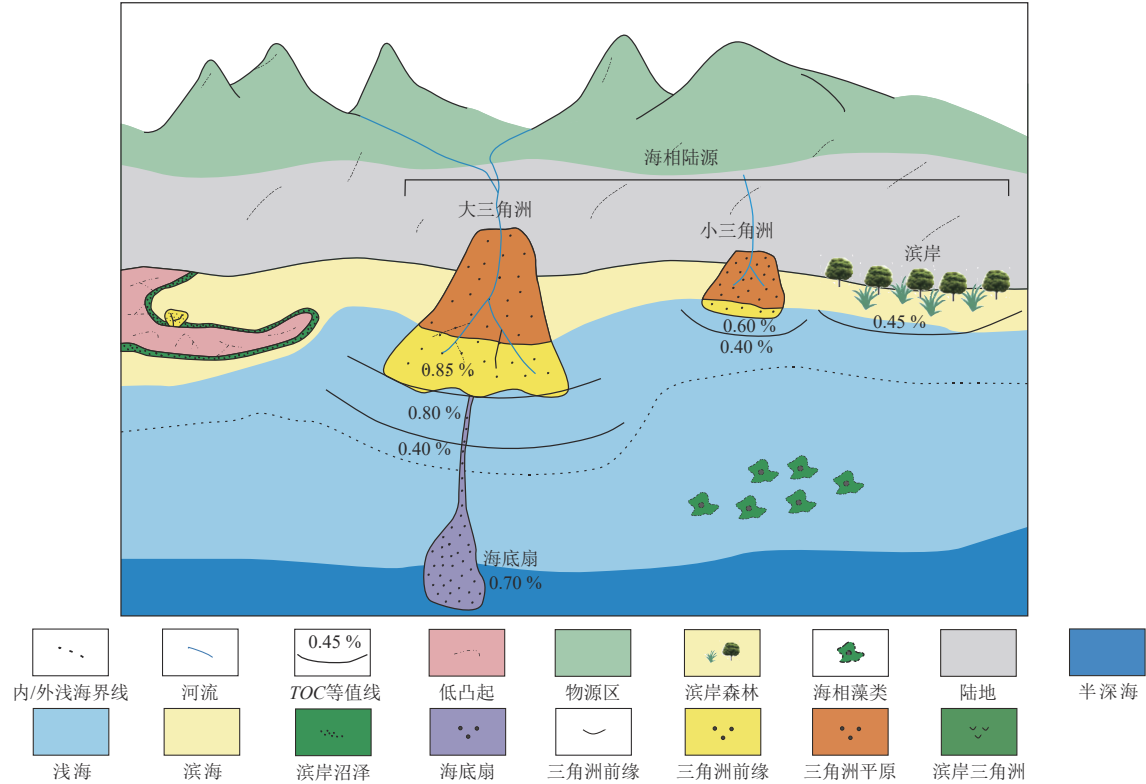


图 10 琼东南盆地陆源海相烃源岩 TOC 分布规律与富集模式

Fig. 10 Distribution pattern and enrichment model of TOC content in terrigenous marine source rocks in the Qiongdongnan Basin

段(E_3Y^2)—崖一段(E_3Y^1)和陵二段(E_3l^2)—陵一段(E_3l^1)沉积期古气候次之;陵三段(E_3l^3)沉积期陆源高等植物生长情况相对差,局部富集以海相藻类为主的陆源海相源岩。沉积相带的不同及古地形控制了陆源有机质的差异性卸载,形成了不同地化特征的陆源海相烃源岩,有利的发育区域为三角洲前缘-内浅海。大规模的三角洲通过输送更高生物通量的陆源有机质,提高了烃源岩有机质丰度。

参 考 文 献

[1] ZHU Weilin, HUANG Baojia, MI Lijun, et al. Geochemistry, origin, and deep-water exploration potential of natural gases in the Pearl River Mouth and Qiongdongnan basins, South China Sea [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(6): 741-761.

[2] ZHOU Di, SUN Zhen, CHEN Hanzong, et al. Mesozoic paleogeography and tectonic evolution of South China Sea and adjacent areas in the context of Tethyan and Paleo-Pacific

- interconnections[J]. *Island Arc*, 2008, 17(2): 186–207.
- [3] 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等. 南海北部陆缘东部的地壳结构[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(1): 27–35.
YAO Bochu, ZENG Weijun, CHEN Yizhong, et al. The crustal structure in the eastern part of the northern margin of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37(1): 27–35.
- [4] 朱光辉, 陈刚, 刁应护. 琼东南盆地温压场特征及其与油气运聚的关系[J]. *中国海上油气(地质)*, 2000, 14(1): 29–36.
ZHU Guanghui, CHEN Gang, DIAO Yinghu. Characteristics of geotherm-pressure field and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 2000, 14(1): 29–36.
- [5] 吴飘, 侯读杰, 甘军, 等. 琼东南盆地深水东区渐新统烃源岩发育模式[J]. *沉积学报*, 2019, 37: 633–647.
WU Piao, HOU Dujie, GAN Jun, et al. Developmental model of Oligocene source rock in the Eastern deep-water Area of Qiongdongnan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37: 633–647.
- [6] 谢文彦, 张一伟, 孙珍, 等. 琼东南盆地断裂构造与成因机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(1): 71–78.
XIE Wenyan, ZHANG Yiwei, SUN Zhen, et al. Characteristics and formation mechanism of faults in Qiongdongnan Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 71–78.
- [7] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 15–21.
ZHANG Gongcheng, MI Lijun, WU Shiguo, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15–21.
- [8] 赵民, 张晓宝, 吉利明, 等. 琼东南盆地构造演化特征及其对油气藏的控制浅析[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(3): 494–502.
ZHAO Min, ZHANG Xiaobao, JI Liming, et al. Characteristics of tectonic evolution in the Qiongdongnan Basin and brief discussion about its controlling on reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(3): 494–502.
- [9] 朱继田, 裴健翔, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地新构造运动及其对晚期油气成藏的控制[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(4): 649–656.
ZHU Jitian, PEI Jianxiang, SUN Zhipeng, et al. Feature of neotectonism and its control on late hydrocarbon accumulation in Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(4): 649–656.
- [10] 谢金有, 祝幼华, 李绪深, 等. 南海北部大陆架琼盆地新生代海平面变化[J]. *海相油气地质*, 2012, 17(1): 49–58.
XIE Jinyou, ZHU Youhua, LI Xushen, et al. The Cenozoic sea-level changes in Yinggehai-Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2012, 17(1): 49–58.
- [11] 邓运华, 兰蕾, 李友川, 等. 论三角洲对南海海相油气田分布的控制作用[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊2): 1–12.
DENG Yunhua, LAN Lei, LI Youchuan, et al. On the control effect of deltas on the distribution of marine oil and gas fields in the South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S2): 1–12.
- [12] 李增学, 何玉平, 刘海燕, 等. 琼东南盆地崖城组煤的沉积学特征与聚煤模式[J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 542–547.
LI Zengxue, HE Yuping, LIU Haiyan, et al. Sedimentology characteristics and coal-forming models in Yacheng Formation of Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 542–547.
- [13] 李增学, 周静, 吕大炜, 等. 琼东南盆地崖城组煤系空间展布特征[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(2): 1–8.
LI Zengxue, ZHOU Jing, LYU Dawei, et al. Coal-bearing distribution characteristics of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2013, 32(2): 1–8.
- [14] 李友川, 米立军, 张功成, 等. 南海北部深水区烃源岩形成和分布研究[J]. *沉积学报*, 2011, 29(5): 970–979.
LI Youchuan, MI Lijun, ZHANG Gongcheng, et al. The formation and distribution of source rocks for deep water area in the northern of South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 970–979.
- [15] 李友川, 傅宁, 张枝焕. 南海北部深水区盆地烃源条件和油气源[J]. *石油学报*, 2013, 34(2): 247–254.
LI Youchuan, FU Ning, ZHANG Zhihuan. Hydrocarbon source conditions and origins in the deepwater area in the northern South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(2): 247–254.
- [16] 刘正华, 陈红汉. 琼东南盆地天然气成因类型及其烃源探讨[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(6): 639–644.
LIU Zhenghua, CHEN Honghan. Origin mechanism and source rock for natural gas in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2011, 33(6): 639–644.
- [17] 黄保家, 李绪深, 王振峰, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(4): 1–7.
HUANG Baojia, LI Xushen, WANG Zhenfeng, et al. Source rock geochemistry and gas potential in the deep water area, Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(4): 1–7.
- [18] 黄保家, 王振峰, 梁刚. 琼东南盆地深水区中央峡谷天然气来源及运聚模式[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(5): 8–14.
HUANG Baojia, WANG Zhenfeng, LIANG Gang. Natural gas source and migration-accumulation pattern in the central canyon, the deep water area, Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(5): 8–14.
- [19] 徐新德, 张迎朝, 梁刚, 等. 南海北部琼东南盆地深水区烃源条件及天然气成藏机制[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(11): 1985–1992.
XU Xinde, ZHANG Yingchao, LIANG Gang, et al. Hydrocarbon source condition and accumulation mechanism of natural gas in deepwater area of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(11): 1985–1992.
- [20] 李文豪, 张智环. 古环境及其对琼东南盆地深水区烃源岩形成的控制[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(10): 10598–10611.
- [21] 王彪, 侯杜杰, 甘军, 等. 古环境及其对琼东南盆地深水区烃源岩形成的控制[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(11): 1985–1992.

- geochemistry and palynology[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(7): 7423–7437.
- [22] 孙瑞, 韩银学, 曾清波, 等. 琼东南盆地深水区东段崖城组沉积特征及对海相烃源岩的控制[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊2): 57–66.
- SUN Rui, HAN Yinxue, ZENG Qingbo, et al. Sedimentary characteristics of Yacheng Formation in the eastern deepwater area in Qiongdongnan Basin and their control on marine source rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S2): 57–66.
- [23] 屈童, 高岗, 徐新德, 等. 三角洲—浅海沉积体系陆源有机质沉积模拟实验研究——以琼东南盆地崖南凹陷崖城组为例[J]. *沉积学报*, 2023, 41(2): 584–600.
- QU Tong, GAO Gang, XU Xinde, et al. Sedimentary simulation experiment study on the distribution of terrestrial organic matter in the delta-shallow sea sedimentary system: A case study of the Yacheng Formation in the Yanan Sag, Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(2): 584–600.
- [24] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: Volume 2: Biomarkers and isotopes in petroleum systems and earth history[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [25] 覃军干, 吴国瑄, 李君, 等. 琼东南盆地渐新统——上新统孢粉、藻类记录[J]. *微体古生物学报*, 2016, 33(4): 335–349.
- QIN Jungan, WU Guoxuan, LI Jun, et al. Spores, pollen, freshwater algae and dinoflagellate cysts recorded in the Oligocene—Pliocene from the southeast Hainan Basin, South China Sea[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2016, 33(4): 335–349.
- [26] 吴国瑄, 覃军干, 茅绍智. 南海深海相渐新统孢粉记录[J]. *科学通报*, 2003, 48(17): 1868–1871.
- WU Guoxuan, QIN Jungan, MAO Shaozhi. Spore pollen records of the Oligocene in the deep sea of the South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(17): 1868–1871.
- [27] 谢金有, 覃军干, 李君, 等. 南海莺琼盆地渐新世—上新世孢粉组合序列及其古环境意义[J]. *微体古生物学报*, 2014, 31(1): 85–97.
- XIE Jinyou, QIN Jungan, LI Jun, et al. Palynological assemblages of the Oligocene and Pliocene in the Yinggehai-Qiongdongnan Basin of the northern South China Sea and their paleoenvironmental implications[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2014, 31(1): 85–97.
- [28] 陈平, 王任, 覃军干, 等. 琼东南盆地深水区WN-A井渐新世—中新世孢粉地层学及古气候[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(2): 390–402.
- CHEN Ping, WANG Ren, QIN Jungan, et al. Oligocene-Miocene palynostratigraphy and paleoclimate of Well WN-A from deep water area, southeast Hainan Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(2): 390–402.
- [29] HAGE S, ROMANS B W, PEPLIE T G E, et al. High rates of organic carbon burial in submarine deltas maintained on geological timescales[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(11): 919–924.
- [30] KARRER W, Cherbuliez E, EUGSTER C H. Konstitution und vorkommen der organischen pflanzenstoffe[M]. Basel: Birkhäuser, 1977.
- [31] DEV S. Terpenoids[M]//ROWE J W. *Natural Products of Woody Plants*. Berlin: Springer, 1989: 691–807.
- [32] RADHWANI M, SINGH V P, BECHTEL A, et al. Miocene organic-rich layers of the Saouef Formation (Oriental Tunisia); insights into temporal and spatial variability of environmental conditions during deposition[J]. *Organic Geochemistry*, 2022, 172: 104464.
- [33] REICH P B, LUO Y J, BRADFORD J B, et al. Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(38): 13721–13726.
- [34] GRANTHAM P J, POSTHUMA J, BAAK A. Triterpanes in a number of far-eastern crude oils[C]//BJORØY M, ALBRECHT P, CORNFORD C, et al. *Advances in Organic Geochemistry 1981, Norway, 1981*. Chichester: John Wiley & Sons, 1983: 675–683.
- [35] 肖贤明. 有机岩石学及其在油气评价中的应用[M]. 广州: 广东科技出版社, 1992.
- XIAO Xianming. *Organic petrology and its application in oil and gas evaluation* [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1992.
- [36] 袁亦楠, 肖敬修, 薛培华. 湖盆三角洲分类的探讨[J]. *石油勘探与开发*, 1982, 9(1): 1–11.
- QIU Yanan, XIAO Jingxiu, XUE Peihua. A discussion on the classification of lake basin Delta[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1982, 9(1): 1–11.
- [37] 张美华. 三角洲在坳陷盆地沉积中所占比例研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 2014, 34(3): 44–51.
- ZHANG Meihua. Proportions of deltas in downwarped basin deposits[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2014, 34(3): 44–51.
- [38] 林畅松. 沉积盆地分析原理与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- LIN Changsong. *Principles and application of sedimentary basin analysis*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [39] 李增学, 宋广增, 王东东, 等. 琼东南盆地渐新统煤系(扇)辫状河三角洲特征[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3471–3484.
- LI Zengxue, SONG Guangzeng, WANG Dongdong, et al. Characteristics of (fan) braided river delta in coal measures of Oligocene Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin[J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3471–3484.
- [40] 徐长贵, 尤丽. 琼东南盆地松南—宝岛凹陷北坡转换带特征及其对大中型气田的控制[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(6): 1061–1072.
- XU Changgui, YOU Li. North slope transition zone of Songnan-Baodao Sag in Qiongdongnan Basin and its control on medium and large gas fields, South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(6): 1061–1072.