

琼东南盆地古近纪成煤沉积体系类型及特征

刘莹¹, 刘海燕¹, 杨海长², 王东东¹, 宋广增³, 吕大炜¹, 陈莹², 李增学¹

[1. 山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 中海油研究总院, 北京 100029; 3. 济南大学, 山东 济南 250022]

摘要:琼东南盆地天然气勘探开发事实证明,煤系及煤层是最重要的生烃源岩。基于琼东南盆地地震资料、钻井岩心及测井资料,在对古近系渐新统含煤沉积特征分析的基础上,建立了沉积相与地震相的对应关系,识别出琼东南盆地渐新统发育冲积扇-潮坪-潟湖组合、冲积扇-潮坪-滨海组合、冲积扇-海沼沙岭平原-滨海组合等14种沉积组合;依据取心段煤的宏观与微观物理化学性质,判断崖城组煤层形成过程中受海水影响且沉积环境还原性较强,说明煤层形成于近海沼泽环境。基于成煤特征及成煤环境分析,划分出4类成煤沉积体系,分别为扇三角洲体系、辫状河三角洲体系、潮坪-潟湖体系和障壁海岸-海沼沙岭平原体系。扇三角洲体系煤层主要发育在扇三角洲平原、废弃朵体、朵体间洼地,煤层较薄,且易发生分叉;辫状河三角洲体系煤层主要发育在辫状河三角洲平原、分流间湾和泛滥平原等地区,煤层薄且不稳定;潮坪-潟湖体系中煤层多发育在潮上坪的沼泽及潮间坪上部的潮道间湾,潮汐三角洲平原以及淤化的潟湖等地区,在多潮道地区,煤层层数多,但厚度较薄,煤层间距大;而在潮道不发育地区,含煤层数较少,但厚度较大,煤层间距较小,煤层结构复杂;障壁海岸-海沼沙岭平原体系煤层主要发育在海岸平原沼泽地区,煤层层数多、但单层厚度小和横向变化较快。

关键词:沉积组合;成煤沉积体系;崖城组;渐新统;琼东南盆地

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Types and characteristics of Paleogene coal-forming sedimentary systems in Qiongdongnan Basin

Liu Ying¹, Liu Haiyan¹, Yang Haizhang², Wang Dongdong¹, Song Guangzeng³, Lyu Dawei¹, Chen Ying², Li Zengxue¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Shandong University of Science and Technology, Shandong, Qingdao 266590, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing 100029, China; 3. Jinan University, Jinan, Shandong 250022, China)

Abstract: The practice for exploring natural gas in Qiongdongnan Basin proves that coal measures and coal seams are the most important hydrocarbon source rocks. Based on the characteristic analysis of coal-bearing deposits in the Oligocene Paleogene by the seismic data, drilling core and logging data in Qiongdongnan Basin, the corresponding relationships between sedimentary facies and seismic facies are established, and 14 kinds of sedimentary assemblages are identified in the Oligocene of Qiongdongnan Basin, including the alluvial fan-tidal flat-lagoon, alluvial fan-tidal flat-coast, alluvial fan-sea bog sand ridge plain-coast assemblages. According to the micro-and macro-physicochemical properties of cored coal intervals, it is made certain that the Yacheng Formation coal seam was affected by seawater during its formative process and its sedimentary environment tended to be strong in reduction, indicating that the coal seam is developed in the offshore marsh environment. In view of the characteristic and environmental analysis for coal forming, four types of coal-forming sedimentary systems were classified, namely fan delta, braided river delta, tidal flat-lagoon and barrier-coast-sea marsh sand ridge plain systems. Among them, the thin coal seam in the fan delta system, prone to bifurcation, is mainly developed in the fan delta plains, abandoned lobes, and interlobe depressions; the coal seam in the braided river delta system, featuring thinness and instability, mainly grows in the braided river delta plains, diversion bays, and floodplains. The coal seam in the

收稿日期:2018-07-21; 修订日期:2018-09-15。

第一作者简介:刘莹(1969—),女,高级实验师,实验地质及沉积地质。E-mail:liuying-69@163.com。

通讯作者简介:刘海燕(1978—),女,博士后,副教授,能源地质。E-mail:lhylsj@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05026007);国家自然科学基金项目(41672096)。

tidal-lagoon system is mostly developed in the swamps of the supratidal flats and the inter-tidal-channel bays of the upper intertidal flats, the tidal delta plains and the silted lagoons, and in areas of multiple tidal channels, the coal seam layers are relatively large in number, and characterized by thinness and larger spacing, while in areas of single tidal channels, the number of coal-bearing seams, complex in structure, is relatively small, but their thickness is relatively large, and their spacing is small. At last, the coal seam in the barrier coast-sea marsh sand plain system is mainly developed in coastal plain marsh areas, characterized by multiple layers and faster change in lateral, but thinness for each layer.

Key words: sedimentation assemblage, coal-forming depositional system, Yacheng Formation, Oligocene, Qiongdongnan Basin

琼东南盆地新生代经历了早期断陷、中期拗陷和晚期新构造期3个发展阶段,盆地具有多水系、多隆、多凹特征,并具有典型被动大陆边缘的构造、沉积演化特征和良好的油气成藏条件^[1-3]。油-源和气-源对比表明盆地内的崖城组煤系烃源岩是主力烃源岩之一。琼东南盆地早渐新世崖城组形成于始新世陆相沉积向晚渐新世陵水组海相沉积过渡的时期。崖城组早期开始发生海侵,但仍以陆相沉积作用占主导。在崖城组中、晚期海侵作用逐渐增强,海相沉积作用逐渐取代陆相沉积作用^[4-7]。因此崖城组含煤地层发育在盆地活动相对较弱的裂陷中期,其间各凹陷断裂活动减弱,地势变得相对平缓,气候潮湿,植被大量生长发育,非常适合成煤^[8]。

在古近系的沉积体系类型分析中,不同研究者认识上有一定差异性。蔡佳^[9]识别出崖城组发育冲积扇体系、(扇)三角洲体系、海岸平原体系、滨海体系、浅海体系;沈怀磊^[10]分析了海底扇体系、辫状河-辫状河三角洲-水下扇体系、潮坪-潟湖体系的特征;魏魁生等^[11]通过陵水组沉积相展布特征研究,指出它们主要受断坡带控制,形成于裂陷晚期,发育浅海与滨海相为主的沉积环境,盆底扇和斜坡扇、扇三角洲在断裂附近较为发育。张功成等^[12]在研究崖北凹陷崖城组烃源岩分布时提到崖城组三段的煤主要在缓坡带的辫状河三角洲平原环境中发育,辫状河道的砂岩与分流间湾的泥岩或煤层互层出现,地震反射特征为乱岗状弱振幅。尚鲁宁等^[13]在研究崖南凹陷崖城组辫状河三角洲沉积特征时指出,该凹陷崖城组沉积具有典型的辫状河三角洲特征,成煤作用主要发生在辫状河三角洲平原亚相的泥炭沼泽微相,凹陷中发育多层薄煤层,为良好的烃源岩。

多位学者对琼东南盆地崖城组进行研究,从沉积环境、层序地层及煤系烃源岩潜力等不同的角度认识崖城组沉积。但对于琼东南盆地古近系成煤沉积体系的发育演化及成煤特征关系方面研究较为薄弱,本文将从成煤沉积体系类型及演化特征两方面,

结合钻井、测井和地震等数据进行研究,深入分析琼东南盆地古近系不同沉积环境下的成煤物质聚集规律及相关特征。

琼东南盆地天然气勘探开发事实证明,煤系及煤层是最重要的生烃源岩。崖城组煤系烃源岩的主生气期镜质体反射率(R_o)值为0.96%~2.74%,生气极限 R_o 值为4.38%^[14-15],因此琼东南盆地崖城组煤的演化正处于大量生气阶段,对天然气成藏具有重要作用和贡献。

1 区域地质背景

琼东南盆地位于海南岛东南部海域,南海北部大陆边缘西北部,是新生代形成的NE向伸展盆地,海域面积为 $6.0 \times 10^4 \text{ km}^2$,盆地面积为 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。北部与海南隆起区相接,南部为永乐隆起区,西侧为莺歌海盆地,东北为神狐隆起与珠三拗陷相邻,走向近NE向,平行于南海海盆主要构造线^[16]。东侧通过西沙海槽与南海西北海盆沟通,西侧与北西向的莺歌海盆地交接。琼东南盆地是南海北部大陆边缘新生代的重要含油气盆地。

琼东南盆地由北部拗陷带、北部隆起带、中央拗陷带及南部隆起带等一级构造单元和20多个二级构造单元构成(表1;图1)^[17-22]。盆地自西向东有3个走向不同的裂谷段:西部裂谷段呈EW走向,主要构造单元为崖南、崖北和乐东3个凹陷以及崖城凸起、崖21低凸起。南部裂谷段面积大于 $4\,620 \text{ km}^2$,沉积厚度大于4 000 m,为张性地堑结构,内部地震反射主要为平行-似平行结构。北部裂谷段为北断南超的崖北和崖南高角度半地堑,沉积地层主要为古近系,沉积厚度最大处超过3 500 m。东部裂谷段主要构造单元为松东、松西、松南、北礁和宝岛等5个凹陷以及中央凸起、松涛凸起,NE走向。陵水区位于东、西裂谷段之间,主要发育两组方向的断层系统,一组是NW-NWW向,另一组是NEE-NE向,其中以NW-NWW向雁列式断

表 1 琼东南盆地凹陷结构主要特征统计

Table 1 Statistics of the main characteristics of the depression unit in Qiongdongnan Basin

坳陷带	区块	凹陷	凹陷面积/km ²	凹陷结构	控制凹陷发育的基底断裂带走向	古近系厚度/m
北部坳陷带	西	崖北凹陷	1 885	半地堑	EW	>3 500
		崖南凹陷	1 241	半地堑	EW	>3 500
	中	陵水低凸起	852	菱形地堑	NWW, NE	>1 500
	东	松东凹陷	1 450	半地堑	NE	>2 500
		松西凹陷	972	半地堑	NE	>2 500
中央坳陷带	西	乐东凹陷	>4 620	地堑	EW	>4 000
	中	陵水凹陷	3 278	菱形地堑	NW, NE	>4 000
		松南凹陷	2 002	半地堑	NE	>4 000
	东	北礁凹陷	1 230	半地堑	NE	>4 000
		宝岛凹陷	>4 583	地堑	EW	>4 000

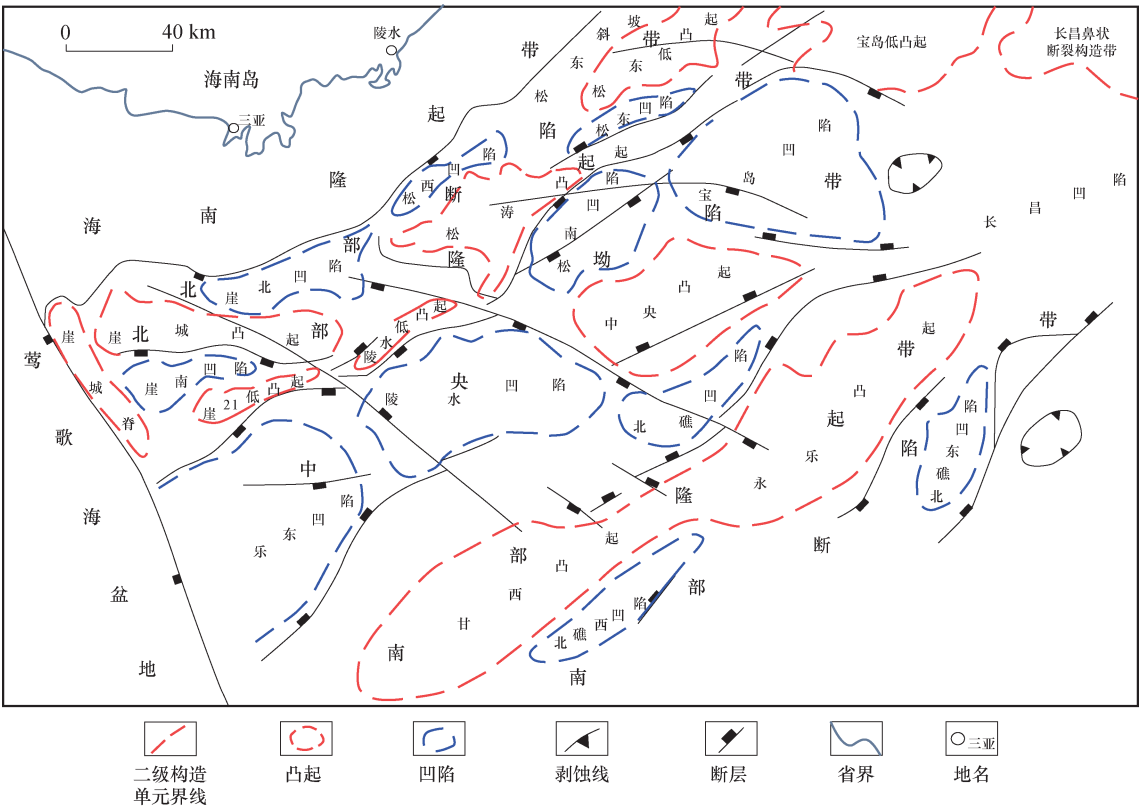


图 1 琼东南盆地构造单元划分(据参考文献[17-19]修改)

Fig. 1 Division of tectonic units in Qiongdongnan Basin(modified from references [17-19])

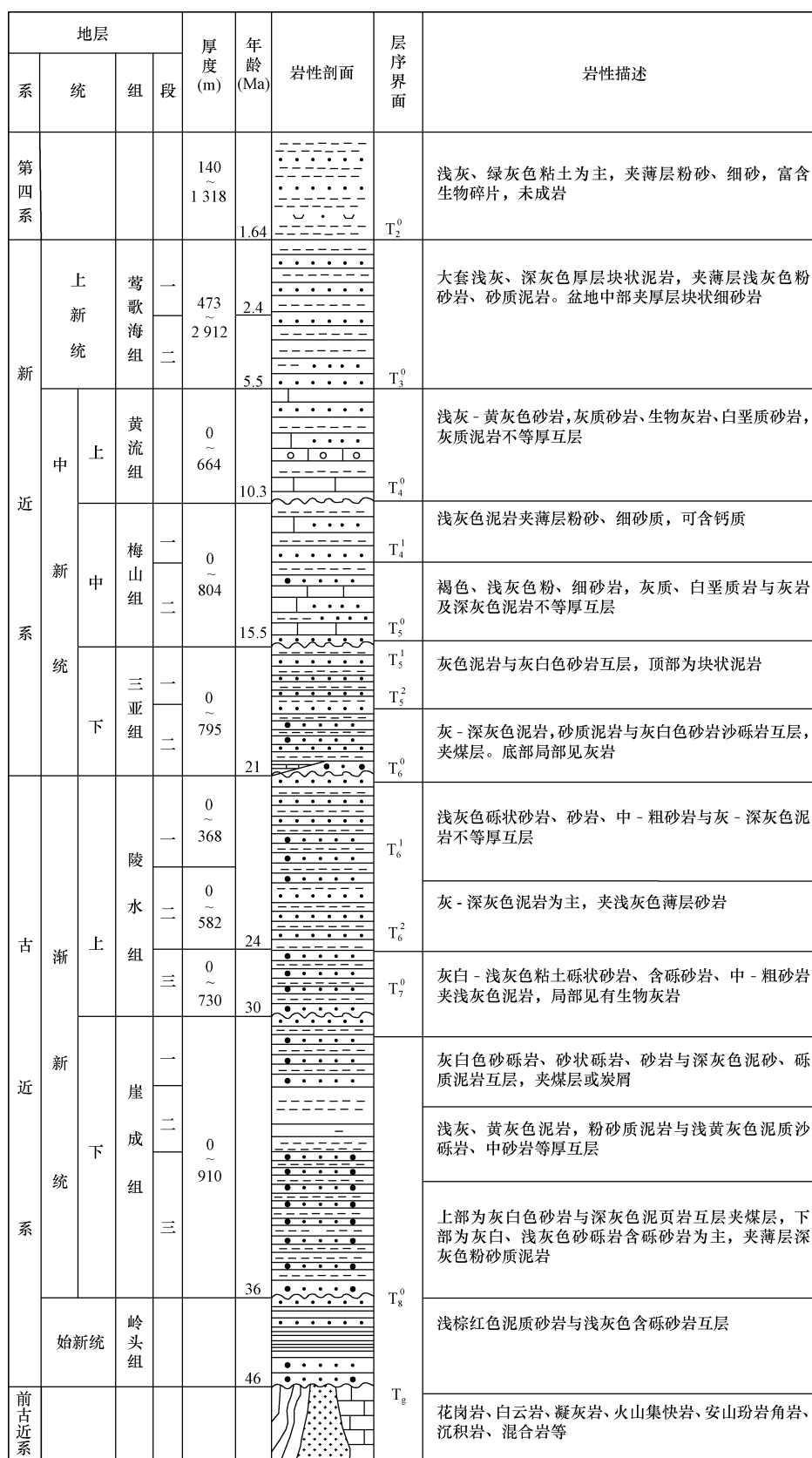
层为主,所控制的共轭断陷为走滑地堑,使陵水区形成区域性构造鞍状脊或洼。

琼东南盆地钻井显示地层自下而上分别为古近系渐新统、新近系中新统、上新统及第四系。根据岩性、电性、古生物及沉积旋回,将地层划分为八个岩性地层组,自下而上分别为始新统岭头组、渐新统崖城组、陵水组,中新统三亚组、梅山组、黄流组,上新统莺歌海组和第四系乐东组(图 2)^[22]。

乐东组:钻厚 377~2 511.5 m,主要发育浅海相,泥岩以灰色为主,夹薄层绿灰、浅灰色细砂、粉砂层,上部为砾状层砂,富含生物碎屑,松散未成岩。

莺歌海组:钻厚 463.5~2 434.8 m。主要发育泥岩,呈绿灰色、灰色厚层状,泥质粉砂岩、细砂岩为浅灰色、灰白色,呈薄层状夹在泥岩中,局部见砾状砂岩、灰岩及薄煤层,呈下细上粗的反粒序。

黄流组:崖北凹陷缺失该组,崖南凹陷钻厚 0~

图 2 琼东南盆地地层综合柱状图^[22]Fig. 2 Stratigraphic column of Qiongdongnan Basin^[22]

664 m,根据岩性和旋回性可分为两段。一段主要由两种岩性呈不等厚互层状,分别为灰色砂质灰岩、灰黄色生物灰岩,以及灰色、深灰色泥岩、浅灰色粉、细砂岩;二段主要为碎屑岩,如深灰色泥岩、浅灰色、灰白色细砂岩,以及夹有薄层灰岩的泥质粉砂岩。

梅山组:钻厚 29.5 ~ 1 323.5 m,分为两段:一段为浅灰色泥质粉砂岩、细砂岩与灰色泥岩互层,局部见灰色砂岩、砂质灰岩;二段为灰色、深灰色泥岩与浅灰色、灰白色粉砂岩、细砂岩不等厚互层,局部见灰质砂岩、灰岩。崖北凹陷部分并见厚层砂岩、泥质灰岩及泥质砂岩、泥岩。

2 沉积相与成煤沉积体系类型

2.1 典型沉积相类型

通过钻井岩心特征观察与测井资料分析,对研究区的沉积相类型进行识别,研究区渐新统崖城组地层

可划分出4类成煤沉积体系,分别为扇三角洲体系、辫状河三角洲体系、潮坪-潟湖体系和障壁海岸-海沼沙岭平原体系。沉积相类型有扇三角洲相、辫状河三角洲相、潮坪相、潟湖相、滨海相和浅海相等,其中扇三角洲平原沼泽、辫状河三角洲平原沼泽、海沼沙岭平原沼泽、潮上坪和潮间坪上部沼泽、海岸平原沼泽均有利于发生成煤作用。

2.2 地震反射与典型沉积相对应关系

利用琼东南盆地地震资料,结合钻井岩心及测井资料分析结果,对古近系渐新统含煤沉积特征进行研究,详细分析了地震相特征与沉积相的对应关系(图3,图4)。

地震相剖面 A 位于乐东凹陷东部(图3),横跨崖北凹陷、崖南凹陷、乐东凹陷与陵南低凸起等。凹陷结构地震特征显示崖北凹陷与崖南凹陷均为北断南超半地堑型,乐东凹陷为南断北超半地堑型。该区识别出

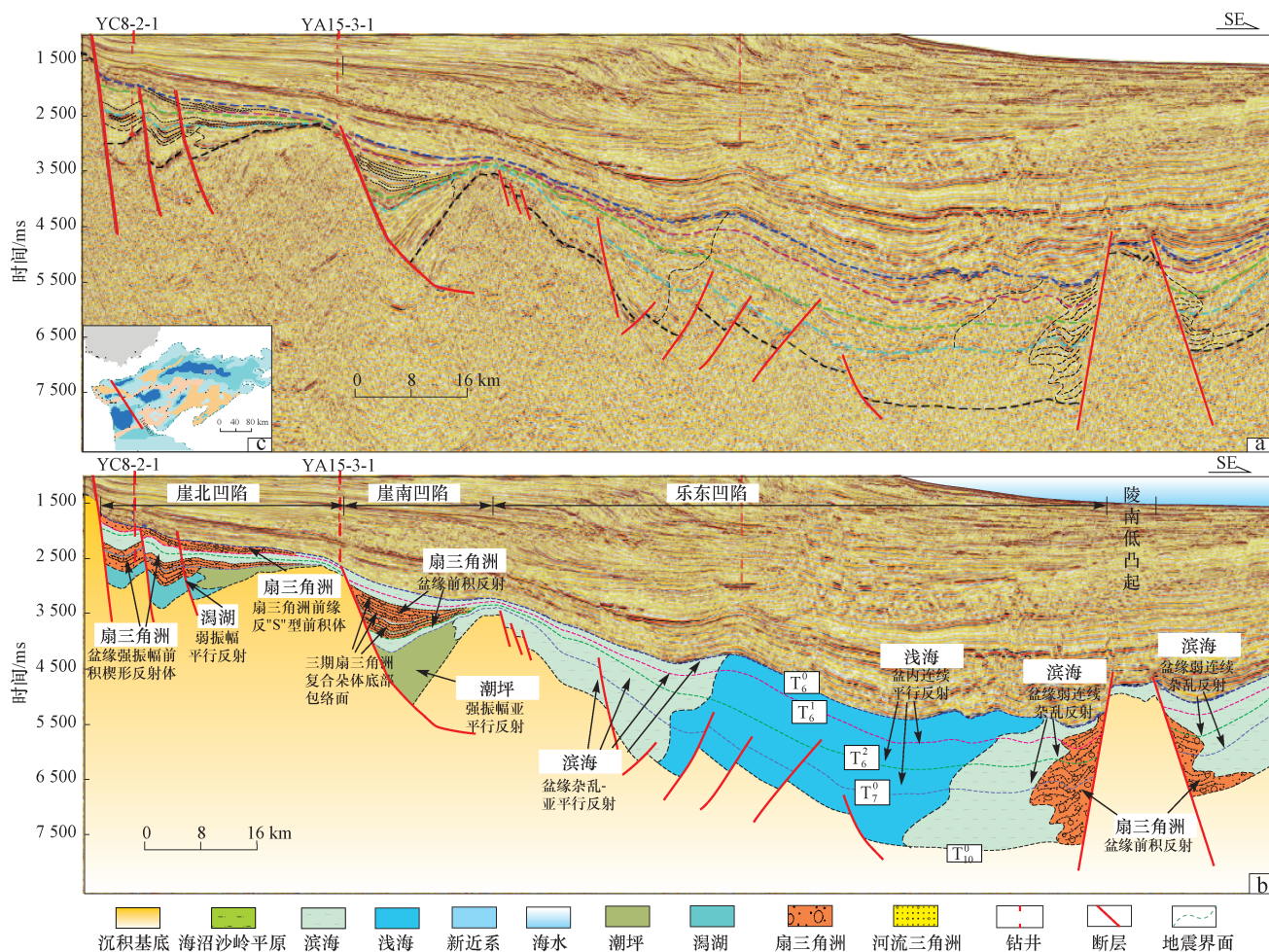


图3 琼东南盆地崖城组沉积相与地震相对应关系(剖面A)

Fig. 3 Correlation of sedimentary facies and seismic facies of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin (section A)

a. 地震-地质解释剖面; b. 地震相分析剖面; c. 地震测线平面位置

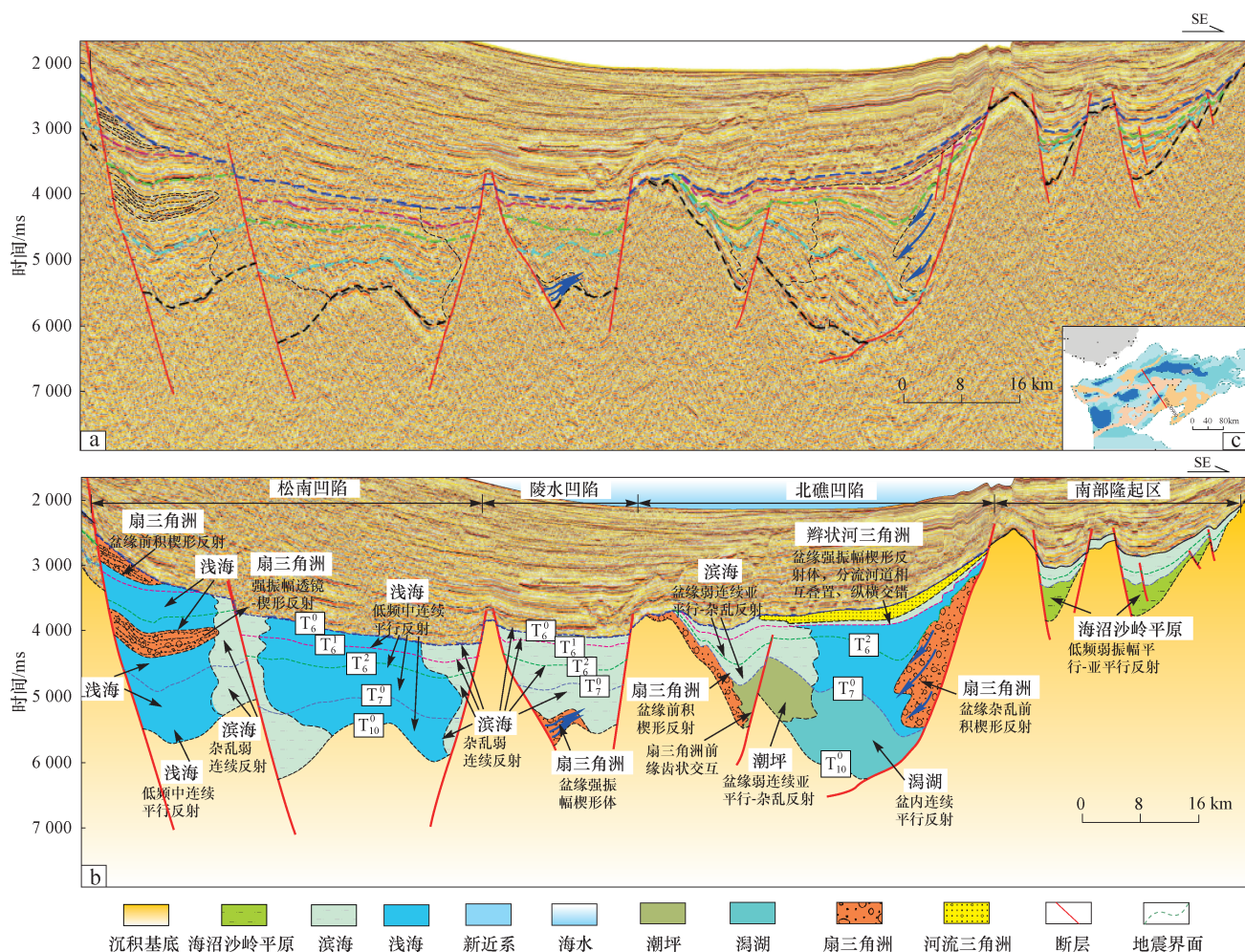


图 4 琼东南盆地崖城组沉积相与地震相对应关系(剖面 B)

Fig. 4 Correlation of sedimentary facies and seismic facies of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin (section B)

a. 地震-地质解释剖面; b. 地震相分析剖面; c. 地震测线平面位置

滨海、浅海、潟湖、潮坪和扇三角洲等 5 种沉积相类型。地震相特征各有差异,其中滨海相为盆缘杂乱-亚平行反射;浅海相为盆内连续平行反射;潟湖相为盆内变振幅平行反射;潮坪相显示中强振幅亚平行反射;扇三角洲识别出 3 个朵体,变振幅前积楔形或叠瓦形反射,分别位于崖北凹陷崖城组与陵水组一段、崖南凹陷陵水组二段。

地震相剖面 B 横跨松南凹陷、陵水凹陷北部、北礁凹陷与南部隆起区(图 4)。凹陷结构地震特征显示松南凹陷为双断式地堑型,北礁凹陷为南断北超式半地堑型。该区可识别出滨海、浅海、潮坪、潟湖、海沼沙岭平原和扇三角洲等 6 种沉积相类型。地震特征差异明显,其中滨海相显示弱连续亚平行-杂乱反射,与浅海之间具有明显的相分异边界;浅海相显示低频中连续平行反射,与滨海之间具有明显的相分异边界;海沼沙岭平原相为低频弱振幅弱连续反射,发育于南部隆起区之上小型洼陷;潮坪相显示弱连续

亚平行反射,发育于北礁凹陷,与潟湖具有明显相分异边界;潟湖相为强连续平行反射,发育于北礁凹陷,与潮坪具有明显相分异边界;扇三角洲相可识别出 5 个朵体,分布于盆缘断控陡坡带,强振幅透镜反射(横剖面),前积-杂乱楔形反射(纵剖面);辫状河三角洲相显示强振幅楔形反射体,可见分流河道砂体相互叠置,扇体延伸规模较大,位于陵水凹陷陵水组一段(断陷期末期)。

本文通过琼东南盆地渐新统不同沉积体系地震相分析,建立了典型沉积相与地震反射波组对应关系(表 2)。其中,划分琼东南盆地渐新统典型沉积相 14 种组合类型,分别是:①冲积扇-潮坪-潟湖组合;②冲积扇-潮坪-滨海组合;③冲积扇-海沼沙岭平原-滨海组合;④扇三角洲-潮坪-潟湖组合;⑤扇三角洲-滨海-浅海组合;⑥扇三角洲-滨海组合;⑦扇三角洲-浅海组合;⑧辫状河三角洲-潮坪-潟湖组合;⑨辫状河三角洲-滨海-浅海组合;⑩辫状河三角

表 2 琼东南盆地典型沉积相及对应地震相特征

Table 2 Characteristics of typical sedimentary facies and of its corresponding seismic facies in Qiongdongnan Basin

盆地位置	沉积相	典型凹陷	地震相特征	发育位置与层位
盆缘	扇三角洲	乐东凹陷、陵水凹陷、北礁凹陷、松南凹陷、长昌凹陷	变振幅杂乱 - 中等连续地震相, 内部为乱岗状反射或前积反射结构	盆缘断控陡坡带、构造转换带(横向背斜), 崖城组、陵水组
	三角洲	陵水凹陷、长昌凹陷	中等连续地震相, 内部多具亚平行与前积反射结构	盆缘缓坡带, 如陵水凹陷与陵南低凸起的平缓过渡部位 崖城组、陵水组
	滨海	乐东凹陷、陵水凹陷、北礁凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷	中强振幅中等连续地震相, 具平行 - 亚平行与波状反射结构	盆地周边, 尤其是盆地与凸起的平缓过渡部位, 崖城组、陵水组
	潮坪	崖南凹陷、崖北凹陷、松东凹陷、松西凹陷、北礁凹陷、长昌凹陷	中强振幅较连续地震相, 具亚平行反射结构	较封闭的小型凹陷边缘, 如长昌凹陷东南部崖城组
	海沼平原	陵南低凸起、南部隆起	强振幅较连续地震相, 具平行反射结构	断控陡坡带坡坪之上, 崖城组、陵水组
盆内	浅海	乐东凹陷、陵水凹陷、北礁凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷	中弱振幅强连续地震相, 具平行反射结构	盆地中心部位, 崖城组、陵水组
	潟湖	崖南凹陷、崖北凹陷、松东凹陷、松西凹陷、北礁凹陷、长昌凹陷	强振幅连续地震相, 具平行反射结构	较封闭的小型凹陷边缘, 如长昌凹陷东南部, 崖城组

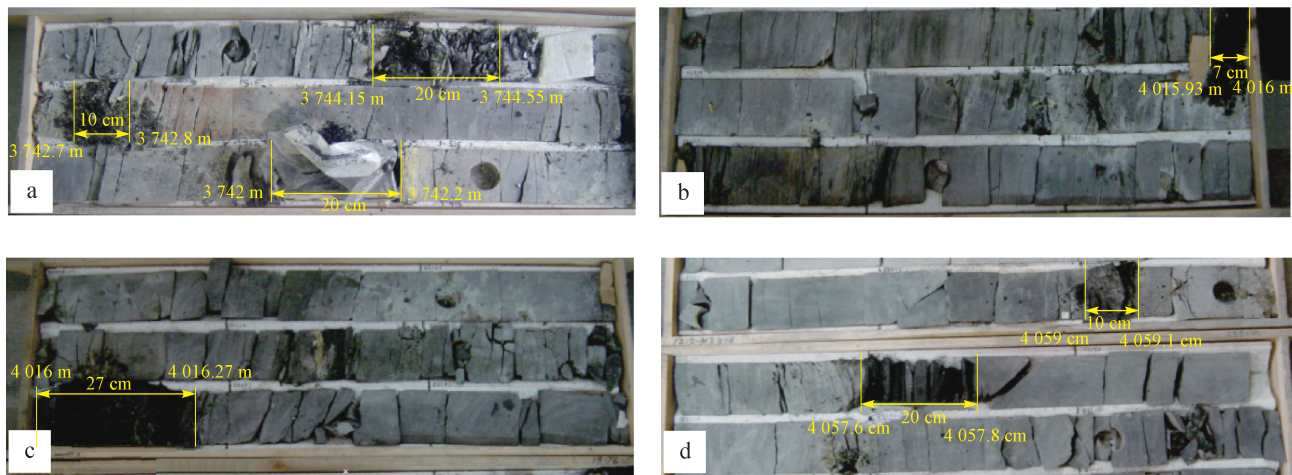


图 5 琼东南盆地 YC - I 地区渐新统薄煤层(岩心盒每行为 1 m)

Fig. 5 Thin coal seam of the Oligocene in YC- I area of Yacheng Formation, Qiongdongnan Basin(core box for each row is 1m)

a. 埋深 3 741. 5 ~ 3 744. 5 m, 含 3 套薄煤层; b. 埋深 4 013 ~ 4 016 m, 含 1 套薄煤层; c. 埋深 4 016 ~ 4 019 m, 含 1 套薄煤层; d. 埋深 4 056. 4 ~ 4 059. 4 m, 含 2 套薄煤层

洲 - 浅海组合; ⑪海沼沙岭平原 - 滨海 - 浅海组合; ⑫潮坪 - 滨海 - 浅海组合; ⑬潮坪 - 潟湖组合; ⑭滨海 - 浅海(浊积扇)组合。成煤沉积体系主要为扇三角洲体系、辫状河三角洲体系和潮坪 - 潟湖体系和障壁海岸 - 海沼沙岭平原体系。

3 成煤特征与成煤环境

琼东南盆地渐新统主要的成煤沉积环境有三角洲平原沼泽、扇三角洲平原沼泽、潮坪的潮上带和潮间带、海沼沙岭平原沼泽等环境, 各种环境下煤层发育特征不尽相同。针对琼东南盆地海域区煤系埋藏深度

大、煤及共生烃源岩厚度不太大、地震资料解释分辨率较低、测井解释烃源岩层位精度不高等问题, 本文研究利用多类测井数据, 运用新的测井分析技术与方法, 结合钻井沉积相和地震相对比分析方法, 精细识别含煤层段、煤层、炭质泥岩、深水暗色泥岩等烃源岩的层位、厚度等特征。

3.1 钻井岩心揭露的煤的宏观特征

琼东南盆地仅有少数钻井取心揭露了崖城组的煤层, 从几厘米到几十厘米, 最厚不超过 40 cm。煤层的层数多, 横向不稳定, 邻近钻孔中揭露的煤层数和厚度变化较大, 难以对煤层进行横向对比。通过 YC- I 井

崖三段取心观察(图5),共发育7层煤,其中最厚煤层厚约27 cm,最薄煤层仅7 cm。煤层顶底板均为泥岩,与煤层为过渡接触,泥岩中富含植物碎屑。煤层主要色调为深灰黑色、黑色,由于存放时间较长,大都呈暗淡光泽,宏观煤岩类型以半亮-半暗型煤为主,煤中矿物含量较高,密度普遍较大,部分煤岩心处有油渍溢出,反映该煤层具有较强的亲油性。样品风化严重,煤岩呈疏松的粉末状。

3.2 实验测试煤的微观特征

琼东南盆地渐新统煤的有机显微组分差异不大,但含量变化较大(表3),镜质组在58.4%~98%,以基质镜质体为主,其次为结构镜质体,结构保存差,多见被挤压成线状、闭合状、破碎状的胞腔,可见充填粘土;少数均质镜质体、团块镜质体、碎屑镜质体;惰质组在1.4%~3.5%,以碎屑惰质体、菌类体为主,少数丝质体碎片,少见微粒体;基本不含壳质组。渐新统烃源岩的有机质总量在61.7%~96.1%,变化较大,炭质泥岩有机质总量在38.5%~59.8%。

煤中的无机显微组分主要为粘土类(3.5%~34.4%);硫化物主要为黄铁矿(0.4%~3.8%);煤中氧化物主要为石英(0.4%~8.0%),炭质泥岩中石英含量偏高(8%~17.6%),炭质泥岩中含少量的碳酸盐岩(1.9%~3.1%)。

3.3 琼东南盆地渐新统成煤环境

观察研究区取心段煤层多光泽暗淡,以半亮煤-半暗煤为主;成煤植物以高等植物(蕨类)为主,少量

水生浮游植物;泥岩中含伊利石等中-弱碱性环境的产物;煤中硫分含量较高,黄铁矿较多,反映了成煤过程受海水影响且沉积环境还原性较强;煤的微观组分以基质镜质体为主,少量丝质体,凝胶化指数(GI)较高(GI值在27~57.3,平均为41.3),植物结构保存程度(TPI)较低;粘土矿物等含量较多;煤样的粘结性较强。反映了植物的木质纤维组织经过了较为彻底的凝胶化作用,为停滞较深水、还原环境的产物,代表着煤层形成于近海沼泽环境。分析崖城组煤样中无机矿物质含量较高,无机矿物含量大于20%的煤,其惰质组主要为流水氧化所致,水体的流动带来无机物,造成了无机物含量偏高,反映了沼泽中有流动水体的注入。

通过YC-B井煤层测井异常表现为高阵列感应电阻率、低岩性密度、高中子孔隙度、低无铀伽马值;煤层位于短期基准面下降半旋回的顶部,下一个短旋回水体加深终止成煤作用;中部和下部煤层均为高灰高硫,上部煤层为低灰高硫,说明中部和下部煤层沉积时期受海水影响导致高硫,且水动力较强,表现为高灰,到上部煤层沉积时,水体相对较为安静,灰分含量相对较低。从显微煤岩类型来看,上部 and 下部煤层均为微镜煤为主的含微镜惰煤组合,说明为浅覆水-半覆水的环境,具微异地煤特征。

综合分析琼东南盆地渐新统煤层发育的宏、微观特征以及化学成分的变化规律,研究发现琼东南盆地渐新统煤层是在多种沉积环境中发育的,有近海的辫状河三角洲平原泥炭沼泽环境、扇三角洲环境、潮坪-潟湖环境、障壁海岸-海沼沙岭平原环境等,系统总结出各成煤体系下煤层发育的有利部位和煤层分布特点(表4)。

表3 琼东南渐新统煤、炭质泥岩煤岩质分析

Table 3 Analysis of coal and carbonaceous mudstone in the Oligocene of Qiongdongnan Basin

序号	有机显微组分/%			无机显微组分/%				平均 R_o /%	变质阶段
	镜质组	惰质组	有机总量	粘土类	碳酸盐	硫化物	氧化物		
1	89.7	2.6	92.3	6.9	—	0.4	0.4	1.16	IV
2	94.0	2.1	96.1	3.5	—	0.4	—	1.09	IV
3	59.5	2.2	61.7	34.4	—	0.8	3.1	1.04	IV
4	67.2	1.6	68.8	25.5	—	2.3	3.4	1.06	IV
5	80.2	1.4	81.6	13.7	—	1.8	2.9	1.15	IV
6	77.2	1.4	78.6	12.3	—	1.1	8.0	1.11	IV
7	81.5	2.6	84.1	12.7	—	0.8	2.4	1.20	IV
8	77.4	1.7	79.1	16.8	—	1.2	3.1	1.17	IV
9	58.4	1.4	59.8	26.4	1.9	3.7	8.2	1.18	IV
10	66.7	2.0	68.7	20.8	—	3.8	6.7	1.23	V
11	86.0	2.5	88.5	7.7	—	1.9	1.9	1.21	V
12	71.9	1.7	73.6	21.5	—	1.2	3.7	1.11	IV
13	37.7	0.8	38.5	38.5	3.1	1.9	17.6	0.94	IV

注:表格中“—”表示没有数据。

表 4 琼东南盆地渐新统成煤沉积体系及煤层发育规律

Fig. 4 Coal-forming deposition system and coal seam development patterns in the Oligocene of Qiongdongnan Basin

沉积体系	发育层段	沉积特征	有利聚煤环境	煤层分布特征
扇三角洲体系	崖二段、崖三段、陵三段	由近源冲积扇及远端水下扇等沉积组成,以近端扇为特征,远端深入深水區,形成水下扇,尤其在低水位期,水下扇较为发育;沉积物粒度较粗,砾石含量高,砾石成分复杂、大小不等、磨圆和分选较差,多呈杂乱分布	扇三角洲平原、废弃朵体、朵体间洼地	扇间洼地沼泽化形成煤层,厚度一般较薄,且易发生分叉,分布不稳定
辫状河-辫状河三角洲体系	部分凹陷的崖二段、崖三段、陵三段	以辫状河平原为特征,辫状河道砂砾质沉积、越岸沉积为粉砂岩、泥岩,部分可发育炭质页岩,或者是薄层煤层,发育大、中、型板状和槽状交错层理及冲刷面构造	辫状河三角洲平原分流间湾、泛滥平原等地区	河道两侧的平原沼泽化并发育煤层,但煤层薄且不稳定。形成于废弃河道的煤层较厚且较稳定
潮坪-潟湖体系	崖城组中上部、陵二段	以大面积潮坪展布为特征,尤其在海侵、高水位期潮坪环境尤为发育;潮坪又可分为潮上带、潮间带、潮下带,潮道贯穿其中,潟湖多受构造凸起屏蔽而与广海连通性小,环境相对稳定	潮上坪的沼泽及潮间坪上部的潮道间湾,潮汐三角洲平原以及淤化的潟湖等地区	在多潮道地区,煤层层数多,但厚度较薄,煤层间距大;在缺潮道地区,含煤层数较少,但厚度较大,煤层间距较小,煤层结构复杂
障壁海岸-海沼沙岭平原体系	部分地区在崖一段、崖三段和陵水组各段	主要发育于凹陷缓坡带靠岸较平坦地区,发育范围受海水升降变化影响较大	海岸平原沼泽地区	煤层的层数多、但单层厚度小和横向变化较快

4 结论

1) 通过对琼东南盆地渐新统不同沉积体系的地震相分析,建立了典型的沉积相与地震相对应关系。识别出琼东南盆地渐新统典型沉积相组合有 14 种类型:冲积扇-潮坪-潟湖组合、冲积扇-潮坪-滨海组合、冲积扇-海沼沙岭平原-滨海组合、扇三角洲-潮坪-潟湖组合、扇三角洲-滨海-浅海组合、扇三角洲-滨海组合、扇三角洲-浅海组合、辫状河三角洲-潮坪-潟湖组合、辫状河三角洲-滨海-浅海组合、辫状河三角洲-浅海组合、海沼沙岭平原-滨海-浅海组合、潮坪-滨海-浅海组合、潮坪-潟湖组合、滨海-浅海(浊积扇)组合。

2) 首次进行琼东南盆地渐新统成煤沉积体系划分,主要为扇三角洲体系、辫状河三角洲体系、潮坪-潟湖体系、障壁海岸-海沼沙岭平原体系。沉积相类型有扇三角洲相、辫状河三角洲相、潮坪相、潟湖相、滨海相、浅海相等,其中扇三角洲平原沼泽、辫状河三角洲平原沼泽、海沼沙岭平原沼泽、潮上坪和潮间坪上部沼泽、海岸平原沼泽均有利于成煤作用。

3) 利用煤层的宏观特点,有机质类型及化学成分的变化规律,分析了成煤环境变化,总结各成煤体系下煤层发育的有利部位和煤层分布特点。研究表明,辫状河三角洲体系煤层发育薄且不稳定;扇三角洲体系煤层厚度较薄,且易发生分叉;潮坪-潟湖体系中在多

潮道地区,煤层层数多,但厚度较薄,煤层间距大;在缺潮道地区,含煤层数较少,但厚度较大,煤层间距较小,煤层结构复杂;障壁海岸-海沼沙岭平原体系煤层的层数多、但单层厚度小且横向变化较快等特点。

参 考 文 献

[1] 张亚雄,朱筱敏,张功成,等. 琼东南盆地古近系陵水组层序地层特征[J]. 油气地质与采收率,2013,20(5):33-37.
Zhang Yaxiong, Zhu Xiaomin, Zhang Gongcheng, et al. The sequence stratigraphic features of the Paleogene system Lingshui formation in Qiongdongnan Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(5): 33-37.

[2] Franke D, Savva D, Pubellier M. The final rifting evolution in the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 704-720.

[3] Hu Bo, Wang Liangshu, Yan Wenbo. The tectonic evolution of the Qiongdongnan Basin in the northern margin of the South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 77: 163-182.

[4] 李增学,张功成,王东东,等. 海域区古近系含煤地层基准面旋回识别与对比:以琼东南盆地为例[J]. 现代地质,2010,24(6): 1178-1186.
Li Zengxue, Zhang Gongcheng, Wang Dongdong, et al. Identification and correlation of base-level cycles of coal-bearing strata in Paleogene system of China sea: Taking the case of Qiongdongnan basin as an example[J]. Geoscience, 2010, 24(6): 1178-1186.

[5] 赵东娜,朱筱敏,林金成,等. 南海琼东南盆地崖 13-1 气田古近系陵水组海陆过渡带沉积特征及演化[J]. 古地理学报,2014, 16(3): 385-400.
Zhao Dongna, Zhu Xiaomin, Lin Jincheng, et al. Sedimentary characteristics and evolution of transitional belt of the Paleogene Lingshui

- Formation in Ya13-1 Gasfield of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(3): 385–400.
- [6] 邵磊, 李昂, 吴国喧, 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.
- Shao Lei, Li Ang, Wu Guoxuan, et al. Evolution of sedimentary environment and provenance in Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 548–552.
- [7] 蔡国富, 邵磊, 乔培军, 等. 琼东南盆地古近纪海侵及沉积环境演化[J]. *石油学报*, 2013, 34(2): 91–101.
- Cai Guofu, Shao Lei, Qiao Peijun, et al. Marine transgression and evolution of depositional environment in the Paleogene strata of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(S02): 91–101.
- [8] 李增学, 张功成, 李莹, 等. 中国海域区古近纪含煤盆地与煤系分布研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 314–326.
- Li Zengxue, Zhang Gongcheng, Li Ying, et al. The Paleogene coal-bearing basin and coal-measures distribution of China sea area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4): 314–326.
- [9] 蔡佳. 琼东南盆地古近系古地貌恢复及其对层序样式和沉积特征的控制[D]. 武汉: 中国地质大学资源学院, 2009.
- Cai Jia. Morphologic restoration of Paleogene in Qiongdongnan Basin and its control on sequence architecture and sedimentary characteristics[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009.
- [10] 沈怀磊, 张功成, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地深水富气凹陷形成控制因素与勘探实践—以陵水凹陷为例[J]. *石油学报*, 2013, 34(增刊2): 83–90.
- Shen Huailei, Zhang Gongcheng, Sun Zhipeng, et al. Formation control factor analysis and exploration practice in gas-rich sag in deep-water areas of Qiongdongnan basin: a case study of Lingshui sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(S02): 83–90.
- [11] 魏魁生, 楚美娟, 崔颖凯, 等. 琼东南盆地东部低位体系域的时空组合特征及油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(06): 650–655.
- Wei Kuisheng, Chu Meijuan, Cui Yingkai, et al. Characteristics of time-space combination of lowstand system tracts and their exploration significance in eastern Qiongdongnan basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(06): 650–655.
- [12] 张功成, 何玉平, 沈怀磊. 琼东南盆地崖北凹陷崖城组煤系烃源岩分布及其意义[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 654–661.
- Zhang Gongcheng, He Yuping, Shen Huailei. Research Significance and coal-measure source rock distribution of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin Ya-north sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 654–661.
- [13] 尚鲁宁, 吕大伟, 李增学, 等. 琼东南盆地崖南凹陷崖城组辫状河三角洲沉积特征及油气地质意义[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(5): 4–9.
- Shang Luning, Lv Dawei, Li Zengxue, et al. Oil vapor geological significance and the braided river delta sedimentary characteristics of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin Ya-south sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(5): 4–9.
- [14] 刘文超, 叶加仁, 雷闯, 等. 琼东南盆地乐东凹陷烃源岩热史及成熟史模拟[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(6): 110–115.
- Liu Wenchao, Ye Jiaren, Lei Chuang, et al. Geothermal and maturation histories modeling of the source rocks in the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(6): 110–115.
- [15] 熊波, 苏龙, 张功成, 等. 琼东南盆地深水崖城组煤系烃源岩定量评价[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(4): 542–550.
- Xiong Bo, Su Long, Zhang Gongcheng, et al. Quantitative evaluation for coal-bearing source rocks of Yacheng Formation in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(4): 542–550.
- [16] 张功成, 李增学, 何玉平, 等. 琼东南盆地煤地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(5): 693–699.
- Zhang Gongcheng, Li Zengxue, He Yuping, et al. Geochemical characteristics of coal in Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(5): 693–699.
- [17] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1–98.
- Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, et al. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997: 1–98.
- [18] 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.
- [19] 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/OL]. *地球科学*, 2018, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180730.0955.010.html>.
- Li Zengxue, Song Guangzen, Wang Dongdong, et al. Characteristics of (fan)braided river delta in coal measures of Oligocene Yacheng Formation in Qiongdongnan basin[J/OL]. *Geoscience*, 2018, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180730.0955.010.html>.
- [20] 宋广增, 王华, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地深水陵水凹陷古近纪同沉积断裂对层序构成样式的控制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(4): 9–18.
- Song Guangzeng, Wang Hua, Sun Zhipeng, et al. Paleogene sydepositional fault and its control on sequence architecture of Lingshui sag, deepwater area of Qiongdongnan basin South China Sea[J]. *Journal of China Petroleum University (natural science edition)*, 2014, 38(4): 9–18.
- [21] 李绪宣, 李维新, 张益明, 等. 琼东南盆地天然气成藏特征及地震识别技术[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(2): 79–86.
- Li Xuxuan, Li Weixin, Zhang Yiming, et al. Gas accumulation characteristics and seismic identification techniques in Qiongdongnan basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(2): 79–86.
- [22] 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 and Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 71–78.