



珠江口盆地西部珠三坳陷古近系物源体系及沉积充填演化特征

徐万兴, 何卫军, 陈奎, 刘芳, 罗威

Provenance system evolutions and sedimentary filling characteristics of the Paleogene in Zhu III Depression, the Western Pearl River Mouth Basin

XU Wanxing, HE Weijun, CHEN kui, LIU fang, and LUO Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022060901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194

中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

徐万兴, 何卫军, 陈奎, 等. 珠江口盆地西部珠三坳陷古近系物源体系及沉积充填演化特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 145-159.

XU Wanxing, HE Weijun, CHEN kui, et al. Provenance system evolutions and sedimentary filling characteristics of the Paleogene in Zhu III Depression, the Western Pearl River Mouth Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 145-159.

珠江口盆地西部珠三坳陷古近系物源体系及沉积充填演化特征

徐万兴¹, 何卫军¹, 陈奎¹, 刘芳², 罗威²

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057

2. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570100

摘要: 珠江口盆地西部珠三坳陷近年来一直未获得商业性油气的重大发现, 古近系是坳陷内主要的勘探层系, 但对其自下而上的物源体系、沉积充填演化规律认识不清。在层序地层划分基础上, 以古近系沉积时期三级层序为基本单元, 结合区域地质背景、古地貌、周缘水体分布、重矿物组合及岩石薄片等资料, 并利用构造地质学、沉积学等分析方法, 开展了珠三坳陷古近系沉积时期的物源体系演化及其对大型碎屑岩储集体分布的控制影响研究。认为珠三坳陷古近系存在两大物源区, 一是南部神狐隆起, 其母岩构成以岩浆岩、浅变质岩及前古近系沉积岩为主; 二是北部海南隆起、粤桂隆起及相关河流体系组成的综合物源区, 母岩构成以岩浆岩为主。确定了始新统文昌组断陷沉积时期, 主要形成了湖泊-(扇)三角洲体系的构造沉积充填格局, 且沉积了巨厚的文昌组中深湖相烃源岩, 为本区的主力烃源岩; 下渐新统恩平组—上渐新统珠海组断陷沉积时期, 主要沉积充填了恩平组湖泊-(扇)三角洲体系以及珠海组滨海湖坪-(扇)三角洲体系。以上研究成果为珠江口盆地西部珠三坳陷下一步寻找优质大型储集体并获得油气发现具有一定的指导意义。

关键词: 物源供给体系; 沉积充填特征; 古近系; 珠三坳陷; 珠江口盆地西部

中图分类号: TE121, P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022060901

Provenance system evolutions and sedimentary filling characteristics of the Paleogene in Zhu III Depression, the Western Pearl River Mouth Basin

XU Wanxing¹, HE Weijun¹, CHEN kui¹, LIU fang², LUO Wei²

1. Zhanjiang Branch, CNOOC China Limited, Zhanjiang 524057, China

2. Hainan Branch, CNOOC China Limited, Haikou 570100, China

Abstract: Commercial-scaled oil and gas has not been discovered in the Zhu III Depression of the Western Pearl River Mouth Basin in recent years. The Paleogene is the main exploration strata in the study area. However, its provenance system from the bottom up and sedimentary filling evolution law is unclear, which greatly hampered the new discoveries of large quality reservoirs and oil/gas fields in this area. Based on the sequence stratigraphic division, the third-order sequence of the Paleogene sedimentary period was taken as the basic unit of study, the regional geological background, Paleogene geomorphology, distribution of surrounding water system, heavy mineral assemblages, and rock thin sections were analyzed using structural geology, sedimentology, and other analytical methods. Result shows that there were two major provenance areas in the Zhu III Depression during the Paleogene. One was the Shenhu uplift in the south, and its parent rock was magmatic rocks, shallow metamorphic rocks, and pre-Tertiary sedimentary rocks. The second was the provenance area covering the northern Hainan uplift, Guangdong-Guangxi uplift, and related river systems, and the parent rock was mainly magmatic rocks. The Eocene Wenchang Formation reflected a fault-rift scheme, represented by a thick semi-deep to deep water lacustrine delta deposit, being the main hydrocarbon source. The Early Oligocene Enping Formation to Late Oligocene Zhuhai Formation manifested a fault-depression scheme, characterized by evolving from a lake delta system to a coastal tidal flat delta system, respectively. This study provided guidance to the next exploration for large and quality reservoirs in the Zhu III depression.

Key words: provenance supply system; sedimentary filling; Paleogene; Zhu III depression; western Pearl River Mouth Basin

资助项目: 南海西部油田上产 2000 万方关键技术研究 (CNOOC-KJ 135 ZDXM 38 ZJ 01 ZJ)

作者简介: 徐万兴 (1986—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事海洋石油地质与勘探研究, E-mail: 771712412@qq.com

通讯作者: 陈奎 (1986—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事深水天然气勘探研究、勘探开发一体化研究, E-mail: chenku3@cnooc.com.cn

收稿日期: 2022-06-09; 改回日期: 2022-07-23. 周立君编辑

油气勘探实践及研究表明,南海北部珠江口盆地西部珠三拗陷是重要的油气富集区,具备形成大中型油气田的基本地质条件,自20世纪80年代对外合作勘探开发油气以来,已取得了一系列重要的油气发现,是南海北部浅水区油气勘探主战场之一^[1-4]。但近年来针对珠三拗陷的油气勘探效果并不十分理想,且近几年尚未获得大规模的商业性油气发现。前人针对珠三拗陷古近系层序及沉积等开展过大量研究^[5-7],在研究古近系层序地层格架基础上,系统分析了珠三拗陷的层序样式,阐明了不同层序样式下控制的沉积充填特征,以及珠三拗陷南断裂体系的演化对于沉积中心迁移的控制,明确了南断裂演化规律对于沉积中心的控制作用。总之,虽然前人针对珠三拗陷开展了大量构造沉积演化特征及层序地层学等研究,但并没有系统地古近系发育时期的物源体系演化及物源演化控制下的大型储集体分布特征进行分析。珠三拗陷新生代经历了断陷-断拗-拗陷的复杂构造演变,其沉积作用则经历了从古近系陆相断陷阶段的多物源、相变快及幕式沉积至新近系海相拗陷阶段的大型水系物源与相变缓慢复杂变化等过程。因此,进一步厘清古近系物源及沉积体系的时空展布及演化规律,明确其对大型优质储集体发育的控制作用,有利于指导研究区下一步评价和圈定有利的油气富集区。

众所周知,物源供给体系是反映物源区与沉积区的纽带^[8-9],从宏观上包括源区分布、周缘水系特征、源-汇体系特征等,微观上包括物源区母岩性质、轻重矿物组合、沉积物搬运路径及距离等研究。根据物源供给体系研究能很好地了解盆地所处的大地构造背景及古气候条件,从而为沉积充填研究提供支持^[10-11]。需强调指出的是,沉积体系充填演化研究是沉积盆地分析的根本,也是寻找大型优质储集体的重要依据。通常是在层序地层学研究基础之上,结合源-汇体系控制下的大型储集体分布特征,明确沉积充填演化,并结合钻井、测井及地震等特征,确定有利于油气富集的区带,进而指导油气勘探中的最佳钻探目标优选与评价。鉴此,本文在综合前人研究基础之上,从构造样式角度,着重恢复珠三拗陷不同区域古近纪文昌组—珠海组沉积时期不同阶段的古地貌特征,同时结合宏观物源区、周缘水系展布、岩石学及重矿物组合等,深入分析研究区物源体系特征、分布及演化规律,并在三级层序地层格架基础上,结合钻井、测井及沉积特征等,进一步剖析其沉积充填演化特征及其演

化规律。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于中国南海北部大陆架边缘东部近海海域,地处粤桂大陆以南、海南岛与台湾岛之间的大陆架及陆坡区,是在燕山期花岗岩及前古近系褶皱基底上发育起来的中生代—新生代大型沉积盆地^[11-12]。受NE向和NW向两组共轭断裂的控制,盆地呈现南北分带、东西分块的构造格局^[13]。珠三拗陷位于珠江口盆地西南部,南北分别以神狐隆起和海南隆起为界,根据构造地质特征可进一步划分为文昌A、B、C凹陷,琼海凹陷、琼海凸起及阳江低凸起等次一级构造单元(图1)。

古新世时期,珠三拗陷进入初始裂陷阶段,受神狐运动控制,在NW-SE向伸展构造应力作用下,发育控盆的珠西断裂,形成了古新统神狐组的半地堑^[14-16];始新世裂陷期,受珠琼运动I幕控制,在拗陷内形成了一系列NE-SW走向控凹断裂体系,控制了文昌组湖相烃源岩的分布;早渐新世裂陷期,受珠琼运动I幕控制,构造应力略有顺时针旋转,断裂活动减弱,湖盆逐渐萎缩,发育了恩平组湖泊、河沼沉积;晚渐新世受珠琼运动II幕控制,构造应力场顺时针旋转,断裂活动变弱,控制了近EW、NWW向断裂的发育,此时,海水侵入珠三拗陷,使得其沉积环境由先期的断陷湖盆演变为半封闭的滨海潮坪-海湾环境,控制了珠海组厚层海相砂岩的发育;其中恩平组、珠海组沉积时期,断裂活动强烈,物源充沛,是研究区发育大型储集体的主要层系。

通过对珠三拗陷钻测井及岩电组合特征分析,同时结合古生物、地震层序界面追踪,识别出了研究区在古近系沉积充填中发育的4个重要构造层序界面,自下而上分别是古近系底面(S100)、始新统文昌组底面(S90)、顶面(S80)及上渐新统珠海组顶面(S60)(图2)。S100和S80界面分别为断陷构造层的底界和顶界,为大型区域不整合面,始新统之前的断陷构造层是受南部基底大断裂限制的半地堑构造,南大断裂活动控制了研究区沉降-沉积作用;S90界面是断陷初始阶段向鼎盛阶段演化的转换界面,此时发生的珠琼运动I幕控制了神狐组河流相沉积向文昌组湖泊相沉积的演变;S60界面是断拗构造层与拗断构造层之间的分界,也是南海北部最大的不整合面,该时期研究区仍然受到南大断裂控制,对沉降-沉积作用有影响,但沉降-沉积中心往拗陷中心迁移。基于上述主要构造层序界面及

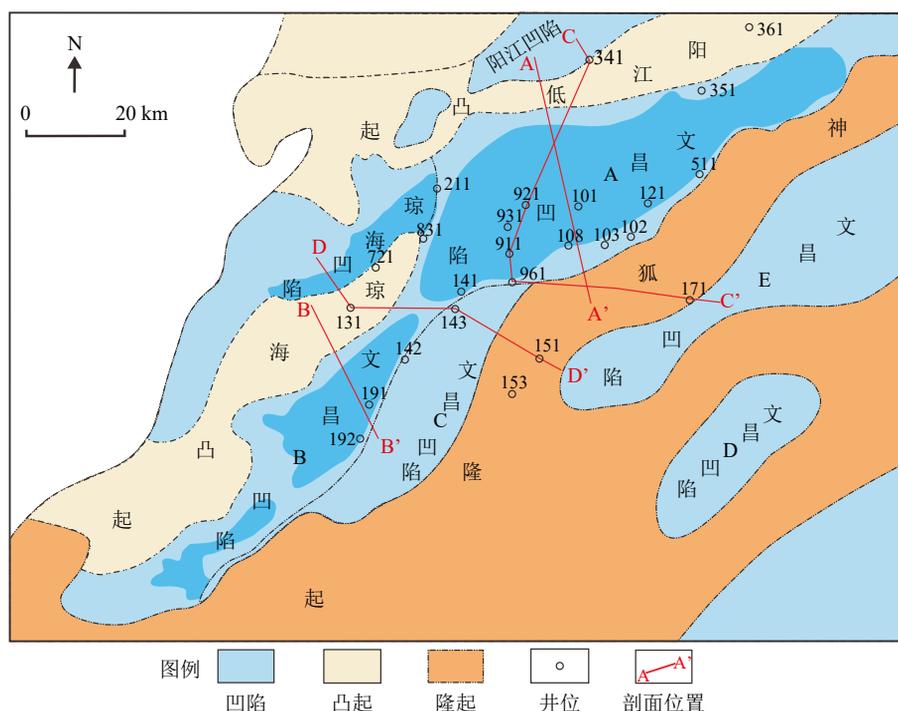


图 1 珠江口盆地西部珠三坳陷区域构造地理位置及主要构造单元分布特征

Fig.1 Tectonic setting of main structural units in the Zhu III Depression of the Western Pearl River Mouth Basin

断裂对沉积充填的控制,认为珠三坳陷古近系地质结构由古新统一始新统断陷及渐新统断坳两个构造层组成(图 3)。

2 物源供给体系特征

盆地的构造样式及古地貌研究,可以辅助判断盆地源汇特征,明确其沉积-沉降中心分布,同时结合周缘水系分布,亦可为盆地物源分析提供宏观方向的判识。在此基础之上,通过开展重点油气勘探区带钻井的岩石学、重矿物组合特征等分析研究,则可对盆地的物源进行半定量示踪分析与判识,进而明确盆地的物源体系分布特点及其演化特征。

2.1 构造样式及其演化特点

根据构造发育特征及其与坳陷的关系,可将珠三坳陷古近系沉积时期的构造样式划分为古新统一始新统基底卷入型伸展断裂构造样式、渐新统走滑-伸展构造样式两类,构造样式演化与盆地的结构演化有着良好的对应关系,受控于区域构造应力场演化^[15-19]。

2.1.1 古新统一始新统基底卷入型伸展断裂构造样式

根据断裂是否切入基底、基底卷入构造是否变形,认为珠三坳陷古新统一始新统断陷构造层主要发育基底卷入型伸展断裂构造样式,相应地发育伸

展断裂构造样式,包括南部陡坡带大型伸展断裂样式、北部斜坡带同向正断裂样式(图 4)。断裂体系与构造样式具有良好的耦合关系,都受控于古新世—始新世简单正向伸展构造应力^[15]。

2.1.2 渐新统走滑-伸展构造样式

渐新统断坳构造层发育伸展-走滑构造样式, Mithjack M O 等研究表明,当后期伸展构造应力方向与先存伸展断裂走向之间的夹角为 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,为传统意义上的简单正向伸展;当夹角为 $30^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 时,为斜向伸展,表现为伸展-走滑变形特征;当夹角为 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时,则以走滑变形为主^[20]。依据该特征,认为珠三坳陷渐新世发育时期南大断裂为伸展-走滑断裂,相应发育走滑-伸展断裂构造样式(图 4)。

上述构造样式演化序列奠定了珠三坳陷古近系沉积时期的构造格局:古新世—始新世主要发育伸展断裂体系,而渐新世发育走滑-伸展断裂体系,同时盆地的结构与构造演化存在较好的响应关系。珠三坳陷的断裂体系与构造样式具有耦合关系,控制着研究区的沉积充填特征,不同时期的断裂特征及构造样式控制了油气成藏和分布,始新世南部大断裂及构造样式控制了该时期湖相烃源岩的分布,渐新世走滑-伸展断裂构造样式控制了沉积体系展布、圈闭及油气输导体系形成,并控制了珠三坳陷的油气分布^[13]。

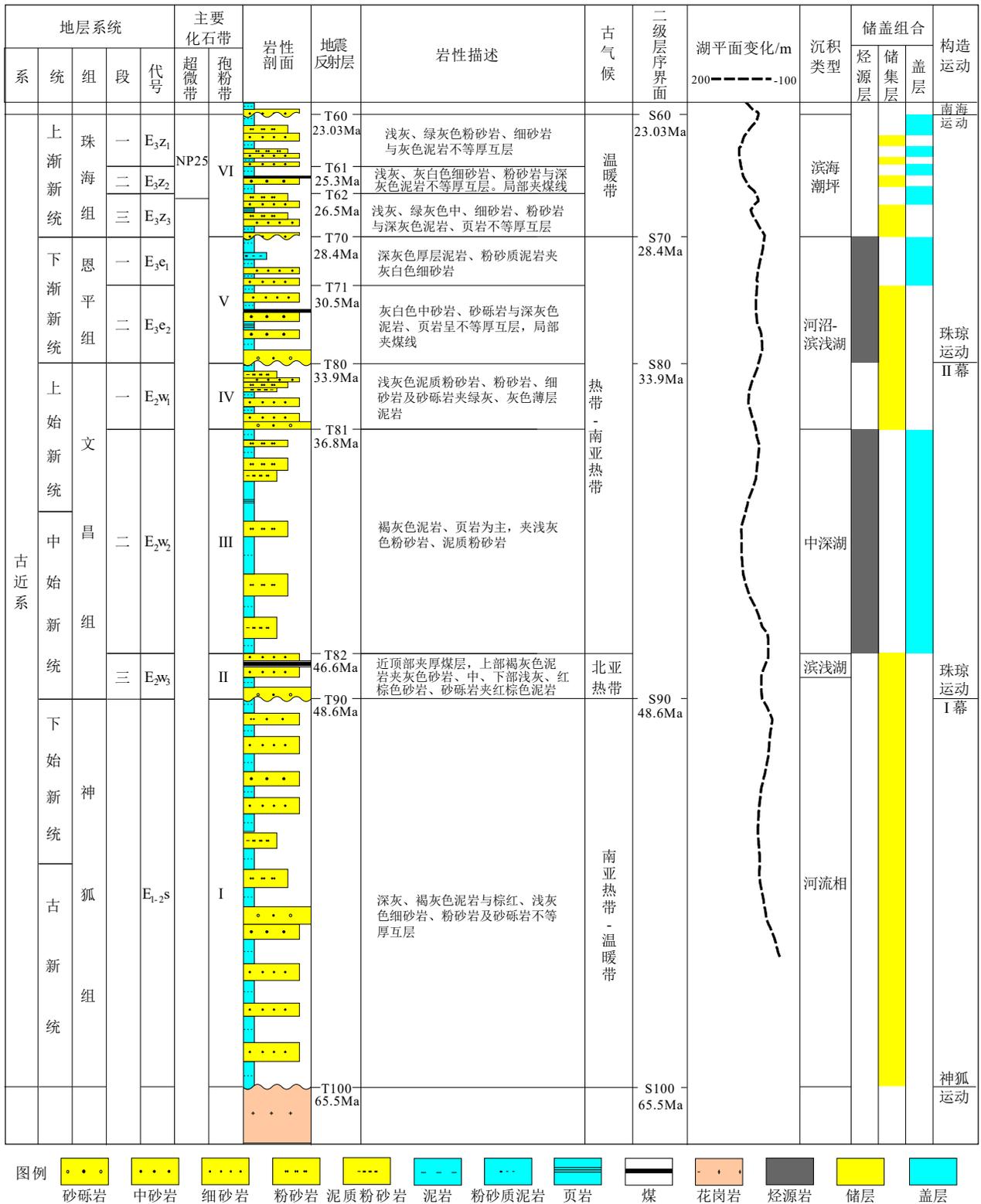


图2 珠江口盆地西部珠三坳陷古近系及沉积充填特征综合柱状剖面

Fig.2 Comprehensive histogram of Paleogene stratigraphic system and sedimentary filling characteristics in Zhu III Depression

2.2 物源供给体系演化特征

物源分析在确定沉积物物源位置及沉积物搬

运路径甚至整个盆地的沉积作用和构造演化等方面有重要意义。沉积物物源分析包括剥蚀区判别、古地貌重塑、古河流体系再现、物源区母岩的性质

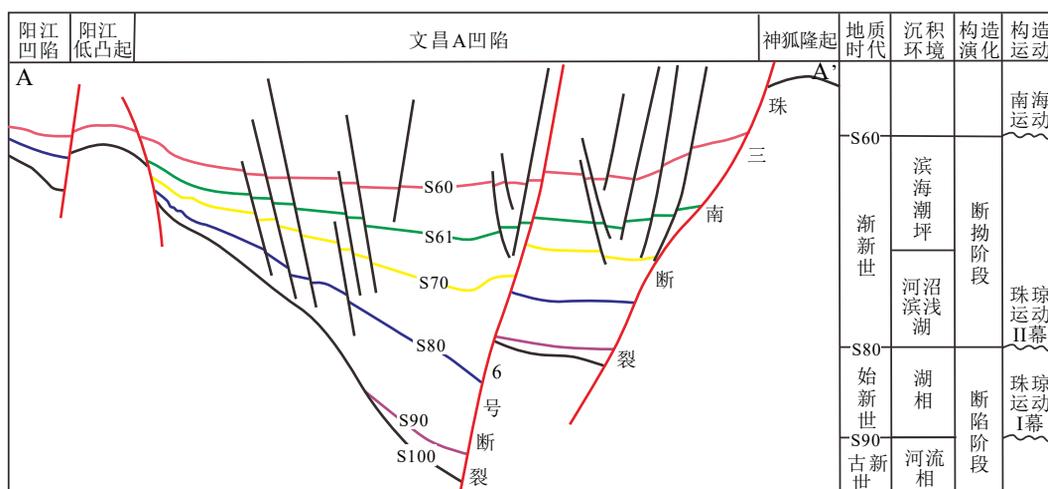


图 3 珠三坳陷古近系沉积结构与构造格架及构造演化特征典型剖面
剖面位置见图 1。

Fig.3 Typical sections of sedimentary structure, tectonic framework, and tectonic evolution of the Paleogene in the Zhu III Depression

See Fig.1 for section location.

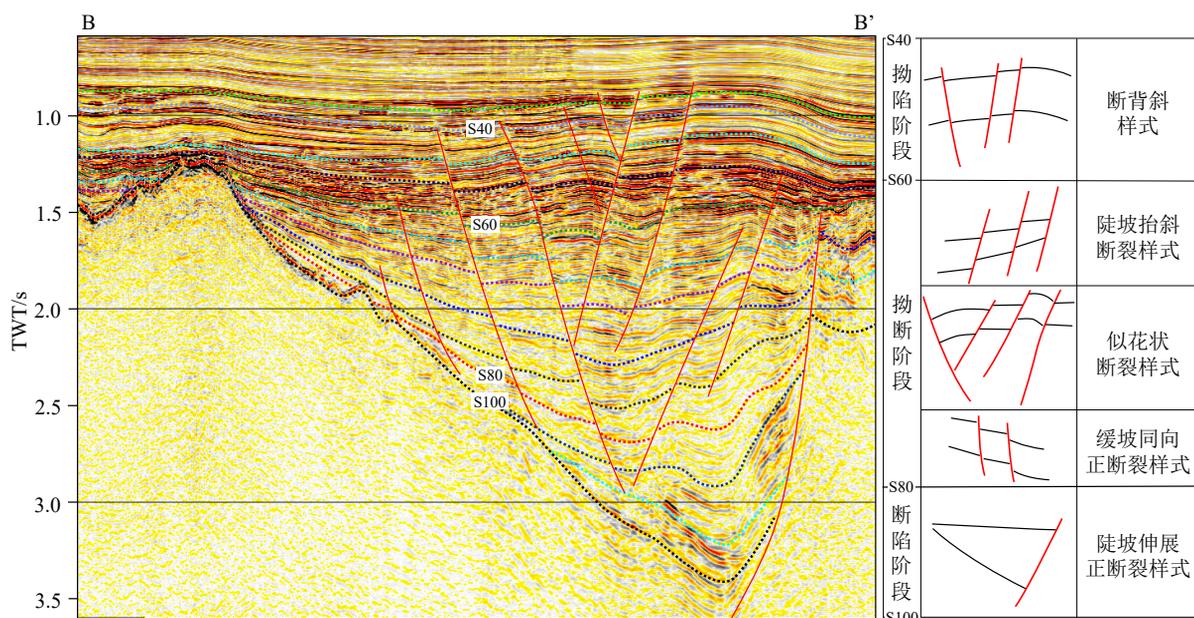


图 4 珠江口盆地西部珠三坳陷主要构造样式类型及其特征剖面
剖面位置见图 1。

Fig.4 Seismic interpretation of main structural styles and representative sections of the Zhu III Depression

See Fig.1 for section location.

追踪、气候及沉积盆地构造背景的确定等方面, 是盆地分析的重要内容^[21-22]。本文在明确珠三坳陷构造样式的基础之上, 通过古地貌重塑、宏观物源及周缘水系分布、岩石学及重矿物组合特征分析, 明确了古近系沉积时期物源体系分布及演化特征, 为区域沉积充填研究奠定了基础。

2.2.1 古地貌特征

古地貌是在构造运动、沉积充填等因素共同作

用下造就而形成的。了解构造演化及充填过程是研究古地貌及其控制作用的前提和基础。通过古地貌的恢复, 可以识别出盆地所处的剥蚀区, 如古隆起及古凸起等, 同时还能识别各类物源通道及沉降-沉积中心, 如沟谷、断槽等。古隆起、古凸起等可作为盆地的物源供给区, 而沟谷及断槽等则可作为物源通道, 是沟通源区和盆地的桥梁^[23]。

本次研究以珠三坳陷古近系三级层序为基本

单元,通过三维地震解释获取地层残余厚度,并通过压实、剥蚀边界恢复等校正后,恢复了古近系始新统一渐新统各个层序沉积时期的古地貌,综合判断研究区物源供给体系分布。

始新统文昌组沉积时期为裂陷鼎盛阶段,断裂活动和基底沉降是该时期最显著的构造活动方式,形成了研究区“南断北超”的箕状断陷形态,同时也控制了沉积充填特征。该时期沉降中心主要位于文昌A凹陷中部,神狐隆起、琼海凸起及阳江低凸起为主要剥蚀区(图5a1, a2)。

渐新统恩平组沉积时期属于盆地裂陷晚期阶段,研究区内的古隆起和古凸起继续起到分割拗陷格局和局部物源的作用。其中恩平组二段沉积时期,文昌A凹陷为主要沉降中心,文昌B凹陷沉降幅度较小,此时文昌C凹陷已抬升遭受剥蚀;恩平组一段沉积时期,古地貌特征与恩平组二段具有一定相似性,受边界断层控制,文昌A凹陷仍然为主要沉降中心(图5b1, b2)。珠海组沉积时期,珠三拗陷由断陷期过渡到了断拗期,此时神狐隆起为连绵起伏的剥蚀山地,受到南断裂不断活动的影响,地表高差较大,为珠三拗陷提供了充足的物源。珠海组三段沉积时期,文昌A凹陷发育多个沉降中心,总体向西部迁移;珠海组二段沉积时期,文昌A、B凹陷沉降范围扩大,且沉降幅度接近,边界断层对沉降的控制作用减弱;珠海组一段沉积时期,沉降中心由文昌A凹陷向B凹陷迁移,此时文昌B凹陷的沉降幅度大于A凹陷(图5c1, c2, c3)。

整体上,珠三拗陷古近系文昌组—珠海组沉积时期,南部神狐隆起为继承性剥蚀区,构成了整个古近系沉积时期的主要物源供给区,北部琼海凸起、阳江低凸起早期剥蚀范围大,为主要供源区,晚期剥蚀范围小,供源作用减小。沉降中心具有由古近系沉积早期至晚期,从文昌A凹陷向文昌B凹陷演变的特征。

2.2.2 周缘水系分布特征

通过区域构造样式及古地貌演化特征分析,认为珠三拗陷周缘主要存在两大物源区,一是位于研究区南部的神狐隆起区,另一个是位于研究区北部包括海南隆起、粤桂隆起、琼海凸起及相关河流体系组成的综合物源区。

区域资料显示,神狐隆起之上基岩以中生界岩浆岩、浅变质岩和前古近系的沉积岩为主;海南隆起可供查证的海南岛露头主要为岩浆岩,沉积岩次之,局部存在变质岩;粤桂隆起之上可普查的广东沿岸基岩主要由岩浆岩和沉积岩组成^[24-27]。珠江流

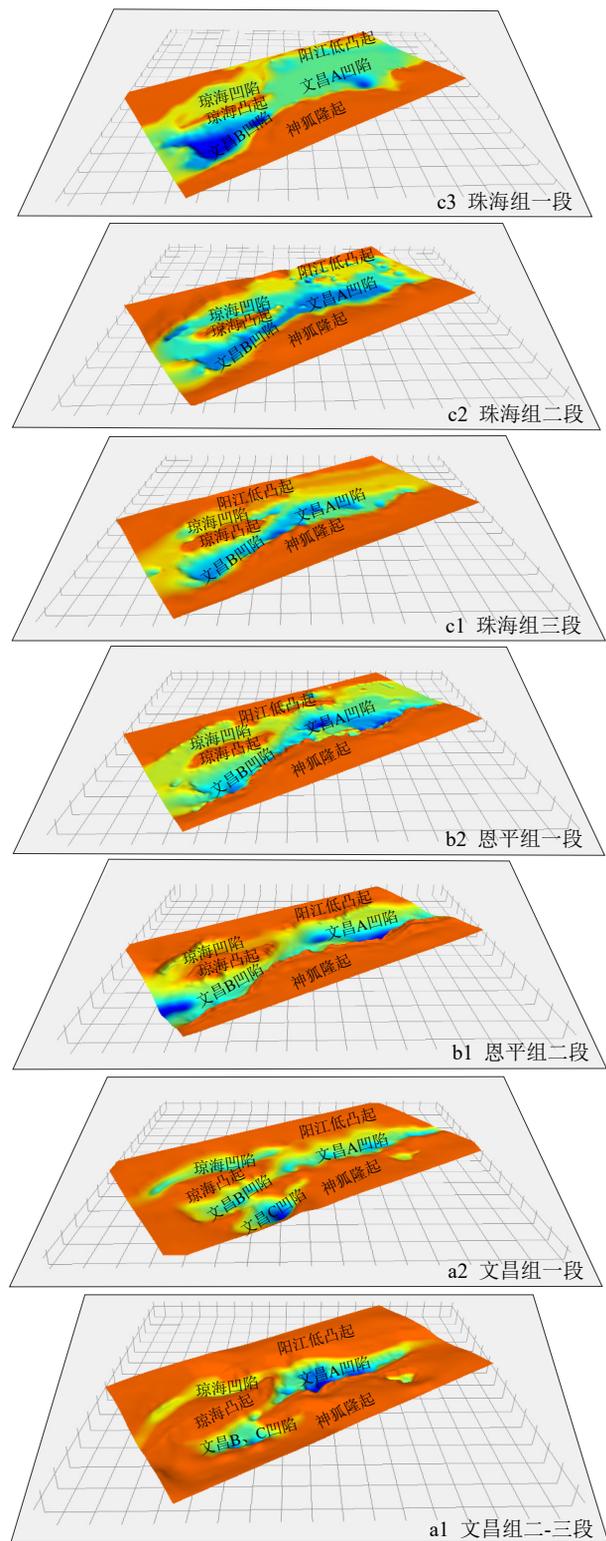


图5 珠江口盆地西部珠三拗陷古近系不同层序沉积时期古地貌特征

Fig.5 Paleogeomorphology of the Paleogene sequences in the Zhu III depression

域重矿物主要有磁铁矿、钛铁矿、锆石和电气石等多种类型^[28-31]。从统计资料分析可知,珠三拗陷周缘的物源区三大母岩类型均有分布。

从现今水系分布发现,流入南海北部的河流体系较多,而对珠江口盆地有直接供源的河流主要包括广东沿岸的珠江、韩江及漠阳江等,以及海南岛东部的南渡江和万泉河。珠江是流入南海最大的河流,其携带碎屑量不高,但水量极大,使得其平均入海泥沙量高达 8×10^7 t,对南海珠江口盆地的沉积物输送起主导作用,同时也是珠江口盆地物源的主要供给者^[32-33]。从河流的入海口分布位置发现除韩江外,其余河流对珠三坳陷均有不同程度的影响^[31]。

2.2.3 岩石学特征

研究区钻井较多,利用岩矿资料可以很好地反映物源方向及源区母岩特征。由于珠三坳陷南北物源区母岩具有一定差异性,因此通过重矿物组合及砂岩成分类型可以很好地示踪物源。重矿物具有耐风化、稳定性强及能较多地保留其母岩性质的特征,可用其组合很好地分析源区与盆地的关系,是物源区特征的标志性矿物,同时也是源区母岩性质的示踪剂^[2]。利用重矿物组合及砂岩成分可以很好地追踪物源区、物源方向及沉积物搬运距离。由于文昌组钻井数量较少,岩矿资料代表性较差,因此选取钻井资料丰富的古近系恩平组及珠海组的重矿物组合及砂岩成分来反映研究区古近系沉积时期的物源体系分布及演化特征。

根据重矿物数据分析,珠三坳陷恩平组二段沉积时期主要的物源区为南部神狐隆起,重矿物组合以锆石、赤褐铁矿及白钛矿为主,反映源区以岩浆岩、浅变质岩为主,但不同位置存在一定差异,如文昌 B 凹陷局部具有高锆石、石榴石的特征,文昌 A 凹陷局部具有高赤褐铁矿的特征(图 6a1);砂岩成分以成熟度较低的岩屑砂岩、长石岩屑砂岩为主,具有近物源的特征(图 6b1)。恩平组一段沉积时期,南部神狐隆起及北部综合物源区均对研究区供源,其中南部以锆石、赤褐铁矿及白钛矿组合为主,局部具有一定差异,东北部受到古珠江物源影响,重矿物组合以锆石、磁铁矿、赤褐铁矿及白钛矿组合为主(图 6a2);砂岩成分南部以低成熟度的岩屑砂岩为主,指示近源沉积,东北部以岩屑石英砂岩为主,成熟度较高,具远源的特征(图 6b2)。

珠海组沉积时期发生了大规模海侵,整体演化为半封闭的滨海潮坪沉积环境,珠三坳陷仍然受到神狐隆起和北部综合物源共同影响。珠海组三段沉积时期,南部沉积区以锆石、电气石、赤褐铁矿及白钛矿组合为主,局部地区存在一定差异,指示物源来自神狐隆起;北部沉积区以锆石、磁铁矿、赤褐铁矿及白钛矿组合为主,局部地区富含电气石

的特征,物源主要来自北部综合物源区(图 7a1);砂岩成分反映珠海组三段研究区南部砂岩类型以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩为主,成熟度较低,指示近物源的特征,局部地区具有成熟度较高的石英砂岩、长石石英砂岩等,推测是受到潮流改造的结果(图 7a2)。珠海组二段及一段的重矿物组合及砂岩成分特征具有一定的继承性,也是受到南部神狐隆起及北部综合物源区共同作用的结果(图 7b1、b2,图 7c1、c2)。

2.2.4 物源供给体系演化特征

古近系古新统至下渐新统沉积时期,珠三坳陷为陆相湖盆沉积环境,周缘均为古隆起、古凸起所包围,构成了研究区的主要物源区。始新统文昌组沉积时期,断陷作用强烈,南部大断裂控制了文昌组湖相沉积体系分布,神狐隆起为最主要的供源区;下渐新统恩平组沉积时期,存在两大物源区,其一为南部神狐隆起,该物源区存在两大物源体系,文昌 B 凹陷南部物源体系和文昌 A 凹陷南部物源体系;其二为北部综合物源区,主要发育文昌 A 凹陷东北部物源体系。上渐新统珠海组沉积时期,随着珠三坳陷遭受海侵,北部综合物源区多个古凸起供源作用减弱,其中神狐隆起为坳陷南部供源,物源体系继承性发育;北部受粤桂隆起、古珠江水系构成的综合物源影响,东北物源体系持续发育。

3 沉积充填及演化特征

在层序格架基础之上,从层序及构造样式演化可以看出,珠三坳陷古近系存在明显的二分结构,发育两个典型的构造层序,分别是断陷构造层序和断拗构造层序,不同类型的构造层序在物源体系控制下的沉积充填演化特征具有一定差异,而这种沉积充填的差异分布控制了古近系沉积时期大型储集体的分布,也是研究区获得油气突破的重点方向。

3.1 沉积相类型及相标志

通过已钻井、录井、岩芯观察、测井及地震相特征等相标志的分析,认为珠三坳陷古近系文昌组—珠海组主要发育了湖泊、扇三角洲、三角洲及潮坪四类沉积相。下面将分别针对这 4 类沉积相的沉积特征及相标志进行分析。

湖泊相沉积主要发育在珠三坳陷断陷期的文昌组及断拗期的恩平组,包括中深湖及滨浅湖沉积。中深湖沉积岩性以深灰色页岩、泥岩为主,发育水平层理,有机质含量较高。测井曲线表现为低

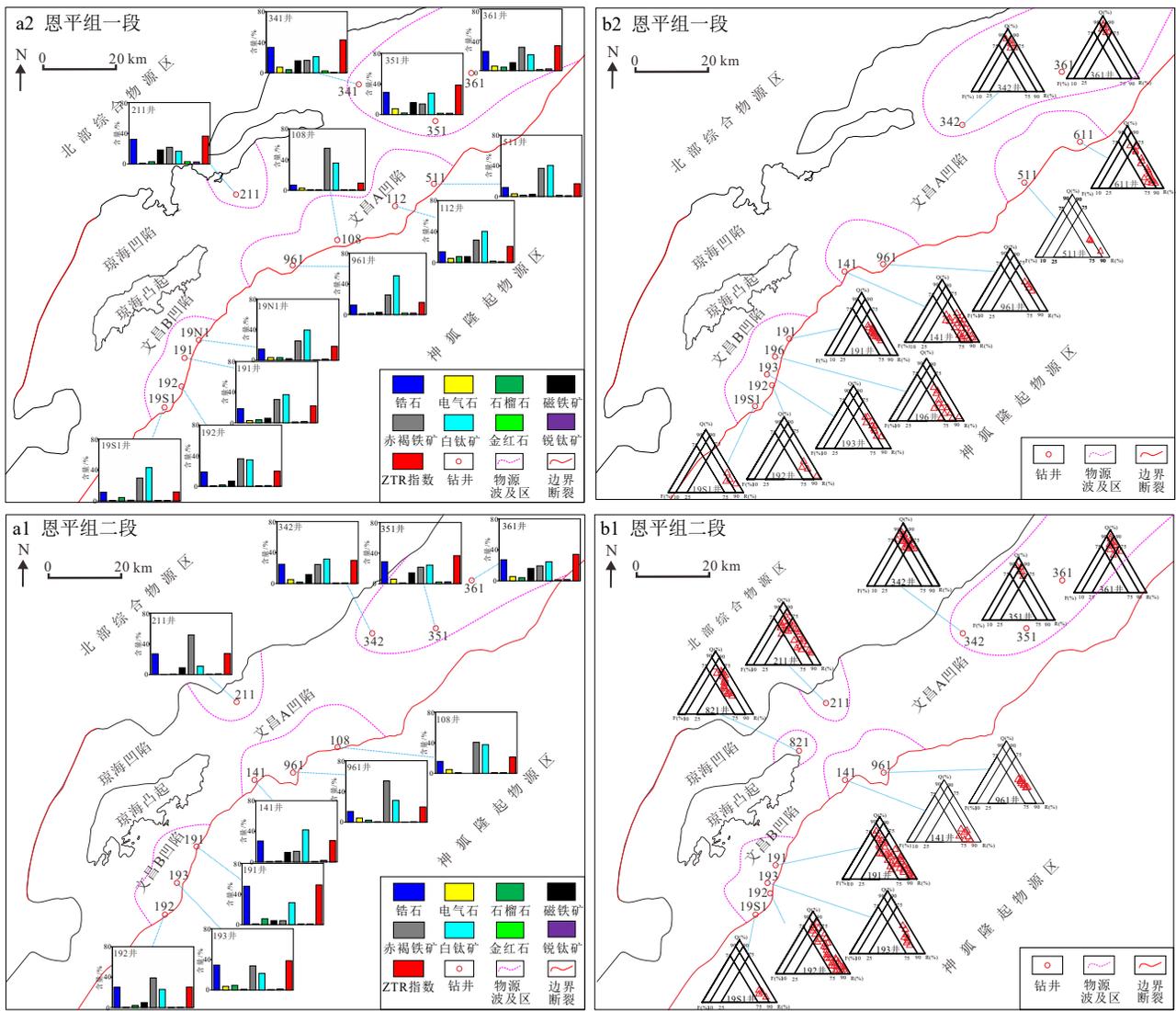


图6 珠江口盆地西部珠三坳陷早渐新世恩平组沉积时期重矿物组合(左图)与砂岩类型(右图)区域分布特征
 Fig.6 Heavy mineral assemblages (left figure) and sandstone types (right figure) in the Enping Formation in the Zhu III Depression

幅齿形,地震特征通常为低频、连续、中强振幅反射(图8)。研究区只有文昌B凹陷南部19井区有钻井揭示。滨浅湖沉积岩性以灰色泥岩、泥质粉砂岩与灰色砂岩不等厚互层为主,砂岩厚度较薄,发育水平层理及小型交错层理。测井曲线呈齿形与指形组合,地震特征以中—低频、连续、中强振幅反射为主(图8)。主要发育于文昌A、B凹陷北部斜坡带,钻井上191、911、101及121井区均有揭示。

扇三角洲在断陷期的文昌组及断拗期的恩平组、珠海组均有发育,主要分布在珠三坳陷南部,其形成受控于南部的珠三南断裂。扇三角洲岩性较粗,砂岩厚度大,以浅灰色砂砾岩、含砾砂岩及粗砂岩夹薄层泥岩为主,磨圆及分选较差。岩芯上发育板状交错层理、正粒序层理、块状层理及冲刷面等沉积构造。测井曲线呈箱形、齿化箱形、指形与齿形组合,地震特征表现为弱连续、中—弱振幅反

射为主,局部可发育前积下超反射(图8),钻井上,91、96、108、141及191等井区均揭示了扇三角洲沉积。

三角洲沉积发育于断拗期的恩平组及珠海组,主要分布在文昌A、B凹陷北部,为以河流供源为主的细粒沉积。三角洲岩性以中、细砂岩、粉砂岩与泥岩互层为主,其中砂岩厚度相对扇三角洲变薄,但砂岩的分选及磨圆更好。岩芯上发育板状交错层理、波状层理及生物扰动等沉积构造。测井曲线呈箱形、钟形及漏斗形组合,地震特征表现为低频、中连续、中强振幅反射,具有明显的前积特征(图8)。钻井显示文昌A凹陷北部的361、351井区、琼海凸起东部的821井区均有发育。

潮坪沉积发育于断拗期的珠海组,该时期由于海侵影响,海水从文昌A凹陷东部进入珠三坳陷,形成了半封闭的滨海潮坪环境。潮坪沉积岩性表

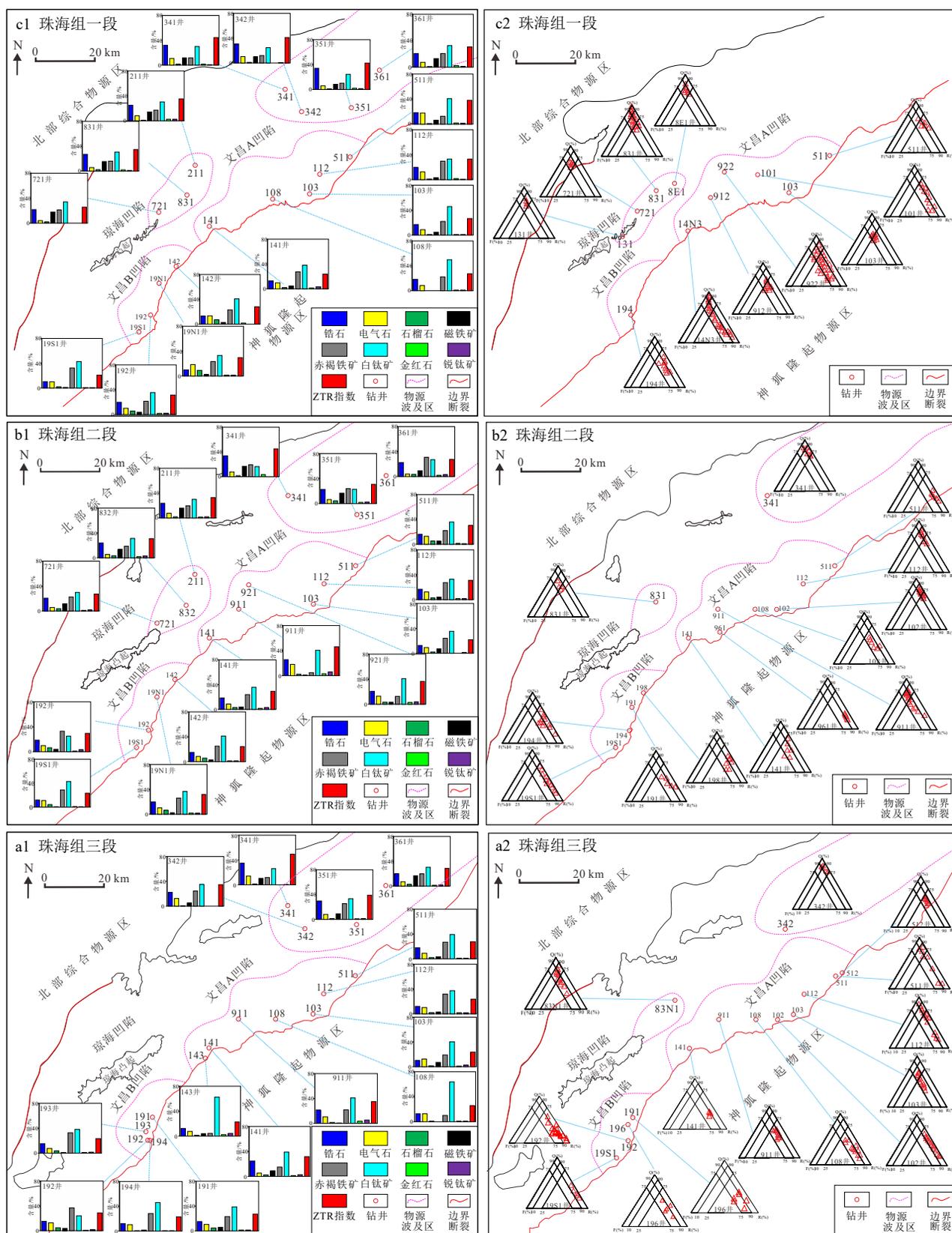


图 7 珠江口盆地西部珠三坳陷晚渐新世珠海组沉积时期重矿物组合 (左图) 与砂岩类型 (右图) 区域分布特征
 Fig.7 Heavy mineral assemblages (left figure) and sandstone types (right figure) in the Late Oligocene Zhuhai Formation in the Zhu III Depression

沉积类型	岩性特征	岩电组合	地震特征	岩心及沉积构造特征	钻遇井及层位
湖泊	厚层泥岩、页岩夹薄层粉砂岩	GR/gAPI	低频、连续、强振幅	深灰色泥岩、暗色泥岩、暗色泥岩,水平层理	193井文昌组二段 19N2井恩平组二段 101井恩平组一段 121井恩平组一段
扇三角洲	厚层砂砾岩、含砾砂岩、中砂岩夹薄层泥岩	GR/gAPI	弱连续、中弱振幅,具前积	板状交错层理、正粒序层理、块状层理、冲刷面	191、192井文昌组一段 141井恩平组二段 961井珠海组三段 102井珠海组三段
三角洲	细砂岩、粉砂岩与泥岩互层	GR/gAPI	弱连续、中强振幅,具前积	板状交错层理、波状交错层理、生物扰动构造、板状交错层理	821井珠海组二、三段 831井珠海组三段 361井恩平组、珠海组 351井恩平组、珠海组
潮坪	细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩与泥岩互层	GR/gAPI	平行、连续,中强振幅	透镜状层理、脉状层理、潮汐复合层理、透镜状层理	721井珠海组一、二段 821、831井珠海组一段 341、342井珠海组 211井珠海组一、二段

图例

含砾砂岩	中砂岩	细砂岩	泥质细砂岩	粉砂岩	砂质泥岩	粉砂质泥岩	泥岩	页岩

图8 珠三坳陷典型沉积相类型及相标志特征

Fig.8 The main types of sedimentary facies and facies indicators in the Zhu III Depression

现为以砂泥互层为主,砂岩厚度较薄、粒度较细,以细砂岩、粉砂岩及泥质粉砂岩为主。岩芯上发育典型的脉状、透镜状及潮汐复合层理。测井曲线呈钟形、漏斗形、指形及齿形组合,地震特征表现为平行、连续、中强振幅反射(图8)。钻井解释显示研究区珠海组均有钻遇,如101、211、341、511及911等井区均有发育。

3.2 古近系沉积体系分布特点

在明确珠三坳陷古近系沉积类型及相标志特征基础上,结合区域钻井、测井、地震等分布特征,落实了古近系文昌组、恩平组及珠海组的沉积体系展布。文昌组作为裂陷鼎盛时期的产物,主要发育(扇)三角洲-湖泊体系,扇三角洲物源主要来自神狐隆起,湖泊主要以滨浅湖-中深湖为主,是研究区的主要烃源岩层系。文昌组三、二段沉积时期,研究区湖相沉积大面积分布,扇三角洲规模较小,数量也较少,文昌B、C凹陷深部位发育中深湖相沉积,文昌A凹陷地层较厚,中深湖面积有所扩大,该时期发育的厚层湖相泥岩是研究区最主要的烃源岩。文昌组一段沉积时期,湖盆范围逐渐扩大,但水体较浅,以滨浅湖沉积为主,剥蚀区范围大,物源充足,南部发育来自神狐隆起的扇三角洲,扇三角洲规模较大,数量较多;文昌C凹陷中深湖面积较大,文昌A、B凹陷中深湖零星发育,规模较小(图9)。

恩平组沉积时期,为裂陷晚期的产物,该时期珠三坳陷为一封闭的湖盆,在断陷湖盆背景下发育来自南部神狐隆起物源的扇三角洲及北部综合物源的三角洲沉积。恩平组二段发育早期,湖盆处于萎缩阶段,东北部发育来自古珠江物源的大型三角洲;中晚期湖盆扩张,文昌A凹陷发育中深湖沉积,此时神狐隆起及琼海凸起为研究区提供点物源,发育小型扇三角洲,北部水体较浅,发育河流-沼泽沉积。恩平组一段沉积时期,湖盆持续扩张,到晚期达到最大,发育区域性的滨浅湖泥岩盖层,该时期坳陷南部继承性发育来自神狐隆起物源的扇三角洲,东北部持续发育来自古珠江物源的大型三角洲沉积,北部继承性发育条带状分布的河流-沼泽沉积,且规模有所增大(图10)。

珠海组沉积时期,研究区遭受海侵影响,由先前的封闭湖盆向半封闭的滨海潮坪转化,该时期神狐隆起仍然为珠三坳陷的主要物源区,且北部综合物源区持续为研究区供源。珠海组三段沉积时期,研究区整体以滨海潮坪沉积环境为主,由于珠三南大断裂的持续活动,南部发育来自神狐隆起的扇三角洲沉积,北部综合物源影响较大,在琼海凸起、北部隆起及古珠江水系作用下发育大型(扇)三角洲。珠海组二段沉积时期,海平面持续上升,沉积环境依然以潮坪为主,坳陷南部继承性发育来自神狐隆起物源的扇三角洲群,北部持续受到综合物源

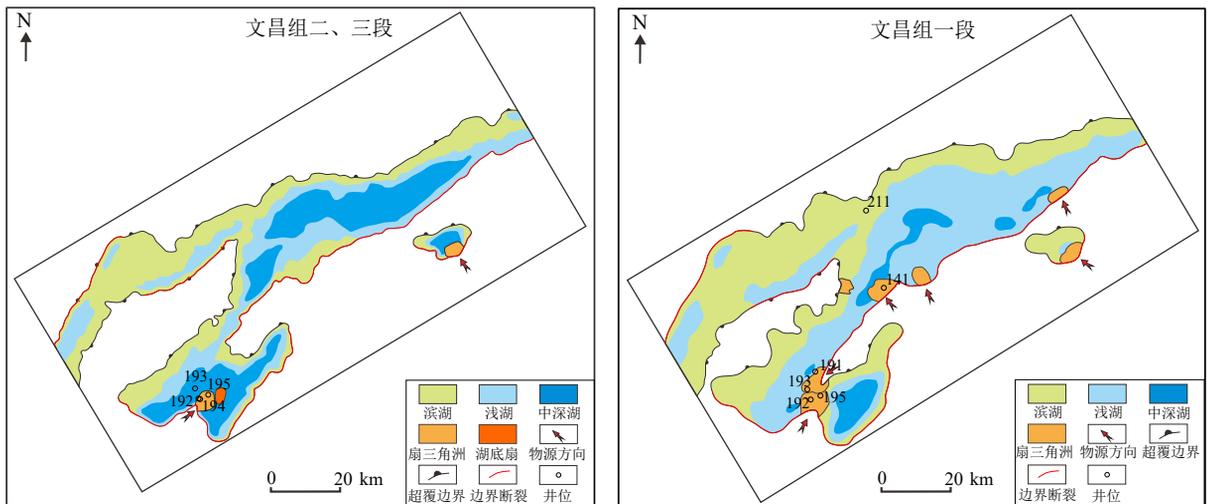


图 9 珠江口盆地西部珠三坳陷始新统文昌组扇三角洲-湖泊沉积体系分布特征

Fig.9 Delta and lake sedimentary system in the Eocene Wenchang Formation of Zhu III depression

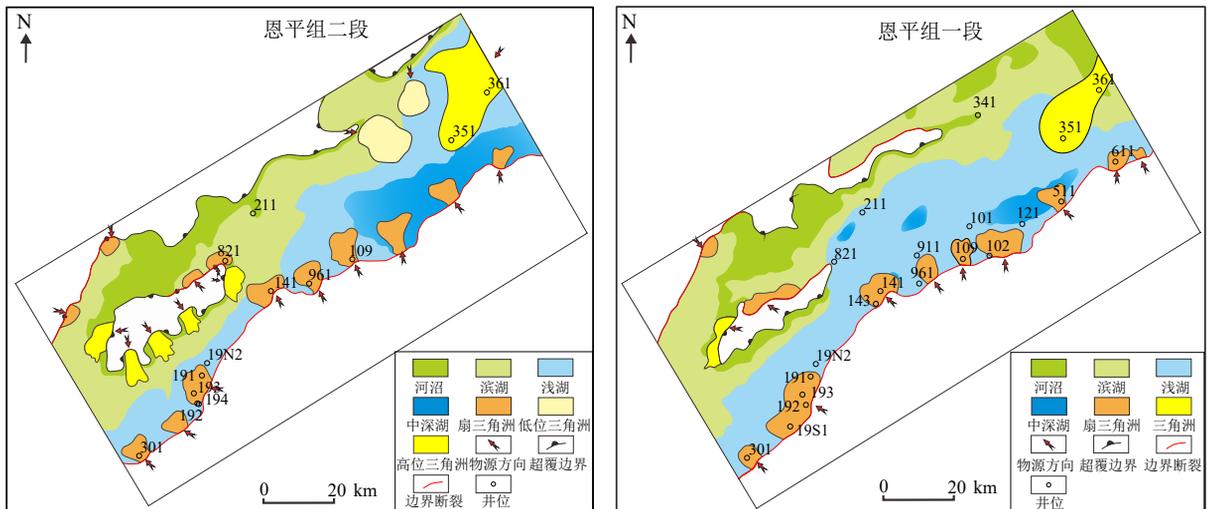


图 10 珠江口盆地西部珠三坳陷下渐新统恩平组(扇)三角洲-湖泊沉积体系分布特征

Fig.10 Delta and lake sedimentary system in the Lower Oligocene Enping Formation of the Zhu III depression

影响, 但影响范围减小, 发育的扇体规模及数量减小。珠海组一段沉积时期, 海平面进一步升高, 潮坪分布范围进一步扩大, 潮坪泥广泛分布, 成为区域性盖层; 南断裂活动性减弱, 来自南部神狐隆起的物源作用减小, 继承性发育的扇体数量及规模减小, 受北部综合物源区影响, 继承性发育的扇体规模进一步减小(图 11)。

3.3 古近系沉积充填及其演化特征

基于上述对于珠三坳陷古近系沉积时期的构造样式及物源体系分布与演化特征, 并结合沉积体系分布研究结果, 分析了沉积充填演化特征, 认为古近系始新统文昌组沉积时期, 发育断陷期构造样式, 此时珠三南断裂活动强烈, 控制了该时期的物

源分布及沉积充填, 并发育了文昌组湖相烃源岩; 渐新统恩平组—珠海组沉积时期, 发育断拗期构造样式, 珠三南断裂活动有所减弱, 但仍然主要控制着该时期的物源分布及沉积充填特征, 同时还发育北部综合物源的沉积体系。

在断陷期, 文昌 A 凹陷文昌组在珠三南断裂及其北部的 6 号断裂下降盘地层较厚, 向北超覆在阳江低凸起之上, 发育湖泊-扇三角洲体系, 凹陷内发育滨浅湖-中深湖沉积, 其湖相泥岩为研究区主要烃源岩; 断拗期恩平组沉积范围扩大, 凹陷南部内继承性发育湖泊-扇三角洲体系, 扇三角洲规模较大, 北部发育长源三角洲、河沼沉积; 珠海组遭受海侵, 发育滨海潮坪-(扇)三角洲体系, 凹陷南部继承性发育来自神狐隆起的大型扇三角洲沉积, 扇三角洲规

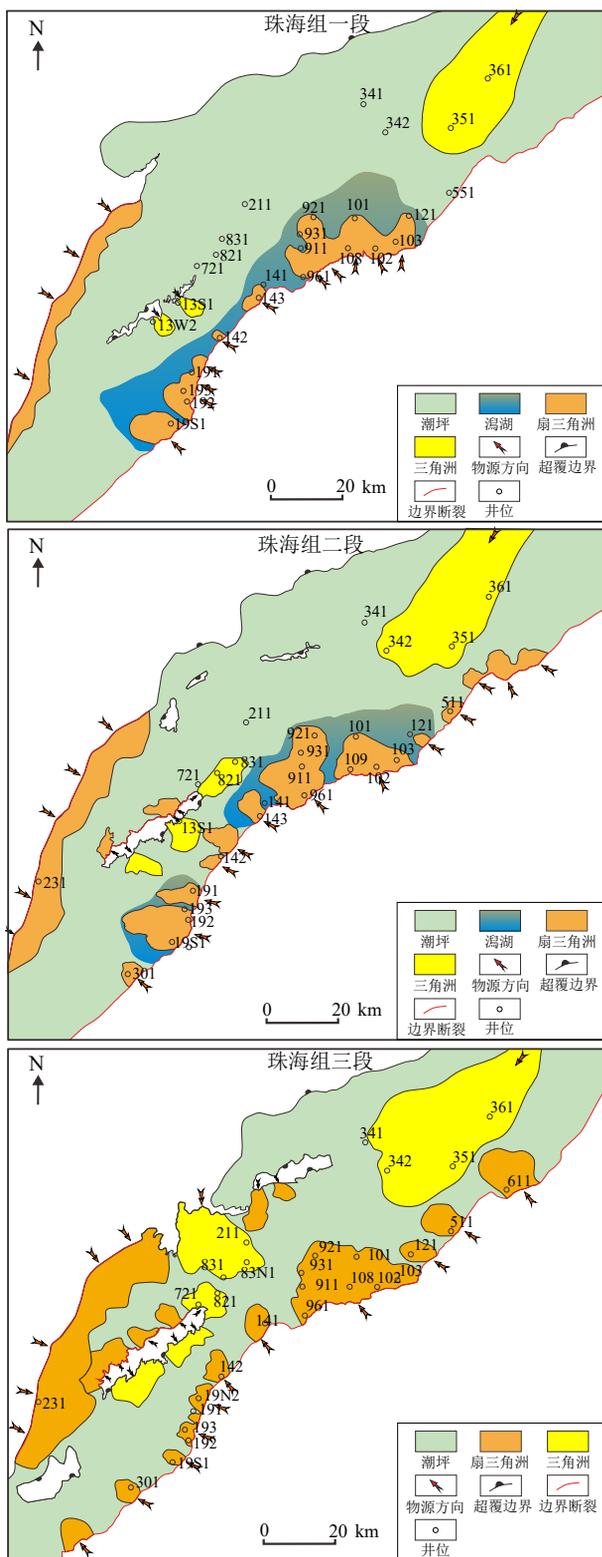


图 11 珠江口盆地西部珠三拗陷上渐新统珠海组(扇)三角洲-潮坪沉积体系分布特征

Fig.11 Delta and tidal flat sedimentary system in the Upper Oligocene Zhuhai Formation of the Zhu III depression

模大,与珠海组一段大面积分布的潮坪泥岩可形成优质储盖组合,也是珠三拗陷寻找大型储集体的主要区带(图 12)。

文昌 B、C 凹陷及琼海凹陷在断陷期均发育文昌组,其中文昌 B、C 凹陷厚度大,内部发育中深湖相沉积,琼海凹陷水体较浅,发育滨浅湖沉积;且各凹陷的断层下降盘发育扇三角洲沉积,文昌 B 凹陷北部发育来自琼海凸起的三角洲沉积。恩平组沉积时期,文昌 C 凹陷抬升遭受剥蚀,琼海凹陷及文昌 B 凹陷发育湖泊-扇三角洲体系,二者断层下降盘继承性发育扇三角洲沉积,文昌 B 凹陷北坡继承性发育来自琼海凸起物源的三角洲;珠海组沉积时期,研究区遭受海侵,发育滨海潮坪沉积。其中文昌 B 凹陷及琼海凹陷南部发育大型扇三角洲沉积,琼海凹陷北部珠海组早期发育三角洲沉积,晚期物源萎缩,发育潮坪泥岩(图 13)。

珠三拗陷古近系文昌组—珠海组沉积充填演化特征控制了研究区大型储集体发育及分布,其中研究区南部受断裂活动及神狐隆起物源影响,在恩平组—珠海组沉积时期,发育大型扇三角洲,并形成了研究区两大储盖组合:恩平组二段扇三角洲砂岩-恩平组一段泥岩储盖组合,珠海组二、三段大型扇三角洲砂岩-珠海组一段潮坪泥岩储盖组合。明确了凹陷南部为研究区主要的大型储集体发育区带,为该区的下一步勘探研究指明了方向。

4 结论

(1)在层序地层格架基础之上,结合构造样式演化特征及沉积充填特点分析,提出珠三拗陷古近系沉积时期主要经历了断陷与断拗两个构造演变阶段,且不同构造演化阶段控制着不同的物源体系及沉积充填演化特征,其中断陷期珠三南断裂活动强烈,控制了文昌组物源分布及沉积充填;断拗期构造活动减弱,恩平组—珠海组的物源分布及沉积充填除受到珠三南断裂控制外,还受到北部物源区影响。

(2)珠三拗陷古近系沉积时期受到两大物源供给区控制和影响,即拗陷南部的神狐隆起物源区和拗陷北部由海南隆起、粤桂隆起及相关河流体系组成的综合物源区。始新世陆相断陷期主要受南部物源区影响,渐新世断拗期则主要受南部和北部两大物源区的共同作用和影响。

(3)始新世—早渐新世文昌组—恩平组沉积时期以陆相断陷沉积为主,主要发育(扇)三角洲-湖泊沉积体系;晚渐新世珠海组沉积时期,珠三拗陷遭受海侵,逐渐演化为半封闭滨海潮坪环境,主要形成了(扇)三角洲-潮坪沉积体系。本区古近系主要

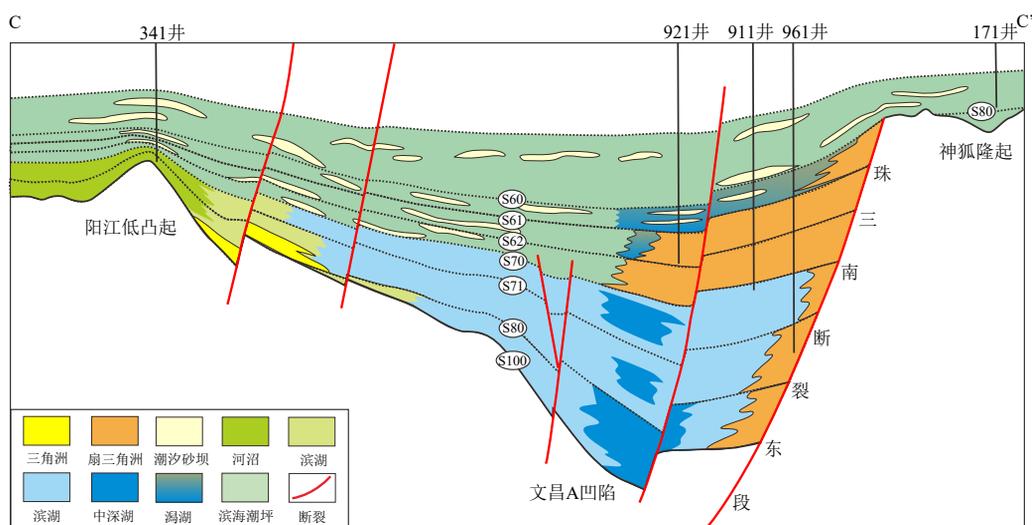


图 12 珠三坳陷文昌 A 凹陷古近系沉积充填演化特征综合剖面
剖面位置见图 1。

Fig.12 Seismic-sedimentary interpretation profile of the Paleogene deposits in the Wenchang A Sag of the Zhu III Depression
See Fig.1 for section location.

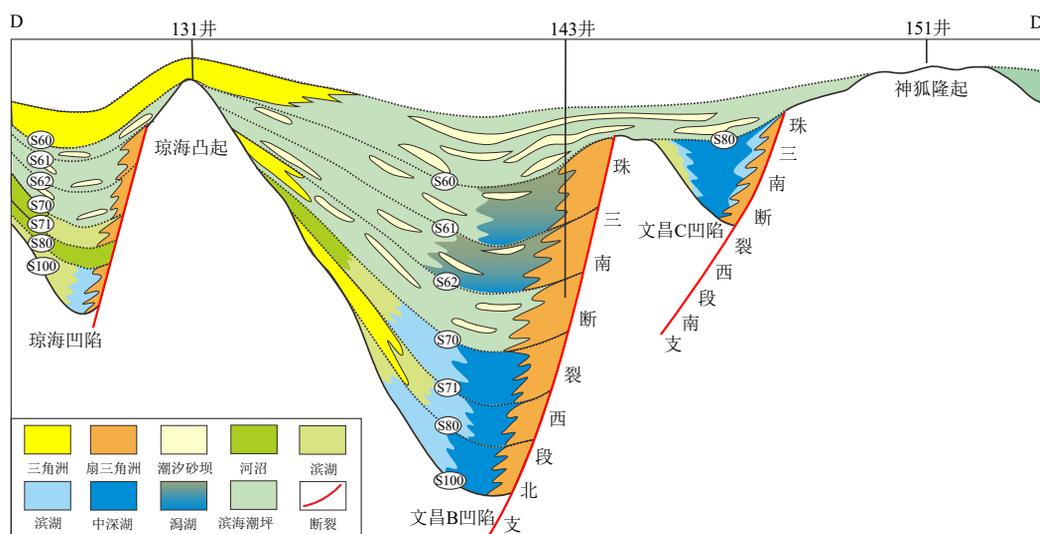


图 13 珠三坳陷文昌 B 凹陷古近系沉积充填演化特征综合剖面
剖面位置见图 1。

Fig.13 Seismic-sedimentary interpretation profile of the Paleogene deposits in the Wenchang B Sag of the Zhu III Depression
See Fig.1 for section location.

发育恩平组二段扇三角洲砂岩-恩平组一段湖相泥岩与珠海组二、三段扇三角洲砂岩-珠海组一段潮坪泥岩两类含油气储盖组合类型,且坳陷南部为大型碎屑岩储集体发育区,是油气勘探的有利区带,有望获得油气勘探的新突破。

参考文献 (References)

[1] 朱伟林,黎明碧,吴培康. 珠江口盆地珠三坳陷石油体系[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(6): 21-23. [ZHU Weilin, LI Mingbi, WU Peik-

ang. Petroleum system in Zhu III Depression of Pearl River mouth basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(6): 21-23.]

[2] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 327-364. [GONG Zaisheng, LI Sitian. *Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1997: 327-364.]

[3] 张迎朝, 陈志宏, 李绪深, 等. 珠江口盆地西部油气成藏组合和成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 108-117,123. [ZHANG Yingzhao, CHEN Zhihong, LI Xushen, et al. *Hydrocarbon plays and*

- pool-forming patterns in the western part of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(1): 108-117,123.]
- [4] 李绪深, 甘军, 张迎朝, 等. 南海西部海域断陷湖盆油气聚集规律及勘探前景[J]. 中国海上油气, 2015, 27(4): 22-29. [LI Xushen, GAN Jun, ZHANG Yingzhao, et al. Hydrocarbon accumulation regularity and exploration prospects of fault lacustrine basins in western South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(4): 22-29.]
- [5] 姜华, 王华, 李俊良, 等. 珠江口盆地珠三坳陷层序地层样式分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 87-93. [JIANG Hua, WANG Hua, LI Junliang, et al. Analysis on sequence formation styles of Zhu-3 Depression in Pearl River mouth basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(1): 87-93.]
- [6] 李俊良, 王海荣, 张建新, 等. 珠江口盆地西部珠江组潮流砂脊的分布、形态和水动力机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 671-677. [LI Junliang, WANG Hairong, ZHANG Jianxin, et al. Distribution, geometry and hydrodynamic mechanism of tidal sand ridges in the Zhujiang Formation, the western Zhujiangkou Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(5): 671-677.]
- [7] 雷宝华, 郑求根, 李俊良, 等. 珠三坳陷珠三南断裂形成演化及其对沉积中心迁移的控制[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 807-813. [LEI Baohua, ZHENG Qiugen, LI Junliang, et al. Formation and evolution of Zhu-3 south fault and its control on the depocenter shift in Zhu-3 Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(5): 807-813.]
- [8] 徐亚军, 杜远生, 杨江海. 沉积物物源分析研究进展[J]. 地质科技情报, 2007, 26(3): 26-32. [XU Yajun, DU Yuansheng, YANG Jianghai. Prospects of sediment provenance analysis [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(3): 26-32.]
- [9] 杨仁超, 李进步, 樊爱萍, 等. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势[J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 99-107. [YANG Renchao, LI Jinbu, FAN Aiping, et al. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 99-107.]
- [10] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 409-415. [ZHAO Hongge, LIU Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 409-415.]
- [11] Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions [J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(12): 2164-2182.
- [12] 焦养泉, 李思田, 解习农, 等. 多幕裂陷作用的表现形式: 以珠江口盆地西部及其外围地区为例[J]. 石油实验地质, 1997, 19(3): 222-227. [JIAO Yangquan, LI Sitian XIE Xinong, et al. Manifestation of multistage episodic rifting: take western Pearl River mouth basin and its peripheral area as an example [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1997, 19(3): 222-227.]
- [13] 张迎朝, 甘军, 李辉, 等. 伸展构造背景下珠三坳陷南断裂走滑变形机制及其油气地质意义[J]. 中国海上油气, 2013, 25(5): 9-15. [ZHANG Yingzhao, GAN Jun, LI Hui, et al. Strike-slip deformation mechanism and its petroleum geology significance along south fault in Zhu III Depression under extensional tectonic setting [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(5): 9-15.]
- [14] 陈桂华. 珠江口盆地珠三坳陷南边界断裂发育方式分析及其意义[J]. 海洋石油, 2002(3): 33-38. [CHEN Guihua. The developing patterns of south boundary fault in Zhu III Depression of the Pearl River mouth basin and his significance [J]. *Offshore Oil*, 2002(3): 33-38.]
- [15] 张迎朝, 张坤坤, 袁冰, 等. 文昌凹陷新生界断裂体系与构造样式及对油气成藏的控制作用[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(23): 26-31. [ZHANG Yingzhao, ZHANG Kunkun, YUAN Bing, et al. Fault system and structural style of cenozoic and their controlling effects on hydrocarbon-forming in Wenchang sag [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(23): 26-31.]
- [16] 李俊良, 雷宝华, 郑求根, 等. 珠江口盆地文昌凹陷应力场演化及其对成藏要素的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(4): 601-609. [LI Junliang, LEI Baohua, ZHENG Qiugen, et al. Stress field evolution and its controls on oil accumulation in the Wenchang Sag [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(4): 601-609.]
- [17] 黄正吉, 朱伟林, 吴国璋. 珠江口盆地(西部)早第三纪古环境分析[J]. 中国海上油气(地质), 1996, 10(4): 215-220. [HUANG Zhengji, ZHU Weilin, WU Guoxuan. Paleogene paleoenvironment of western Pearl River mouth basin [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1996, 10(4): 215-220.]
- [18] 赵中贤, 周蒂, 廖杰. 珠江口盆地第三纪古地理及沉积演化[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(6): 52-60. [ZHAO Zhongxian, ZHOU Di, LIAO Jie. Tertiary paleogeography and depositional evolution in the Pearl River Mouth Basin of the northern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(6): 52-60.]
- [19] 吕学菊, 肖力, 林正良, 等. 珠江口盆地西部珠三坳陷沉降史分析[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(2): 195-197,205. [LV Xueju, XIAO Li, LIN Zhengliang, et al. Analysis of subsidence history of Zhusan Depression in western Pearl River mouth basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(2): 195-197,205.]
- [20] Withjack M O, Jamison W R. Deformation produced by oblique rifting [J]. *Tectonophysics*, 1986, 126(2-4): 99-124.
- [21] 刘强虎, 朱红涛, 舒誉, 等. 珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 286-299. [LIU Qianghu, ZHU Hongtao, SHU Yu, et al. Provenance systems and their control on the beach-bar of Paleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 286-299.]
- [22] 陈安清, 陈洪德, 徐胜林, 等. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代物源体系及聚砂规律[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(6): 1-7. [CHEN Anqing, CHEN Hongde, XU Shenglin, et al. Provenance and sandy accumulation regularity of Neopaleozoic in North Ordos Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2011, 35(6): 1-7.]
- [23] 姜华, 王华, 肖军, 等. 古地貌对边缘海盆地沉积充填特征的控制: 以南海珠江口盆地珠三坳陷为例[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(1): 10-15. [JIANG Hua, WANG Hua, XIAO Jun, et al. Control of paleomorphology to sedimentary filling in marginal sea basin: by taking Zhu III Depression for example [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(1): 10-15.]
- [24] 鲁宝亮, 王璞珺, 张功成, 等. 南海北部陆缘盆地基底结构及其油气勘探意义[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 580-587. [LU Baoliang, WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, et al. Basement structures of an

- epicontinental basin in the northern South China Sea and their significance in petroleum prospect [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 580-587.]
- [25] Zhang B, Wang P J, Zhang G C, et al. Cenozoic volcanic rocks in the Pearl River Mouth and Southeast Hainan Basins of South China Sea and their implications for petroleum geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 704-713.
- [26] 孙晓猛, 张旭庆, 张功成, 等. 南海北部新生代盆地基底结构及构造属性[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 57(6): 1199-1211. [SUN Xiaomeng, ZHANG Xuqing, ZHANG Gongcheng, et al. Texture and tectonic attribute of Cenozoic basin basement in the Northern South China Sea [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(6): 1199-1211.]
- [27] 广东省地质矿产局. 中华人民共和国地质矿产部地质专报-一, 第 9 号-区域地质, 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988. [The Geological and Mineral Resources Bureau of Guangdong Province. The Regional Geological Well of Guangdong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.]
- [28] 苏广庆, 王天行. 珠江口表层沉积物的重矿物分析[J]. *矿物学报*, 1992, 12(1): 45-52. [SU Guangqing, WANG Tianxing. Analysis of heavy minerals in the surface sediment at the Pearl River Mouth, Guangdong [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1992, 12(1): 45-52.]
- [29] 朱素琳, 梁百和, 吴华新, 等. 珠江口及邻近海岸表层沉积物重矿物的初步研究[J]. *海洋通报*, 1983, 2(1): 22-29. [ZHU Sulin, LIANG Baihe, WU Huaxin, et al. A Preliminary study on the heavy minerals in the surface sediment in the estuary of the Pearl River and its adjacent coast [J]. *Marine Science Bulletin*, 1983, 2(1): 22-29.]
- [30] 梁百和, 朱素琳, 吴华新. 广东省海岸表层沉积物的重矿物特征及其与沉积环境的关系[J]. *岩石矿物学杂志*, 1989, 8(2): 180-188. [LIANG Baihe, ZHU Sulin, WU Huaxin, et al. The characteristics of heavy minerals in the coastal surficial sediments of Guangdong province in relation to sedimentary environments [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1989, 8(2): 180-188.]
- [31] 向绪洪, 邵磊, 乔培军, 等. 珠江流域沉积物重矿物特征及其示踪意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(6): 27-35. [XIANG Xuhong, SHAO Lei, QIAO Peijun, et al. Characteristics of heavy minerals in Pearl River sediments and their implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(6): 27-35.]
- [32] 程天文, 赵楚年. 我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影响[J]. *海洋学报*, 1985, 7(4): 460-471. [CHENG Tianwen, ZHAO Chunian. Runoff volumes and sediment discharges of large rivers in China and their influence on the coastal zone [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7(4): 460-471.]
- [33] 邵磊, 庞雄, 乔培军, 等. 珠江口盆地的沉积充填与珠江的形成演变[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 179-185. [SHAO Lei, PANG Xiong, QIAO Peijun, et al. Sedimentary filling of the Pearl River mouth basin and its response to the evolution of the Pearl River [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 179-185.]