

doi:10.3799/dqkx.2017.123

# 珠江口盆地白云凹陷恩平组物源转换及沉积充填演化

曾智伟<sup>1,2</sup>, 朱红涛<sup>1,2\*</sup>, 杨香华<sup>1,2</sup>, 夏晨晨<sup>1,2</sup>, 陈莹<sup>3</sup>, 韩银学<sup>3</sup>

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

3. 中海油研究总院, 北京 100028

**摘要:**为了阐明白云凹陷古近系恩平组的物源供给方式及沉积充填演化规律,以古地貌—古生物分析、LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年、地震属性分析及典型地震相识别为主要技术手段,对白云凹陷恩平组不同沉积时期的沉积环境、古地貌特征、锆石形态及年代组成、砂体发育特征等进行分析,认为恩平组沉积时期其物源供给方式及沉积充填特征发生了明显的变化。恩平组 SQ1~SQ2 时期陆相断陷湖盆特征明显,沉积时期沉积范围较小,以盆内短程物源(中生代火成岩基底母岩)供给为主;南部陡坡带主要发育近源快速堆积而成的扇三角洲;北部缓坡带发育充填结构典型的辫状河三角洲及上倾尖灭明显的滩坝砂体。恩平组 SQ3 时期主要为半封闭的海湾沉积环境,沉积范围较大,以盆外远程物源(华南褶皱带前寒武纪—古生代变质岩基底母岩)供给为主;南部陡坡带断裂活动减弱,发育规模较小的扇三角洲;北部缓坡带发育沿北西—南东方向展布的三期前积反射并不断向盆地中心进积的典型大型辫状河三角洲。

**关键词:**大型三角洲;前积反射;沉积环境;碎屑锆石;砂体展布;地震属性;石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2017)11-1936-19

收稿日期: 2017-03-08

## Provenance Transformation and Sedimentary Evolution of Enping Formation, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

Zeng Zhiwei<sup>1,2</sup>, Zhu Hongtao<sup>1,2\*</sup>, Yang Xianghua<sup>1,2</sup>, Xia Chenchen<sup>1,2</sup>, Chen Ying<sup>3</sup>, Han Yinxue<sup>3</sup>

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

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China

**Abstract:** In order to clarify the sediment supply and sedimentary filling evolution, seismic attributes and seismic facies, the sediment supply and infilling evolution are studied by analyzing the changes in sedimentary environment, morphology, the shape and chronology of the detrital zircons, and the characteristics of sand-bodies, based on the main measuring method of the paleogeomorphology, paleontology, LA-ICPMS zircon U-Pb dating. The results indicate that the sediment supply and sedimentary filling have greatly changed during different sequences of the Enping Formation. During the SQ1 and SQ2 of the Enping Formation, the sedimentary environment was characterized by lacustrine rift basins with relatively small sedimentary-range. The sediments around the paleo-uplift were composed of Mesozoic igneous rocks and interpreted to have sourced via relatively short-distance transportation. The southern steep slope zone mainly developed a series of medium-small scale proximal fan deltas. The northern slope zone mainly formed a series of braided deltas with typical channel-filling and beach-bar sand-bodies, and the sediments were mainly derived from the Panyu lower uplift and Dongsha uplift. During the SQ3 of the Enping Formation, the sedimentary environment was characterized by semi-closed bay with relatively large sedimentary-range. The sediments mainly derived from the South China Folded Belt which were composed of Precambrian-Paleozoic metamorphic rocks. The activity of

基金项目:国家科技重大专项(Nos.2011ZX05023-001-015, 2011ZX05023-001-001)。

作者简介:曾智伟(1990—),男,在读博士,主要从事沉积学、层序地层学及储层研究。ORCID: 0000-0002-8884-6822。

E-mail: zwzeng@cug.edu.cn

\* 通讯作者:朱红涛, E-mail: htzhu@cug.edu.cn

引用格式:曾智伟,朱红涛,杨香华,等,2017.珠江口盆地白云凹陷恩平组物源转换及沉积充填演化.地球科学,42(11): 1936—1954.

the syn-depositional faults in the southern steep slope zone gradually weakened and mainly formed a series of small scale proximal fan deltas with the sediments provided by the southern uplift. The northern slope zone was interpreted to have sourced via relatively long-distance transportation and deposited along the northwest-southeast-trending, forming three stages large-scale prograding braided deltas.

**Key words:** large-scale delta; progradational reflection; sedimentary environment; detrital zircon; dispersal patterns; seismic attribute; petroleum geology.

白云凹陷的油气勘探始于 20 世纪 70 年代末期,至今已发现诸多著名的大油气田,例如白云凹陷北部缓坡带上发现的番禺气田群以及 2006 年在凹陷东部凸起带上发现的荔湾 3-1 深水大气田(张功成等,2014),这些油气田的发现均证实了白云凹陷蕴含巨大的油气勘探潜力。目前白云凹陷的勘探层系主要集中在下中新统珠江组和上渐新统珠海组(柳保军等,2011;吴伟中等,2013;Lin and Shi, 2014;张功成等,2015),其油气探明率相对珠江口盆地许多富烃凹陷而言仍较低,因此白云凹陷深部储层油气勘探潜力巨大。按照“油气分布互补性理论”(杜金虎等,2004),中深层的恩平组可能是油气的潜在富集层位。珠二坳陷深水区珠江组与珠海组的油气勘探成果显著(李云等,2014;刘惟庆等,2015;乔博等,2015;谢志远等,2015),证实了白云凹陷中深层恩平组烃源岩的生烃潜力,间接揭示了恩平组自生自储的油气勘探前景。白云凹陷内及周缘低隆起均有恩平组分布,最厚处可达 4 000 m,凹陷的北部、西部发育多个三角洲,其中白云西北坡在恩平组沉积晚期发育一个面积最大达 4 500 km<sup>2</sup> 的大型含煤辫状河三角洲,该三角洲的煤系烃源岩是已经被证实的恩平组主力烃源岩之一(张功成等,2014),恩平组三角洲沉积环境下发育的各类储集砂体紧邻烃源岩,是潜在的有利储集目标。因此,白云凹陷中深层岩性圈闭无论是作为潜在战略勘探方向,还是作为当今的潜在勘探目标都具有重要的研究价值。

柳保军等(2011)及吴伟中等(2013)应用钻井、地球物理、古生物等资料分析认为白云凹陷恩平组处于断拗期陆相湖盆沉积,地震剖面上识别出大规模的前积斜层或“S”型反射,大型三角洲发育,普遍发育河流平原相、泛滥平原相和滨浅湖相;张功成等(2014, 2015)通过地震、钻井、地球化学和古生物资料综合分析认为恩平组沉积时期,白云凹陷北坡发育海陆过渡相三角洲,受控于沉积相带的分布,烃源岩呈二元分布特征——三角洲煤系烃源岩和浅海相泥岩,凹陷内部发育地层超覆、近岸水下扇、滩坝、低位扇、三角洲前缘楔状砂岩体和上倾尖灭砂岩体等

6 种岩性地层圈闭,但目前对恩平组三级层序格架内的物源体系特征及沉积充填演化关系还缺乏系统的研究。而物源分析是含油气盆地分析的重要组成部分之一,是确定盆地沉积体系的物源供给方式、性质以及搬运方式,判断有利储集相带分布范围及古湖盆重建等的重要依据(杨仁超等,2013)。目前主要方法有沉积法、重矿物法、地质年代学法、化石和古生标化合物法、元素地球化学法、岩石学法以及一系列的地球物理学方法等。随着石油地质科学技术的革新,沉积盆地物源分析也从最初的定性研究判别逐渐向定量研究转变(杨仁超等,2013; Zhu et al., 2014; Benyon et al., 2016; Bruand et al., 2016)。白云凹陷古近系恩平组沉积充填过程中,其层序地层格架、沉积物源供给方式、地层样式及砂体展布协同变化,能够较好地体现裂陷盆地充填演化的内在规律,可为白云凹陷恩平组寻找大型构造—岩性复合圈闭或岩性—地层圈闭提供有力支持。

因此,本文基于珠江口盆地盆外物源及盆内局部物源母岩性质及地质年代间的差异,在恩平组等时层序地层格架内,充分利用全区覆盖的三维、二维地震资料及有限的钻遇恩平组 SQ3 层序的 9 口钻井地质资料,分别通过古生物沉积环境分析、碎屑锆石 U-Pb 定年物源示踪、古地貌物源通道识别、地震属性分析、典型地震相识别及砂体边界追踪刻画等方法,基于源—汇耦合控砂的思想(赖维成等,2010;徐长贵等,2010;徐长贵,2013),从整体上厘清白云凹陷恩平组三级层序格架内的物源体系特征及沉积充填演化规律,以此完善白云凹陷恩平组沉积体系的相关认识,深化南海北部恩平组沉积晚期大型三角洲沉积模式的理解,降低深部储集砂体的预测风险,并期望为白云凹陷恩平组岩性地层圈闭成藏条件分析及勘探决策提供借鉴。

## 1 地质背景

珠江口盆地位于中国南海北部、华南大陆南缘,处于欧亚、太平洋和印度洋三大板块交汇处附近,是

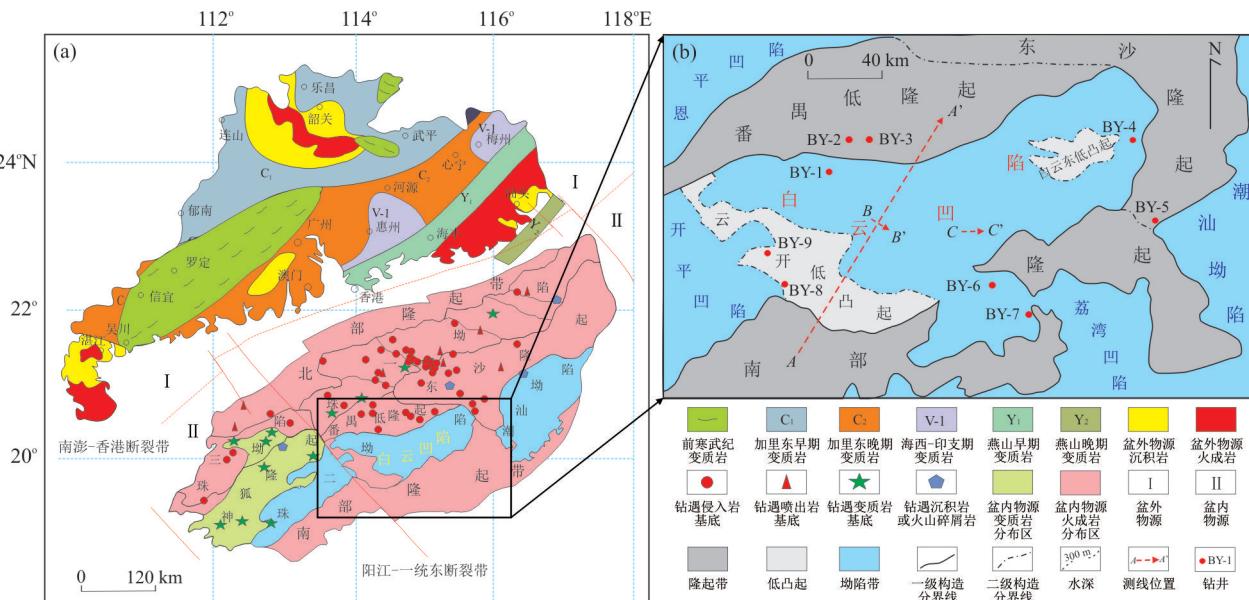


图 1 物源区基底岩性分布(a)及白云凹陷构造位置(b)

Fig.1 The distribution of basement lithology (a) and tectonic location of the Baiyun sag (b)

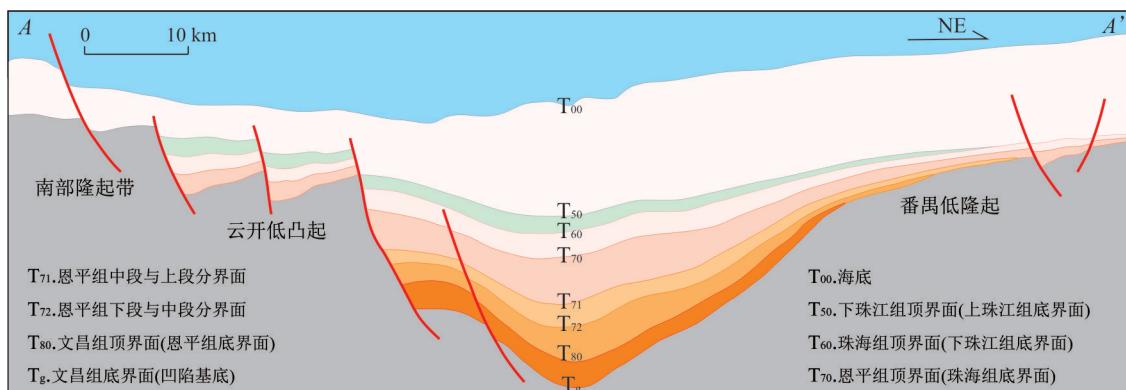


图 2 珠江口盆地白云凹陷区域地质剖面

Fig.2 Regional geological profile of Baiyun sag in the Pearl river Mouth basin

位置见图 1

在燕山期花岗岩及前第三系褶皱基底上发育起来的中—新生代大型沉积盆地(王家豪等, 2011; 刘强虎等, 2013). 白云凹陷处于珠江口盆地珠二坳陷东北部(图 1), 其北接番禺低隆起, 南至南部隆起带, 西连云开低凸起, 东邻东沙隆起, 凹陷面积超过  $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 水深为 200~2 000 m, 白云凹陷约 70% 的面积水深大于 500 m(李成海等, 2014; 陈亮等, 2015). 恩平组沉积时期, 白云凹陷处于裂谷演化的晚期, 断拗特征明显, 整体呈“南陡北缓、南断北超”的宽“半地堑”特征(图 2); 在拉张断拗和深部热衰减共同作用下, 白云凹陷整体发生沉降, 沉积范围不断扩大, 东南与荔湾凹陷相连. 恩平组沉积晚期, 沉积背景由逐渐由陆相断陷湖盆环境向海陆过渡相环

境过渡(张功成等, 2015), 同时白云凹陷北坡宽缓的古地理背景为大型三角洲发育提供了有利条件.

目前白云凹陷钻遇恩平组的钻井只有 9 口, 主要分布在凹陷边缘的构造高部位, 其中凹陷北部番禺低隆起上 3 口、凹陷东部 2 口、南部 2 口、西南云开低凸起上 2 口(图 1b), 且这些钻井均只钻遇恩平组 SQ3 层序, 因此白云凹陷恩平组的钻井资料相对较少. 但白云凹陷地震资料较为丰富, 全区三维地震资料覆盖面积超过 15 000 km<sup>2</sup>, 且凹陷四周隆起均有二维地震资料覆盖, 这能有效弥补钻井资料较少的缺陷, 可为白云凹陷古近系恩平组层序地层格架的建立、古地貌恢复及识别、地震相及地震属性分析提供良好的基础条件.

## 2 层序地层划分及沉积环境判别

### 2.1 恩平组层序地层划分

地震资料是在无井、少井地区开展层序地层学研究的核心资料,可有效弥补研究区钻遇目的层系探井较少的不足;地震反射结构参数能够反映产生反射的地下地质单元宏观上的结构特征,并可对高精度等时地层格架、层序地层界面及层序内部结构进行识别研究(Vail, 1983; 刘强虎等, 2013)。通过典型地震反射特征进行识别追踪,结合现有钻井岩性、测井曲线及古生物资料等,本文将白云凹陷恩平组划分为3个三级层序(图3),自下而上为SQ1、SQ2、SQ3层序,它们共同构成一个完整的二级层序。

SQ1层序时期,南部控凹断裂活动强度较大,层序底界面为T<sub>80</sub>区域不整合面,对应于珠琼运动二幕,为一个区域构造运动面,在凹陷中心T<sub>80</sub>界面可见明显的角度不整合(图3-BB'),在凹陷边缘局部可见上超;层序顶界面为T<sub>72</sub>局部不整合面。SQ2层序时期,控凹断裂活动速率有所减弱,但可容纳空间增长速率大于沉积物供应速率,层序底界面为T<sub>72</sub>局部不整合面,主要表现为明显的上超(图3-BB'),顶界面为T<sub>71</sub>局部不整合面。SQ3层序断拗特征明显,构造活动稳定,沉积物供应速率大于可容纳空间增长速率,处于过补偿的沉积环境,凹陷西北斜坡发育大规模的进积型辫状河三角洲,前积反射结构典型,层序底界面为T<sub>71</sub>局部不整合面,为恩平组内部的沉积转换面,地震剖面可见明显下超(图3-

CC');顶界面为T<sub>70</sub>区域不整合面,为恩平组与珠海组的分界面,对应于南海运动,是盆地由断拗转换至拗陷演化的转换面,在珠江口盆地区域不整合特征表现突出,全区普遍发育低角度削截或不整合(图3-CC')。

### 2.2 恩平组沉积环境判别

米立军等(2008)、吴伟中等(2013)研究认为白云凹陷古近系恩平组的沉积环境整体上以陆相湖泊沉积为主,而张功成等(2014, 2015)则认为恩平组主要为海相沉积环境。因此,关于其沉积环境的判别及认识一直存在争议。由于研究区缺少钻井直接揭示恩平组SQ1及SQ2,因此该时期的沉积环境主要由地震资料进行辅助判别,而恩平组SQ3层序的沉积环境则可通过古生物进行分析判别。

**2.2.1 古地貌分析** 通过恩平组层序界面的识别解释,在Petrel软件中完成了恩平组三级层序的厚度图绘制(图4),结合区域格架剖面分析(图5),能够较好地反映恩平组不同沉积时期的沉积特征,进而判别其沉积环境。从恩平组SQ1的厚度图可看出(图4a),该时期白云凹陷被四周隆起所包围,沉积范围主要局限于凹陷内部,与北部珠一坳陷及东南部荔湾凹陷基本处于分隔状态(图5-FF'),由凹陷四周古隆起(番禺低隆起、东沙隆起、云开低凸起、南部隆起带以及白云东低凸起)提供短程物源,此时西南部控凹断裂活动仍较为强烈。恩平组SQ2沉积时期,白云凹陷的沉积范围增大,但沉积的厚度相对薄,此时白云凹陷与北部珠一坳陷仍处于分隔状态,

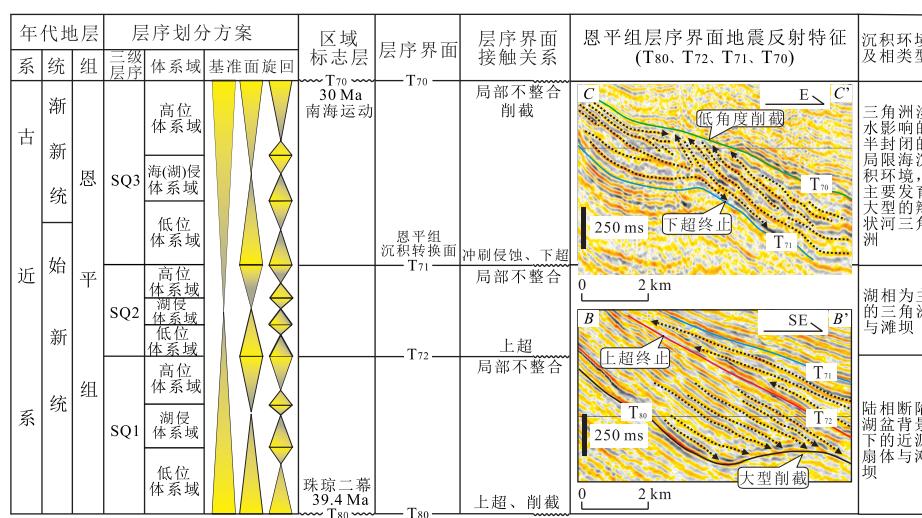


图3 恩平组层序地层格架及层序界面地震反射特征

Fig.3 The sequence stratigraphic framework and seismic reflection characteristics of sequence boundary of Enping Formation  
剖面位置见图1

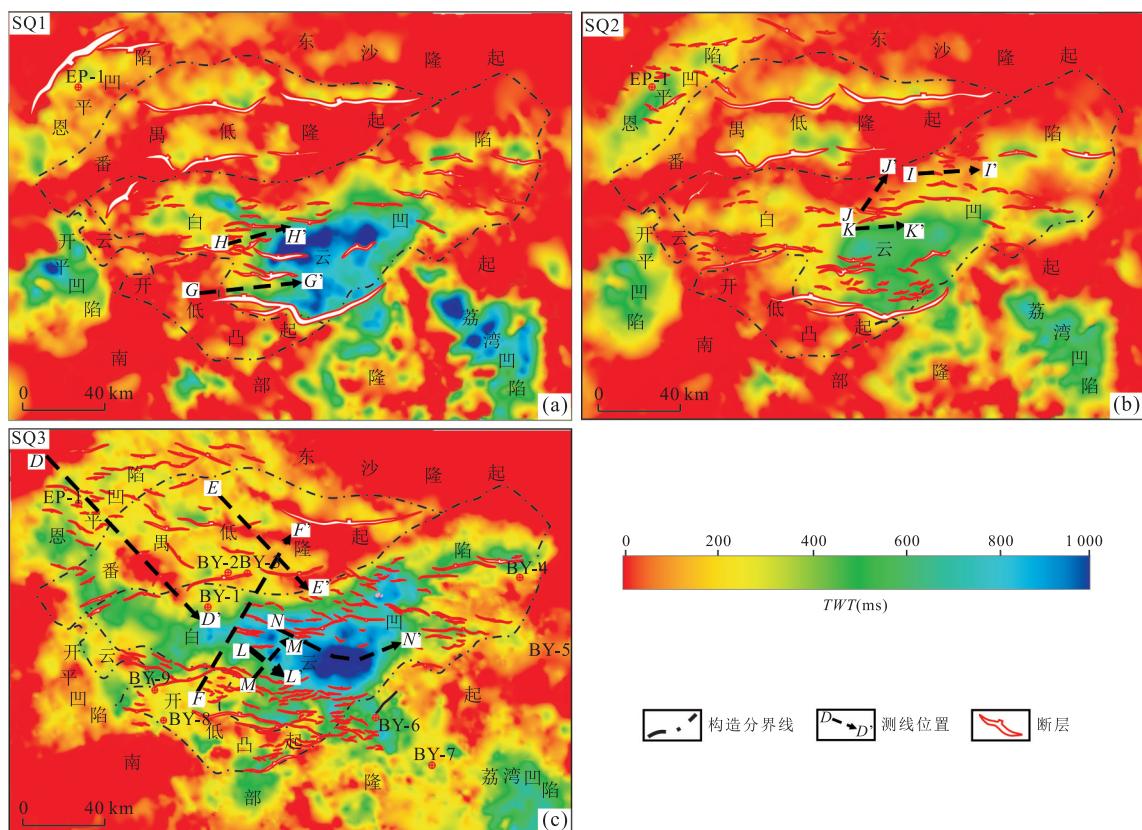


图 4 白云凹陷恩平组 SQ1~SQ3 层序厚度

Fig.4 The thickness map of SQ1-SQ3 sequences of the Enping Formation in Baiyun sag

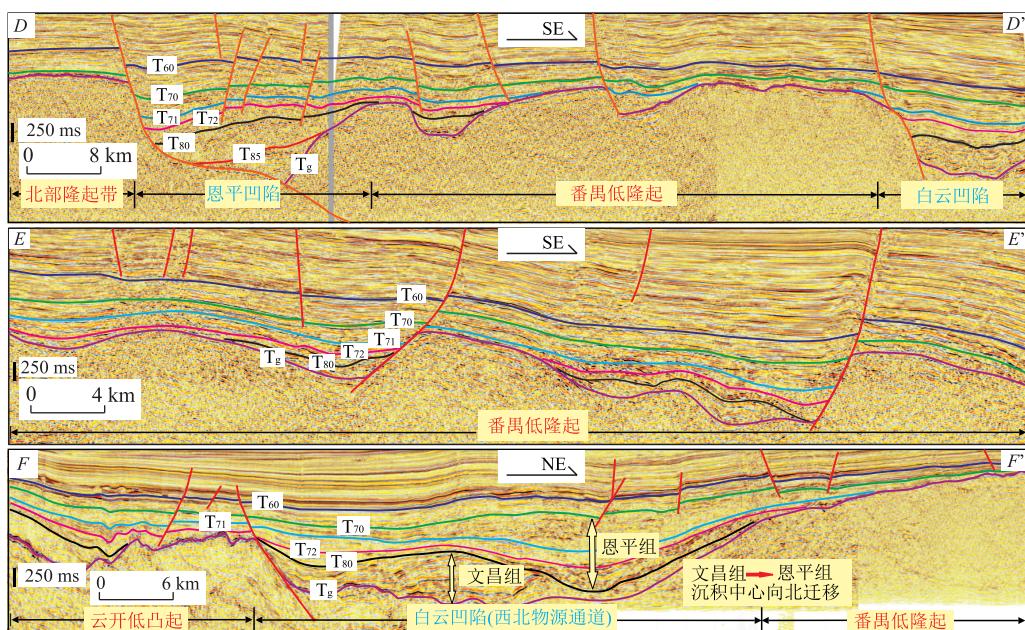


图 5 恩平凹陷—番禺低隆起—白云凹陷地震剖面

Fig.5 Seismic profile of Enping sag, Panyu low uplift and Baiyun sag

位置见图 4c

与东南部荔湾凹陷已逐渐开始连通(图 4b).恩平组 SQ3 沉积时期,白云凹陷发生广泛海侵,沉积范围

不断扩大,海水逐渐覆盖到凹陷四周低隆起之上,番禺低隆起西侧低部位开始接受沉积(图 5-DD'、

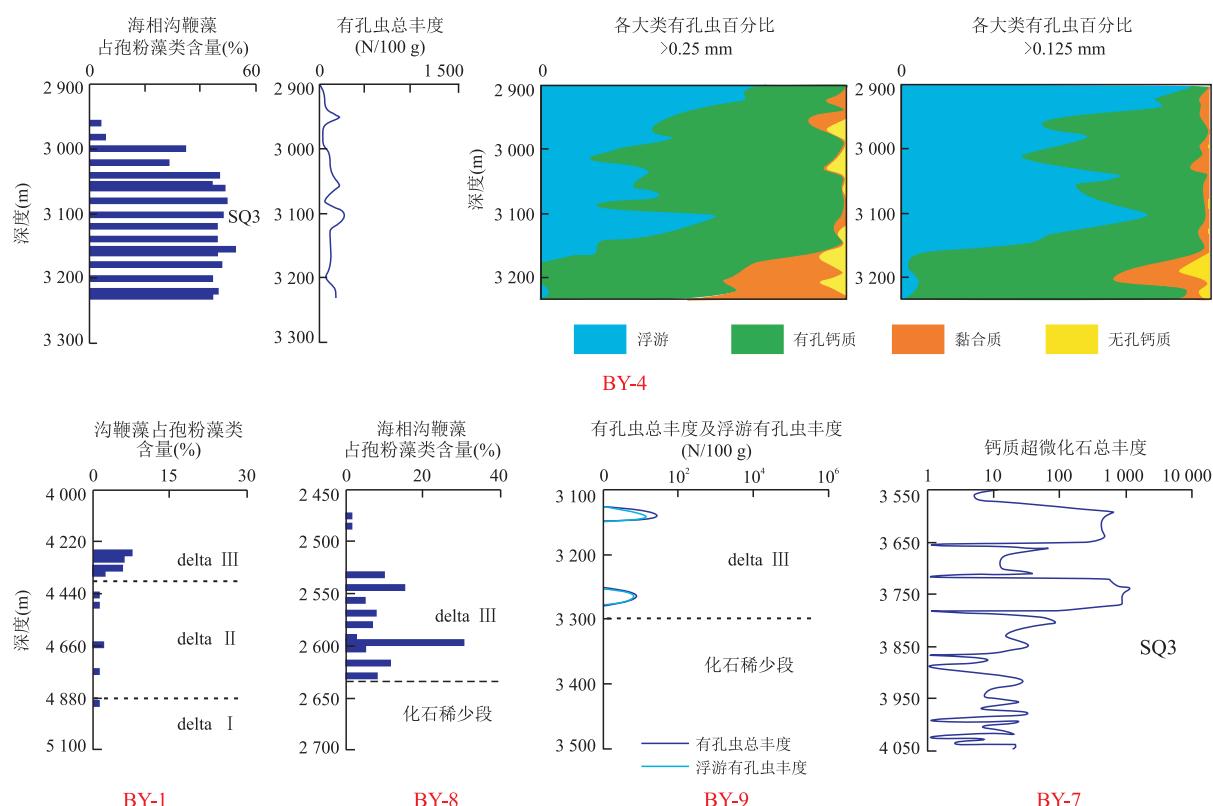


图 6 白云凹陷古生物特征分析

Fig.6 Paleontology characteristics analysis of Enping Formation in Baiyun sag

据赵玉娟等(2017)

5-EE’),且物源区受侵蚀及准平原化作用影响(曾智伟等,2014, 2015),白云凹陷与北部珠一坳陷恩平凹陷基本连通(图 4c、图 5);同时,由于凹陷四周沉积地貌变缓,东南入海通道加宽(图 4c),海水从东南缘“峡口”涌入白云凹陷,局部地区咸水化石发育(张功成等,2014)。

**2.2.2 古生物分析** 沟鞭藻是一种广泛分布于海洋的低等浮游植物,少量分布在内陆咸水湖泊;有孔虫是一类古老的原生动物,种类繁多,多分布于海洋,少见于淡水和半咸水中;钙质超微化石是颗粒藻纲表面的钙质骨骼及与其相近化石的统称,是典型的海相化石,绝大多数分布于海洋,少数生活在淡水中(蒋海军等,2011)。目前对白云凹陷恩平组的微体古生物研究尚少,研究区仅有 BY-1 井、BY-4 井、BY-7 井、BY-8、BY-9 这 5 口钻遇 SQ3 的单井微体古生物资料(图 6),通过微体古生物化石组合中沟鞭藻、有孔虫和钙质超微化石的含量分析,即可有效判断 SQ3 沉积时期不同构造部位的水介质性质,为进一步的物源供给方式及沉积充填演化研究提供分析基础(数据引自中海油研究总院,2014,北京;古生物测试分析由同济大学海洋地质国家重点实

验室完成)。

恩平组 SQ3 沉积时期,白云凹陷不同构造部位的微体古生物特征存在明显的差异.BY-1 井位于凹陷西北部,根据其微体古生物资料显示,其沟鞭藻仅在 SQ3 的晚期——第三期三角洲(delta III)有少量发育(图 6),且含量占孢粉藻类的比例较低,小于 10%,体现了白云凹陷西北部与东南海水入口相对较远,水体盐度较低,主要受三角洲的淡水影响为主;但随着海水的影响逐渐增强,沟鞭藻的含量也呈现由下往上逐渐升高的趋势.BY-8 井与 BY-9 井均位于凹陷西南部云开低凸起上(图 1),BY-8 井在 2 520~2 630 m 的层段(对应 delta III)内海相沟鞭藻含量相对较高且连续分布(图 6),BY-9 井的有孔虫总丰度以及浮游有孔虫丰度均较低且不连续分布,反映了凹陷西南部受到了一定程度的海水影响且大于西北部.BY-7 井位于白云凹陷东南部(图 1),处于与荔湾凹陷交接的“峡口”处,海水的影响较大,根据该井的钙质超微化石资料显示,总体上其含量呈递增模式,其中在 3 580~3 675 m 以及 3 710~3 785 m 两个层段钙质超微化石总丰度突然增加(图 6),这与 BY-9 井有孔虫含量相似.BY-4 井位于凹陷

东北部(图 1),其微体古生物资料显示,海相沟鞭藻含量持续高值,有孔虫总丰度值较低,但其中的浮游类有孔虫及有孔钙质类有孔虫含量较高且持续分布,表明白云东洼受陆源碎屑供给影响,水介质条件有利于微体古生物发育,浮游藻类繁盛。同时,张功成等(2014)通过对 BY-4 井海相沟鞭藻属种统计分析发现,SQ3 中包含 *Cordosphaeridium*、*Cleistosphaeridium*、*Hystrichokolpoma*、*Lingulodinium*、*Operculodinium*、*Polysphaeridium*、*Systematophrara* 等多种滨浅海相的沟鞭藻属种,这也为白云凹陷恩平组 SQ3 沉积时期为海相沉积环境提供了一定的证据支持。

因此,综合古地貌特征及古生物分析结果,我们认为恩平组 SQ1 沉积时期,白云凹陷主要表现为陆相断陷湖盆的沉积特征,由凹陷周缘隆起近源提供物源碎屑;恩平组 SQ2 沉积时期主要仍以陆相湖泊沉积为主,凹陷东南边缘局部不定期受海水的影响改造,但影响范围相对较小;SQ3 沉积时期则主要表现为受三角洲淡水影响的相对封闭的局限海沉积环境。

### 3 碎屑锆石 U-Pb 定年物源示踪

#### 3.1 盆外物源与盆内物源体系划分

珠江口盆地北侧华南褶皱带与盆内珠一坳陷、番禺低隆起、东沙隆起、云开低凸起及南部隆起带的基底岩性、地质年代和母岩类型存在明显差异(图 1a)。珠江口盆地北侧华南褶皱带的基底岩性及地质年代分布较为复杂,从太古代到中生代变质岩、岩浆岩均广泛发育(杨超群等,1988),但以前主要以寒武纪—古生代变质岩母岩为主。近年来,国内许多学者利用同位素定年、碎屑锆石 U-Pb 定年等技术手段证实了华南地区曾经存在过一个古老基底,前寒武纪变质岩出露,基岩地质年代主要为新太古代和中元古代(于津海,2006)。与之相比较而言,白云凹陷周缘隆起的基底岩性及地质年代相对简单,从珠江口盆地钻遇古近纪基岩的 50 余口钻井的成果揭示来看,盆内隆起 90% 左右的基岩为燕山期中酸性火成岩(刘安和吴世敏,2011),这已由李平鲁等(1998)及施和生等(2009)采用 K-Ar 法和 Rb-Sr 等时线法测定绝对年龄、锆石 U-Pb 同位素定年等技术方法证实了珠江口盆地的中生代火成岩基底年龄主要分布在  $163.8 \pm 2.0 \sim 70.5 \pm 1.0$  Ma。盆内相关钻井揭示神狐隆起主要为中生代变质岩基底,基岩地质年代也主要为侏罗纪—白垩纪。本文以南澎—香港岩石

圈断裂为界(图 1a),将珠江口盆地北侧华南褶皱带出露的前寒武纪—古生代变质岩、岩浆岩母岩称为盆外物源体系,白云凹陷周缘基底隆起的中生代火成岩母岩称为盆内物源体系(图 1a、图 5)。盆外与盆内两大物源体系的基底母岩性质、地质年代上存在着较大的差异,这为白云凹陷恩平组锆石 U-Pb 定年物源示踪分析提供了有利条件。因此,研究区可使用前寒武纪—古生代锆石的相对含量或者中生代锆石的相对含量来定量研究两大物源体系的物源供给规律。

#### 3.2 样品特征及分析方法

随着含油气盆地油气勘探的不断深入,石油地质学家们越来越重视盆山耦合的研究,以寻找中深部有利储集砂体,寻找有利的油气储量接替区域。重矿物组合法被广泛应用于物源分析,尤其是锆石 U-Pb 物源示踪方法更是取得了长远的发展(王维等,2015;Benyon et al., 2016;Bruand et al., 2016;胡蓉等,2016;刘强虎等,2016)。稳定重矿物具有其独特的稳定性,不同性质的母岩类型可对应不同的重矿物组合类型并且随着碎屑物搬运距离的增加,稳定重矿物的含量会相对增加,因此可以有效地指示水流方向。白云凹陷钻遇古近系恩平组的钻井相对较少,常规的重矿物组合分析的方法对该盆地的物源体系的研究相对局限,而由于沉积盆地中的碎屑锆石稳定性强,且广泛分布,能够较好地保存大量的物源区的原始信息,因此通过碎屑锆石阴极发光(CL)图像内部结构分析以及锆石 U-Pb 定年物源示踪,是对传统的重矿物组合分析是一个较好的方法补充,也为珠江口盆地白云凹陷中深层有限井控区的物源体系分析提供良好的勘探思路(图 7)。

文昌组—恩平组 SQ1~SQ2 沉积时期,珠一坳陷与白云凹陷整体处于分隔状态;SQ3 沉积时期,珠一坳陷与白云凹陷逐渐连通(图 4)。因此,珠一坳陷与白云凹陷整体上有着相似的物源供给体系,将二者的物源体系进行联合分析具有重要的科学意义。由于白云凹陷缺乏钻遇文昌组及恩平组 SQ1~SQ2 的钻井,为更好地开展珠江口盆地古近系的物源体系研究,本文选取了谐和度高于 90% 的珠一坳陷、恩平凹陷及惠州凹陷相关揭示文昌组、恩平组的碎屑锆石 U-Pb 定年数据(其中文昌组年龄 65 个,恩平组年龄 160 个)(刘强虎等,2015;王维等,2015),结合白云凹陷钻遇恩平组的 6 口钻井(BY-1、BY-2、BY-5、BY-6、BY-8、BY-9)的恩平组 SQ3 及珠海组共计 12 件样品(恩平组 SQ3 年龄 293 个,珠海

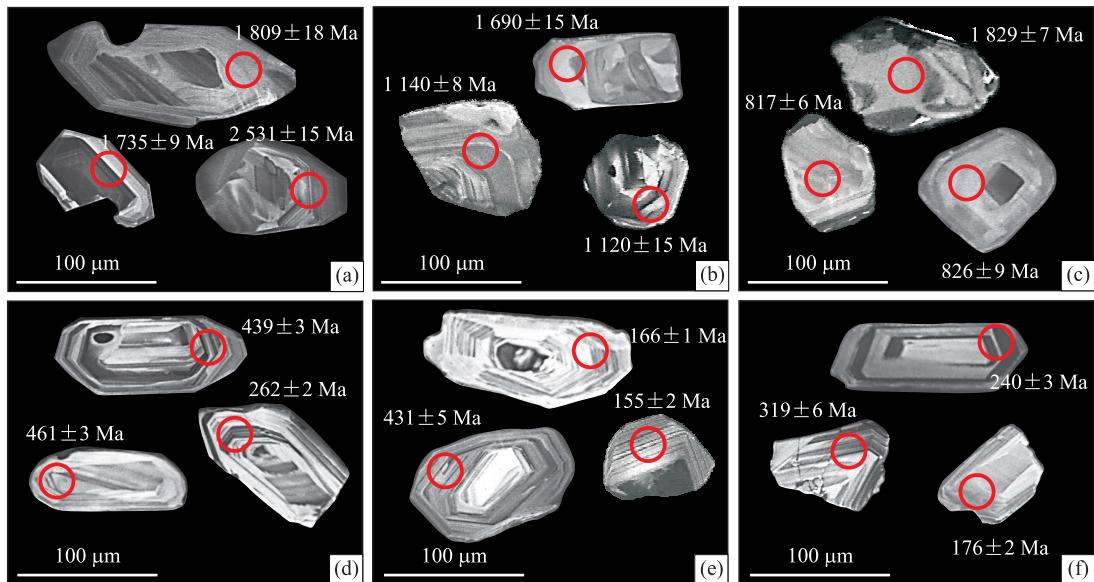


图 7 变质成因及岩浆成因锆石阴极发光图像

Fig.7 The cathodoluminescence images of metamorphic origin and magma genesis zircons

a.BY-1 井, 恩平组 SQ3 delta III, 4 020~4 290 m, 变质成因锆石;b.BY-9 井, 恩平组, 3 159~3 360 m, 变质成因锆石;c.BY-2 井, 恩平组 SQ3 delta II, 4 325~4 755 m, 变质成因锆石;d.BY-1 井, 恩平组 SQ3 delta II, 4 505~4 665 m, 岩浆成因锆石;e.BY-9 井, 恩平组 SQ3 delta II, 4 325~4 755 m, 岩浆成因锆石;f.BY-5 井, 恩平组, 2 244~2 289 m, 岩浆成因锆石

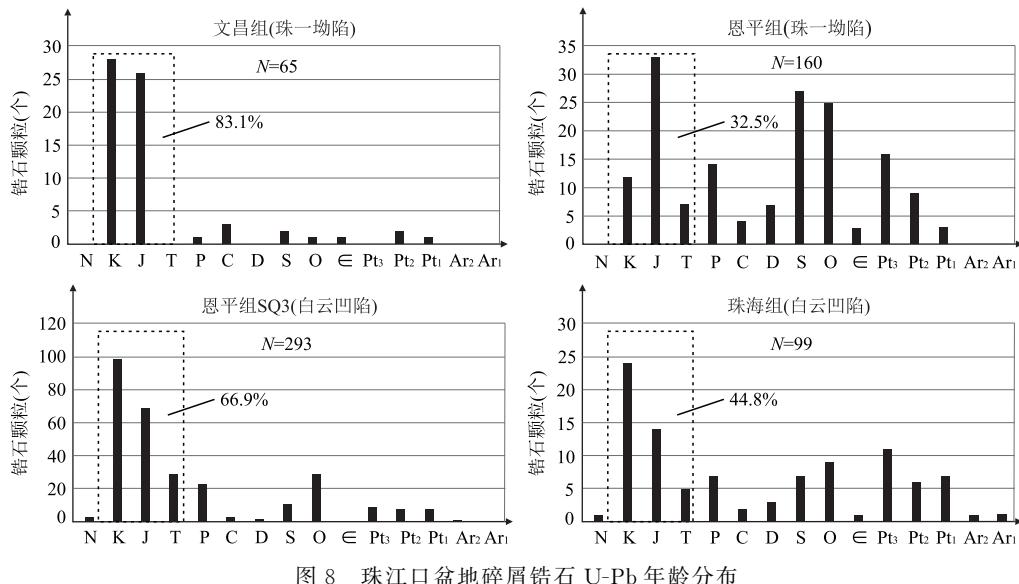


图 8 珠江口盆地碎屑锆石 U-Pb 年龄分布

Fig.8 The U-Pb age dating analysis of clastic zircon in Pearl river Mouth basin

组年龄 99 个)(图 8), 样品点数量相对充足, 具备较好的统计分析基础。本文选取的样品点具有很好的谐和性, 基本都落在谐和线上或者附近, 锆石年龄从太古代到新近纪均有分布(图 8, 图 9)。白云凹陷恩平组 SQ3 及珠海组的碎屑锆石主要可分为两种类型: 一类为前寒武纪—古生代变质成因锆石, 有的呈浑圆状, 有的呈环带状, 但都共同发育白色次生边(图 7a~7c)(吴元保和郑永飞, 2004); 另一类为中

生代岩浆成因锆石, 锆石多为长柱状, 结晶环带比较发育, 其晶形、晶棱磨蚀较弱, 多数呈现岩浆成因特征的岩浆震荡环带(图 7d~7f)。白云凹陷碎屑锆石的样品是在廊坊区域地质调查所完成挑选, 在镜下随机挑选清晰度高、晶型较好的锆石制成样品靶, 并对所制样品靶进行阴极发光(CL)图像分析(图 7)。LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室

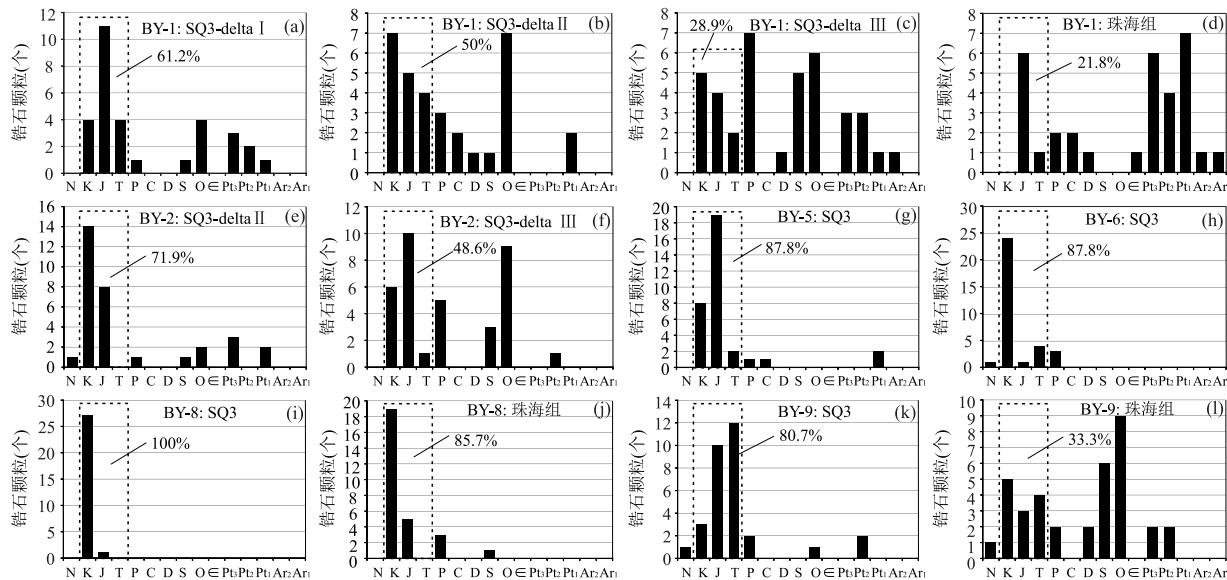


图 9 白云凹陷恩平组 SQ3-珠海组砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄分布

Fig.9 The U-Pb Age distribution of clastic zircon in sandstone of the upper member of Enping Formation and Zhuhai Formation in Baiyun sag

(GPMR)完成;实验测试数据的处理及分析均采用该国家重点实验室提供的ICPMMSDataCal软件完成(Liu *et al.*, 2008, 2010; 王维等, 2015).

### 3.3 碎屑锆石 U-Pb 年龄分析

从珠一坳陷及白云凹陷碎屑锆石 U-Pb 定年结果可看出(图 8),珠一坳陷从文昌组到恩平组,中生代锆石颗粒含量迅速降低(从 83.1% 下降到 32.5%),前寒武—古生代锆石颗粒含量迅速增加;白云凹陷恩平组 SQ3 到珠海组,中生代锆石颗粒含量也逐渐降低(从 66.9% 下降到 44.8%),但中生代锆石颗粒的相对含量比珠一坳陷的含量高.锆石 U-Pb 定年结果反映了珠江口盆地珠一坳陷、白云凹陷从文昌组到珠海组都经历了盆内物源体系到盆外物源体系的转变,但其物源转换的时间存在一定的差异(白云凹陷物源转换时间相对较晚).其中,珠一坳陷文昌组沉积时期主要以盆内中生代火成岩母岩供给为主,到恩平组沉积时期,盆外华南褶皱带远源物源开始进入并发育分布范围较广的浅水辫状河三角洲(王维等, 2015);而白云凹陷文昌组—恩平组 SQ1~SQ2 沉积时期,与珠一坳陷处于分隔状态(以番禺低隆起、东沙隆起相隔)(图 4),到恩平组沉积晚期盆外物源才逐渐越过番禺低隆起,沿西北—南东方向进入白云凹陷,发育大型的辫状河三角洲(柳保军等, 2011; 吴伟中等, 2013; Lin and Shi, 2014; 张功成等, 2014, 2015).因此,本文在此区域物源转换认识的基础上,可进一步根据白云凹陷不同构造

位置(西北部、东南部及西南部)的碎屑锆石 U-Pb 年龄组合特征(恩平组 SQ3 及珠海组)进行分析,明确不同构造部位的物源供给差异.

BY-1 井及 BY-2 井位于白云凹陷西北部(共计 6 个样品; SQ3 有 5 个、珠海组 1 个).BY-1 井钻遇 SQ3 的三期辫状河三角洲(delta I ~ delta III)(图 9a~9d),自下而上中生代火成岩锆石含量由 61.2% ( $241 \pm 3 \sim 68 \pm 1$  Ma) 下降到 50% ( $251 \pm 3 \sim 91 \pm 1$  Ma),再下降到 28.9% ( $252 \pm 4 \sim 116 \pm 1$  Ma),最后下降到珠海组 21.8% ( $252 \pm 3 \sim 141 \pm 3$  Ma),其前寒武纪—古生代碎屑锆石( $3202 \pm 21 \sim 252$  Ma  $\pm 3$  Ma)逐渐增加;BY-2 井也钻遇 SQ3 的两期三角洲砂体(delta II ~ delta III),自下而上中生代碎屑锆石含量由 71.9% ( $231 \pm 2 \sim 93 \pm 2$  Ma) 下降到 48.6% ( $251 \pm 3 \sim 100 \pm 1$  Ma)(图 9e~9f).

BY-5 井及 BY-6 井位于白云凹陷东南部(2 个样品; 每口井各 1 个 SQ3 样品)(图 9g~9h).这两口钻井距离盆外华南褶皱带物源相对较远,其中生代碎屑锆石含量均为 87.8%(分别对应年龄  $240 \pm 3 \sim 106 \pm 2$  Ma、 $250 \pm 3 \sim 79 \pm 1$  Ma),仅含少量的古生代及元古代锆石(分别对应年龄  $2313 \pm 31 \sim 253 \pm 4$  Ma、 $282 \pm 3 \sim 267 \pm 3$  Ma).

BY-8 井及 BY-9 井位于白云凹陷西南部(共计 4 个样品; 每口井 SQ3 及珠海组样品各 1 个)(图 9i~9l).BY-8 井从 SQ3 到珠海组其中生代碎屑锆石含量由 100% ( $171 \pm 2 \sim 100 \pm 2$  Ma) 下降到

85.7%( $251 \pm 3 \sim 97 \pm 1$  Ma),仅含少量的古生代变质成因锆石( $430 \pm 5 \sim 254 \pm 3$  Ma).BY-9井从 SQ3 到珠海组其中生代碎屑锆石含量由 80.7%( $249 \pm 3 \sim 103 \pm 1$  Ma)下降到 33.3%( $239 \pm 3 \sim 98 \pm 1$  Ma)(图 9k~9l);到珠海组沉积时期,BY-9 井的中生代锆石( $239 \pm 3 \sim 98 \pm 1$  Ma)含量迅速下降,元古代及古生代变质成因锆石( $1\,017 \pm 19 \sim 269 \pm 3$  Ma)含量迅速增加。

因此,碎屑锆石 U-Pb 定年结果表明(图 9),SQ3 沉积时期,白云凹陷西北部受益外华南褶皱带远程物源供给影响最大,西南部次之,东南部影响最小;珠海组沉积时期,白云凹陷发生广泛海侵,沉积范围较大,盆内物源供给逐渐减弱,盆外供给逐渐增强。白云凹陷西北部在 SQ3 到珠海组沉积时期,由盆外及盆内两大物源体系混合供源,且随时间推移,盆外华南褶皱带远程物源供给影响不断增强;白云凹陷东南部及西南部 SQ3 沉积时期主要以盆内东沙隆起、南部隆起带及云开低凸起等(中生代火成岩母岩基底)供给为主,轻微受益外物源影响;珠海组沉积时期,锆石年龄反映了白云凹陷西南部的主物源体系发生明显变化,盆外物源供给能力逐渐增强。

## 4 沉积体系发育特征

由于研究区缺乏钻遇恩平组 SQ1 及 SQ2 的相关钻井,因此,本文以 SQ3 层序井震综合标定为基础,基于地震资料明确恩平组 SQ1 与 SQ2 层序的沉积环境,明确研究区内典型地震相及地震属性与沉积相间的匹配关系,有利于增强恩平组三级层序内沉积相刻画的可信性。

### 4.1 单井相分析

本文选取了钻遇恩平组 SQ3 的 4 口钻井进行单井相分析,其中 BY-1 及 BY-2 井位于白云凹陷西北斜坡处,BY-4 井位于白云凹陷东部低凸起北缘,BY-7 井位于白云凹陷南部边缘区带。不同的沉积环境及沉积相特征可以表现出不同的岩性组合及沉积组合样式,并通过岩性的区别反映在测井相上(王俊林,2003).BY-1 及 BY-2 井主要表现为大套的中细砂岩夹薄层泥岩,薄煤层广泛发育,测井曲线主要表现为箱型、钟型及高幅齿状箱型;BY-4 及 BY-7 井主要表现为大套泥岩夹灰质泥岩及薄层粉砂质泥岩,测井曲线主要表现为低幅齿状箱型(图 10).根据各钻井的岩性组合和测井相的差异,笔者在白云凹

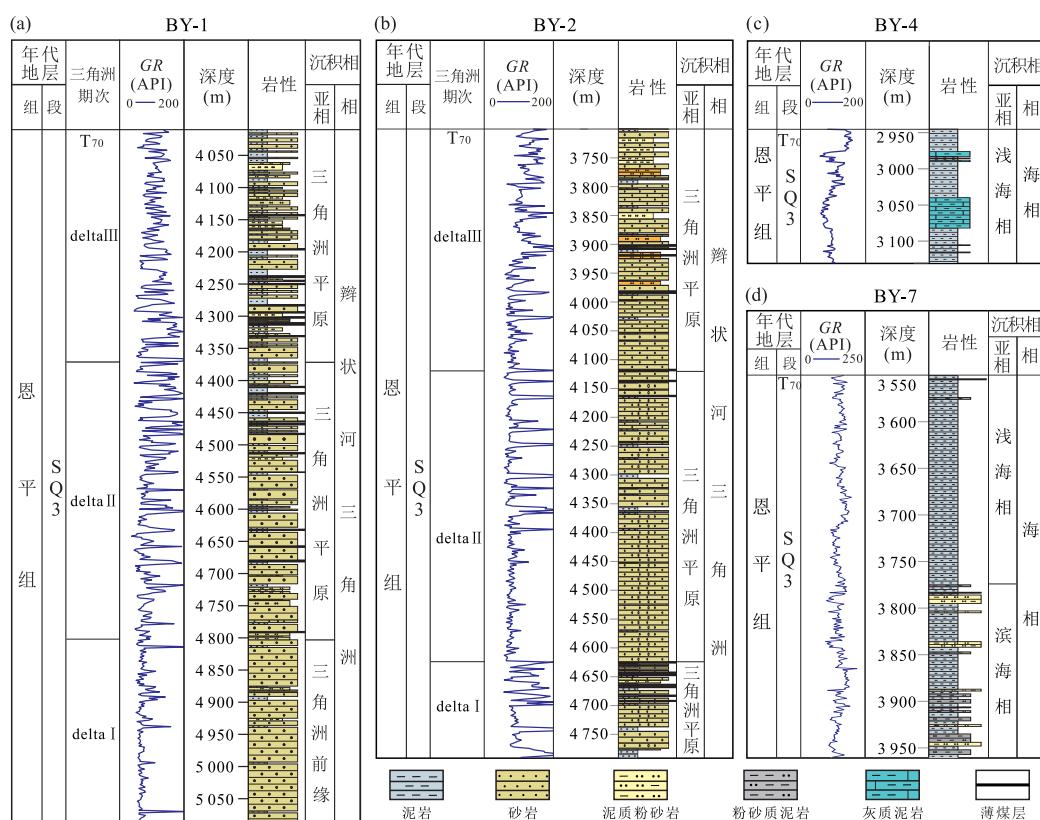


图 10 恩平组 SQ3 单井相分析

Fig.10 The single well phase analysis of the upper member of Enping Formation

沉积时期	地震相类型	发育位置	沉积相类型	地震反射结构示意	典型实例
SQ2	中低频连续强振幅地震相	发育于北部缓坡带底部低隆起之上	滩坝	连续强振幅反射	
SQ2	中低频断续强振幅地震相	发育于北部缓坡带中间高部位之上	滩坝	短轴透镜状上超	
SQ1	双向上超水道充填地震相	发育于北部缓坡带东侧,受地貌控制	辫状河三角洲	多期水道充填	
SQ1	双向上超水道充填地震相	发育于北部缓坡带西侧,受断层及地貌联合控制		双向水道充填	
SQ1	楔状杂乱前积反射地震相	主要发育于西南部陡坡构造转换带,受古地貌及断层控制	扇三角洲	楔状杂乱前积反射	

图 11 恩平组 SQ1~SQ2 地震相类型及其对应沉积相

Fig.11 Seismic facies types and their corresponding sedimentary facies of the middle and lower segment of Enping Formation in Baiyun sag

位置见图 4a, 4b

陷恩三段可识别出辫状河三角洲平原、三角洲前缘及滨浅海等多种沉积亚相。其中,辫状河三角洲平原亚相的岩性组合主要表现为大套砂岩夹泥岩,薄煤层发育,常见向上变细的正粒序;GR 测井曲线以高幅的齿状箱型为主,以及箱型和钟型组合曲线(图 10a, 10b)。辫状河三角洲前缘亚相的岩性组合主要表现为大套砂岩夹薄层灰色、灰绿色泥岩,不含煤层,GR 测井曲线以齿状箱型为主(图 10a, 10b)。滨浅海亚相的岩性组合主要表现为大套泥岩夹灰质泥岩、粉砂质泥岩,GR 测井曲线以齿状箱型为主,在灰质泥岩和粉砂质泥岩薄层处为指状(图 10c, 10d)。

#### 4.2 沉积相分析

在恩平组沉积期主力物源供给方向示踪分析下,结合古地貌沟槽与沉积卸载区空间配置(图 4),通过地震相特征识别,重点解剖了研究区发育的扇三角洲、滩坝及辫状河三角洲等三种沉积相类型(图 11, 图 12)。

**4.2.1 扇三角洲** 扇三角洲是指从邻近山区直接推进到稳定水体中的扇体,往往发育在凹陷边缘同沉积大断裂附近(单敬福等,2013)。研究区恩平组 SQ1~SQ2 沉积时期,南部陡坡带同生控凹断裂活

动强烈,云开低凸起及南部隆起带短程供源,沿构造转换带发育一系列受沟谷及断裂联合控制的近源快速堆积而成的扇三角洲。该扇三角洲在地震剖面上整体呈中一弱振幅楔状杂乱前积反射(图 11-GG'),扇体展布范围约  $130 \text{ km}^2$ ,内部亚相间存在明显的地震相差异,即地震剖面上扇三角洲平原亚相呈现为低频杂乱反射或空白反射;扇三角洲前缘具有中一强振幅中一高连续前积反射结构,局部可见蠕虫状杂乱发射;前扇三角洲呈中一弱振幅连续平行反射。恩平组 SQ3 沉积时期,整个凹陷断裂活动减弱,南部断裂对盆地的控制作用减小,盆地整体向断坳阶段转化;且此时云开低凸起逐渐淹没水下,开始接受沉积,从 SQ1~SQ2 时期的物源区转变为沉积区,由南部隆起带单独供源,碎屑物供给数量大幅减少,因此南部陡坡带扇三角洲发育规模也相对较小,扇体规模  $20 \sim 30 \text{ km}^2$ 。由于白云凹陷南部陡坡带距离凹陷烃源岩最大厚度中心较近,陡坡带扇三角洲砂体也多发育于烃源岩的边缘线之内,油势较低,因此,陡坡带的圈闭成藏几率较高。

**4.2.2 滩坝** 国内外以滩坝砂体为储集层的油气藏分布广泛,如中国渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷

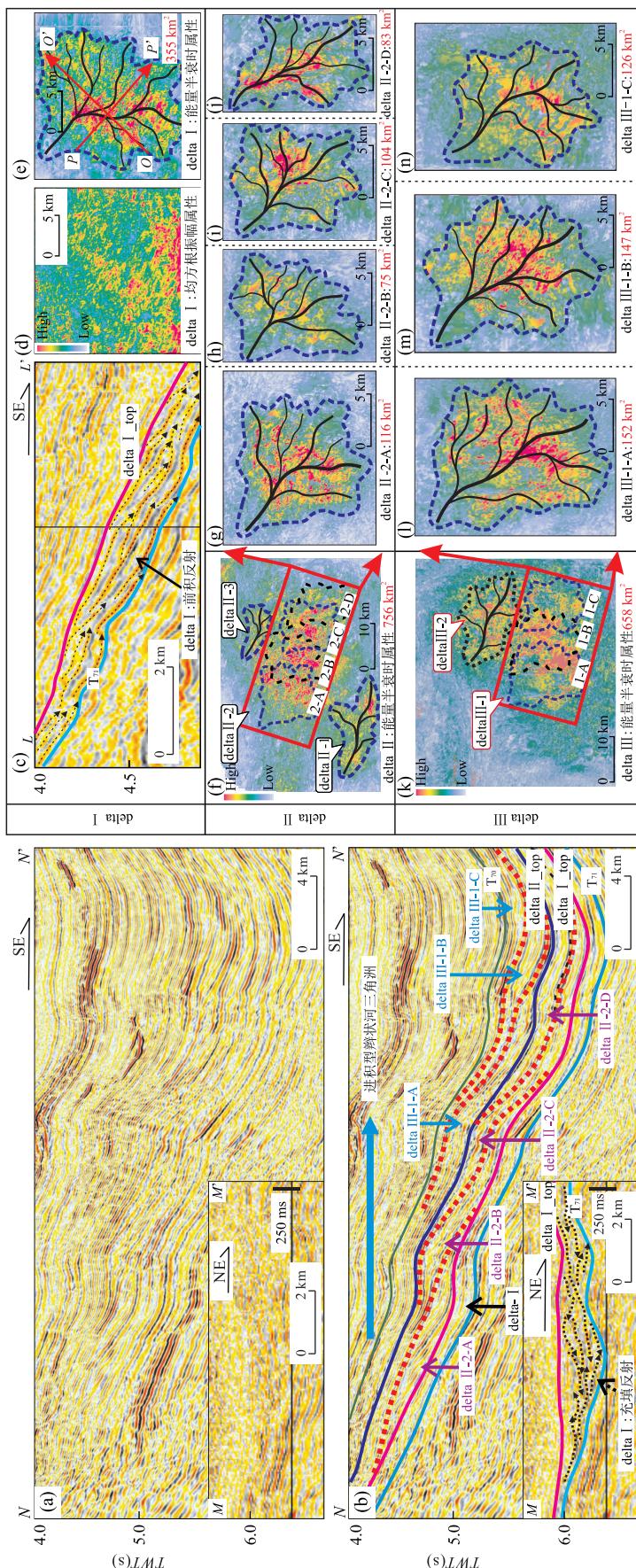


Fig. 12 The seismic attributes analysis and the characteristics of progradational reflections of the three Phase of the upper member of Enping Formation  
位置见图4c

图 12 恩平组 SQ3 三期三角洲前积反射特征及地震属性分析

沙二段及东营凹陷沙四段滨浅湖滩坝沉积体系、澳大利亚西北大陆架 Bonaparte 盆地中晚侏罗世三角洲侧缘滩坝等(冯兴雷,2008;毛振强,2012;姜在兴等,2015),滩坝砂体已成为油气勘探和开发的重要领域。盆地构造演化阶段的宏观结构与古地貌特征、物源体系的分布、沉积物供给量、古气候、海(湖)平面的变化、水动力条件(波浪、沿岸流、风暴)的强度等因素联合控制着滩坝的形成与分布(林会喜等,2010)。恩平组 SQ1~SQ2 沉积时期,湖平面相对较低,白云凹陷北部缓坡带两侧的近源辫状河三角洲砂体受湖水波浪及沿岸流等水动力改造,在北部缓坡带中央稳定平台区上形成规模较大的滩坝砂体(图 11-JJ',图 11-KK')。恩平组 SQ3 沉积时期,由于东南海水影响不断增强,盆内水体分布范围增大,云开低凸起及番禺低隆起局部处于水下,开始接受沉积,主要发育规模较大的辫状河三角洲前缘前积复合砂体,在凹陷周缘水下低隆起零散分布一些规模较小的滩坝砂体。在平面上,白云凹陷恩平组滩坝砂呈卵型或条带状平行于盆地岸线分布于三角洲侧缘或水下低隆起之上,属于三角洲侧缘及水下低隆起滩坝沉积模式(朱筱敏等,1994)。单个滩坝砂体长 5~12 km,宽 2~4 km,连片面积规模较大,约 30~80 km<sup>2</sup>;在剖面上,滩坝砂体表现为短轴透镜状相互叠置或呈中一低频强振幅反射的条带状分布,砂体厚度相对较大,累积砂体厚度高达 130~200 m(图 11-JJ',图 11-KK'),且由于白云凹陷恩平组滩坝砂体具有近油源(煤系烃源岩和泥质烃源岩)、生储盖组合配置较好的利于油气富集的地质条件(张功成等,2015),因此可作为白云凹陷中深层恩平组岩性地层油气勘探目标之一。

#### 4.2.3 辩状河三角洲

辩状河三角洲属稳定水系供应下的沉积体系,研究区辩状河三角洲主要发育于构造相对稳定的北部缓坡带。恩平组不同沉积时期,其层序界面下切谷(古水道)的发育程度差异较大,这主要与边界断裂的间断式活动导致可容纳空间的重新分配有关,而下切谷发育的位置又与物源区的供给速率、物源规模的大小有关(李成海等,2014)。

恩平组 SQ1~SQ2 沉积时期,南部控凹断裂活动较强,物源区地形起伏较大,北部缓坡带整体呈两侧低、中间高的分布格局,缓坡带两侧低洼带容易汇聚水系,主要发育充填结构典型的辩状河三角洲(图 11-HH',图 11-II'),沉积物以番禺低隆起近源供给为主。在垂直水道的地震剖面上可清晰识别出辩状河三角洲前缘水下分流河道双向上超充填的典型

反射结构,水道宽约 5 km,下切深度 150~200 m,其底部 T<sub>80</sub> 大型不整合界面可见明显冲刷侵蚀构造(图 11-HH');在白云凹陷东北缘发育的水道充填复合扇体的剖面上可识别出多期的水道砂体相互叠置(图 11-II'),各期水道砂体间的叠置关系清楚(每期水道宽 3~6 km,下切深度 50~100 m),可由此判断出该三角洲水道的摆动迁移规律。而恩平组 SQ3 沉积时期,由于断裂活动减弱,盆地沉积范围扩大,云开低凸起及局部番禺低隆起开始接受沉积,近源水系减少,主要发育由盆外大型水系供源的辩状河三角洲,此时下切谷基本不发育。白云凹陷恩平组低位体系域河道充填砂体由于盆地长期稳定沉降,后期发生广泛海侵,有利于形成大套连续、分异清楚的砂泥岩交互沉积,凹陷北部斜坡带发育的辩状河三角洲砂体上部均覆盖一套富泥弱振幅反射(图 11-II');由于基准面上升,侵蚀阶地后退,有利于形成地层尖灭超覆;由于水流改道造成砂岩顶变与砂岩渗透性差异,容易形成河道砂体侧向尖灭;且沟槽发育位置靠近凹陷深凹区,处于油气运移的优势通道上,构成了较好的油源供给条件及封盖条件,因此有利于形成大型的岩性地层圈闭。

恩平组 SQ3 沉积时期,由于沉积范围扩大、古地貌相对平缓,沉积区逐渐覆盖到番禺低隆起上,具备了大型水系发育的条件,古珠江携带盆外华南褶皱带及番禺低隆起混合母岩碎屑沉积物越过番禺低隆起进入白云凹陷,受地形地貌、断裂体系及坡折带联合控制发育 NW-SE 向展布的大型辩状河三角洲,三角洲前缘前积反射典型(图 12),三角洲平原可见薄煤层广泛发育(图 10)。从地震剖面上可识别出 3 大期叠置关系清楚、前积反射典型的三角洲前缘砂体(图 12),沉积体形态在地震剖面上中间厚向两侧逐渐减薄的特点。 $\delta$ I 以高角度一斜交型前积反射为主,顶积层及底积层均不发育,沉积时河流水体能量较强,沉积地形坡度较陡( $3.0^\circ \sim 4.5^\circ$ ),前积角度较大( $7.0^\circ \sim 11.0^\circ$ ),前积内部同相轴不断向凹陷中心进积,向凹陷中心延伸约 15~20 km; $\delta$ II 主要发育 S-斜交复合型前积反射,顶积层不发育,地形坡度与  $\delta$ I 相比相对较陡( $5.0^\circ \sim 8.0^\circ$ ),但前积角度与  $\delta$ I 相比相对较小( $4.0^\circ \sim 8.0^\circ$ ),三角洲的发育规模增大,从剖面中可识别出 4 小期呈楔状叠置、不断进积的三角洲前缘砂体,向凹陷中心延伸约 30~50 km; $\delta$ III 主要发育 S 型前积反射,地形坡度( $2.0^\circ \sim 3.0^\circ$ )及前积角度( $3.0^\circ \sim 6.0^\circ$ )向凹陷中心逐渐减小,三角洲发育规模与  $\delta$ II

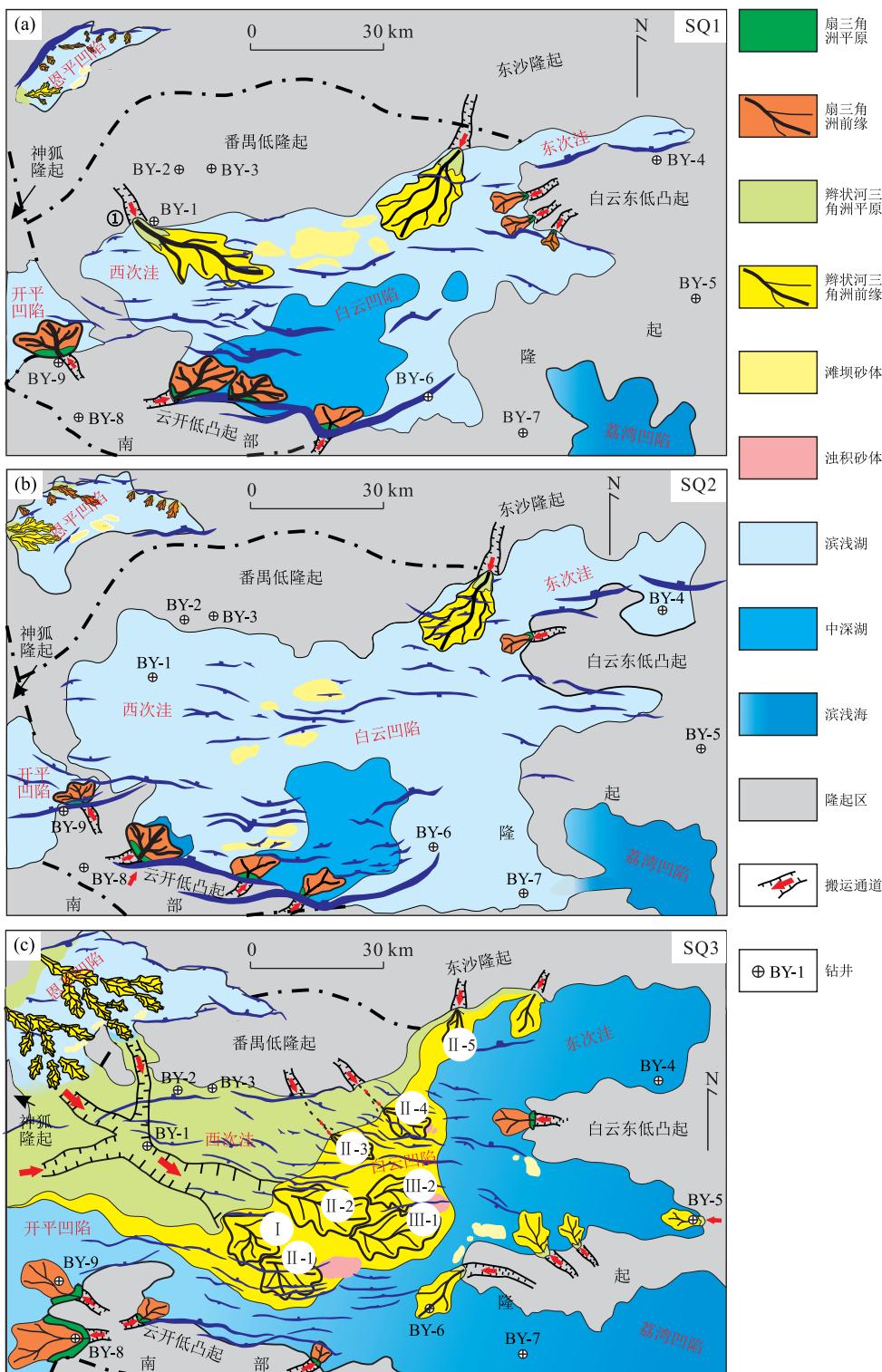


图 13 白云凹陷恩平组沉积相

Fig.13 The sedimentary facies of Enping Formation in Baiyun sag

相比有所减小,从剖面中可识别出3小期三角洲前缘砂体,向凹陷中心延伸约25~40 km,此时三角洲已进入凹陷中心,河流水体能量减弱。

由于三角洲前缘砂体内部的振幅、频率、连续性等地震参数空间变化较快,运用传统的振幅类、频率

类地震属性很难有效地刻画砂体的平面展布形态,目前这方面的研究仍相对较少。针对恩平组SQ3的3期三角洲进行了多种地震属性分析对比,发现能量半衰时属性在限定的单期次的三角洲前积反射顶、底界面时窗内,前积主体部位与能量半衰时属性

的吻合性比均方根振幅等属性好(张营革,2013;曾智伟等,2017),在能量半衰时属性分析平面图中异常高值区为前积反射主体部位,主河道整体明显呈现高值异常,地震剖面上呈蠕虫状反射(图 12e~12n),而均方根振幅属性显示则较为分散(图 12d)。此外,通过将不同小期砂体进行单独刻画的效果远比整个复合体刻画的效果好。例如 delta II-2 及 delta III-1,复合体的属性刻画使得各小期砂体的异常高值相互叠置,难以识别出精确的尖灭边界(图 12f、图 12k);而将各小期的砂体的顶底进行识别追踪后单独提取相对应时窗的能量半衰时属性,则能更好地识别扇体的边界及展布形态(图 12g~12j、图 12l~12n)。

## 5 恩平组沉积充填演化规律

物源体系与沉积充填格局的变化受控于构造活动的强度(刘俊等,2006),白云凹陷恩平组不同沉积时期的物源体系转换、沉积充填演化与凹陷不同沉积阶段的同沉积控凹断裂的活动及古地貌特征密切相关。通过有限井控下的沉积体系与地震属性分析,可有效刻画白云凹陷的沉积相平面分布(图 13);而本文中的恩平凹陷沉积相展布特征则主要在前人研究基础上进行修改补充(刘强虎等,2015)。

恩平组 SQ1~SQ2 沉积时期,白云凹陷与北部珠一坳陷、东南部荔湾凹陷基本处于分隔状态(图 4a, 4b),沉积环境主要以陆相断陷湖盆为主,沉积范围相对较小,主要以凹陷周缘隆起中生代火成岩母岩提供的短程分散物源体系供给为主。南部陡坡带同生控凹断裂活动强烈,由云开低凸起及南部隆起带提供的短程物源,受构造转换带与古沟谷联合控制在同生断裂下降盘快速堆积形成扇三角洲;白云凹陷北部缓坡带整体呈两侧低、中间高的分布格局,缓坡带两侧低洼带由番禺低隆起短程供源,发育充填结构典型的辫状河三角洲,三角洲砂体受湖水波浪等水动力改造,于北部缓坡带中央稳定平台上形成规模较大的滩坝砂体,分选磨圆及储集物性相对较好(图 13a, 13b)。

恩平组 SQ3 沉积时期,南部陡坡带同生控凹断裂活动减弱,物源区由于准平原化地形变缓,沉积范围扩大,白云凹陷东南部与荔湾凹陷逐渐连通,沉积环境逐渐转变为半封闭的海湾;海水覆盖到番禺低隆起上,凹陷西北部与珠一坳陷逐渐连通(图 4c),盆外大型水系携带的沉积物开始进入白云凹陷沉

积,以盆外华南褶皱带前寒武纪—古生代变质岩与盆内番禺低隆起中生代火成岩母岩的混合物源体系供给为主,沿北西—南东方向发育 3 期前积反射典型并不断向盆地中心进积的辫状河三角洲前积楔状砂体,辫状河三角洲前缘储集体与 SQ1~SQ2 的湖相泥质烃源岩呈垂向接触关系,与白云凹陷恩平组 SQ3 的三角洲平原煤系烃源岩呈侧向接触,油源丰富(吴伟中等,2013;张功成等,2014, 2015);砂体发育的规模较大,内部尖灭点清晰,且砂体经过较长距离的搬运,结构成熟度及成分成熟度均较高,储集物性较好,有利于形成大型的三角洲前缘上倾尖灭油气藏(图 13c)。因此对于白云凹陷古近系恩平组的油气勘探来说,盆外长距离物源供给的三角洲储集砂体应作为下一步优质储层预测及评价的重要目标。

## 6 结论

(1) 白云凹陷在古近系恩平组沉积时期,凹陷周缘隆起与珠江口盆地北侧华南褶皱带两大物源供给体系的转换特征非常典型,碎屑锆石 U-Pb 定年物源示踪及砂体识别追踪研究显示,白云凹陷恩平组 SQ1~SQ2 时期陆相湖盆特征明显,以凹陷周缘低凸起及隆起带近源水系供给为主;恩平组 SQ3—珠海组沉积时期海相特征逐渐增强,盆外华南褶皱带远程水系物源供给强度不断增大,与番禺低隆起混合供源,但盆外物源供给占绝对优势。

(2) 白云凹陷恩平组不同沉积时期的物源体系转换、沉积充填演化与凹陷不同沉积阶段的同沉积控凹断裂的活动及古地貌特征密切相关;恩平组 SQ1~SQ2 沉积时期,南部陡坡带同沉积断裂活动强烈,凹陷四周物源区地形起伏较大,以短程分散水系供给为主,主要发育一系列中小型的扇三角洲、充填结构典型的辫状河三角洲及上倾尖灭明显的滩坝砂体;恩平组 SQ3 沉积时期,断裂活动强度减弱,凹陷四周物源区普遍遭受准平原化,主要物源供给方式发生转换,以盆外华南物源区远程水系的集中供给为主,发育覆盖整个凹陷的、呈北西—南东向不断向盆地中心进积的 3 大期辫状河三角洲前积楔状体,生储盖组合条件较好,是下一步优质储层预测及评价的重要目标。

## References

- Benyon, C., Leier, A. L., Leckie, D. A., et al., 2016. Sandstone Provenance and Insights into the Paleogeography of the

- McMurray Formation from Detrital Zircon Geochronology, Athabasca Oil Sands, Canada. *AAPG Bulletin*, 100(2): 269–287.
- Bruand, E., Storey, C., Fowler, M., 2016. An Apatite for Progress: Inclusion in Zircon and Titanite Constrain Petrogenesis and Provenance. *Geology*, 44(2): 91–94.
- Chen, L., Pang, X., Liu, J., et al., 2015. High Quality Deep-Water Gravity Flow Sandstone Reservoirs in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 42(4): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Du, J.H., Yi, S.W., Lu, X.J., et al., 2004. Oil and Gas Distribution of Oil-Enriched Depression Characterized with “Reciprocity”. *China Petroleum Exploration*, 9(1): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X.L., 2008. The Research of Microfacies and Genetic Mechanisms of Beach and Bar Sandy Body in the Second Member of Shahejie Formation, Dawangbei Sag in Chezhen Depression (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Hu, R., Li, S.Q., Wang, W., et al., 2016. Source Characteristics of Tillite the Nantuo Formation in Three Gorges, Northern Yangtze Block: Evidences from Zircon Ages and Geochemical Composition. *Earth Science*, 41(10): 1630–1654.
- Jiang, H.J., Hu, M.Y., Hu, Z.G., et al., 2011. Sedimentary Environment of Paleogene in Xihu Sag: Microfossil as the Main Foundation. *Lithologic Reservoirs*, 23(1): 74–78 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z.X., Wang, J.H., Zhang, Y.F., 2015. Advances in Beach-Bar Research: A Review. *Journal of Palaeogeography*, 17(4): 427–440 (in Chinese with English abstract).
- Lai, W.C., Song, Z.Q., Zhou, X.H., et al., 2010. Model of Dynamic Source Controlling Sand. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 763–768 (in Chinese with English abstract).
- Li, C.H., Wang, J.H., Liu, B.J., et al., 2014. Types and Distribution of the Paleogene Sedimentary Facies in Baiyun Depression of Pearl River Mouth Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(6): 1162–1170 (in Chinese with English abstract).
- Li, P.L., Liang, H.X., Dai, Y.D., 1998. Exploration Perspective of Basement Hydrocarbon Accumulations in the Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 12(6): 361–369 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Zheng, R.C., Zhu, G.J., et al., 2014. Deposition and Diagenesis of the Miocene Deep-Water Limestones of Zhujiang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 301–311 (in Chinese with English abstract).
- Lin, H.M., Shi, H.S., 2014. Hydrocarbon Accumulation Conditions and Exploration Direction of Baiyun-Liwan Deep Water Areas in the Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Industry*, 1(2): 150–158.
- Lin, H.X., Deng, H.W., Qin, Y.Q., et al., 2010. Control of Sequence Stratigraphic Evolution on the Distribution and Hydrocarbon Accumulation of Beach and Bar Reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 680–689 (in Chinese with English abstract).
- Liu, A., Wu, S.M., 2011. A Discussion on the Formation of Granite in the Pearl River Mouth Basin and Its Implication to Hydrocarbon Resource. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 141–148 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B.J., Pang, X., Yan, C.Z., et al., 2011. An Analysis of Depositional Evolution and Its Controls in Baiyun Deep-Water Area, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 23(1): 19–23 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Yang, H., Shen, H., et al., 2006. The Research on Control Action of Sedimentary System by Tectonism. *China Mining Magazine*, 15(11): 98–101 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.H., Zhu, H.T., Shu, Y., et al., 2015. Provenance Systems and Their Control on the Beach-Bar of Paleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(3): 286–299 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.H., Zhu, H.T., Yang, X.H., et al., 2013. Quantitative Recognition of Seismic Sequence Stratigraphic Units in Wenchang Formation, Paleogene, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(3): 1076–1082 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.H., Zhu, X.M., Li, S.L., et al., 2016. Pre-Paleogene Bedrock Distribution and Source-to-Sink System Analysis in the Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 41(11): 1935–1949 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W.Q., Wu, W., Lin, C.S., et al., 2015. Continental Shelf Margin Delta Front Sandstone Reservoirs in the Zhujiang Formation, Northern Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(3): 56–62 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43.

- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571.
- Mao, Z.Q., 2012. The Beach-Bar Sand Body Causes and Development of Low-Permeability Reservoir Counter Measures in Dongying Depression (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Mi, L.J., Zhang, G.C., Shen, H.L., et al., 2008. Eocene-Lower Oligocene Sedimentation Characteristics of Baiyun Sag in the Deep Water Area of Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 29(1): 29–34 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, B., Zhang, C.M., Li, S.H., et al., 2015. Study of the Configuration of Two Types of Submarine Channels in the Baiyun Sag. *Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition)*, 37(2): 65–72 (in Chinese with English abstract).
- Shan, J.F., Ge, D.W., Le, J.H., et al., 2013. Framework of Sequence Stratigraphy, Sedimentary System and Evolution of Southeastern Songliao Basin: An Example from Yingcheng Formation in Lishu Fault Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 67–76 (in Chinese with English abstract).
- Shi, H.S., Yu, S.M., Mei, L.F., et al., 2009. Features of Paleogene Episodic Rifting in Huizhou Fault Depression in the Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Industry*, 29(1): 35–37 (in Chinese with English abstract).
- Vail, P.R., 1983. Seismic Stratigraphy and the Evaluation of Depositional Sequences Facies. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 73(1): 278.
- Wang, J.H., Liu, L.H., Chen, S.H., et al., 2011. Tectonic-Sedimentary Responses to the Second Episode of the Zhu-Qiong Movement in the Enping Depression, Pearl River Mouth Basin and Its Regional Tectonic Significance. *Acta Petrolei Sinica*, 32(4): 588–595 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.L., 2003. Application of Electrograph Curve Morphology in Sedimentary Facies Analysis. *Coal Technology*, 22(9): 109–110 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Ye, J.R., Yang, X.H., et al., 2015. Sediment Provenance and Depositional Response to Multistage Rifting, Paleogene, Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 40(6): 1061–1071 (in Chinese with English abstract).
- Wu, W.Z., Xia, B., Jiang, Z.L., et al., 2013. Sedimentary Evolution and Hydrocarbon Accumulation in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 33(1): 25–33 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genetic Mineralogy Research of Zircon and Its Constraint on Explanation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1588–1604 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Z.Y., Li, Y.P., Sun, Z., et al., 2015. A Basin Modeling Study on the Coupling of Fault Activity and Hydrocarbon Accumulation in the Baiyun Sag. *Journal of Tropical Oceanography*, 34(1): 30–41 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C.G., 2013. Controlling Sand Principle of Source-Sink Coupling in Time and Space in Continental Rift Basins: Basic Idea, Conceptual Systems and Controlling Sand Models. *China Offshore Oil and Gas*, 25(4): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C.G., Zhou, X.H., Deng, J.H., et al., 2010. Geological Significance in Discovering Large Jinzhou 25-1 Light Oilfield in Liaoxi Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 22(1): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C.Q., He, T.X., Weng, S.J., et al., 1988. Regional Geology of Guangdong Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, R.C., Li, J.B., Fan, A.P., et al., 2013. Research Progress and Development Tendency of Provenance Analysis on Terrigenous Sedimentary Rocks. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 99–107 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J.H., Wang, L.J., Zhou, X.M., et al., 2006. Compositions and Formation History of the Basement Metamorphic Rocks in Northeastern Guangdong Province. *Earth Science*, 31(1): 38–48 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z.W., Yang, X.H., Shu, Y., et al., 2014. Development Characteristics and Tectonic-Sedimentary Response of Gluteneite Bodies of Wenchang Formation in Northern Steep Slope, Enping Sag. *Geological Science and Technology Information*, 33(6): 60–68 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z.W., Yang, X.H., Shu, Y., et al., 2015. Structure Paleo-Geomorphology Characteristics and Sand Bodies Distribution Regularities of Paleogene Wenchang Formation in Enping Sag: Under the Conditions of Lack of Drilling Data to Predict and Evaluate the Reservoir Sand Bodies. *Geoscience*, 29(4): 804–815 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z.W., Yang, X.H., Zhu, H.T., et al., 2017. Development

- Characteristics and Significance of Large Delta of Upper Enping Formation, Baiyun Sag. *Earth Science*, 42(1): 78—92 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.C., Wang, Q., Miao, S., et al., 2014. The Duality Distribution Pattern of Marine-Continental Transitional Hydrocarbon Source Rocks: A Case Study from Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(9): 1329—1308 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.C., Chen, Y., Yang, H.Z., et al., 2015. Stratigraphic-Lithologic Traps in the Enping Formation: A New Exploration Field in Deep Water Area of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 27(6): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.G., 2013. The Application of Energy Half-Time Attribute to Turbidite Reservoir Prediction. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 52(6): 662—668 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y.J., Yang, X.H., Zhu, H.T., et al., 2017. Distinct Sedimentary Backgrounds and Hydrocarbon Characteristics of Paleogene Enping Formation, Baiyun Sag. *Geological Science and Technology Information*, 36(3): 156—163 (in Chinese).
- Zhu, H.T., Yang, X.H., Liu, K.Y., et al., 2014. Seismic-Based Sediment Provenance Analysis in Continental Lacustrine Rift Basin: An Example from the Bohai Bay Basin, China. *AAPG Bulletin*, 98(10): 1995—2018.
- Zhu, X.M., Xin, Q.L., Zhang, J.R., 1994. Sedimentary Characteristic and Models of the Beach-Bar Reservoirs in Faulted down Lacustrine Basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(2): 20—28 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈亮,庞雄,刘军,等,2015.珠江口盆地白云凹陷深水重力流优质砂岩储集层特征及识别方法.石油勘探与开发,42(4): 1—9.
- 杜金虎,易士威,卢学军,等,2004.试论富油凹陷油气分布的“互补性”特征.中国石油勘探,9(1): 15—22.
- 冯兴雷,2008.车镇大王北洼陷沙二段滩坝砂体沉积微相及成因模式研究(学位论文).武汉:中国地质大学.
- 胡蓉,李双庆,王伟,等,2016.扬子北部三峡地区南沱组冰碛岩的物源特征:锆石年龄和地球化学证据.地球科学,41(10): 1630—1654.
- 蒋海军,胡明毅,胡忠贵,等,2011.西湖凹陷古近系沉积环境分析——以微体古生物化石为主要依据.岩性油气藏,23(1): 74—78.
- 姜在兴,王俊辉,张元福,2015.滩坝沉积研究进展综述.古地理学报,17(4): 427—440.
- 赖维成,宋章强,周心怀,等,2010.“动态物源”控砂模式.石油勘探与开发,37(6): 763—768.
- 李成海,王家豪,柳保军,等,2014.珠江口盆地白云凹陷古近系沉积相类型.沉积学报,32(6): 1162—1170.
- 李平鲁,梁慧娴,戴一丁,1998.珠江口盆地基岩油气藏远景探讨.中国海上油气,12(6): 361—369.
- 李云,郑荣才,朱国金,等,2014.珠江口盆地白云凹陷中新统珠江组深水灰岩沉积—成岩作用特征.地学前缘,21(2): 301—311.
- 林会喜,邓宏文,秦雁群,等,2010.层序演化对滩坝储集层成藏要素与分布的控制作用.石油勘探与开发,37(6): 680—689.
- 刘安,吴世敏,2011.珠江口盆地花岗岩成因探讨及其对油气资源指示意义.地学前缘,18(1): 141—148.
- 柳保军,庞雄,颜承志,等,2011.珠江口盆地白云深水区沉积充填演化及控制因素分析.中国海上油气,23(1): 19—23.
- 刘俊,杨洪,沈华,等,2006.构造对沉积的控制作用.中国矿业,15(11): 98—101.
- 刘强虎,朱红涛,舒誉,等,2015.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.石油学报,36(3): 286—299.
- 刘强虎,朱红涛,杨香华,等,2013.珠江口盆地恩平凹陷古近系文昌组地震层序地层单元定量识别.中南大学学报(自然科学版),44(3): 1076—1082.
- 刘强虎,朱筱敏,李顺利,等,2016.沙垒田凸起前古近系基岩分布及源—汇过程.地球科学,41(11): 1935—1949.
- 刘惟庆,吴伟,林畅松,等,2015.白云凹陷北坡珠江组陆架边缘三角洲前缘砂体储层特征及控制因素.沉积与特提斯地质,35(3): 56—62.
- 毛振强,2012.滩坝砂低渗透储层成因及开发对策研究——以东营凹陷为例(学位论文).成都:成都理工大学.
- 米立军,张功成,沈怀磊,等,2008.珠江口盆地深水区白云凹陷始新统一下渐新统沉积特征.石油学报,29(1): 29—34.
- 乔博,张昌民,李少华,等,2015.白云凹陷水道几何形态研究.西南石油大学学报(自然科学版),37(2): 65—72.
- 单敬福,葛黛薇,乐江华,等,2013.松辽盆地东南缘层序地层与沉积体系配置及演化——以梨树断陷西北部营城组地层为例.沉积学报,31(1): 67—76.
- 施和生,于水明,梅廉夫,等,2009.珠江口盆地惠州凹陷古近纪幕式裂陷特征.天然气工业,29(1): 35—37.
- 王家豪,刘丽华,陈胜红,等,2011.珠江口盆地恩平凹陷珠江运动二幕的构造—沉积响应及区域构造意义.石油学报,32(4): 588—595.
- 王俊林,2003.电测井曲线形态在判断沉积相方面的应用.煤炭技术,22(9): 109—110.
- 王维,叶加仁,杨香华,等,2015.珠江口盆地惠州凹陷古近纪多幕裂陷旋回的沉积物源响应.地球科学,40(6):

- 1061—1071.
- 吴伟中,夏斌,姜正龙,等,2013.珠江口盆地白云凹陷沉积演化模式与油气成藏关系探讨.沉积与特提斯地质,33(1): 25—33.
- 吴元保,郑永飞,2004.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约.科学通报,49(16): 1588—1604.
- 谢志远,李元平,孙珍,等,2015.白云凹陷断裂活动与油气成藏耦合关系的盆地模拟研究.热带海洋学报,34(1): 30—41.
- 徐长贵,2013.陆相断陷盆地源—汇时空耦合控砂原理:基本思想、概念体系及控砂模式.中国海上油气,25(4): 1—11.
- 徐长贵,周心怀,邓津辉,等,2010.辽西凹陷锦州 25-1 大型轻质油田发现的地质意义.中国海上油气,22(1): 7—11.
- 杨超群,贺同兴,翁世勤,等,1988.广东省区域地质志.北京:地质出版社.
- 杨仁超,李进步,樊爱萍,等,2013.陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势.沉积学报,31(1): 99—107.
- 于津海,王丽娟,周新民,等,2006.粤东北基底变质岩的组成和形成时代.地球科学,31(1): 38—48.
- 曾智伟,杨香华,舒誉,等,2014.恩平凹陷北部陡坡带文昌组砂砾岩体发育特征及构造沉积响应.地质科技情报,33(6): 60—68.
- 曾智伟,杨香华,舒誉,等,2015.恩平凹陷古近系文昌组构造古地貌特征及砂体展布规律.现代地质,29(4): 804—815.
- 曾智伟,杨香华,朱红涛,等,2017.白云凹陷恩平组沉积晚期大型三角洲发育特征及其意义.地球科学,42(1): 78—92.
- 张功成,王琪,苗顺,等,2014.中国近海海陆过渡相烃源岩二元分布模式——以珠江口盆地白云凹陷为例.天然气地球科学,25(9): 1329—1308.
- 张功成,陈莹,杨海长,等,2015.恩平组岩性地层圈闭——白云凹陷深水区天然气勘探新领域.中国海上油气,27(6): 1—9.
- 张营革,2013.能量半衰时属性在浊积岩储层预测中的应用研究.石油物探,52(6): 662—668.
- 赵玉娟,杨香华,朱红涛,等,2017.白云凹陷古近系恩平组沉积背景差异及其烃类特征.地质科技情报,36(3): 156—163.
- 朱筱敏,信荃麟,张晋仁,1994.断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式.沉积学报,12(2): 20—28.