

doi:10.3799/dqkx.2017.006

白云凹陷恩平组沉积晚期大型三角洲发育特征及其意义

曾智伟^{1,2}, 杨香华^{1,2*}, 朱红涛^{1,2}, 夏晨晨^{1,2}, 牛杏^{1,2}, 陈莹³, 韩银学³

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: 白云凹陷恩平组沉积晚期发育大型的辫状河三角洲, 但该三角洲的沉积过程、内部发育期次及平面分布规律尚不明确。基于9口钻遇恩三段的钻井资料, 开展了砂岩碎屑锆石 U-Pb 定年及全区覆盖的三维、二维地震资料分析。结果表明恩平组不同沉积时期的主要物源供给方式: 恩平组早—中期以白云凹陷四周隆起提供短程物源碎屑为主(母岩类型以中生代火成岩为主), 恩平组沉积晚期白云凹陷与北部珠一坳陷开始连通, 盆外大型水系携带华南褶皱带物源碎屑沿 NW-SE 方向进入白云凹陷沉积(母岩类型以古生代—前寒武系变质岩为主), 大型三角洲开始发育。地震相及能量半衰时属性分析揭示了白云凹陷恩平组沉积晚期大型三角洲的沉积构成特征, 即发育3期不断向东南方向进积的楔状体, 其沉积规模由小到大, 然后再变小, 直至断陷消亡。恩平组沉积晚期三角洲煤系烃源岩及陆源海相烃源岩广泛发育, 大型三角洲具备优越的生储盖组合, 有利于形成三角洲前缘上倾尖灭油气藏, 是白云凹陷深水区古近系油气勘探重要目标。

关键词: 三角洲; 前积反射; 物源体系; 锆石 U-Pb 定年; 恩平组; 白云凹陷; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2017)01-0078-15

收稿日期: 2016-06-20

Development Characteristics and Significance of Large Delta of Upper Enping Formation, Baiyun Sag

Zeng Zhiwei^{1,2}, Yang Xianghua^{1,2*}, Zhu Hongtao^{1,2}, Xia Chenchen^{1,2}, Niu Xing^{1,2}, Chen Ying³, Han Yinxue³

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: A large-scale braided delta is developed in the late stage of the Enping Formation in the Baiyun sag, but the sedimentary process, the internal development stages and the plane distribution of the delta remain unclear. Based on the nine wells which penetrated the third member of the Enping Formation, the detrital zircon U-Pb dating and the 2D and 3D seismic data analyses were carried out in this paper. The sediment supply patterns of the Enping Formation in different depositional periods were determined. During the first-second members of Enping Formation (SQ1-SQ2), sediments derived from the paleo-uplift were mainly composed of Mesozoic igneous rocks and are interpreted to have sourced via relatively short-distance transportation. During the third member of Enping Formation (SQ3), the sediments oriented from South China folded belt (SCFB) which mainly consists of Precambrian-Paleozoic metamorphic rocks. The sediments which are derived from SCFB and transported long-distance pathways through northwest-southeast orientation have deposited in Baiyun sag and the large-scale delta developed subsequently. Meanwhile, the sedimentary characteristics of large-scale delta of the SQ3 within Baiyun sag are described through typical seismic facies and the energy half-time seismic attribute analysis. The delta developed three stages of progradational wedges continuously to the southeast direction and with increasing scale initially, followed by decreasing scale until the

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

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

E-mail: zengzw1990@163.com

* **通讯作者:** 杨香华, ORCID: 0000-0002-0567-6590. E-mail: xhyang111@vip.sina.com

引用格式: 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.

rift basin disappeared. The results reveal that the deltaic coal-bearing and terrigenous-marine source rocks are mainly developed in the SQ3 and thus the large-scale delta has an excellent accumulation condition of source-reservoir-cap rock assemblages. And the delta front sand bodies tend to develop the updip pinch-out reservoir which will become an important target for oil and gas exploration in Paleogene of Baiyun deep-water region.

Key words: delta; progradational reflection; provenance system; zircon U-Pb dating; Enping Formation; Baiyun sag; petroleum geology.

白云凹陷是珠江口盆地的继承性深大凹陷(图 1a),也是经钻探证实的富气凹陷(张功成等,2015),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(图 1b),凹陷面积超过 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (李成海等,2014;陈亮等,2015).白云凹陷北部斜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,2014a, 2014b)均证实了白云凹陷巨大的油气勘探潜力.目前白云凹陷勘探层系主要集中在下中新统珠江组 and 上渐新统珠海组(柳保军等,2011;朱伟林等,2012;吴伟中等,2013;廖计华等,2016),其油气探明程度不足 10%(张功成等,2015),待探明资源潜力巨大;杜金虎等(2004)按照油气分布的互补性原理分析,认为中深层的恩平组可能是油气潜在富集层位.同时,珠二坳陷深水珠江组与珠海组的油气勘探成果显著(林鹤鸣和施和生,2014;张功成等,2014a),也证实了白云凹陷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.

白云凹陷恩平组发育海陆过渡相三角洲—海湾相沉积,凹陷及周缘隆起均有恩平组沉积分布,最厚处可达 4 000 m,受西北及西南两大物源供给影响,白云凹陷的北部、西部发育多个三角洲,其中白云凹陷北坡在恩平组沉积晚期发育一个面积达到

4 500 km^2 的大型辫状河三角洲,下渐新统恩平组煤系烃源岩已被证实为白云凹陷的主力烃源岩之一(张功成等,2014a),因此恩平组三角洲环境发育的各类砂体紧邻烃源岩,是潜在的有利储集层,油气勘探潜力巨大.目前针对白云凹陷恩平组沉积晚期大型三角洲的精细研究成果相对较少,前人主要分析了该三角洲的发育位置及内部反射特征——自 NW-SE 方向覆盖了白云主凹的大部分区域,三角洲内部“S”型前积反射典型,整体表现为中强振幅、亚平行、较连续的反射特征(柳保军等,2011;邵磊等,2013;吴伟中等,2013;张功成等,2014b, 2015),但对该三角洲发育的古地理背景、沉积物源体系特征、三角洲内部发育期次及时空展布规律等仍缺乏系统的研究.本文充分利用全区覆盖的 3D($>15\,000 \text{ km}^2$)、2D 地震资料($>10\,000 \text{ km}$)及凹陷周缘钻遇恩三段的 9 口钻井资料,通过对恩平组层序地层格架及地层样式的研究,结合锆石 U-Pb 定年物源示踪,揭示了恩平组沉积晚期大型三角洲发育的地质条件,明确其物源供给方式及内部结构特征,总结了白云凹陷恩平组沉积晚期大型三角洲的发育模式,并分析该三角洲的含油气远景;降低深部储集砂体预测风险的同时为白云凹陷油气勘探决策提供借鉴,并为南海大陆架的构造演化分析提供新的信息.

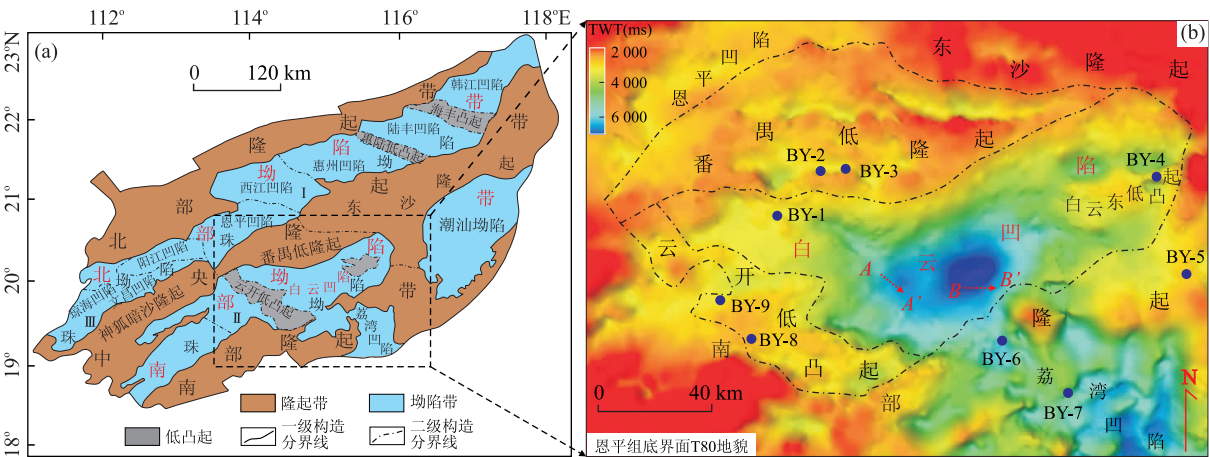


图 1 珠江口盆地白云凹陷构造位置

Fig. 1 Tectonic location of Baiyun sag in the Pearl River Mouth basin

1 层序地层格架及沉积环境判别

地震地层终止方式是层序界面识别的重要依据,是在无井、少井地区开展层序地层学研究的核心资料,可有效弥补研究区目的层系钻井资料揭示信息较少的不足;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 *et al.*, 1983; Catuneanu *et al.*, 2009; 刘强虎等, 2013; 刘浩冉等, 2016). 笔者通过对白云凹陷古近系恩平组层序界面的典型地震反射特征进行识别追踪,并结合现有的钻井岩性、测井曲线等资料,将白云凹陷恩平组划分为 3 个三级层序(图 2),自下而上依次为 SQ1、SQ2、SQ3 层序,分别对应恩一段、恩二段及恩三段,它们共同构成一个完整的二级层序.

SQ1(恩一段)层序底界面为 T80 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,也是重要的二级层序界面,在凹陷中心 T80 界面可见大型的削截终止反射与下切充填特征(图 2 剖面 AA'),在凹陷边缘普遍发育削截不整合;层序顶界面为 T72 局部不整合面. 恩一段与文昌组时期的控凹断裂具有一定的继承性,构造活动强度较大,可容纳空间增长速率大,整体表现为陆相断陷湖盆的沉积背景.

SQ2(恩二段)层序底界面为 T72 局部不整合面, T72 界面表现为明显的上超(图 2 剖面 AA'),层序顶界面为 T71 局部不整合面,整体厚度相对较薄. 恩二段断裂活动速率有所减弱,但可容纳空间增

长速率有所降低,凹陷东南部与荔湾凹陷已逐渐开始连通,但海水的影响范围相对较小,此时白云凹陷主要仍以陆相湖泊沉积为主.

SQ3(恩三段)层序底界面为 T71 局部不整合面,可见明显的下超(图 2 剖面 BB');SQ3 顶界面为 T70 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,此时边界断裂活动明显减弱,区域性整体沉降占主导优势,体现了拗陷作用的特点,全区普遍发育低角度削截或不整合(图 2 剖面 BB'). 恩三段断拗特征明显,构造活动稳定,发育 3 期大规模的进积型辫状河三角洲,前积反射结构典型. 由于此时白云凹陷四周沉积地貌变缓,东南入海通道加宽,海水从东南缘“峡口”涌入白云凹陷(图 1b),局部地区咸水化石发育. 张功成等(2014a)通过对 BY-4 井海相沟鞭藻属种统计分析发现,恩三段中包含 *Cordosphaeridium*、*Cleistosphaeridium*、*Hystrichokolpoma*、*Lingulodinium*、*Operculodinium*、*Polysphaeridium*、*Sytematophara* 等多种滨浅海相的沟鞭藻属种,这也为白云凹陷恩三段沉积时期受到了较强的海水影响提供了证据,此阶段白云凹陷主要表现为大型三角洲发育的相对封闭的局限海沉积环境.

2 碎屑锆石 U-Pb 定年物源示踪

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原始信息,因此

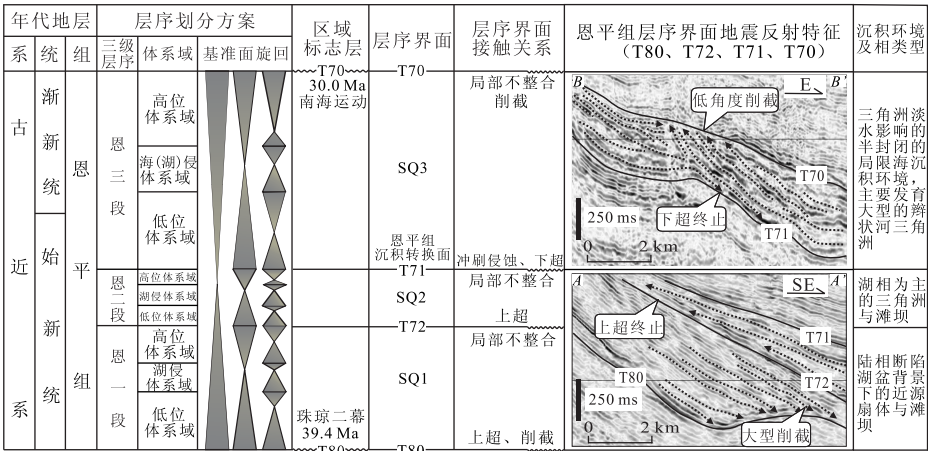


图 2 白云凹陷恩平组层序地层格架

Fig. 2 The sequence stratigraphic framework of Enping Formation in Baiyun sag
地层位置见图 1b

通过碎屑锆石定年进行物源示踪分析已成为物源体系研究的全球热点之一(Fan *et al.* , 2015; Kimbrough *et al.* , 2015; Benyon *et al.* , 2016),且珠江口盆地的盆内外基底岩性存在较大的差异,可为白云凹陷恩平组碎屑锆石 U-Pb 定年物源示踪分析提供较好的分析基础. 珠江口盆地北部华南褶皱带物源体系(北部物源)为前寒武纪—古生代岩浆运动及变质作用叠加,母岩岩性及地质年代复杂(杨超群等,1988;舒良树,2006;于津海等,2006),而珠江口盆地盆内低隆起(南部物源)则以中生代中酸性火成岩基底为主(李平鲁等,1998;施和生等,2009;刘安和吴世敏,2011;王维等,2015),且变质成因与岩浆成岩的碎屑锆石形态及内部结构也存在较大差异(图 3). 因此可通过碎屑锆石阴极发光(CL)图像内部结构分析,结合锆石 U-Pb 定年统计分析中的前寒武纪—古生代锆石的相对含量或者中生代锆石的相对含量来衡量两大物源体系的物源供给变化,为白云凹陷恩平组沉积晚期发育的大型三角洲的物源分析提供证据支持.

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;LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 定年测试分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成. 本文选取白云凹陷

钻遇恩三段的 6 口钻井(BY-1、BY-2、BY-5、BY-6、BY-8、BY-9)的恩三段及珠海组共计 12 件样品(其中恩三段 9 件、珠海组 3 件),并筛选谐和度高于 90%的同位素年龄 392 个,锆石年龄从太古代到新近纪均有分布(图 4). 其中一类为前寒武纪—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(吴元保和郑永飞,2004)(图 3a~3c);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 3d~3f). 碎屑锆石 U-Pb 定年结果表明(图 4),恩三段沉积时期,白云凹陷不同构造位置的锆石 U-Pb 年龄组合存在较大的差异,其中凹陷西北缘受北部物源体系影响最大,西南缘次之,东南缘影响最小.

BY-1 井、BY-2 井位于白云凹陷西北方向、番禺低隆起南缘,共有 6 个样品取自这两口钻井(恩三段 5 个,珠海组 1 个). BY-1 井钻遇恩三段的 3 期辫状河三角洲砂体(delta I ~delta III),通过对该井岩屑砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄分析(图 3,图 4a~4d),自下而上中生代火成岩锆石含量由 62%(67.7~241.0 Ma)下降到 50%(97.3~251.0 Ma),再下降到 29%(116~252 Ma),最后到珠海组 22%(141~252 Ma),其前寒武纪—古生代碎屑锆石(252~3 302 Ma)含量逐渐增加,显示了该井由北部物源体系及南部物源体系混合供源,且北部华南褶皱带前

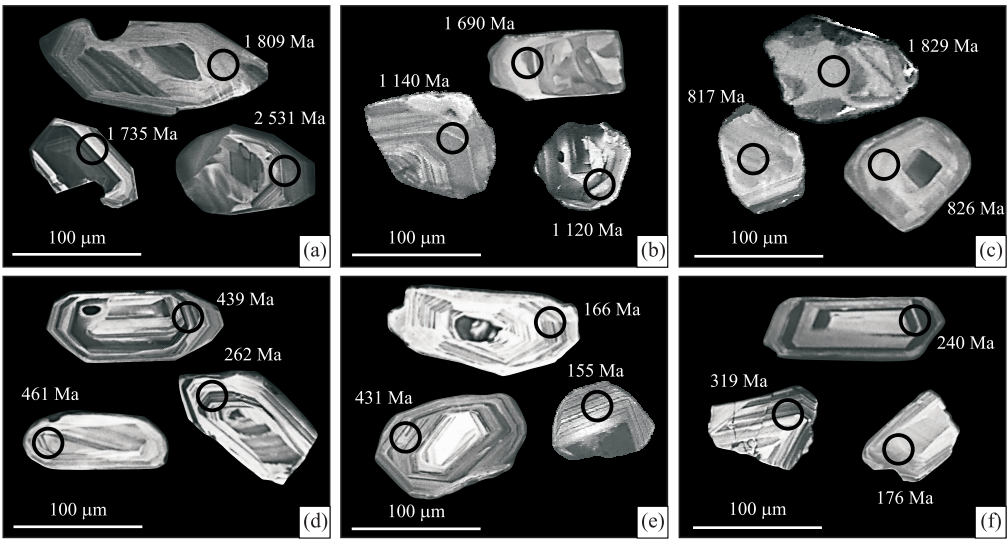


图 3 恩平组变质成因及岩浆成因锆石阴极发光图像

Fig. 3 The CL images of metamorphic origin and magma genesis zircon in Enping Formation

a. BY-1 井,恩三段 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,恩三段 delta II, 4 325~4 755 m,变质成因锆石; d. BY-1 井,恩三段 delta II, 4 505~4 665 m,岩浆成因锆石; e. BY-2 井,恩三段 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

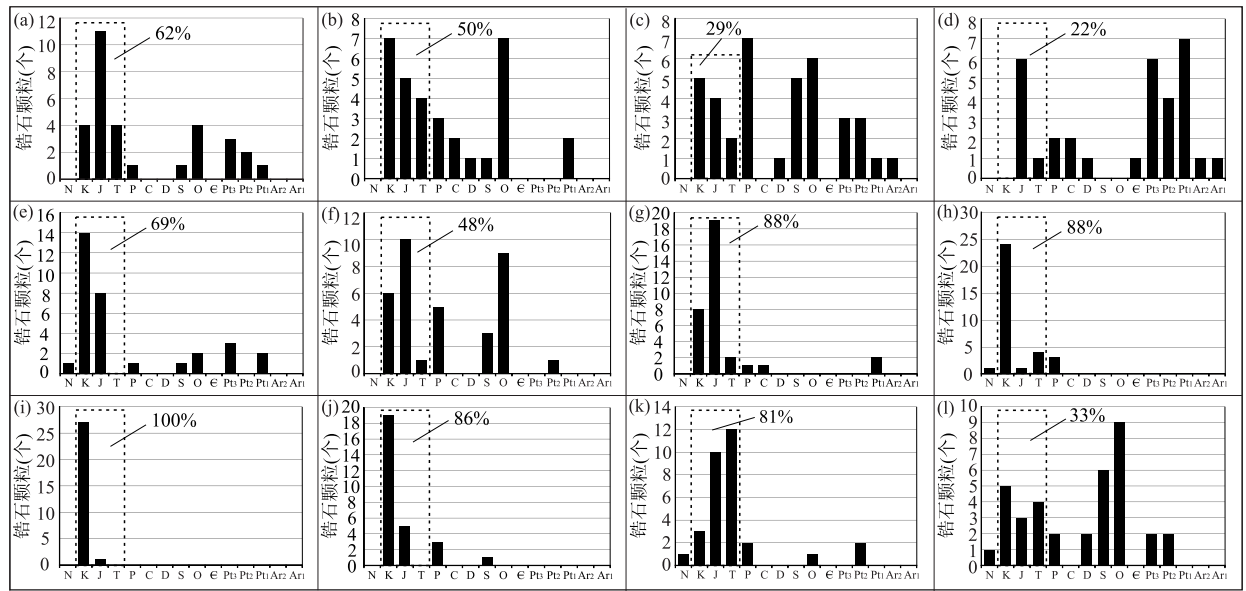


图 4 恩三段—珠海组砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄分布

Fig. 4 The U-Pb age distribution of clastic zircon in sandstone of the third member of the Enping Formation and Zhuhai Formation
a. BY-1 井, 4 755~5 055 m, 恩三段 delta I; b. BY-1 井, 4 505~4 665 m, 恩三段 delta II; c. BY-1 井, 4 020~4 290 m, 恩三段 delta III; d. BY-1 井, 3 500~3 690 m, 珠海组; e. BY-2 井, 4 325~4 755 m, 恩三段 delta II; f. BY-2 井, 3 720~4 165 m, 恩三段 delta III; g. BY-5 井, 2 244~2 289 m, 恩平组; h. BY-6 井, 4 480~4 650 m, 恩平组; i. BY-8 井, 2 622~2 661 m, 恩平组; j. BY-8 井, 2 394~2 595 m, 珠海组; k. BY-9 井, 3 159~3 360 m, 恩平组; l. BY-9 井, 2 928~3 075 m, 珠海组

寒武纪—古生代变质岩母岩物源的供给从 delta I~delta III 到珠海组不断增强。BY-2 井也钻遇恩三段的其中两期三角洲砂体 (delta II~delta III), 自下而上中生代碎屑锆石含量由 69% (93~184 Ma) 下降到 48% (99.6~251.0 Ma) (图 4e, 4f), 反映的规律与 BY-1 井一致。

BY-5 井、BY-6 井位于白云凹陷东南缘, 距离北部华南褶皱带物源较远, 2 口井的恩平组碎屑锆石 U-Pb 年龄分析表明 (图 4g, 4h), 其中生代碎屑锆石含量均为 88% (分别对应年龄 106~240 Ma、78.9~250.0 Ma), 仅含少量的元古代及古生代锆石 (分别对应年龄 259~2 313 Ma、267~282 Ma), 反映了恩三段沉积时期白云凹陷东南缘以南部物源体系中的东沙隆起及南部隆起带提供的中生代火成岩碎屑物供给为主, 轻微受北部物源体系的影响。

BY-8 井、BY-9 井位于白云凹陷西南缘云开低凸起之上, 两口钻井的碎屑锆石 U-Pb 年龄存在较大的差异 (图 4i~4l)。BY-8 井从恩三段到珠海组其中生代碎屑锆石含量由 100% (100~155 Ma) 下降到 86% (97.1~251.0 Ma) (图 4i, 4j), 反映了 BY-8 井恩三段沉积时期仅由南部物源体系中的南部隆起带及云开低凸起提供中生代火成岩物源碎屑, 到珠海组沉积时期仍以中生代岩浆成因锆石为主, 仅含

少量北部物源体系供给的古生代变质成因锆石 (254~430 Ma)。BY-9 井从恩三段到珠海组其中生代碎屑锆石含量由 81% (104~249 Ma) 下降到 33% (98~252 Ma) (图 4k, 4l), 反映了恩三段沉积时期 BY-9 井受到轻微的北部物源体系的影响, 但整体仍以南部物源体系为主; 到珠海组沉积时期, BY-9 井的中生代锆石 (98~252 Ma) 含量迅速下降, 元古代及古生代变质成因锆石 (269~1 017 Ma) 含量迅速增加, 反映了该时期以北部物源体系物源供给为主, 主物源体系发生变化。

3 大型三角洲的发育特征

3.1 三角洲发育的古地理背景

白云凹陷位于洋陆过渡地壳之上, 经历了印度板块、太平洋板块和欧亚板块 3 大板块的构造作用, 同时又叠加了南海扩张作用的影响; 在深部地幔作用影响下, 白云凹陷在裂陷期之后继续强烈热沉降, 沉积环境演变为陆坡深水环境 (能源等, 2013; 邵磊等, 2013; 谢志远等, 2015)。恩平组沉积时期, 由于受珠琼运动二幕的影响, 白云凹陷恩平期仍处于张裂背景下的裂谷演化晚期, 断拗特征明显, 整体呈南陡北缓的宽“半地堑”特征, 在断拗拉张和深部热衰减

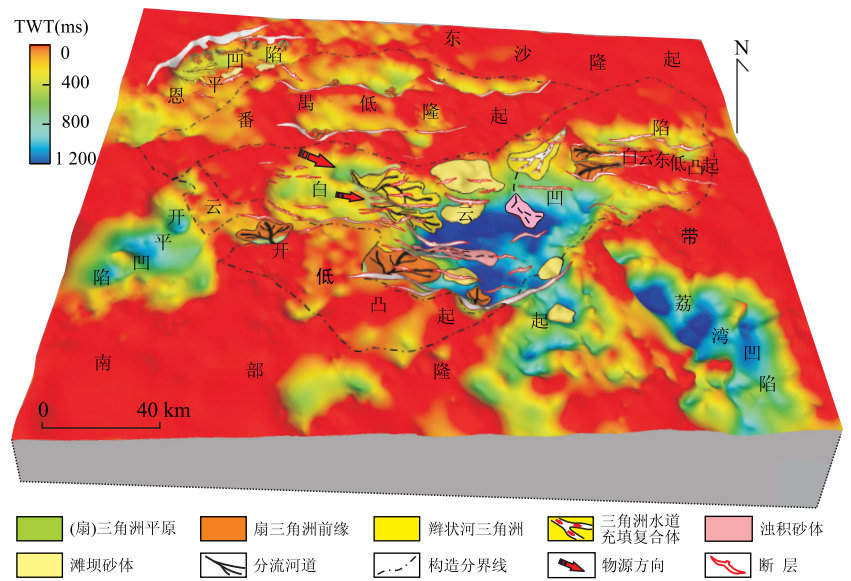


图 5 SQ1~SQ2 层序厚度与沉积相叠加

Fig. 5 The overlapping sketch of the thickness and sedimentary facies of SQ1-SQ2 sequences

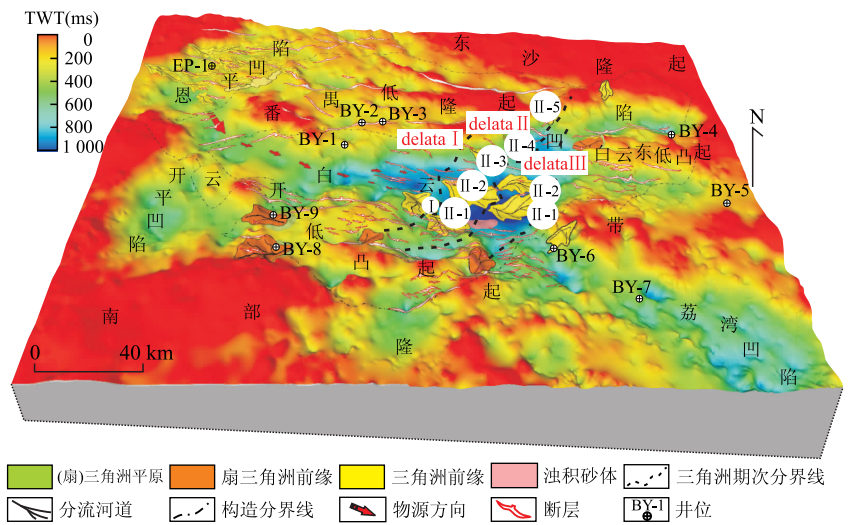


图 6 SQ3 层序厚度与沉积相叠加

Fig. 6 The overlapping sketch of the thickness and sedimentary facies of SQ3 sequence

的共同作用下,凹陷发生整体沉降,沉积范围不断扩大,白云凹陷东南部逐渐与荔湾凹陷相连通,沉积背景由文昌组时期“洼陷分隔”的陆相断陷湖盆逐渐向海陆过渡相环境过渡(张功成等,2014b)。

恩平组沉积早—中期,白云凹陷南部控凹断裂活动仍较为强烈,断裂发育的数量虽然相对较少(图 5),但断裂的持续活动时间较长、延伸距离较远,仍然控制着凹陷的构造格局与沉积过程。该时期白云凹陷受东部东沙隆起、北部番禺低隆起、西部云开低凸起以及南部隆起区围限,与北部珠一坳陷处于分隔状态(图 5),此阶段其整体特征表现为以陆相断陷湖盆为主的沉积充填,主要由白云凹陷四周隆起

区提供短程物源,凹陷南部陡坡带主要发育近源快速堆积形成的扇三角洲及浊积砂体,北部缓坡带主要发育小型的辫状河三角洲及水道充填复合砂体,局部水下低隆起上发育经湖浪水流改造形成的滩坝砂体。

恩平组沉积晚期,白云凹陷南部控凹断裂活动减弱,调节断裂增多但规模相对较小,断裂平面分布密度较大(图 6);此时恩平组沉积范围明显扩大,云开低凸起及番禺低隆起局部开始接受沉积,白云凹陷西北方向与珠一坳陷恩平凹陷连通,有利于盆外古珠江大型远源水系的进入。白云凹陷恩平组沉积晚期具备分布范围较广且浅的水体、相对稳定的构

造地质背景、相对平缓的地形以及充足的北部物源体系碎屑物供给,这为白云凹陷发育大型的三角洲奠定了良好的基础.

3.2 三角洲时空展布特征

3.2.1 单井相分析 不同的沉积环境可以表现出不同的岩性组合及沉积组样式,并通过岩性的区别反映在测井相上(王俊林,2003). 通过对比研究钻遇恩三段的 BY-1、BY-2、BY-4、BY-7 等钻井的岩性组合和测井相的差异,笔者在白云凹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 7a,7b). 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 7a,7b). 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 7c,7d).

3.2.2 沉积相分析 通过有限的单井相分析及典型的地震相分析,结合全区的古地理背景及沉积相发育模式,可比较有效地确定无井约束地区的沉积相发育类型及其分布规律. 恩三段沉积时期,由于隆起区准平原化,古地貌相对平缓,沉积范围扩大,北部物源供给充足,具备了大型水系发育的基本条件,此时以北部物源体系与南部物源体系的混合物源供给为主,古珠江将珠一坳陷恩平凹陷“填平”补齐后越过番禺低隆起(Liu *et al.*, 2016),沿 NW-SE 方向将大量碎屑物带进白云凹陷,在凹陷西北部发育规模最大达 4 500 km² 的大型海陆过渡相三角洲(图 6,图 8,图 9). 该大型三角洲整体呈扇形,其展布方向受 NW-SE 向的断裂体系及地形地貌控制,三角洲前缘分布范围广泛,呈裙边状分布,地震剖面上表现为典型的“S 型”及切线斜交型前积反射(图 9),河水携带的碎屑沉积物向盆地中心推进的距离较大,呈典型的河控型三角洲展布特征(杨香华等, 2000). 在 BY-1、BY-2 井中三角洲平原亚相可见薄

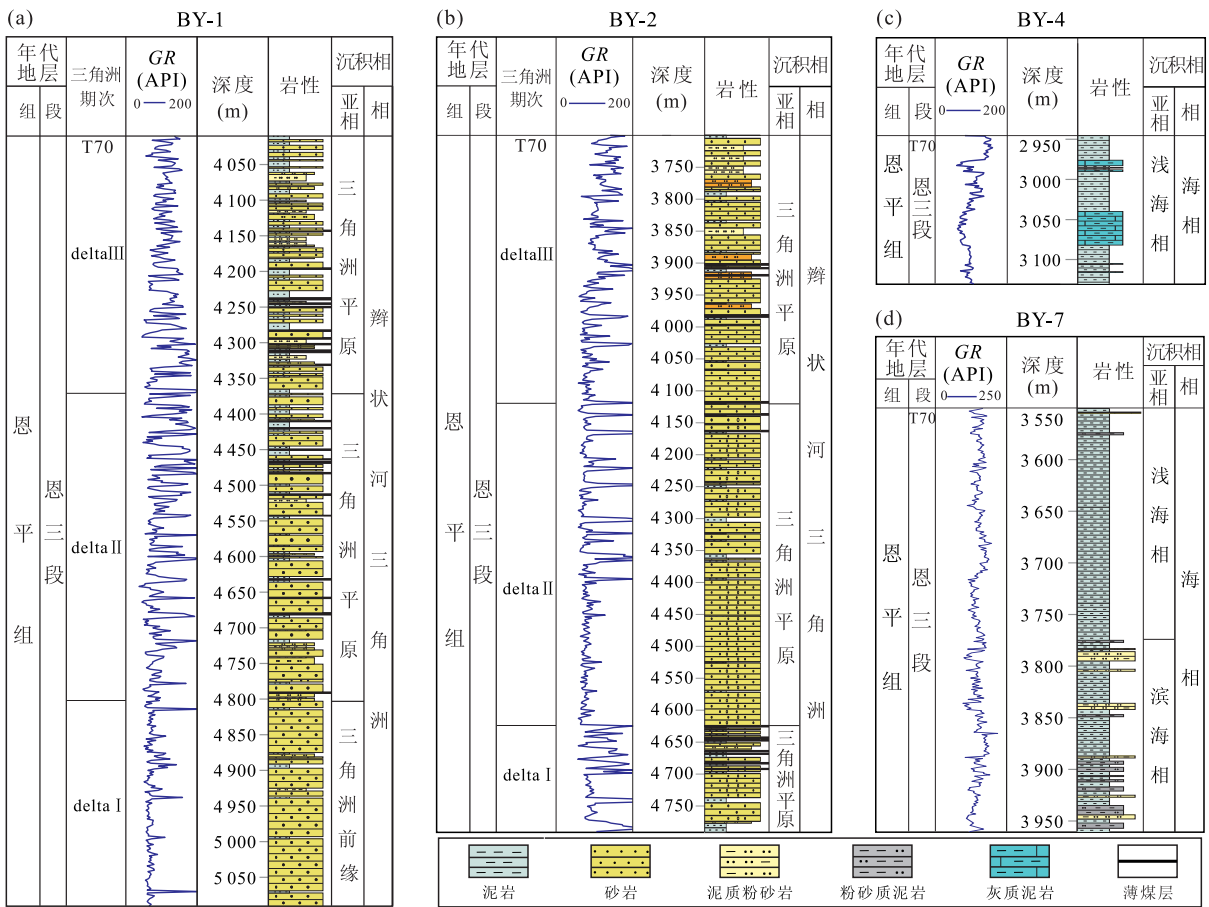


图 7 恩三段单井相分析

Fig. 7 The single well phase analysis of the third member of Enping Formation

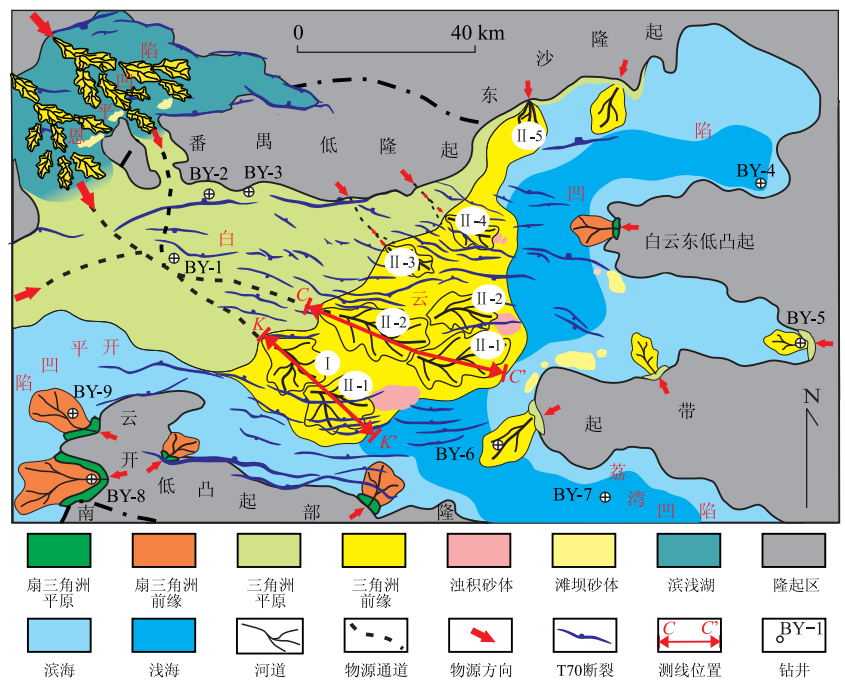


图 8 白云凹陷恩三段(SQ3)沉积相

Fig. 8 Sedimentary facies sketch of the third member of Enping Formation (SQ3) in Baiyun sag

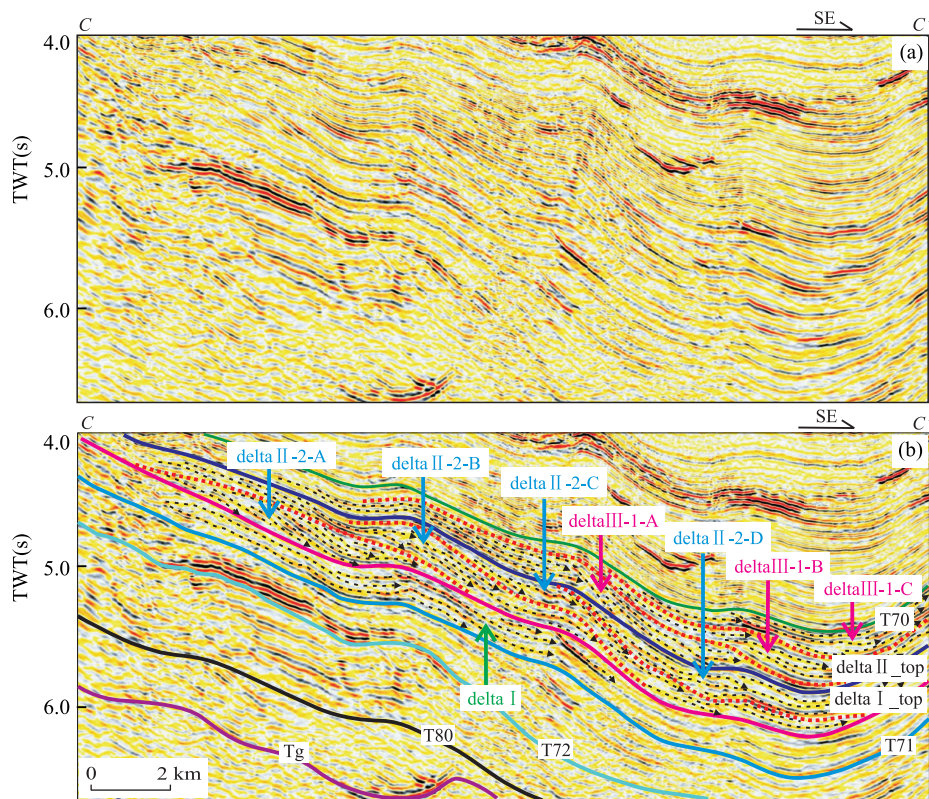


图 9 恩三段大型三角洲典型地震剖面

Fig. 9 Typical seismic profile of large delta of the third member of Enping Formation

剖面位置见图 8

煤层发育;BY-1 井在 delta I 发育时期主要为三角
洲前缘亚相,随着三角洲不断向凹陷中心迁移推进, 该井自下而上表现为由三角洲前缘向三角洲平原亚
相过渡(图 7)。白云凹陷东北部及东南部则主要发

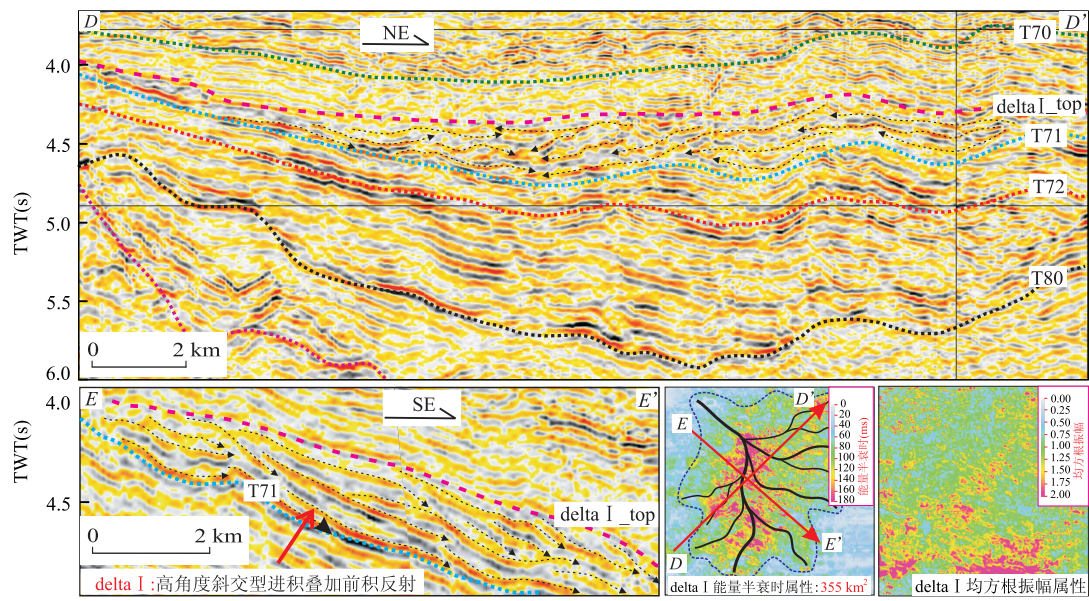


图 10 恩三段 deltaI 典型剖面及地震属性分析

Fig. 10 Typical seismic profiles and attributes analysis of the deltaI in the third member of Enping Formation

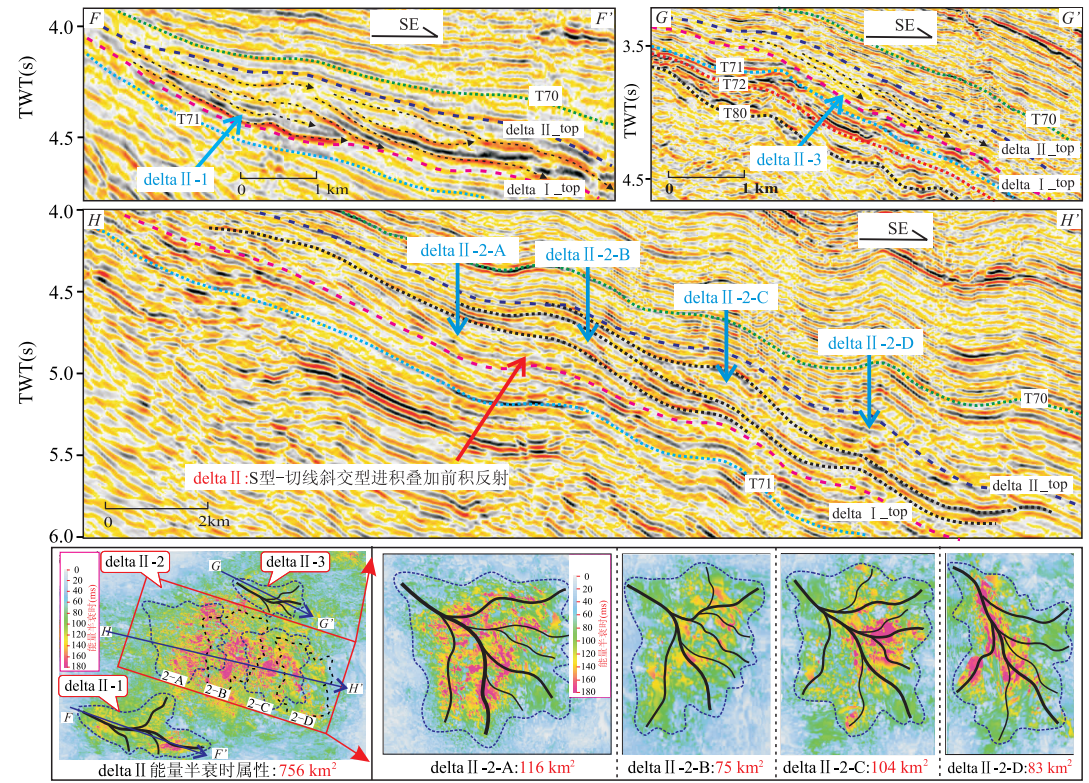


图 11 恩三段 deltaII 典型剖面及地震属性分析

Fig. 11 Typical seismic profiles and attributes analysis of the deltaII in the third member of Enping Formation

育规模较小的、由短程水系供源的辫状河三角洲，凹陷西南部云开低凸起边缘发育小型的近源扇三角洲（图 8）。

3.3 三角洲内部构成特征

3.3.1 分析方法 如何有效确定三角洲内部发育

期次及其平面分布范围，对于三角洲沉积过程研究具有重要的意义。首先，本文通过前积反射地震相识别，明确了各小期三角洲前缘砂体主要呈楔状叠置并逐渐向凹陷中心进积，通过识别各小期砂体间的沉积界面即可较为准确地划分三角洲内部的发育期

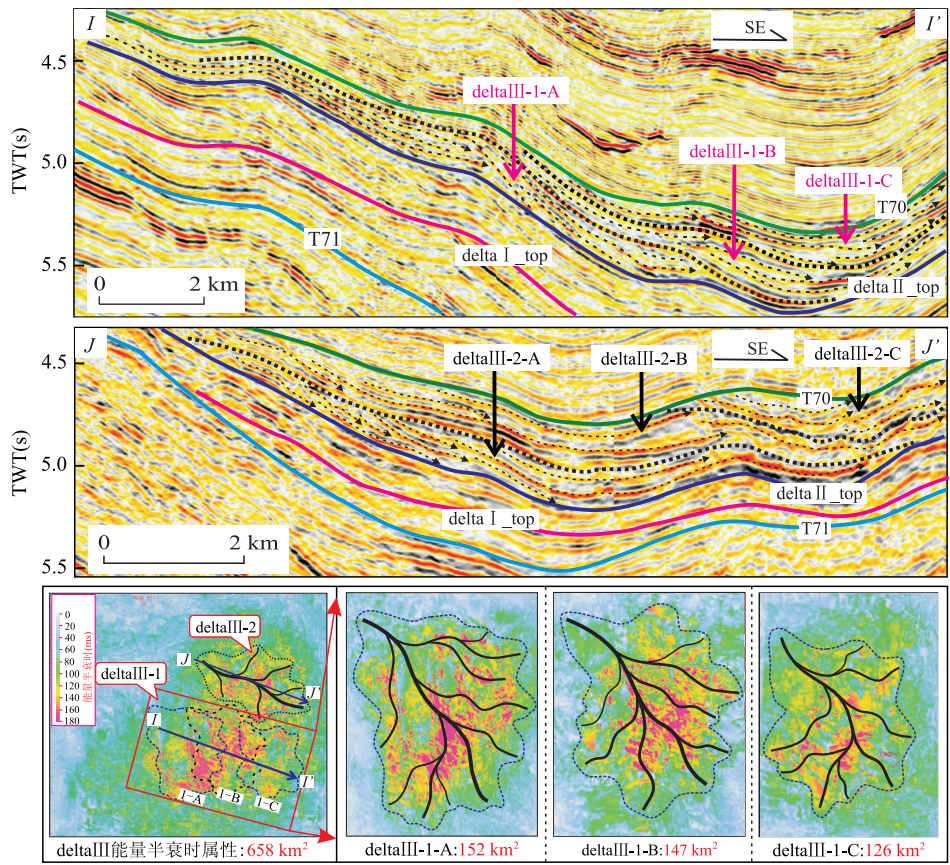


图 12 恩三段 delta III 典型剖面及地震属性分析

Fig. 12 Typical seismic profiles and attributes analysis of the delta III in the third member of Enping Formation

次.同时,由于三角洲前缘楔状砂体内部的振幅、频率、连续性等地震参数空间变化较快,通过振幅类、频率类等传统的地震属性很难有效地分析刻画其平面展布形态,笔者针对恩三段的 3 期三角洲进行了多种地震属性分析对比,发现在限定的三角洲前积反射顶、底界面时窗内,前积反射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,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(图 10~图 12),呈现明显高值异常,地震剖面上呈蠕虫状反射(图 10 剖面 DD'),而均方根振幅属性显示则较为分散(图 10). 能量半衰时是对反射波通过地层后能量衰减大小程度的一种度量,其主要特征是值的大小与前积体的厚度、韵律性、速度结构等因素关系密切,对前积反射能量变化的快慢、地层组合的韵律、指示岩相、岩性和孔隙度的变化均较敏感(张营革,2013),运用此属性可以有效圈定特定时窗内三角洲前缘砂体的平面分布范围.

由于古水流携带碎屑物进入凹陷中沉积,古水流的方向及规模决定了沉积砂体的发育规模与平面展布,古水流的展布方向以层理的表现形式体现在

沉积地层的沉积构造上,而在地震剖面中则主要以前积反射的形式来呈现(朱筱敏和信荃麟,1989;周路等,2013;李慧琼等,2014). 因此,笔者通过地震剖面的前积反射可直观地判断古水流的方向,而沉积时地形的坡度、前积反射的类型、前积角度的大小、前积反射的水平投影长度等参数(表 1)则可有效反映三角洲水体能量的大小及规模(朱筱敏和信荃麟,1989;周路等,2013). 其中,笔者在地形坡度的计算中先将 SQ3 层序顶界面 T70 作层拉平处理后选定坡上两个端点作垂向线及水平线,构成直角三角形,然后经 Geoframe 工作站长度计算模块计算出水平边长 a ,经时深转换公式计算得出垂直边长 b ,最后通过反正切函数计算出地形坡度 x . 计算前积角度时,先将前积反射的底部包络面作层拉平处理,然后选定前积反射范围的两个端点作垂向线及水平线,构成直角三角形,然后经 Geoframe 工作站长度计算模块计算出前积水平投影长度 c ,经时深转换公式计算得出垂直边长 d ,最后通过反正切函数计算出前积角度 y ,计算公式如下:

$$x = \arctan \frac{b}{a}, y = \arctan \frac{d}{c}. \tag{1}$$

表 1 白云凹陷恩平组三角洲前缘砂体要素

Table 1 The main elements of delta front sand-bodies of Enping Formation in Baiyun sag

序号	三角洲期次	地形坡度(°)	前积角度(°)	前积投影长度(km)	主体面积(km ²)	前积反射类型
1	delta I -1	3.0~4.5	5.0~11.0	15~18	355	斜交型
2	delta II -1	2.0~4.0	3.0~7.0	8~10	73	S斜交复合型
3	delta II -2-A	3.0~5.5	2.0~4.0	10~12	116	S斜交复合型
4	delta II -2-B	4.0~6.5	3.0~8.0	6~8	75	S斜交复合型
5	delta II -2-C	7.0~11.0	3.5~7.0	11~13	104	S斜交复合型
6	delta II -2-D	6.0~9.0	2.0~4.0	10~12	83	S型
7	delta II -3	2.5~4.0	3.0~5.0	7~8	58	S斜交复合型
8	delta II -4	3.0~4.0	1.5~3.0	6~8	68	S斜交复合型
9	delta II -5	3.0~4.5	2.0~3.5	4~5	45	S斜交复合型
10	delta III -1-A	3.0~5.0	3.0~6.0	13~15	152	S斜交复合型
11	delta III -1-B	2.0~4.0	2.0~4.0	12~14	147	S型
12	delta III -1-C	1.5~3.0	2.0~3.0	10~12	126	S型
13	delta III -2	2.0~4.0	1.0~2.0	15~16	136	S型

3.3.2 分析结果 通过地震反射特征识别,白云凹陷恩三段(SQ3)层序底界面 T71 可见清晰的下超终止反射(图 9、图 10),该时期主要发育 3 期大规模的进积型辫状河三角洲,前积反射结构典型,剖面上呈楔状产出,笔者通过砂体的叠置关系可进一步识别出 8 个次一级规模的沉积单元(图 9~图 12). 其中 delta I 整体规模相对较小,可识别出 1 期三角洲前缘砂体;delta II 整体规模最大,可识别出 4 小期三角洲前缘砂体;delta III 规模与 delta II 比较相对较小,可识别出 3 小期三角洲前缘砂体.

第 1 期三角洲(delta I)以高角度一斜交型前积反射为主(图 10 剖面 EE'),顶积层及底积层均不发育,斜交型前积反射具有相对高的沉积物供给速度、相对强的水动力能量和缓慢的盆地沉降,该时期沉积地形坡度较陡(3.0°~4.5°),前积角度较大(5.0°~11.0°),前积体展布长度为 15~18 km(表 1),岩性体内部尖灭点清晰,同相轴不断向凹陷中心进积. 由于 delta I 沉积时期,盆外远源水系携带的北部物源体系沉积物开始进入白云凹陷沉积,水流的能量及规模仍相对较小,因此 delta I 的平面展布范围相对 delta II 及 delta III 而言相对较小,其展布面积约为 355 km².

第 2 期三角洲(delta II)发育规模增大(图 8、图 11),delta II 顶积层不发育,地形坡度与 delta I 相比相对较陡(3.0°~11.0°),但前积角度与 delta I 相比相对较小(3.0°~8.0°),前积反射的水平投影长度为 30~50 km(表 1),反映 delta II 沉积时期盆外大型水系的持续作用时间较长,且水动力不断增强. 其中 delta II -2 发育规模最大(展布面积达 370 km²),能量半衰时属性反映的三角洲朵体形态清晰(图

11),其内部可识别出 4 小期典型的呈楔状叠置、不断进积的三角洲前缘砂体:delta II -2-A~delta II -2-C 这 3 小期主要发育 S-斜交复合型前积反射,delta II -2-D 则主要发育 S 型前积反射,剖面中可见明显的沉积坡折带. S-斜交复合型前积反射结构具有相对较强的水动力能量,是 S 型前积反射与斜交前积反射结构相互交替形成的产物;S 型前积反射反映相对弱的水动力条件(朱筱敏和信荃麟,1989),因此,从 delta II -2-A 到 delta II -2-D,随着三角洲逐渐向凹陷中心推进,河流的水动力也逐渐减弱,前积反射类型也逐渐由 S-斜交复合型向 S 型过渡.

第 3 期三角洲(delta III)主要发育 S 型前积反射(表 1、图 12),地形坡度(2.0°~3.0°)及前积角度(2.0°~6.0°)向凹陷中心逐渐减小,三角洲整体继续向凹陷中心进积,整体向凹陷中心延伸 25~40 km. 笔者在白云凹陷内可识别出 2 个大型的三角洲前缘楔状砂体(图 8、图 12),其内部均可识别出 3 小期三角洲砂体,其中 delta III -1 的规模较大,平面展布面积达 400 km²,能量半衰时属性反映的三角洲朵体形态典型(图 12),delta III -1-A 到 delta III -1-C 整体上逐渐向凹陷中心推进,前积反射类型也从 S-斜交复合型逐渐向 S 型过渡,delta III -1-C 沉积时期三角洲已进入凹陷中心,河流水体能量减弱. 古近纪晚期南海大陆架及周边地区普遍发生准平原化,物源区汇水面积不断加大,断陷盆地由于三角洲的不断进积於浅而消亡. 到晚渐新世珠海组沉积时期,白云凹陷的断裂活动已十分微弱,主要为浅海相沉积环境,南海北部开始发育大型陆架边缘三角洲沉积.

4 大型三角洲的油气勘探前景

5 结论

经勘探证实,白云凹陷恩平组发育两套烃源岩,即海陆过渡相三角洲煤系烃源岩及陆源海相烃源岩,其中海陆过渡相煤系地层是恩平组的主力烃源岩(张功成等,2014a).白云凹陷地温梯度及热流值均较高(米立军等,2009),根据“源热联控”理论(张功成等,2013),白云凹陷恩平组油气资源量丰富.恩平组沉积晚期,盆外大型远程水系携带北部物源体系的沉积物进入白云凹陷,沿 NW-SE 方向发育大型的辫状河三角洲.三角洲前缘砂体发育的规模较大、内部期次清晰、尖灭点明确,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,储集物性相对较好.因此,恩平组沉积晚期发育的大型辫状河三角洲前缘储集体与三角洲煤系烃源岩及海相烃源岩直接接触,油源丰富,烃源岩生成油气可近距离聚集成藏;三角洲平原煤系、水系分流间湾泥岩及恩平组沉积晚期广泛发育的区域性泥岩可构成该大型三角洲储集体的有利盖层,优越的生储盖组合条件十分有利于形成三角洲前缘上倾尖灭油气藏(图 13).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前缘储集砂体可作为下一步优质储层预测及评价的重要目标.

(1)基于沉积环境、碎屑锆石 U-Pb 定年分析及地震相识别追踪等方法,本文明确了白云凹陷恩平组不同沉积时期的物源组合存在较大差异.白云凹陷恩一段~恩二段时期以白云凹陷周缘低凸起及隆起带近源水系供给为主,发育规模相对较小的三角洲、扇三角洲及滩坝砂体;恩三段一珠海组沉积时期北部物源体系影响逐渐增强,在充足的北部物源供给下,发育大型的进积型三角洲沉积体系.

(2)通过地震相追踪解释,笔者在恩平组晚期大型三角洲内部识别出了 3 期大型的三角洲前缘楔状砂体,并将其进一步细分为 8 个次一级规模的沉积单元;通过地震属性分析,明确了各期砂体的平面展布范围及空间叠置关系,这一方法体系对于研究三角洲的沉积过程,明确三角洲的内部发育期次与平面分布具有重要的指导意义.古近纪晚期南海大陆架及周边地区普遍发生准平原化,物源区汇水面积不断加大,断陷盆地由于三角洲的不断进积淤浅而消亡.

(3)白云凹陷恩平组沉积晚期发育的大型三角洲具备良好的生储盖条件,整体上成藏条件优越,有利于形成三角洲前缘上倾尖灭油气藏,可作为研究

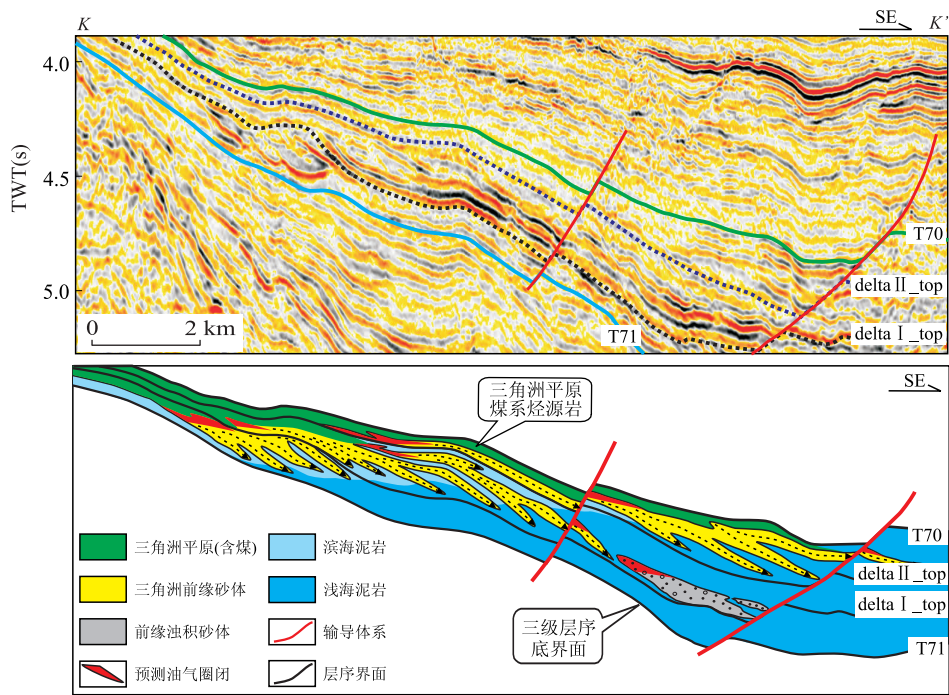


图 13 恩平组沉积晚期大型三角洲成藏模式

Fig. 13 The large delta reservoir model of the late sedimentary period in Enping Formation
据张功成等(2015)修改,剖面位置见图 8

区古近系恩平组下一步优质储层预测评价的重要目标及重点研究方向.

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. doi:10.1306/10191515029
- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J. P., et al., 2009. Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy. *Earth Science Reviews*, 94(1): 1–33. doi:10.1016/j.earscirev.2008.10.003
- Chen, L., Pang, X., Liu, J., et al., 2015. Characteristics and Identification of High Quality Deep-Water Gravity Flow Sandstone Reservoirs in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 42(4): 463–471 (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).
- Fan, M., Mankin, A., Chamberlain, K., 2015. Provenance and Depositional Ages of Late Paleogene Fluvial Sedimentary Rocks in the Central Rocky Mountains, U. S. A.. *Journal of Sedimentary Research*, 85(11): 1416–1430. doi:http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2015.87
- Kimbrough, D. L., Grove, M., Gehrels, G. E., et al., 2015. Detrital Zircon U-Pb Provenance of the Colorado River: A 5 m. y. Record of Incision into Cover Strata Overlying the Colorado Plateau and Adjacent Regions. *Geosphere*, 11(6): 1719–1748. doi:10.1130/GES00982.1
- 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, H. Q., Pu, R. H., Wang, D. X., et al., 2014. Progradational Reflection from Lacustrine Yanchang Formation in Ordos Basin, China. *Oil Geophysical Prospecting*, 49(5): 985–996 (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 (Geology)*, 12(6): 361–369 (in Chinese with English abstract).
- Liao, J. H., Xu, Q., Chen, Y., et al., 2016. Sedimentary Characteristics and Genesis of the Deepwater Channel System in Zhujiang Formation of Baiyun-Liwan Sag. *Earth Science*, 41(6): 1041–1054 (in Chinese with English abstract).
- Lin, H. M., Shi, H. S., 2014. Hydrocarbon Accumulation Conditions and Exploration Direction of Baiyun-Liwan Deep Water in the Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Industry*, 34(5): 29–36 (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, H. R., Zhu, H. T., Shi, H. S., et al., 2015. Migrated Sequence Stratigraphic Architecture and Its Geological Significance in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 40(5): 840–850 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. H., Zhu, H. T., Shu, Y., et al., 2016. Provenance Identification and Sedimentary Analysis of the Beach and Bar Systems in the Palaeogene of the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 70: 251–272. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.12.002
- 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).
- Mi, L. J., Yuan, Y. S., Zhang, G. C., et al., 2009. Characteristics and Genesis of Geothermal Field in Deep-Water Area of the Northern South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 30(1): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- Neng, Y., Wu, J. F., Qi, J. F., et al., 2013. Three Structural Layers and Its Evolution of Cenozoic Basins in Deep Water Area of Northern Margin, South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 403–414 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Meng, X. J., Zhang, G. C., et al., 2013. Feature of Faults System and Its Influence on Tectonic and Sedimentary History of Baiyun Sag. *Journal of Tongji*

- University (Natural Science)*, 41(9): 1435—1441 (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, 40 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., 2006. Predevonian Tectonic Evolution of South China: From Cathaysian Block to Caledonian Period Folded Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418—431 (in Chinese with English abstract).
- Vail, P. R., 1983. Seismic Stratigraphy and the Evaluation of Depositional Sequences and Facies. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 73(1): 278.
- Wang, J. L., 2003. Application of Electrograph Curve Morphology in Sedimentary Facies Analysis. *Coal Technology*, 22(9): 109—110 (in Chinese).
- 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 Depression, Zhujiangkou 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): 1589—1604 (in Chinese).
- 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).
- Yang, C. Q., He, T. X., Weng, S. J., et al., 1988. Regional Geology of Guangdong Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, X. H., Chen, H. H., Ye, J. R., et al., 2000. Large Lake Deltas and Their Hydrocarbon Potential in Bozhong Sag. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 14(4): 226—232 (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).
- 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, G. C., Miao, S. D., Chen, Y., et al., 2013. Distribution of Gas Enrichment Regions Controlled by Source Rocks and Geothermal Heat in China Offshore Basins. *Natural Gas Industry*, 33(4): 1—17 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Wang Q., Miao S. D., 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, China offshore. *Natural Gas Geoscience*, 25(9): 1329—1308 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Yang, H. Z., Chen, Y., et al., 2014. The Baiyun Sag: A Giant Rich Gas-Generation Sag in the Deepwater Area of the Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Industry*, 34(11): 11—25 (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).
- Zhou, L., Guan, X., Lei D. W., et al., 2013. Geological Significance of Imbricated Progradation Seismic Reflection Characteristics from Member 1 of Qingshuihe Formation of Cretaceous in Modong. *Oil Geophysical Prospecting*, 48(4): 625—633 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Zhong, K., Li, Y. C., et al., 2012. Characteristics of Hydrocarbon Accumulation and Exploration Potential of the Northern South China Sea Deepwater Basins. *Chinese Science Bulletin*, 57(20): 1833—1841 (in Chinese).
- Zhu, X. M., Xin, Q. L., 1989. Application of Seismic Clinoform Reflection to the Determination of Ancient Flow System. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences)*, 13(1): 9—14 (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): 463—471.
- 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.
- 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.
- 李慧琼, 蒲仁海, 王大兴, 等, 2014. 鄂尔多斯盆地延长组地震

- 前积反射的地质意义. 石油地球物理勘探, 49(5): 985—996.
- 李平鲁, 梁慧娟, 戴一丁, 1998. 珠江口盆地基岩油气藏远景探讨. 中国海上油气(地质), 12(6): 361—369.
- 廖计华, 徐强, 陈莹, 等, 2016. 白云—荔湾凹陷珠江组大型深水水道体系沉积特征及成因机制. 地球科学, 41(6): 1041—1054.
- 林鹤鸣, 施和生, 2014. 珠江口盆地白云—荔湾深水区油气成藏条件及勘探方向. 天然气工业, 34(5): 29—36.
- 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.
- 刘浩冉, 朱红涛, 施和生, 等, 2015. 珠江口盆地惠州凹陷迁移型层序特征及其意义. 地球科学, 40(5): 840—850.
- 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.
- 米立军, 袁玉松, 张功成, 等, 2009. 南海北部深水区地热特征及其成因. 石油学报, 30(1): 27—32.
- 能源, 吴景富, 漆家福, 等, 2013. 南海北部深水区新生代盆地三层结构及其构造演化. 地质学报, 87(3): 403—414.
- 邵磊, 孟晓捷, 张功成, 等, 2013. 白云凹陷断裂特征对构造与沉积的控制作用. 同济大学学报(自然科学版), 41(9): 1435—1441.
- 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, 40.
- 舒良树, 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 12(4): 418—431.
- 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): 1589—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.
- 杨超群, 贺同兴, 翁世劼, 等, 1988. 广东省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 杨香华, 陈红汉, 叶加仁, 等, 2000. 渤中凹陷大型湖泊三角洲的发育特征及油气勘探前景. 中国海上油气(地质), 14(4): 226—232.
- 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.
- 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.
- 张功成, 苗顺德, 陈莹, 等, 2013. “源热共控”中国近海天然气富集区分布. 天然气工业, 33(4): 1—17.
- 张功成, 王琪, 苗顺, 等, 2014a. 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, 杨海长, 陈莹, 等, 2014b. 白云凹陷——珠江口盆地深水区一个巨大的富生气凹陷. 天然气工业, 34(11): 11—25.
- 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.
- 周路, 关旭, 雷德文, 等, 2013. 莫东地区白垩系清水河组一段叠瓦状前积地震反射特征的地质意义. 石油地球物理勘探, 48(4): 625—633.
- 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等, 2012. 南海北部深水区油气成藏与勘探. 科学通报, 57(20): 1833—1841.
- 朱筱敏, 信荃麟, 1989. 利用地震反射前积结构确定古水体系. 中国石油大学学报(自然科学版), 13(1): 9—14.