卫哲,向绪洪,谢世文,等. 珠江口盆地白云凹陷古近系源-汇系统耦合及时-空演化.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1927-1939. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240247.
Wei Zhe,Xiang Xuhong,Xie Shiwen,et al. Source-to-Sink System Coupling and Time-Space Evolution of Paleogene in Baiyun Sag,Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(6):1927-1939. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240247.

珠江口盆地白云凹陷古近系源-汇系统耦合及时-空演化

卫 哲[1,2],向绪洪[1,2],谢世文[1,2],张朋霖[3],单玄龙[3]
1.中海石油深海开发有限公司,广东 深圳 518054
2.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054
3.吉林大学地球科学学院,长春 130061

摘要:白云凹陷位于珠江口盆地南部,属于继承性深大凹陷,目前勘探成果表明其为富气凹陷。受控于白云凹陷古近系文昌组和恩平组古地貌格局、断裂组合、物源供给、古沟谷-坡折体系等因素的差异,研究区发育了多个不同类型的源-汇系统。为了明晰研究区内源-汇系统耦合及时-空演化规律,本文通过详细的岩石矿物学分析及三维地震资料对区内核心参数进行了定量化表征。结果表明:裂陷早期(下文昌组时期),物源以盆内基底的中生代中酸性火成岩供源为主,盆地整体呈现了凹隆相间的格局,沉积中心与深洼受NWW和NE向两组不同展布方向的轴向断槽物源控制,并形成了富长英质砂体;该时期的砂体分布范围十分有限,主要呈现短程、低结构成熟度的特征。上文昌组时期,轴向物源逐渐萎缩,受沟谷体系制约的北部物源通道规模逐渐增大,与下文昌组时期相比,该时期碎屑岩具有更高的结构成熟度和成分成熟度,显示了较大规模的搬运过程。恩平组时期,岩相古地理及物源体系格局均与文昌组时期存在明显差异,呈现典型的浅水广盆沉积特征,并在西北通道一侧发育大规模盆外物源,盆内物源区规模明显减小。

关键词:珠江口盆地;白云凹陷;古近系;物源体系;时空演化
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240247 **中图分类号**:P618.13;TE122 **文献标志码**:A

Source-to-Sink System Coupling and Time-Space Evolution of Paleogene in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

Wei Zhe[1,2], Xiang Xuhong[1,2], Xie Shiwen[1,2], Zhang Penglin[3], Shan Xuanlong[3]
1. *CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen* 518054, *Guangdong, China*
2. *CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen* 518054, *Guangdong, China*
3. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun* 130061, *China*

收稿日期:2024-10-08
作者简介:卫哲(1986-),男,工程师,主要从事珠江口盆地(东部)油气勘探与地质方面的研究,E-mail: weizhe@cnooc.com.cn
通信作者:谢世文(1985-),男,高级工程师,主要从事沉积学与油气地质方面的研究,E-mail:xieshw@cnooc.com.cn
基金项目:中国海洋石油集团有限公司"十四五"重大科技项目(KJGG2021-0100)
Supported by the Major Science and Technology Project of CNOOC During the 14th Five-Year Plan Period (KJGG2021-0100)

Abstract: Baiyun sag is located in southern Pearl River Mouth basin, which is an inherited deep sag. The current exploration results show that it is a gas-rich sag. However, it is controlled by the paleogeomorphology pattern, fault combination, source supply, and paleo-valley-slope break system of the Paleogene Wenchang Formation and Enping Formation in Baiyun sag. There are many different types of source-sink systems in the study area. In this paper, through detailed rock mineralogical analysis and three-dimensional seismic data, the coupling and time-space evolution of the Paleogene source-sink system in Baiyun sag are revealed. In the early stage of rifting (Lower Wenchang Formation), the source was dominated by Mesozoic intermediate-acid igneous rocks in the basement of the basin. The basin as a whole showed a pattern of depression and uplift. The sedimentary center and deep sag were controlled by two groups of axial faults trough sources with different distribution directions in NWW and NE directions, and formed felsic-rich sand bodies. The distribution range of sand bodies in this period is very limited, mainly showing the characteristics of short range and low structural maturity. The axial provenance of the Upper Wenchang Formation gradually shrank, and the scale of the northern provenance channel restricted by the gully system gradually increased. Compared with the Lower Wenchang Formation, the clastic rocks of the Upper Wenchang Formation had higher structural maturity and compositional maturity, showing a large-scale transportation process. The lithofacies paleogeography and provenance system pattern of the Eenping period are obviously different from those of the Wenchang period. It is characterized by the typical sedimentary characteristics of shallow water and wide basin, and large-scale shore-shallow lacustrine facies and braided river delta are developed on the side of the northwest channel. The scale of the source area in the basin is significantly reduced, and the long axis source system outside the basin restricts the distribution of large-scale sand bodies.

Key words: Pearl River Mouth basin; Baiyun sag; Paleogene; provenance system; spatiotemporal evolution

0 引言

随着世界油气勘探技术的进步,源-汇体系分析在全球范围内得到了广泛的关注[1-2]。源-汇体系分析包含了物理化学风化背景下物源区碎屑沉积物的成分、物质搬运方式、汇水区(海盆或湖盆等)岩相古地理的展布[3-4]。物源研究强调了动态构造背景下内在因素与外在动力耦合机制[5]。目前,陆相湖盆的源-汇体系分析是该领域的热门话题,与经典的被动大陆边缘盆地模型相比,其类型复杂多样(断陷型、坳陷型等)且转换过程快;此外,陆相湖盆物源区-搬运区-沉积区受多种因素复合控制,普遍具有相变快及多物源区的特征,以及类型丰富多样的搬运通道。因此,需要对陆相湖盆进行精细的物源区构造背景分析及对沉积体系进行刻画,才能揭示多物源区背景下的碎屑物源供给、搬运通道类型,并进一步了解不同类型或不同级次的"源-渠-汇"系统差异化耦合模式。

珠江口盆地白云凹陷在古南海消亡及新南海诞生的背景之下[6-7],具有断陷、断坳、坳陷性质。古近纪以来,白云凹陷整体表现为一宽缓的复合半地堑。文昌组时期,白云凹陷具有北倾拆离半地堑样式。断层对沉积厚度控制作用明显,中深湖相主要发育在近断层的深断次洼中。而恩平组时期,白云凹陷具有浅水广盆的特征。受控于白云凹陷古近系文昌组和恩平组古地貌格局、断裂组合、物源供给、古沟谷-坡折体系等因素差异的影响,研究区发育多个不同类型的源-汇系统,并且不同系统之间存在本质上的差异[8-9],这些差异会导致不同源-汇系统内沉积体和有利砂体的分布特征存在明显不同[10-13]。本文基于薄片分析及三维地震资料提取核心参数对白云凹陷物源区开展定量化表征,明确不同源-汇系统差异性,以揭示动态构造背景演化下的古近系源-汇系统耦合及时-空差异演化规律。

1 地质背景

白云凹陷是珠江口盆地最大的凹陷,位于中国

近海两个含油气带的第二盆地带，处于珠江口盆地珠二坳陷的东北部(图 1a)[10-11]，即南海北部大陆边缘陆坡区，为海陆过渡相富气坳陷盆地，为长期稳定下沉的负构造单元[10,12]，面积大于 20 000 km^2，水深为 200～3 000 m，构造单元内 70%以上范围的水深大于 500 m。白云凹陷总体呈复式地堑结构样式，盆地 NEE 向展布。白云凹陷北部为番禺低隆起，西南部为云开低凸起，东侧与东沙隆起相邻(图 1b)。白云凹陷整体上可划分为白云主洼(约 4 800 km^2)、白云东洼(约 512 km^2)和白云西洼(约 900 km^2)，其中白云主洼北部坡度较缓，南部呈现陡坡断阶的特征，整体上表现为断裂不完全控制沉积中心的断坳结构[10-12]。恩平组沉积时期，白云凹陷处于裂谷演化的晚期，断坳特征明显[14-15]，整体呈南陡北缓、南断北超的宽“半地堑”特征。东南部则与荔湾凹陷毗邻，沉积背景为滨浅海与局限海，结束了文昌组沉积时期“洼陷分隔”的沉积格局[16]。

2　物源体系特征

2.1　基岩组成

南海北部发育一系列 NW 向基底深大断裂，深大断裂是岩浆侵位的重要通道。南海北部陆缘以阳江—一统暗沙断裂为界，该断裂以东近端带主要发育燕山期岩浆岩，以西近端带主要发育浅变质变沉积岩和沉积岩，零星发育燕山期岩浆岩；而珠江口盆地深水区主要发育由于新生代岩石圈伸展、拆离薄化形成的地壳核杂岩和地幔核杂岩，琼东南深水区南部隆起区发育大面积的燕山期岩浆岩，零星分布印支期岩浆岩和前寒武纪地层[14-15]。珠江口盆地约 173 口井钻遇中生代地层，进尺超过 50 m 的钻井 48 口，占比为 28%，岩性以花岗岩等中酸性侵入岩为主。前人[14-15]研究表明珠江口盆地基底主要形成于晚侏罗世—早白垩世(J_3－K_1)的岩浆建造活动中。

2.2 岩石学特征

原岩的岩石组构属性在经历搬运及沉积再旋回的多期次过程中，部分信息可以记录在盆地的沉积岩石内，故分析地层中沉积岩的岩石学特征能够揭示沉积物的来源及相关物源区的范围。本次研究薄片取自白云深水区的 4 口井，共计 37 个薄片样品，分析结果表明，研究区碎屑岩以石英为主，岩屑体积分数普遍较高(图 2)。断陷早期下文昌组石英平均体积分数为 43%，长石平均体积分数为 32%，岩屑平均体积分数为 25%(其中花岗岩岩屑体积分数 22%，沉积岩岩屑体积分数1%，变质岩岩屑体积分

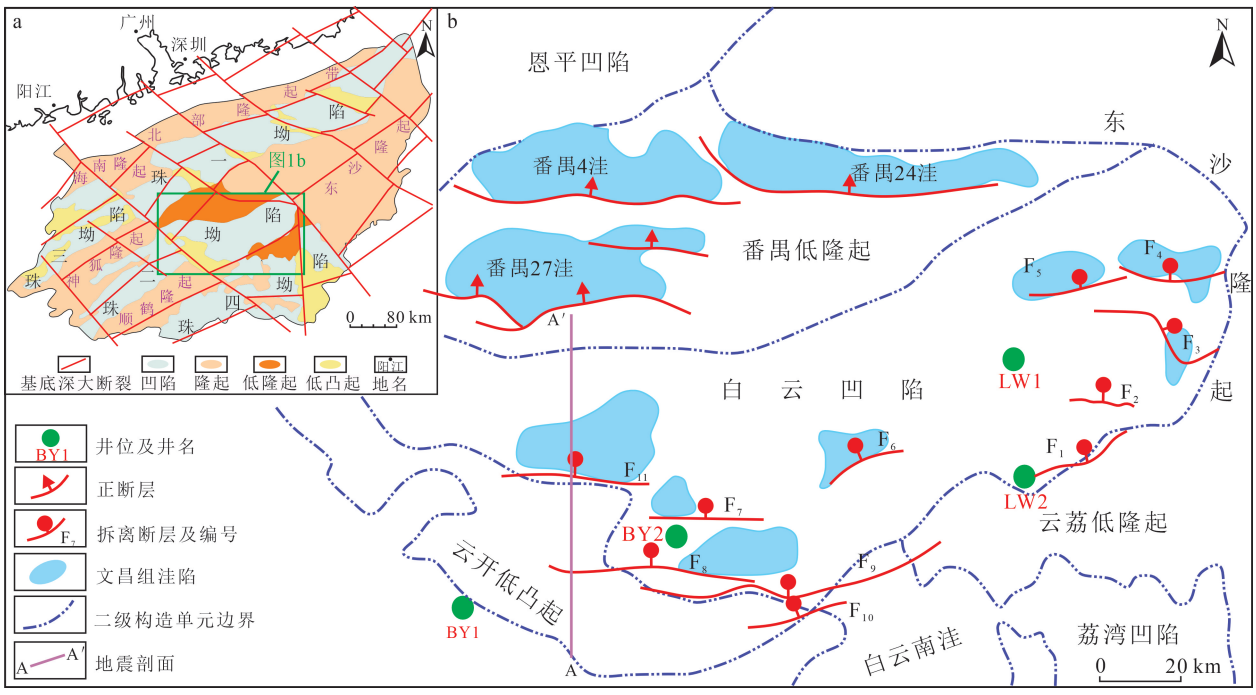
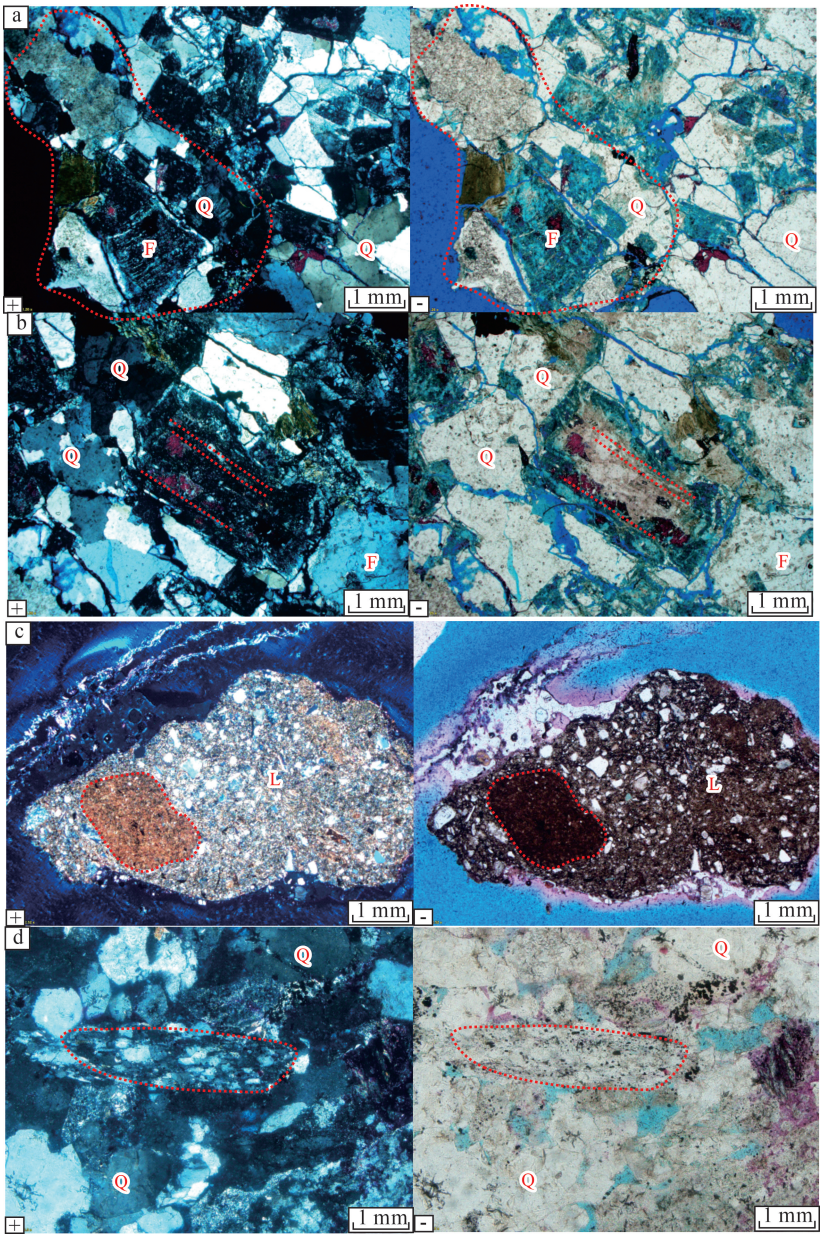


图 1　珠江口盆地(a)和白云凹陷(b)构造位置图

Fig.1　Structural location map of Pearl River Mouth basin (a) and Baiyun sag (b)



a. BY1井,文4段,2 663.3 m,花岗岩岩屑;b. BY1井,文4段,2 663.3 m,凝灰岩岩屑; c. LW1井, 文3段,4 025.3 m,泥岩岩屑;d. LW2井,恩1段,3 974.0 m,变质岩岩屑。红色虚线表示岩屑边界。Q.石英;F.长石;L.岩屑。

图2 珠江口盆地碎屑岩的典型薄片照片

Fig.2 Typical thin section photos of clastic rocks in Pearl River Mouth basin

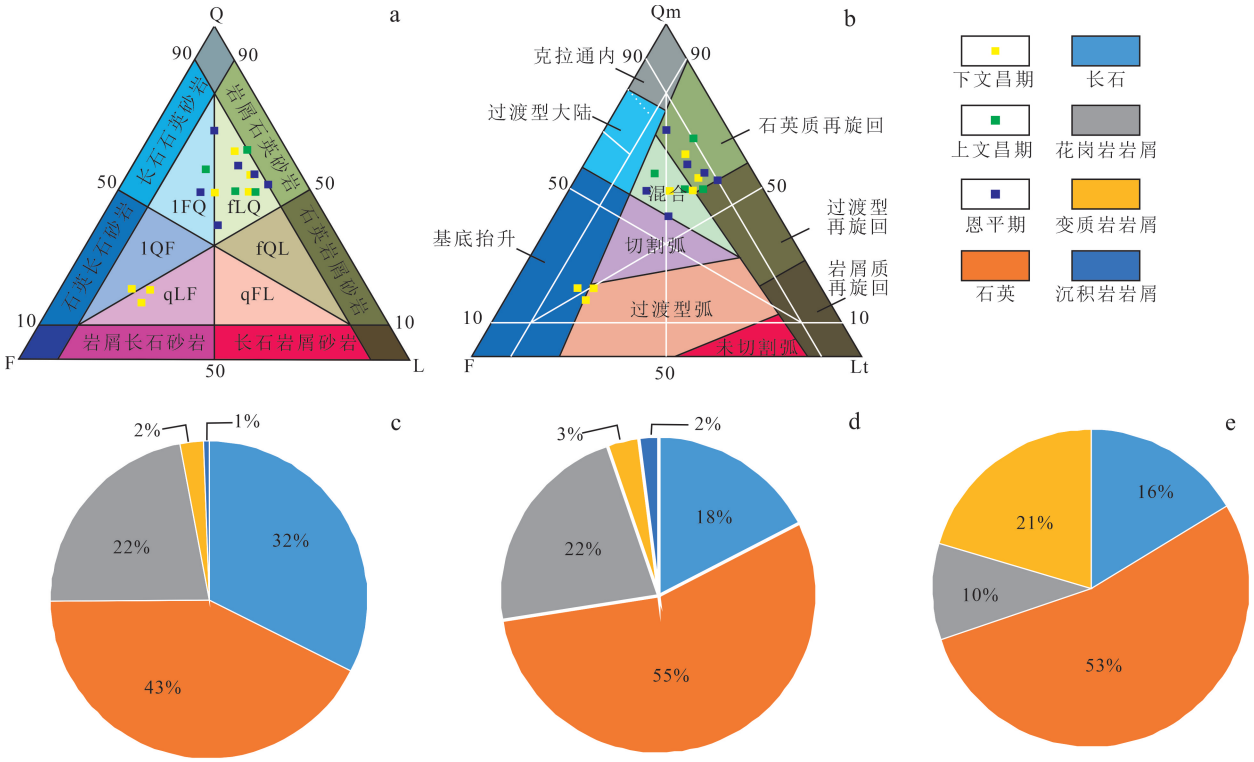
数2%);上文昌组石英体积分数有所增加,达到了55%,长石体积分数为18%,岩屑体积分数为27%(其中花岗岩岩屑体积分数22%,沉积岩岩屑体积分数2%,变质岩岩屑体积分数3%);断坳转换期恩平组石英体积分数为53%,长石体积分数为16%,岩屑显著增加,体积分数高达31%(其中花岗岩岩屑体积分数10%,变质岩岩屑体积分数21%)。

实用的砂岩命名方案应具有易操作和能直观反映成分的特征。此次研究应用的砂岩分类方案采用Garzanti图版[17-18]。该分类体系源自Gazzi-Dickinson碎屑统计法(QFL)。其中,L代表所有的沉积岩、变质岩、花岗岩和超基性岩岩石碎屑,同时考虑了前人命名方案中被特殊归类的硅质岩、灰岩和白云岩碎屑。该分类系统采取完全对称的模式,只要某一端元物质的体积分数大于10% 即被引入命名。研究区碎屑岩构造判别图解及岩屑饼图见图

3。由图 3a 可知，研究区下文昌期、上文昌期、恩平期均主要发育长石岩屑石英砂岩，此外，下文昌期还发育石英岩屑长石砂岩和岩屑石英长石砂岩，上文昌期和恩平期还发育岩屑长石石英砂岩。

2.3　构造背景

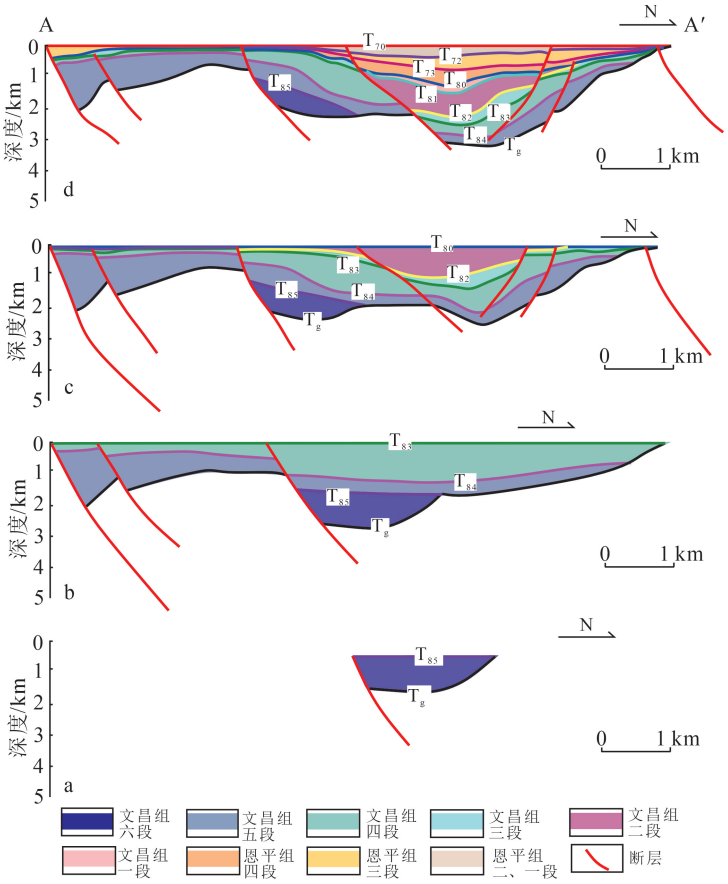
二十世纪六七十年代，大陆板块构造研究体系被广泛关注，科学家提出了基于砂岩碎屑组分研究的特定板块构造背景分析。虽然近年来提出的 Dickinson 模式[17-19]依托于“砂岩中的碎屑模式可反映源区的构造背景”这一理论，然而 Dickinson 模式也存在争议；这是因为砂岩的物质组成仅代表母岩的矿物组成，无法判别这些物质是否存在迁移，是否来自造山带[17-18]。本文应用基于现代河流砂提出的 QmFLt 构造判别图解[17-18]结合三维地震资料，对研究区内碎屑岩物源构造背景进行分析。研究结果表明：下文昌组时期，碎屑岩中以花岗岩岩屑为主（图 3c），体现了盆内供源的特征，QmFLt 构造判别图解（图 3b）显示该时期物源区构造背景具有基底抬升-混合质石英再旋回的特征，盆地西南部物源主要体现了基底抬升的构造背景，可能与 T_{83}—T_{84} 界面云开低隆起的抬升有关；此外，位于云开低隆起上的 BY1 井文昌组 4 段薄片可见隐晶质纹层和碎屑颗粒相间的凝灰岩岩屑（图 2b），该发现也揭示了区域隆升期间伴随着规模火山活动的发育。上文昌组时期，酸性岩屑依然占据主导，QmFLt 构造判别图解（图 3b）表明该期物源区构造背景为混合-石英再旋回，主要为盆内供源；此外，该时期的沉积岩岩屑体积分数较下文昌期有所增加（图 3c、d），表明了盆地东部燕山期沉积岩源区的贡献。恩平组时期，较文昌组时期变质岩岩屑体积分数显著增加（图 3c—e），表明该时期可能受到盆外水系物源供给的影响，以太古宙—古生代变质岩为代表的华南褶皱带基岩可能通过古珠江水系以变质岩屑的形式进入珠江口盆地[12]；此外，QmFLt 构造判别图解（图 3b）表明该期物源区背景主要具有石英质再旋回的特征，显示了较高的成分成熟度和物源区较远及沉积再旋回的属性（图 4）。



a. 岩屑三角图版[17-18]；b. 构造三角图版[17-18]；c. 下文昌期岩屑饼图；d. 上文昌期岩屑饼图；e. 恩平期岩屑饼图。Q. 石英砂岩；F. 长石砂岩；L. 岩屑砂岩；Qm. 多晶石英；Lt. 岩屑总量；lFQ. 岩屑长石石英砂岩；lQF.岩屑石英长石砂岩；qLF.石英岩屑长石砂岩；qFL.石英长石岩屑砂岩；fQL. 长石石英岩屑砂岩；fLQ. 长石岩屑石英砂岩。

图 3　珠江口盆地碎屑岩的 QFL 构造判别图解及岩屑体积分数饼状图

Fig.3　QFL structure discrimination diagram and rock debris content pie chart of clastic rocks in Pearl River Mouth basin



a. 文昌组六段盆地恢复期;b. 文昌组下段盆地恢复期;c. 文昌组盆地恢复期;d. 文昌组—恩平组盆地恢复期。剖面位置见图1。

图4 白云凹陷原型盆地恢复

Fig.4 Restoration of prototype basin in Baiyun sag

3 搬运体系特征

基于碎屑岩岩石组构的研究通常只能在大规模尺度上揭示物源区与盆内凸起或盆外水系的关联特征,但在精细对比方面,需要进一步基于研究区广泛分布的三维地震资料刻画沉积物的搬运路径及相关沉积体系的精细特征。

3.1 典型搬运通道地震充填模式

研究区主要识别出两类沉积搬运通道系统,即古沟谷及断槽搬运通道。古沟谷是断陷湖盆中一种典型的物源搬运通道,依据搬运通道几何形态(宽深比)可将其进一步定义为"V"型沟谷、"U"型沟谷及"W"型沟谷。作为最普遍的一种物源通道类型,在剖面上,古沟谷主要表现为底界面具有明显下凹、内部具有典型双向充填模式、局部可见杂乱空白发射等特征。断槽搬运通道是湖盆断陷早期主要发育的一种沉积物搬运模式,通常发育于盆地边缘位置,是因构造活动局部隆升形成的相对处于低势区的对偶双断或单断控制的搬运通道。在断陷湖盆内部,受多期构造运动影响改造,往往会形成一系列由于断裂活动形成的槽道或断沟通道(图5)。

3.2 断陷期-断坳转换期搬运通道演化

下文昌组时期,白云凹陷具有典型的断陷盆地特征,发育轴向分布的西南部断槽搬运通道(图6)、东北部断槽-沟谷搬运通道以及北部缓坡沟谷搬运通道。其中,受到 T_{83}—T_{84} 界面云开低隆起抬升的影响,西南部断槽搬运通道规模较大,输砂能力较强,并受到对偶双断型断槽的制约;从盆外到盆内,断槽宽深比由0.6过渡为0.8,河谷下蚀能力逐渐变弱;通道上游相对低势区具有双向上超、中低频、断续-连续强反射地震相,通道窄深,通道下游低势区普遍具有中频、连续中—强反射地震相,多期水道侧向叠置的特点。东北部断槽-沟谷搬运通道也普遍具有较低的宽深比,从盆外到盆内,断槽宽深比由

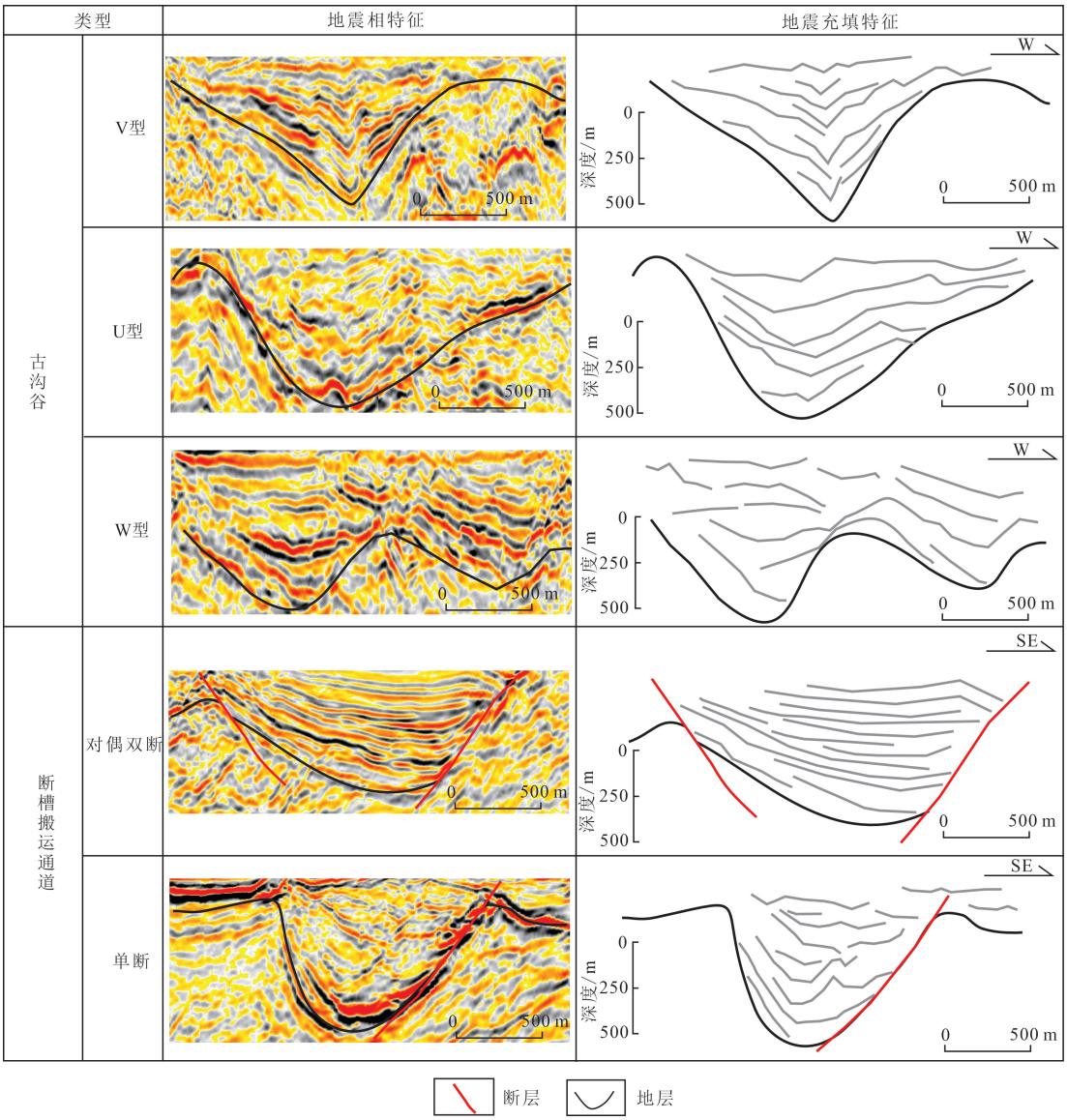


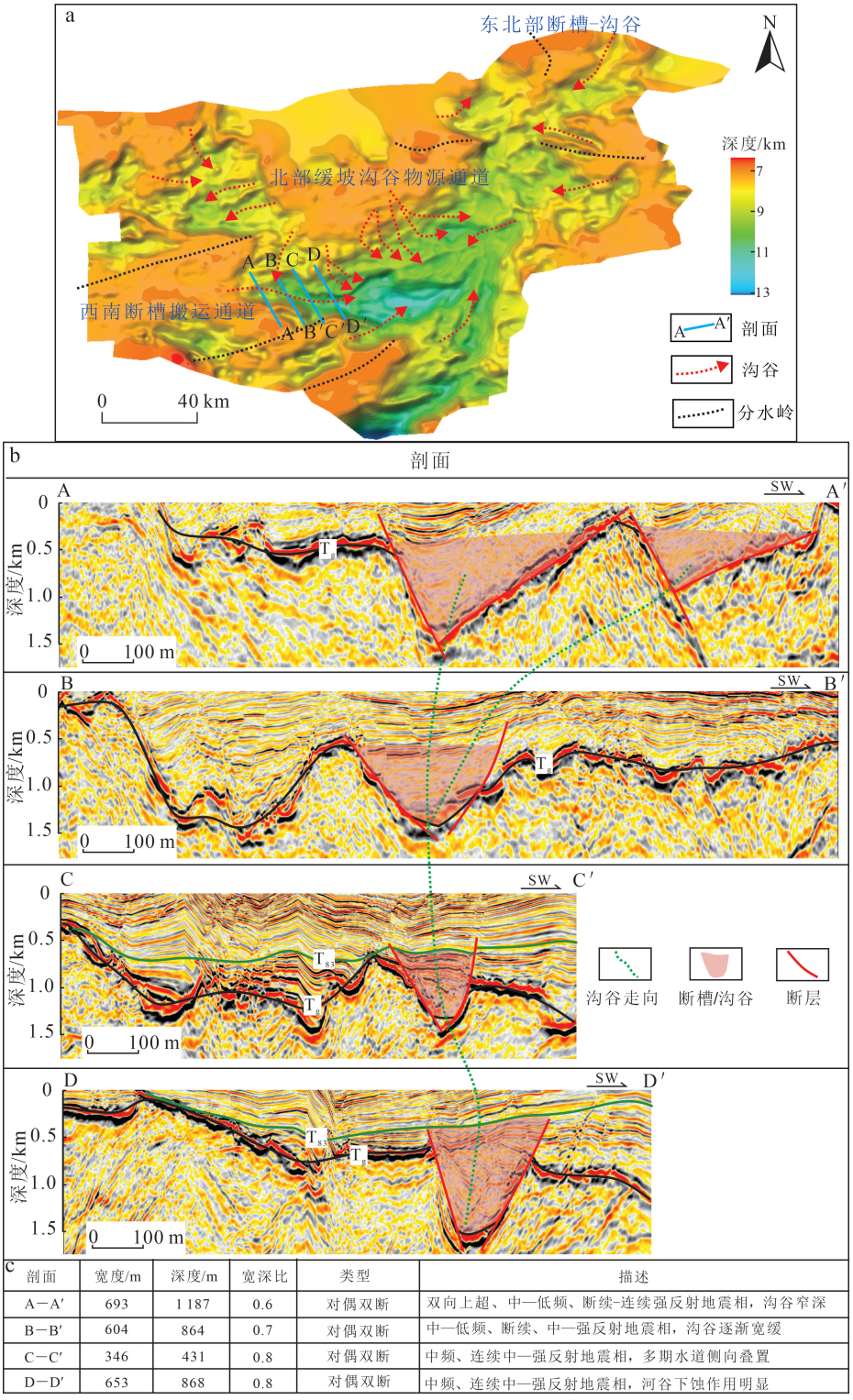
图 5　白云凹陷典型搬运通道地震充填模式

Fig.5　Seismic filling mode of typical transport channels in Baiyun depression

0.3 过渡为 0.7，盆外物源通道主要由单断槽控制，具有双向上超、中低频、弱反射地震相，窄深通道的特点；通道下游低势区盆地内部搬运通道由“V”型过渡为“W”型，通道普遍具有中低频、中—弱反射地震相，多期河道叠置，河谷逐渐宽缓的特点。北部缓坡沟谷搬运通道不甚发育，规模有限，沟谷主要以宽缓的“W”型为主，宽深比由 0.6 过渡为 1.6，盆外具有双向上超、中低频、断续型反射地震相的特征，通道下游低势区河谷下蚀能力弱。综合分析表明，下文昌组主要以轴向物源为主，断陷强烈，主断裂各分支活动性增强，加剧盆地沉降，最大湖泛面规模增加，破坏上升盘的沉积剥蚀平衡形成下切，因此这一时期以断槽为代表的轴向物源搬运通道十分普遍（图 6）。

上文昌组时期，研究区具有部分坳陷性质，断层活动减弱，轴向断槽型物源通道搬运能力逐渐减小，部分断槽被充填，最终转化为湖盆沉积空间，主要以北部缓坡沟谷物源通道为主。该时期盆地北部缓坡沟谷物源通道发育，其主要由一套宽深比较小的沟谷体系控制（图 7），通道上游盆外物源区主要以“V”型窄深沟谷控制。通道上游宽深比约为 0.2，具有中频、不连续中—弱反射地震相，双向上超地震反射的特征，河谷下蚀作用明显；低势区河谷较为宽缓，通道宽深比介于 0.3～0.4 之间，具有不连续中—弱反

射地震相、多期河道侧向叠置的特征。相较于下文昌组时期，该时期北部缓坡沟谷物源通道规模更大，河谷下蚀能力更强，可能与上文昌期白云凹陷北部番禺低隆起的区域隆升作用有关。



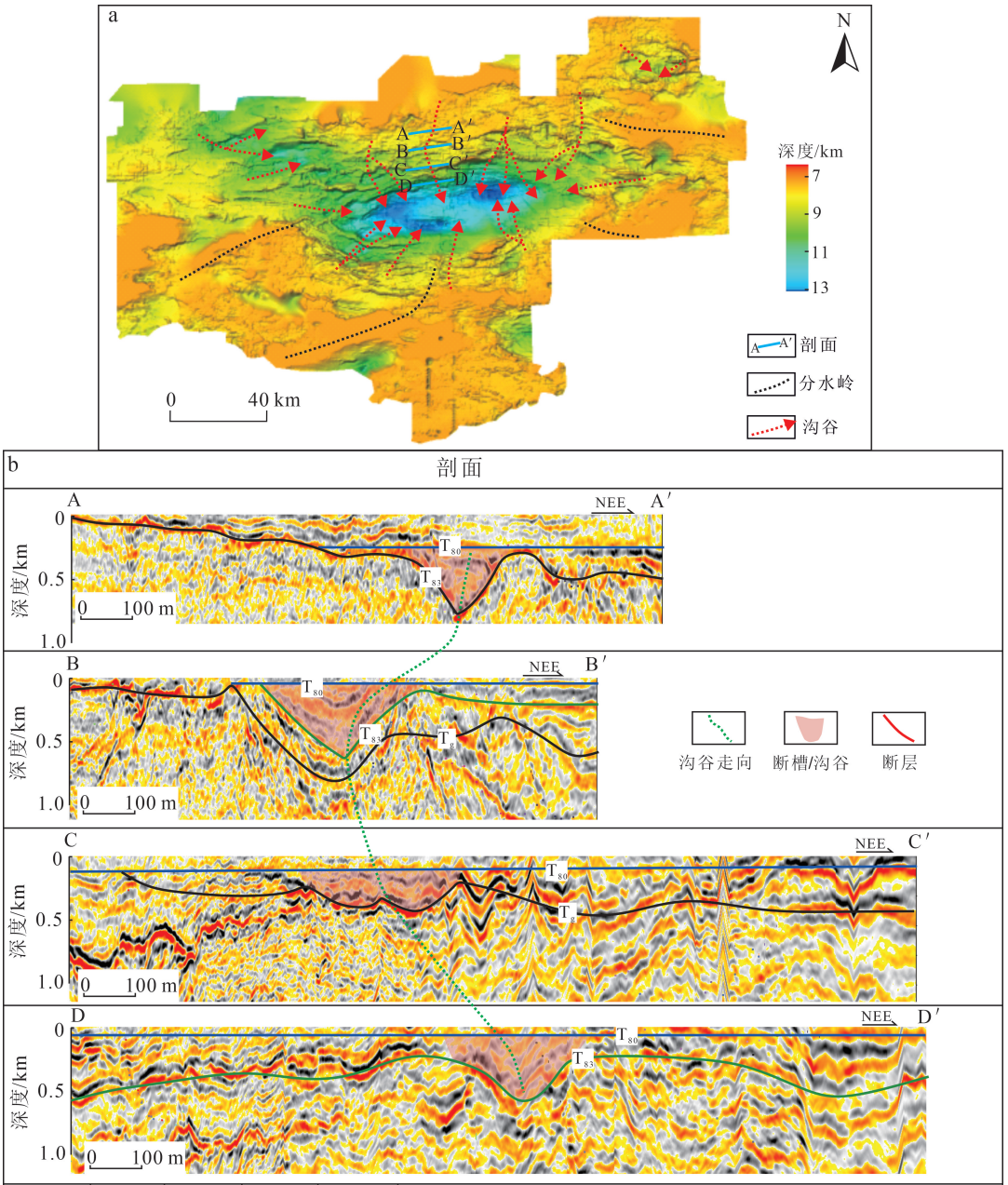
c

剖面	宽度/m	深度/m	宽深比	类型	描述
A—A′	693	1 187	0.6	对偶双断	双向上超、中—低频、断续-连续强反射地震相，沟谷窄深
B—B′	604	864	0.7	对偶双断	中—低频、断续、中—强反射地震相，沟谷逐渐宽缓
C—C′	346	431	0.8	对偶双断	中频、连续中—强反射地震相，多期水道侧向叠置
D—D′	653	868	0.8	对偶双断	中频、连续中—强反射地震相，河谷下蚀作用明显

a. 下文昌组时期古地貌特征及剖面位置；b. 西南部断槽搬运通道典型剖面；c. 西南部断槽搬运通道几何信息统计。

图6 白云凹陷下文昌组西南部断槽搬运通道地震充填特征

Fig.6 Seismic filling characteristics of fault trough transport channel in southwest Wenchang Formation in Baiyun sag



c

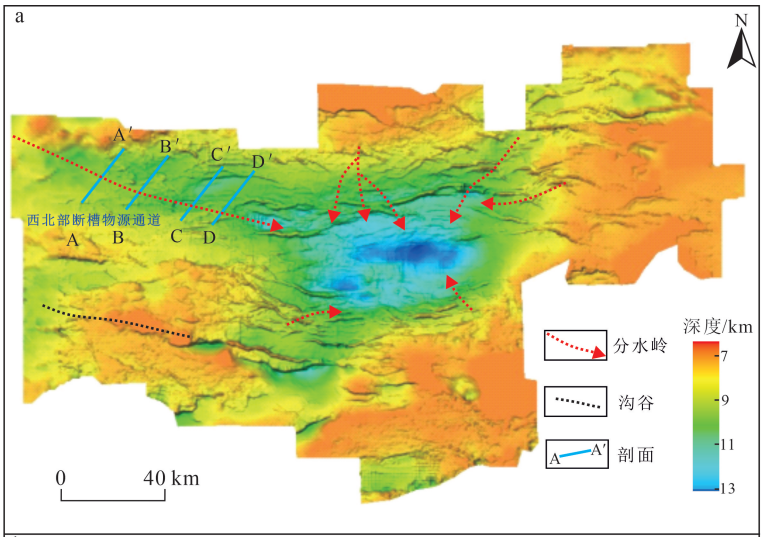
剖面	宽度/m	深度/m	宽深比	类型	描述
A−A′	97	544	0.2	V型	中频、不连续中—弱反射地震相，窄深通道，古地貌控制下的沟谷体系
B−B′	153	644	0.2	V型	双向上超、中频、连续中—弱反射地震相，窄深通道，河谷下蚀明显
C−C′	108	330	0.3	W型	双向上超、中频、不连续中—弱反射地震相，窄深通道，河谷下蚀明显
D−D′	131	330	0.4	U型	中频、不连续中—弱反射地震相，多期河道侧向叠置，宽缓通道

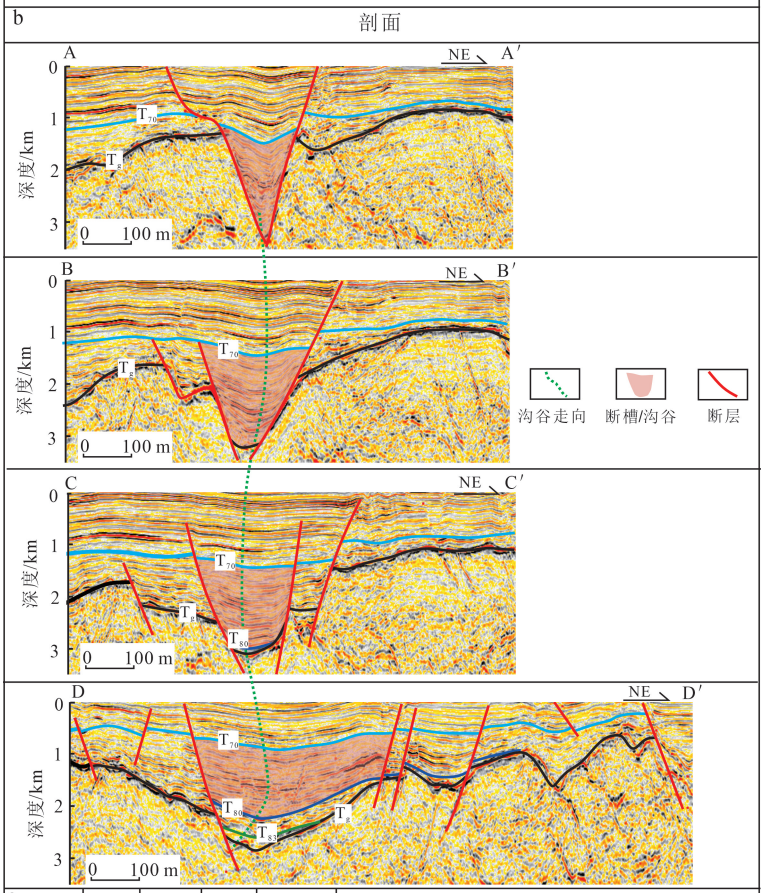
a. 上文昌组时期古地貌特征及剖面位置；b. 北部缓坡沟谷物源通道典型剖面；c. 北部缓坡沟谷物源通道几何信息统计。

图 7　白云凹陷上文昌组北部缓坡沟谷物源通道地震充填特征

Fig.7　Seismic filling characteristics of source channels in the gentle slope gully in the north of Shangwenchang Formation in Baiyun sag

恩平组时期，白云凹陷进入断坳转换期，随着珠江口盆地内部凸起或隆起区准平原化作用的进一步增强，物源区的汇水面积明显减小。西北部断槽搬运通道受到对偶双断型断槽的控制（图8），具有较





c

剖面	宽度/m	深度/m	宽深比	类型	描述
A—A′	177	1 693	0.1	对偶双断	中低频、中—弱反射地震相，窄深通道，双断槽控制
B—B′	263	1 407	0.2	对偶双断	中低频、连续中—强反射地震相，窄深通道，双断槽
C—C′	261	1 226	0.2	对偶双断	中频、连续中—强反射地震相，断槽逐渐宽缓
D—D′	476	1 326	0.4	对偶双断	中频、连续中—强反射地震相，宽缓沟谷，下蚀明显

a. 恩平组时期古地貌特征及剖面位置；b. 西北部断槽搬运通道典型剖面；c. 西北部断槽搬运通道几何信息统计。

图8 白云凹陷恩平组西北部断槽搬运通道地震充填特征

Fig.8 Seismic filling characteristics of fault trough transport channel in northwest Enping Formation in Baiyun sag

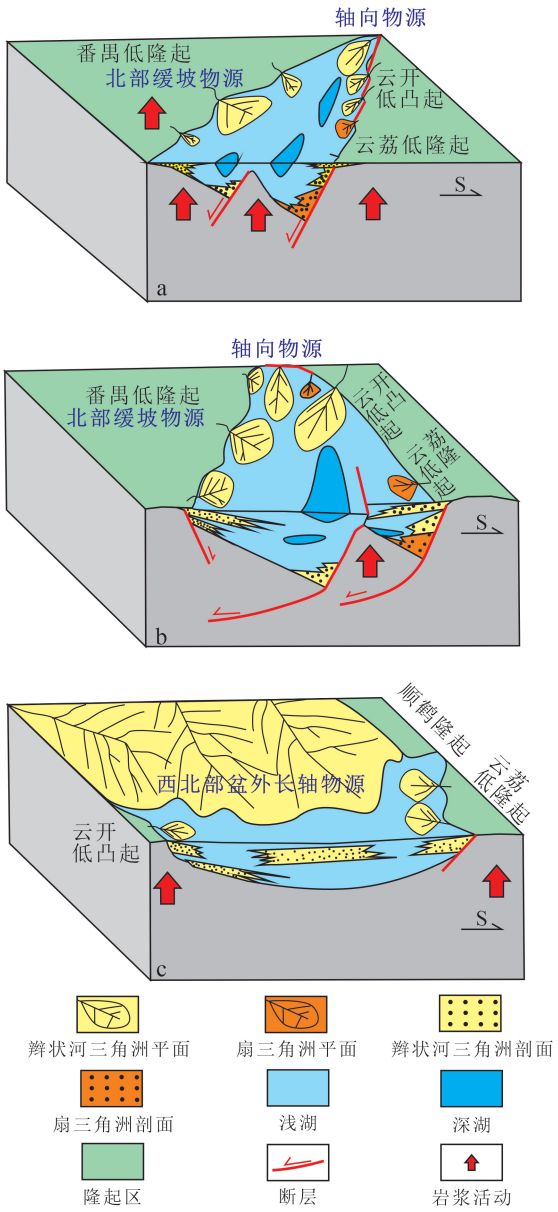
低的纵横比。通道上游断槽横纵比仅为 0.1～0.2，具有双向上超、中—弱反射的地震相特征，通道下游低势区宽深比有所增加，最高可达 0.4，其具有双向上超、中频、连续中—强反射地震相特征。

4　源-汇体系耦合机制

下文昌组时期，研究区裂陷活动剧烈，深大断裂活动和湖盆的快速沉降形成了较大可容空间及半补偿的状态。白云凹陷内部基底先存断裂体系加剧活化，加之受云开低凸起局部隆升的影响，白云凹陷西南缘控盆断裂系统活动进一步加剧，并在古地貌的制约下，盆内周缘隆起的短轴河谷体系进入汇水中心，导致 NE 向轴向物源体系的发育（图 9a）。这一时期地层沉积厚度较大，但与扇三角洲、辫状河三角洲相关的富砂沉积体系发育规模较小。此外，沉积物物源很大程度上制约了储集体的岩石组构及湖盆内部的沉积建造，并进一步约束了砂体物性和湖相细粒沉积的有机质丰度。通过上文对物源区构造背景和岩屑成分分析，可知裂陷阶段以白云凹陷盆地基底等局部物源为主，碎屑岩中花岗岩碎屑体积分数较高。综合分析表明，裂陷早期的下文昌组阶段，物源以盆内基底的中生代中酸性火成岩供源为主，盆地整体呈现了坳隆相间的格局，沉积中心与深洼受 NWW 和 NE 向两组不同展布方向轴向断槽物源的控制，并形成了富长英质规模砂体。然而，该时期砂体的分布范围十分有限，主要呈现短程、低结构成熟度的特征。

上文昌组时期，盆地具有凹陷性质，断裂活动减弱，呈现出典型的深洼窄盆特征。NWW 和 NE 向物源供给通道在最大湖泛面的制约下被部分充填（图 9b），供给能力有所下降，然而，北部沟谷体系规模迅速增大，并受到一系列宽深比较小的沟谷体系控制。该时期研究区整体依然以盆内基底物源供给为主，值得注意的是，以泥岩岩屑为代表的沉积岩岩屑体积分数略有增大，并主要发育于盆地的东南侧，表明盆地东部燕山期沉积岩物源区的贡献。此外，构造判别图解（图 3）表明，该期物源区构造背景主要为混合-石英再旋回，也验证了这一观点。综合分析表明，该期轴向物源逐渐萎缩，受沟谷体系制约的北部物源通道规模逐渐增大，与下文昌组时期相比，该期碎屑岩具有更高的结构成熟度和成分成熟度，显示了较大规模的搬运过程。

恩平组时期，珠江口盆地开始进入珠琼裂陷Ⅱ幕，随着研究区进入断坳转换期，内部凸起或隆起区准平原化，盆内隆起规模减小，低凸起物源体系的分布范围及规模进一步缩小（图 9c）。同时白云凹陷西北缘与恩平凹陷南部之间的古沟谷物源通道开始出现，该物源通道受到对偶双断型断槽的控制，具有较低的纵横比，显示了强下蚀性和较强的输砂能力；此外该通道的出现可能沟通了恩平凹陷，较高的变质岩岩屑体积分数与太古宙—古生代变质岩为代表的华南褶皱带基岩有关。构造判别图解（图 3）表



a. 下文昌组时期；b. 上文昌组时期；c. 恩平组时期。

图 9　白云凹陷沉积相及源-汇体系演变模式图

Fig.9　Evolution pattern of sedimentary facies and source sink system in Baiyun sag

明,该期构造背景以石英质再旋回为主,揭示了显著的沉积再循环特征。综合分析表明,恩平组时期为典型的浅水广盆的沉积特征,这一时期的岩相古地理及物源体系格局均与文昌期存在明显差异,在西北通道一侧发育大规模盆外物源,盆内物源区规模明显减小。

5 结论

1)本次研究薄片取自白云深水区的4口井,共计37个薄片样品,研究区碎屑岩以石英为主,岩屑含量普遍较高。研究区下文昌期、上文昌期、恩平期均主要发育长石岩屑石英砂岩,此外,下文昌期还发育石英岩屑长石砂岩和岩屑石英长石砂岩,上文昌期和恩平期还发育岩屑长石石英砂岩。

2)裂陷早期的下文昌组时期,物源以盆内基底的中生代中酸性火成岩供源为主,盆地整体呈现了坳隆相间的格局,沉积中心与深洼受NWW和NE向两组不同展布方向的轴向断槽物源控制,并形成了富长英质规模砂体。然而,该时期的砂体分布范围十分有限,主要呈现短程、低结构成熟度的特征。上文昌组时期,轴向物源逐渐萎缩,受沟谷体系制约的北部物源通道规模逐渐增大,与下文昌组时期相比,该期碎屑岩具有更高的结构成熟度和成分成熟度,显示了较大规模的搬运过程。恩平组时期,岩相古地理及物源体系格局均与文昌组时期存在明显差异,为典型的浅水广盆的沉积特征,并在西北通道一侧发育大规模盆外物源,盆内物源区规模明显减小。

参考文献(References):

[1] Romans B W, Graham S A. A Deep-Time Perspective of Land-Ocean Linkages in the Sedimentary Record [J]. Annual Review of Marine Science, 2013, 5: 60-94.

[2] Sømme T O, Jackson C A, Vaksdal M. Source-to-Sink Analysis of Ancient Sedimentary Systems Using a Subsurface Case Study from the Møre-Trøndelag Area of Southern Norway: Part 1: Depositional Setting and Fan Evolution[J]. Basin Research, 2013, 25(5): 489-511.

[3] 朱红涛,徐长贵,朱筱敏,等. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展[J].地球科学,2017,42(11): 1851-1870.
Zhu Hongtao, Xu Changgui, Zhu Xiaomin, et al. Research Progress on Coupling Elements of Terrestrial Basin Source Sink System[J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1851-1870.

[4] 操应长,徐琦松,王健. 沉积盆地"源-汇"系统研究进展[J].地学前缘,2018,25(4): 116-131.
Cao Yingchang, Xu Qisong, Wang Jian. Research Progress on the "Source Sink" System of Sedimentary Basins[J]. Frontiers in Geosciences, 2018, 25(4): 116-131.

[5] 张功成,王琪,苗顺德,等. 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[J].天然气地球科学,2014,25(9):1299-1308.
Zhang Gongcheng, Wang Qi, Miao Shunde, et al. Binary Distribution Model of Marine Terrestrial Transitional Hydrocarbon Source Rocks in China Offshore: Taking Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin as an Example[J]. Natural Gas Earth Science, 2014, 25(9): 1299-1308.

[6] 韩银学,陈莹,杨海长,等. 白云凹陷恩平组"源-汇"体系及其对油气勘探的影响[J].中国石油勘探,2017,22(2):25-34.
Han Yinxue, Chen Ying, Yang Haichang, et al. The Source Sink System of Enping Formation in Baiyun Depression and Its Impact on Oil and Gas Exploration [J].China Petroleum Exploration, 2017, 22(2): 25-34.

[7] 柳保军,庞雄,颜承志,等. 珠江口盆地白云深水区沉积充填演化及控制因素分析[J]. 中国海上油气,2011,23(1):19-25.
Liu Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. Analysis of Sedimentary Filling Evolution and Control Factors in Baiyun Deep-Water Area of the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(1): 19-25.

[8] 米立军,何敏,翟普强,等. 珠江口盆地深水区白云凹陷高热流背景油气类型与成藏时期综合分析[J]. 中国海上油气,2019,31(1):1-12.
Mi Lijun, He Min, Zhai Puqiang, et al. Comprehensive Analysis on Oil and Gas Types and Accumulation Period of High Heat Flow Background in Baiyun Sag, Deep Water Area of the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(1): 1-12.

[9] 吴伟中,夏斌,姜正龙,等. 珠江口盆地白云凹陷沉积演化模式与油气成藏关系探讨[J].沉积与特提斯地质,2013,33(1):25-33.
Wu Weizhong, Xia Bin, Jiang Zhenglong, et al. Discussion on the Relationship Between Sedimentary Evolution Model and Hydrocarbon Accumulation in

Baiyun Sag, the Pearl River Mouth Basin [J]. Sedimentation and Tethys Geology, 2013, 33 (1): 25 - 33.

[10] Zeng Z W, Zhu H T, Mei L F, et al. Multilevel Source-to-Sink (S2S) Subdivision and Application of an Ancient Uplift System in South China Sea: Implications for Further Hydrocarbon Exploration [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 181: 106220.

[11] Zeng Z W, Zhu H T, Yang X H, et al. Three-Dimensional Imaging of Miocene Volcanic Effusive and Conduit Facies: Implications for the Magmatism and Seafloor Spreading of the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 109: 193 - 207.

[12] Zeng Z W, Zhu H T, Yang X H, et al. Using Seismic Geomorphology and Detrital Zircon Geochronology to Constrain Provenance Evolution and Its Response of Paleogene Enping Formation in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea: Implications for Paleo-Pearl River Drainage Evolution[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 177: 663 - 680.

[13] 刘志峰，王升兰，印斌浩，等. 珠江口盆地珠Ⅰ、珠Ⅲ坳陷裂陷期湖相分布差异及其控制因素[J].石油实验地质，2013，35(5)：523 - 527.
Liu Zhifeng, Wang Shenglan, Yin Binhao, et al. Distribution Difference of Lacustrine Facies and Its Controlling Factors in Zhu Ⅰ and Zhu Ⅲ Depressions of the Pearl River River Mouth Basin During Rifting Period[J]. Petroleum Experimental Geology, 2013, 35 (5): 523 - 527.

[14] 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，2014，44(6)：1312 - 1323.
Sun Xiaomeng, Zhang Xuqing, Zhang Gongcheng, et al. The Basement Structure and Structural Properties of the Cenozoic Basins in the Northern South China Sea[J]. Chinese Science: Earth Sciences, 2014, 44 (6): 1312 - 1323.

[15] 王维，叶加仁，杨香华，等. 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[J].地球科学：中国地质大学学报，2015，40(6)：1061 - 1071.
Wang Wei, Ye Jiaren, Yang Xianghua, et al. Sediment Source Response to Multiple Paleogene Rifting Cycles in Huizhou Sag, the Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(6): 1061 - 1071.

[16] 代一丁. 珠江口盆地西江南洼古近系构造演化与沉积特征[J]. 中国海上油气，2013，25(3)：5 - 11.
Dai Yiding. Tectonic Evolution and Sedimentary Characteristics of Paleogene in Xijiangnanwa, the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25 (3): 5 - 11.

[17] Garzanti, E. Petrographic Classification of Sand and Sandstone[J/OL]. Earth - Science Reviews, 2019, 192: 545 - 563. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.014.

[18] Garzanti E. From Static to Dynamic Provenance Analysis: Sedimentary Petrology Upgraded [J]. Sedimentary Geology, 2016, 336: 3 - 13.

[19] 王柯，高崇龙，王剑，等. 准噶尔盆地南缘东段侏罗系—白垩系物源及其演化特征[J].吉林大学学报(地球科学版)，2022，52(2)：328 - 347.
Wang Ke, Gao Chonglong, Wang Jian, et al. Provenance and Evolution Characteristics of Jurassic-Cretaceous in Eastern Part of the Southern Margin of Junggar Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 328 - 347.