

珠江口盆地白云凹陷始新世盆-源演化过程

闫博¹,向绪洪^{2,3},卫哲^{2,3},单玄龙¹,郝国丽¹,张朋霖¹,王志豪¹,马凌¹

[1. 吉林大学地球科学学院,吉林长春130061;2. 中海石油深海开发有限公司,广东深圳518067;3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳518067]

摘要:珠江口盆地位于南海北部陆缘深水超伸展区,其裂陷期构造演化过程复杂多样。以南海北部珠江口盆地白云凹陷始新世文昌组和恩平组为研究对象,在三级层序尺度下开展了白云凹陷全区原型盆地恢复,弥补了此前洼陷尺度和二级层序地层格架下分析的局限性,提出了白云凹陷裂陷期构造-沉积演化机制的新认识。采用地层趋势法恢复了文昌组和恩平组沉积期的剥蚀厚度。在区域构造背景分析基础上,结合前人沉积体系研究结果,刻画了白云凹陷的原型盆地动态演化过程。研究结果表明:①文昌组至恩平组沉积时期,盆地从强伸展背景的小盆窄湖演化为弱伸展背景的宽浅湖盆,最终形成稳定沉降背景的浅水广盆。②剥蚀中心自文昌组沉积期由盆内轴向源区逐渐迁移至北部缓坡,并在恩平组沉积期进一步迁移至西北部盆外源区。③研究区经历了近源和远源及近源-陡坡型、近源-缓坡型和远源-缓坡型“双源三型”的盆-源动态沉积充填演化。从强裂陷期文六亚段—文四亚段的盆内近源-陡坡型轴向供给,转变为弱裂陷期文三亚段—文一亚段的近源-缓坡型北部缓坡带供给,直到转变为断-拗转换期恩四亚段—恩一+二亚段的远源-缓坡型盆外长轴供给。④剥蚀中心迁移和盆-源体系转变皆受控于南海北部区域应力场NW向—NNW向—近NS向伸展拉张的顺时针变化。

关键词:剥蚀厚度;原型盆地;盆-源演化;始新世;白云凹陷;珠江口盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Dynamic evolution of the Eocene basin-source system in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

YAN Bo¹, XIANG Xuhong^{2,3}, WEI Zhe^{2,3}, SHAN Xuanlong¹, HAO Guoli¹, ZHANG Penglin¹, WANG Zhihao¹, MA Ling¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China; 2. Deepwater Development Ltd., CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518067, China; 3. Shenzhen Branch of CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518067, China)

Abstract: The Pearl River Mouth Basin (PRMB), located in the deep-water super-extensional region along the northern continental margin of the South China Sea, exhibits complex and diverse tectonic evolution in the rifting stage. Focusing on the Eocene Wenchang and Enping formations in the Baiyun Sag within the PRMB, northern South China Sea, we reconstruct the prototype basin of the entire Baiyun Sag on the scale of third-order sequences. This approach overcomes the limitations of previous analyses on the sag scale and under a second-order sequence stratigraphic framework while also leading to new insights into the tectono-sedimentary evolutionary mechanisms of the Baiyun Sag during rifting. Based on seismic stratigraphic trend analysis, we reconstruct the denuded thickness of the Baiyun Sag during the deposition of the Wenchang and Enping formations. Furthermore, based on an analysis of the regional tectonic setting and previous research results on sedimentary systems, we characterize the dynamic evolutionary process of the prototype basin of the Baiyun Sag. The results indicate that during the deposition of the Wenchang and Enping formations, the prototype basin evolved from small-scale narrow lake basin under strong extension to a wide, shallow-water lacustrine basin under weak extension, ultimately developing into a shallow-water, extensive basin under a stable subsidence setting. The denudation center migrated gradually from the initial axial intra-basin provenance area during the deposition of the lower member of the Wenchang Formation to the northern gentle slope during the deposition of the upper member

收稿日期:2025-04-27;修回日期:2025-08-19。

第一作者简介:闫博(1997—),男,博士研究生,盆地构造演化。E-mail: 1554332516@qq.com。

通信作者简介:郝国丽(1982—),女,副教授,硕士研究生导师,石油与天然气成藏。E-mail: haoguoli@jlu.edu.cn。

基金项目:中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目(KJGG2021-0100)。

of the Wenchang Formation and then to the northwestern area outside the basin during the deposition of the Enping Formation. The study area experienced a dynamic evolution of basin-source sedimentary and filling, shifting from proximal to distal provenance. Correspondingly, the basin-source system of the Baiyun Sag transitioned from a proximal provenance-steep slope type to a proximal provenance-gentle slope type and then to a distal provenance-gentle slope type. Specifically, the intra-basin axial supply of the proximal provenance-steep slope type dominant from the 6th to 4th sub-members of the Wenchang Formation during intense rifting changed to the supply of the proximal provenance-gentle slope type in the northern gentle slope zone predominating from the 3rd to 1st sub-members of the Wenchang Formation during weak rifting. Finally, it transitioned to the long-axis supply of the distal provenance-gentle slope type spanning from the 4th sub-member of the Enping Formation to the 1st and 2nd sub-members of the Enping Formation during the rifting-depression transition period. Both the migration of the denudation center and the transformation of the basin-source system are governed by a clockwise variation in the stress field in the northern South China Sea, shifting from NW to NNW and then to nearly NS.

Key words: denuded thickness, prototype basin, basin-source evolution, Eocene, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB)

引用格式:闫博,向绪洪,卫哲,等. 珠江口盆地白云凹陷始新世盆-源演化过程[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 198–215. DOI: 10. 11743/ogg20260113.

YAN Bo, XIANG Xuhong, WEI Zhe, et al. Dynamic evolution of the Eocene basin-source system in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 198–215. DOI: 10. 11743/ogg20260113.

盆-源系统的概念起源于1988年美国“洋陆边缘计划”研究中的“源-汇系统”专题,目前已成为沉积学研究工作的前沿热点^[1-4]。其核心研究思想体现在:①盆-源系统研究突破传统沉积区研究的局限,将剥蚀区、搬运区与沉积区纳入系统进行刻画^[5]。②盆-源系统研究不仅包括剥蚀区边界样式厘定和沉积区刻画等定性分析,更通过剥蚀量和面积恢复、沉积通量计算等定量手段,建立起“成盆—物源—搬运—沉积”全过程的动力学和运动学响应关系^[6]。③盆-源系统遵循正演方式,更侧重于从量化恢复原型盆地到盆-源动态演化过程的分析^[7]。目前,针对边缘海盆地的盆-源系统研究主要体现在两方面:①沉积通量模型(ART)和沉积供给—堆积通量(BQART)模型的应用,通过汇水面积、汇水高差和平均温度等参数预测盆地沉积通量(Q_s),利用统计学手段实现半定量研究水平^[8-9];②Sømme^[10]提出的陆棚—陆坡—深海盆地系统多元统计分析方法,综合沉积路径、河道长度、古地貌、古水深和陆坡长度等地貌参数实现半定量分析。

在中国,陆相沉积盆地作为主要油气资源富集区,是盆-源系统研究的重点对象。例如,徐长贵等^[11]基于盆-源系统的思想,提出“山—沟—坡—面”控砂理论,强调有效源区、侵蚀沟谷、坡折体系和层序界面四元有效配置控砂体富集,显著提升了富砂储集体的预测精度。刘强虎等^[12]对渤海湾沙垒田凸起源区岩性、

地貌特征和沉积体系的响应关系做了精细分析,塑造其盆-源演化过程,认为基岩组成、汇水区、物源通道和边界样式共同控制沉积砂体规模。总体来看,中国陆相沉积盆地的盆-源系统研究主要聚焦于驱动机制及地球动力学过程、深时古气候作用及影响、沉积盆地古物源区演化恢复与古水系重建、盆-源系统要素分析和剥蚀—搬运—沉积过程耦合模式5个方面^[13-14]。相较于海相沉积盆地盆-源系统研究的丰富成果,中国陆相沉积盆地的盆-源系统研究仍有待加强,目前其难点在于陆相沉积盆地结构复杂、源区类型多样和“物源区—搬运区—沉积区”各要素之间关系不清等^[15-16]。例如,对于盆-源系统剥蚀—搬运—沉积过程耦合模式研究而言,“原型盆地”恢复便是难点之一。

“原型盆地”概念起源于20世纪中叶^[17],最初主要用于野外地质特征描述和地貌年龄判定^[18]。后逐渐被国内学者应用于含油气盆地分析中并常与特定地质时期的盆地构造演化过程关联,用于进一步分析盆地运动学特征和动力学机制^[19-21]。国内外众多学者基于这一概念,对盆地分类、构造应力和沉积沉降过程进行了详细分析^[22-27],这些工作都是盆-源系统研究的必要环节。然而,由于经历了长时间地质改造,绝大多数原型盆地已遭到破坏或消失,这使得原型盆地的恢复面临一定挑战,直接影响了陆相沉积盆地盆-源系统的精准刻画。

珠江口盆地古近纪经历了从陆相沉积盆地向洋陆边界盆地转换的过程,其盆-源系统复杂多变。刘太勋等^[28]通过井-震资料建立了珠江口盆地白云东洼的构造-沉积演化过程。郭伟等^[29]同样通过井-震资料还原了珠江口盆地白云主洼的沉积充填演化过程,进而建立了盆-源体系。刘军等^[30]通过恢复沉积时期古地貌,建立了珠江口盆地白云西洼的盆-源响应。唐武等^[31]通过对珠江口盆地白云南洼珠海组陆架边缘三角洲和深水扇进行精细解剖,建立了3种洲-扇耦合关系,并探讨了“源、渠、汇”各要素对这3种耦合关系的控制作用。虽然这些研究已对珠江口盆地古近系盆-源系统进行了初步分析,但均未充分考虑剥蚀作用的影响范围,导致始新统原型盆地重建滞后,因此未能深入探讨始新统文昌组和恩平组沉积时期的盆-源动态演化过程。特别是对于裂陷盆地区域应力场偏转条件下的构造变形、沉积中心迁移和沉积体系演化之间的耦合关系,尚缺乏深入的系统研究。

本文以定性厘定剥蚀区范围和半定量恢复剥蚀量为切入点,在三级层序尺度下刻画白云凹陷文昌组和恩平组沉积期全区原型盆地演化过程,弥补了前人在次洼尺度和二级层序地层格架下分析的局限性。在白云凹陷盆-源动态演化系统分析的基础上,重点突出构造-沉积的协同演化关系,深入探讨应力场旋扭控制下白云凹陷盆地结构演变与沉积体系动态响应机制,以期为其他类似盆地的盆-源演化分析和深层油气勘探提供借鉴。

1 区域地质背景

1.1 构造特征

南中国海(南海)是西太平洋板块汇聚区最大的边缘海^[32],位于亚欧板块、太平洋板块和印澳板块交汇区(图1a)。长期以来,此交汇区受多个板块的联合作用,形成了独特的构造演化过程。从地质演化角度来看,现今的南海是在中生代末陆缘弧拼合褶皱基底上形成的新生代含油气盆地^[33-35]。

珠江口盆地位于南海北部陆缘中段(图1b),是该区域面积最大的新生代盆地,总面积约 $17.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[36]。整体呈NE向展布,盆地内发育的3个隆起区和2个坳陷带均保持NE走向。珠江口盆地构造演化过程复杂,经历了从中生代主动大陆边缘挤压构造背景到新生代被动大陆边缘伸展构造背景的转变,随后进入大

陆裂谷期,并于始新世末期进入稳定沉降期^[37]。

白云凹陷位于珠江口盆地珠二坳陷中部,总面积约 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,是本研究的重点区域(图1c)。白云凹陷被番禺低隆起、云荔低隆起、顺鹤隆起带和云开低凸起所包围,凹陷内部可以进一步划分为主洼、东洼、西洼和南洼4个次级构造单元(图1d)。白云凹陷陆缘地壳薄化程度高,新生代经历多期伸展作用,引发多幕构造沉降事件,为巨厚沉积的形成提供了有利条件^[38]。研究区裂陷期发育多期火山活动^[39],这些岩浆作用持续至裂后期(约24 Ma),对凹陷结构产生了显著的改造和复杂化影响。

1.2 沉积特征

白云凹陷基底为中生代火山岩,自下而上沉积了古近系文昌组(E_2w)、恩平组(E_2e)和珠海组(E_3z),新近系珠江组(N_1z)、韩江组(N_1h)、粤海组(N_1y)和万山组(N_2w)以及第四系(Q)(图1e)。

始新统文昌组和恩平组为三角洲-湖泊相沉积,岩性主要为砂、泥岩,局部发育凝灰岩和玄武岩等火成岩。其中,文昌组($T_8^s-T_8^o$)不整合上覆于基底之上,主要为半深湖-深湖相和辫状河三角洲相沉积,岩性主要为粗砂岩和暗色泥岩。该沉积期是白云凹陷优质烃源岩发育形成的时期,在各次洼中均有分布。文昌组以 T_8^s 地震反射界面为界,可划分为上、下两段,每段又可进一步细分为3个亚段。

恩平组($T_7^s-T_7^o$)沉积与下伏文昌组或基底呈不整合接触,主要发育浅湖相和三角洲相沉积,岩性主要为含砾砂岩、灰色泥岩和灰黑色泥岩。该时期沉积可见含煤碎屑岩,是煤系烃源岩的发育期。恩平组以 T_7^s 地震反射界面为界,可划分为上、下两段,其中下段可进一步细分为2个亚段。

2 剥蚀地层恢复和平面分布特征

2.1 剥蚀量恢复

白云凹陷裂陷期经历了多期剥蚀作用,导致沉积地层普遍存在缺失或减薄现象,多个沉积界面存在明显的“上超下削”特征。由于深水區钻探资料较为匮乏,且研究目的层位埋深均超过5 000 m,泥岩段分段不完整,使得利用钻井资料精准计算剥蚀量较为困难。因此,本文主要采用地震地层趋势法,进行剥蚀量恢复。该方法通过获取趋势延伸相交后层位顶底面差值,计算不同层段的剥蚀厚度,具有等时性强、操作简

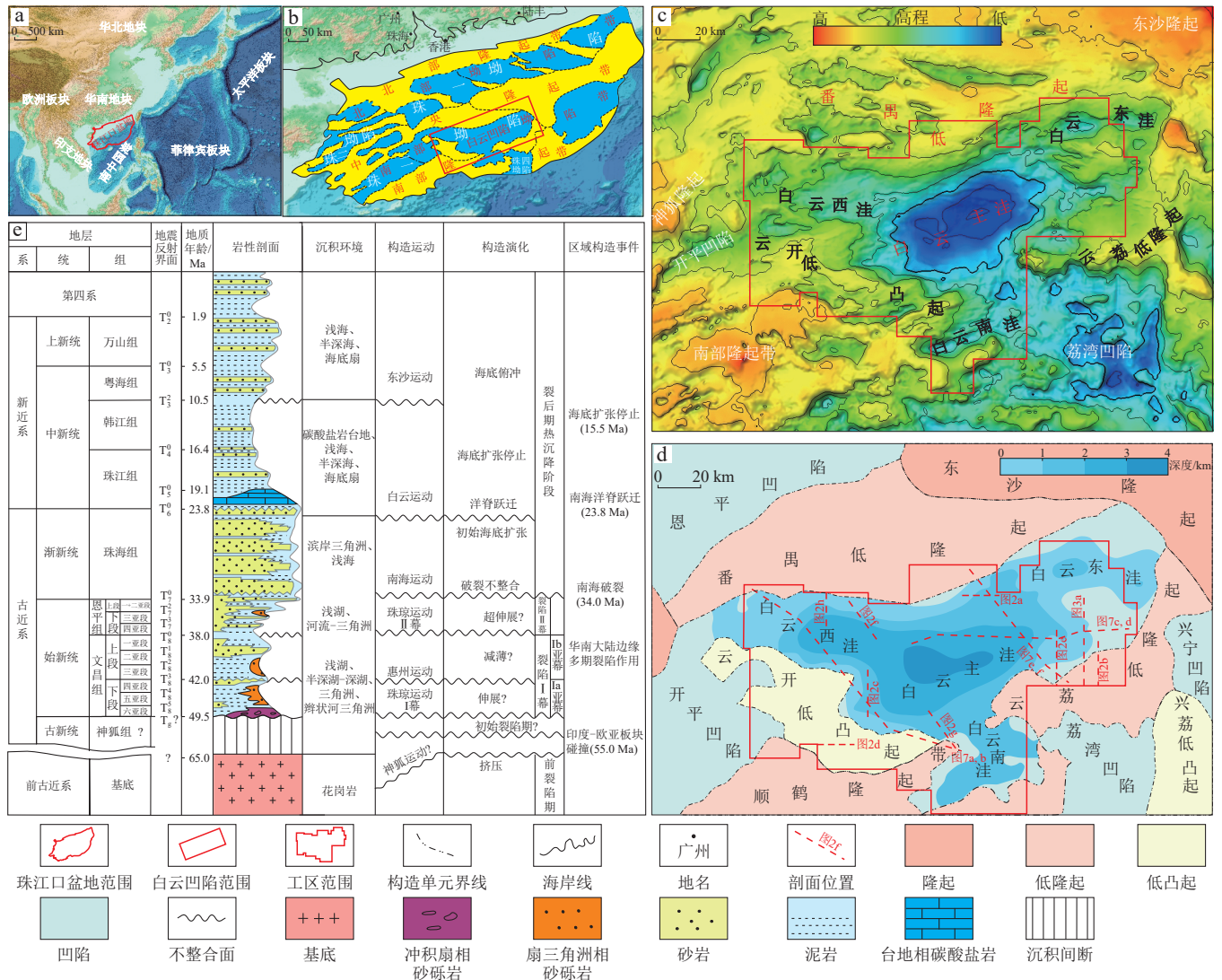


图1 南海北部珠江口盆地白云凹陷构造位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Tectonic location and composite stratigraphic column of the Baiyun Sag in the PRMB, northern South China Sea

a. 南中国海区域构造纲要; b. 珠江口盆地构造单元分布(据文献[40]修改); c. 白云凹陷基底顶面构造; d. 白云凹陷及其周缘构造分区(据文献[41]); e. 珠江口盆地地层岩性和年代地层综合柱状图(据文献[42-43]修改)

便的特点,同时能够考虑后期构造改造的影响^[44]。该方法依据上下地层接触关系和削截上超角度大小,可以判别各时期剥蚀强度和趋势变化。在地震资料丰富而钻井资料相对缺乏的勘探区域,此方法能够充分发挥其优势,从较大尺度上对剥蚀量进行整体预测,是一种较有效的地层剥蚀厚度恢复方法。但需要指出的是,当地层横向起伏波动较大时,该方法的准确性会受到一定限制,同时对地震资料的精确解释追踪和削截点的准确定位也有较高要求。

地震反射剖面分析结果显示,在文下段沉积期,白云主洼北部削截现象显著,削截点逐层增多,表明该区域的剥蚀厚度呈现逐层增大的趋势(图2a);白云东洼文下段沉积期岩浆活动发育,地层挠曲明显^[45]。其中,文六亚段沉积地层削截现象明显,显著强于文五亚段和文

四亚段,该区域剥蚀厚度表现为逐层减小的特征(图2b);白云主洼西南部剥蚀趋势与主洼北部一致,自文六亚段至文四亚段剥蚀厚度逐渐增大(图2c)。

在文上段沉积期,白云主洼西南部沉积地层很薄,削截上超特征不明显,推测剥蚀厚度呈现逐渐减小的趋势(图2d);白云东洼受同沉积底辟体改造影响严重,整体表现为继承性剥蚀特征,剥蚀厚度逐渐减小(图2e);白云凹陷北部及西北部持续剥蚀,剥蚀厚度逐渐增大(图2f)。至恩平组沉积期,沉积地层普遍较薄,白云凹陷内几乎未见明显的削截上超现象(图2g),研究区西北部逐渐与盆外物源沟通,接受来自盆外隆起区的持续剥蚀供给,且剥蚀厚度逐渐增大,推测恩平期末期以盆外剥蚀作用为主(图2h)。

为了厘清白云凹陷始新世构造-剥蚀演化过程,

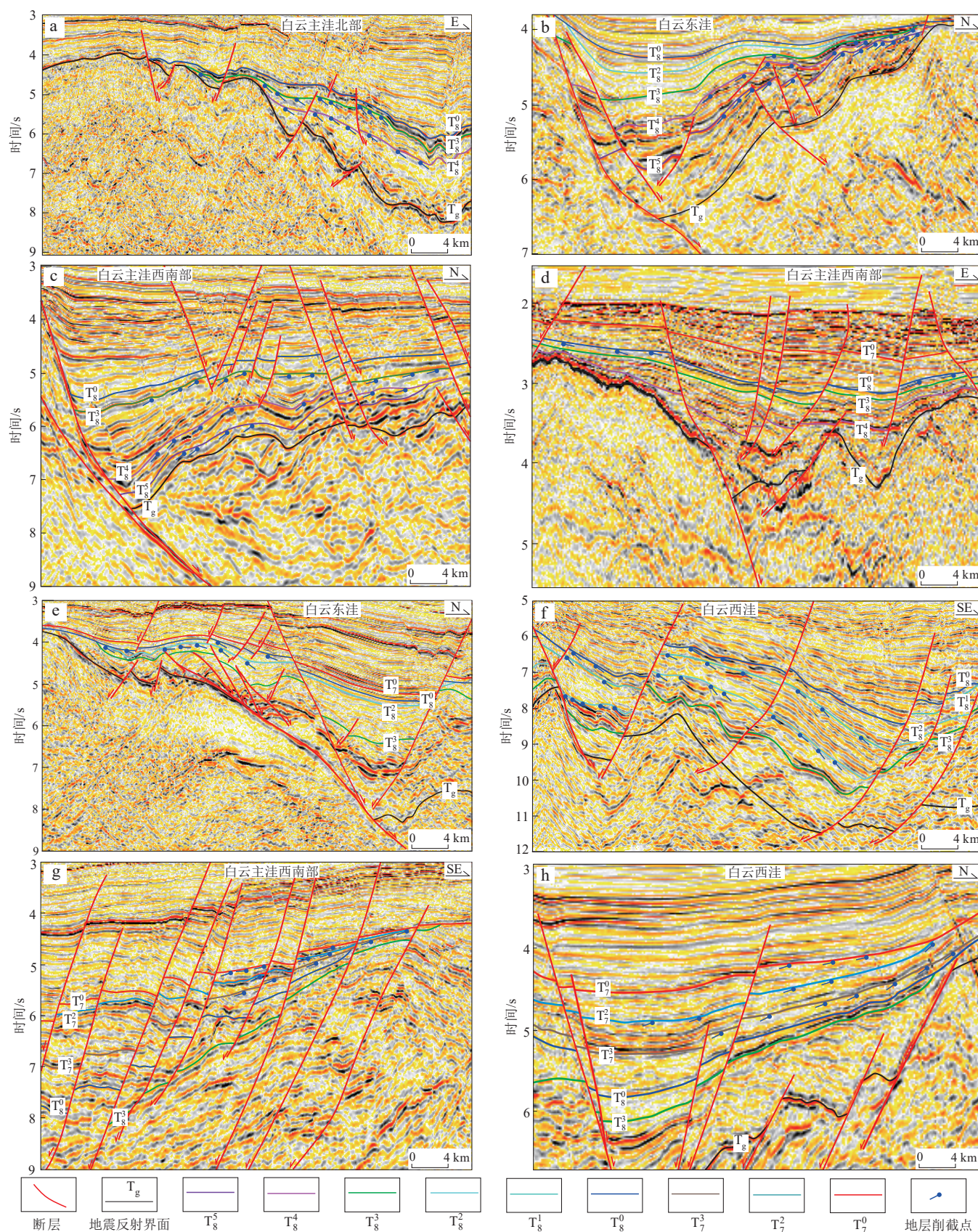


图2 白云凹陷始新世典型剥蚀特征地震剖面(剖面位置见图1d)

Fig. 2 Seismic profiles illustrating the typical denudation characteristics of the Eocene strata in the Baiyun Sag

a. 白云主洼北部文下段沉积期; b. 白云东洼文下段沉积期; c. 白云主洼西南部文下段沉积期; d. 白云主洼西南部文上段沉积期; e. 白云东洼文上段沉积期; f. 白云西洼文上段沉积期; g. 白云主洼西南部恩平组沉积期; h. 白云西洼恩平组沉积期

本文也选取了白云凹陷东部NS向典型地震剖面。该剖面可见多条铲式断裂和阶梯状次级断裂,反映该地区经历了多期强烈伸展形变。该剖面不仅揭示了原型

盆地构造格架,还为剥蚀恢复和应力场演化提供了直接证据(图3a)。

研究区局部存在岩浆侵入诱发上覆地层隆起形变

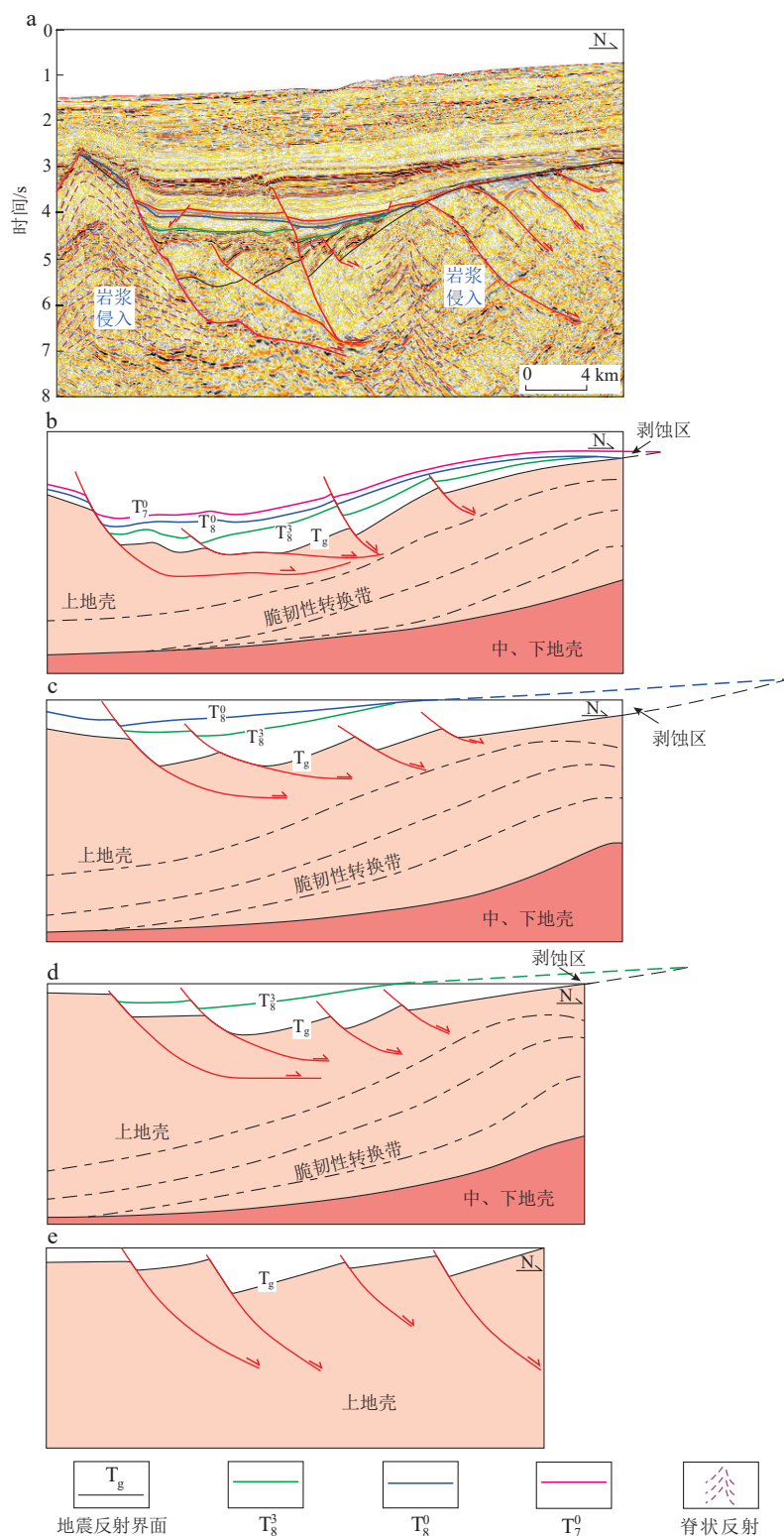


图3 白云凹陷东部构造-剥蚀演化过程

Fig. 3 Sketches showing the tectonic and denudation evolution in the eastern Baiyun Sag

a. 典型地震剖面(剖面位置见图1d);b. 断-拗转换期古地貌还原剖面;c. 弱裂陷期古地貌还原剖面;d. 强裂陷期古地貌还原剖面;e. 初始裂陷期古地貌还原剖面

现象,地层厚度变化明显,掀斜、削截特征显著,导致研究区剥蚀期次较多,恢复难度较大。基于这一特点,本文采用基于地层起剥点追踪延伸的剥蚀恢复方法:依据原始地层顶面位置,依次逆推各期剥蚀趋势,定量计算剥蚀厚度,实现沉积前古地貌还原。此法强调了剥蚀厚度恢复的时空约束条件,特别是在断裂发育和地层削截严重的区带,可有效消除构造运动对原型盆地地貌的扰动,为区域应力场变化和剥蚀响应的耦合研究提供了模型基础。

通过建立白云凹陷东部构造演化过程,发现如下关键演化阶段。

1) 初始裂陷期(图3e):以高角度正断层为主,上地壳表现出强烈的脆性拉张。断裂发育密集,主边界断裂和次级断裂控制早期洼陷边界。此时盆地尚处于伸展初级阶段,剥蚀主要发生在陡坡带,沉积中心分布较分散,为后续湖盆扩展和剥蚀中心迁移奠定了结构基础。

2) 强裂陷期(图3d):对应文下段沉积期。在NW-SE向拉张应力场作用下,主边界断裂呈低角度拆离结构。上地壳伸展减薄,深部韧性物质上涌导致脆性上地壳和上覆地层沉积物上拱形变。这导致原有缓坡带翘倾抬升转为陡坡带,遭受剥蚀。

3) 弱裂陷期(图3c):对应文上段沉积期。区域拉张作用显著减弱,断裂活动趋于平缓,剥蚀中心仍向北部缓坡区推进,剥蚀量减小但剥蚀面积持续增大。

4) 断-拗转换期(图3b):对应恩平组沉积期。盆地整体构造活动减弱,主控边界断裂基本稳定发育。 T_7^0 时期的岩浆底侵作用导致南部陡坡带再次抬升,遭受剥蚀,提供点状物源供给。北部缓坡带虽然仍为主剥蚀区,但剥蚀厚度显著减小。该时期洼陷结构反映区域应力已由拉张转变为均衡沉降,系统展示了白云凹陷东部盆地结构演化与剥蚀响应的协同过程。

2.2 三级层序下剥蚀厚度平面分布

构造活动及其演化基本决定了沉积区发育位置和剥蚀区范围,进而把控物源体系。本文基于三维地震资料,按照 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 网格恢复了各三级层序地层顶界面的剥蚀厚度(表1),详细分析了文昌组至恩平组三级层序格架下的剥蚀厚度平面分布特征(图4)。

文下段沉积期,盆地处于NW向伸展背景,凹陷开始进入裂陷Ia幕,处于强裂陷期,湖盆开始扩张,剥蚀强度逐渐增加,主要剥蚀区分布在白云凹陷东北部和西南部。文六亚段沉积期(图4a),凹陷东北部剥蚀量较大,西南部云开低凸起遭受剥蚀较小。平均剥蚀量为 212.91 m ,最大剥蚀量可达 460.24 m ,整体以轴向源区剥蚀为主。文五亚段沉积期(图4b),凹陷东北部继承性剥蚀,西南部云开低凸起持续隆升,剥蚀增强,北部缓坡开始遭受剥蚀。平均剥蚀量为 240.02 m ,最大剥蚀量可达 483.38 m 。文四亚段沉积期(图4c),研究区东北部剥蚀程度相对减弱,西南部继承性剥蚀,且有持续增强趋势,北部缓坡剥蚀显著增强。平均剥蚀量为 306.82 m ,最大剥蚀量可达 508.44 m 。这是由于白云凹陷西南部陡坡带文下段沉积期发育多期大范围的岩浆活动^[45],导致断层变形及陡缓坡地层发生抬升,遭受持续剥蚀,剥蚀厚度较大。文下段沉积期,白云凹陷中下地壳经历了强烈的伸展减薄作用,导致地壳厚度不均匀分布,上覆沉积地层极度薄化。主断层面上盘地层经历明显的旋转翘倾,导致北部番禺低隆起缓坡地层逐渐抬升,处于相对较高位置,易遭受剥蚀。由此可见,文下段沉积期以轴向源区剥蚀为主,存在向北部缓坡剥蚀转换的趋势。

文上段沉积期,盆地主要处于NWW向伸展背景,凹陷开始进入裂陷Ib幕,处于弱裂陷期,湖盆开始萎缩,北东轴向剥蚀区逐渐迁移至南北两侧缓坡。文三

表1 白云凹陷关键地震反射界面剥蚀量恢复结果

Table 1 Restoration results of denudation at key stratigraphic interfaces in the Baiyun Sag

关键地震反射界面	现今残余面积/ km^2	剥蚀面积/ km^2	最大剥蚀厚度/ m	原始沉积面积/ km^2
T_7^0	15 866.413	4 397.514	518.110	20 263.927
T_7^2	12 690.503	4 129.672	506.520	16 820.175
T_7^3	12 308.182	3 209.475	504.180	15 517.657
T_8^0	13 417.575	2 931.610	506.640	16 349.185
T_8^1	2 749.468	3 877.401	502.250	6 626.868
T_8^2	5 019.044	6 437.364	499.770	11 456.407
T_8^3	12 021.804	7 779.206	508.440	19 801.010
T_8^4	9 533.851	4 341.947	483.380	13 875.799
T_8^5	2 504.708	2 508.015	460.240	5 012.723

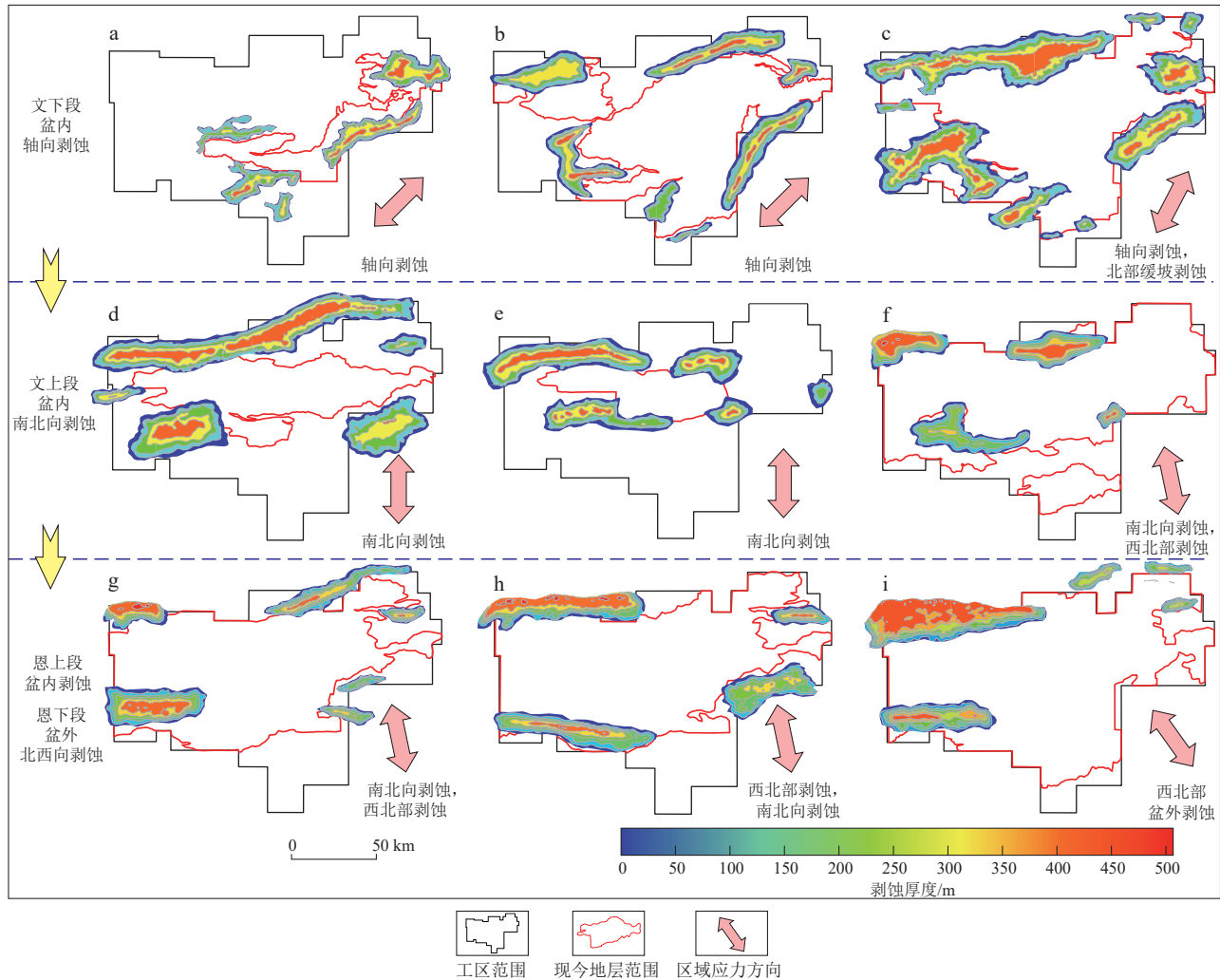


图4 白云凹陷始新世文昌组-恩平组沉积期三级层序地层剥蚀厚度平面分布图

Fig. 4 Isopach maps of denudation in the third-order sequences during the deposition of the Eocene Wenchang and Enping formations, Baiyun Sag

a. 文六亚段; b. 文五亚段; c. 文四亚段; d. 文三亚段; e. 文二亚段; f. 文一亚段; g. 恩四亚段; h. 恩三亚段; i. 恩一+二亚段

亚段沉积期(图4d),全区依旧继承性剥蚀,但剥蚀强度有所减弱,沉积范围逐渐变小。白云东洼仅在东北部存留少量剥蚀区,白云凹陷西南部剥蚀范围也逐渐缩小,北部缓坡剥蚀持续增强。平均剥蚀量为264.16 m,最大剥蚀量可达499.77 m。文二亚段沉积期(图4e),剥蚀范围整体缩小,主剥蚀区持续向北迁移,剥蚀量较大。白云凹陷东部由于文上段沉积期发育小范围的岩浆活动,导致局部地层抬升,遭受剥蚀,因此存在局部点状剥蚀区。平均剥蚀量为278.28 m,最大剥蚀量可达502.25 m。文一亚段沉积期(图4f),白云凹陷全区继承性剥蚀,西北部剥蚀较强,有沟通盆外物源的趋势。平均剥蚀量为288.93 m,最大剥蚀量可达506.64 m。文上段沉积期,白云凹陷主要受控于岩石圈地壳的韧性隆升,发生强烈拆离作用,致使该时期原型盆地局部被剥蚀夷平,发育继承性的剥蚀区和沉降中心。

恩平组沉积早期,凹陷开始进入裂陷Ⅱ幕,为断拗转换期,盆地处于近NS向伸展构造背景,研究区断裂活动减弱,凹陷内部凸起或隆起区准平原化、规模减小、分布范围进一步缩小,剥蚀区主要集中在北部缓坡,西南部继承性剥蚀逐渐减弱。恩四亚段沉积期(图4g),盆内剥蚀供给减弱,平均剥蚀量为297.56 m,最大剥蚀量可达504.18 m。恩三亚段沉积期(图4h),沟通盆外西北长轴物源趋势持续变大,盆内低凸起及隆起碎屑供给减少。平均剥蚀量为308.64 m,最大剥蚀量可达506.52 m。恩平组沉积末期,盆内凸起及隆起区准平原化作用进一步增强,盆内剥蚀区范围及碎屑供给量进一步减小。恩一+二亚段沉积期(图4i),西北部盆外物源通道完全打开,盆外隆起区剥蚀碎屑成为主要供给来源,平均剥蚀量为334.48 m,最大剥蚀量可达518.11 m。此时珠一坳陷与白云凹陷之间开

始连通,盆外西北侧神狐隆起或更远隆起带可能成为该时期白云凹陷的主要剥蚀区和物源供给区。

由此可见,研究区文昌组和恩平组各沉积期普遍存在剥蚀现象,文四亚段、文三亚段、恩四亚段和恩三亚段地层的剥蚀范围广泛,而文一亚段、文二亚段及恩一+二亚段地层的剥蚀范围较为局限。白云凹陷整体主要受构造运动影响,导致地层发生旋转翘倾,差异沉降及抬升剥蚀。文昌组—恩平组沉积期剥蚀中心由文下段沉积期的盆内轴向源区剥蚀过渡到文上段沉积期的北部缓坡剥蚀至恩平期的盆外西北部缓坡剥蚀。岩浆活动造成围岩形变和形成局部底辟体虽然也会使地层抬升剥蚀,但更多是作为点状物源为次级洼陷提供沉积物。

3 三级层序下原型盆地演化特征

原型盆地是构造变形、沉积充填、风化剥蚀等多种因素综合作用的结果,其构造—沉积格局记录了不同时期沉降动态转化过程。剥蚀作用直接改造原型盆地的地貌格局,因此,精准恢复剥蚀量是原型盆地重建的前提条件。本文将上述构造运动—剥蚀地层恢复作为约束条件,在剥蚀区和沉积区开展原型盆地恢复,有助于揭示白云凹陷各期次构造演化及沉积充填演化的配置关系。

文下段沉积期,对应珠江运动Ⅰ幕,先存构造制约洼陷早期格局,形成多个独立分布的复式半地堑,沉积分隔明显,供源分散多向。文六亚段沉积期(图5a),白云凹陷整体处于初始裂陷阶段,上地壳经历脆性伸展破裂,主要表现为纯剪切作用,高角度正断层控制了狭长孤立的箕状断陷发育,呈现出“南断北超”的楔状特征。文五亚段沉积期(图5b),凹陷整体处于强伸展构造背景下,湖盆范围显著扩大,同时伴随基底隆升、岩浆底辟、断块旋转翘倾等构造活动^[45]。在此期间,控洼断裂活动性逐步增强,并在文五亚段沉积末期达到高峰^[41]。受复杂多变的构造活动影响,文六亚段与文五亚段地层厚度存在显著差异。文四亚段沉积期(图5c),盆地强烈伸展并伴随岩浆活动发育,北部番禺低隆起抬升明显,在NW向—NNW向伸展背景下湖盆沉积范围持续扩大。白云主洼经历早期快速伸展裂陷阶段,其结构样式由初始高角度半地堑向宽缓断陷转换,反映边界断裂活动速率的阶跃式增长。白云东洼主控断裂面呈现分段滑脱特征,形成坡—坪式组合,指示伸展作用过程中基底拆离机制的差异活化。白云西洼断裂活动性强,形成大量分散的半地堑或复式半

地堑,呈现出小而多的沉积中心,具隆—洼相间特征。

文上段沉积期,对应惠州运动,盆地中下地壳韧性隆升,伸展前移作用较强,导致隆起区形成复式断—拗转换结构,顶部发育具有拗陷期特征的披覆型沉积序列,小盆窄湖向宽浅湖盆转换,洼—隆格局逐渐连片分布。文三亚段沉积期(图5d),盆地断裂活动明显减弱,岩浆活动逐渐减弱。同时受构造抬升作用影响,湖盆面积逐渐缩小。沉积和沉降中心从南部控洼断裂附近向北迁移至湖盆中心。文二亚段沉积期(图5e),此时期控洼断层活动几乎停滞,叠加构造抬升作用,致使白云东洼缺失文二亚段沉积,白云凹陷整体进入湖盆收缩阶段。沉积范围随之缩小,地层厚度减薄,填平补齐为该时期主要沉积模式。沉积单元由离散型复式断陷向连续型拗陷过渡,仅白云主洼保留继承性沉积中心。文一亚段沉积期(图5f),由于构造均衡抬升导致湖盆范围持续收缩,大部分文一亚段沉积地层都已剥蚀殆尽,残留水体集中于白云主洼和西洼构造鞍部。断陷型湖盆开始向热沉降主导的拗陷型湖盆演化,标志裂陷旋回结束。

恩平组沉积期,对应珠江运动Ⅱ幕,白云凹陷整体表现为拗陷型湖盆特征,全区接受稳定沉降。恩平组沉积末期盆外古珠江水系碎屑供给占据主导地位,盆内岩浆活动基本消失,仅形成零星低幅隆起,提供碎屑沉积物。恩四亚段沉积期(图5g),在断—拗转换背景下,盆内剥蚀区范围显著收缩。此时期,白云凹陷仍保持被周缘隆起包围的封闭环境,与北侧珠一拗陷及东南侧荔湾凹陷基本处于分隔状态。恩三亚段沉积期(图5h),白云凹陷沉积范围有所增大,但沉积厚度较薄。此时,白云凹陷与北部珠一拗陷仍保持分隔状态,但已与东南部荔湾凹陷局部连通。受海侵作用影响,白云凹陷沉积范围进一步扩大,海水逐渐覆盖至白云凹陷南部低洼区,接受浅海相沉积。同时,来自盆内低凸起和隆起的短程物源持续萎缩。恩一+二亚段沉积期(图5i),随着早期沉积物不断地填平补齐及凹陷南部持续接受海侵,白云凹陷内部隆洼地貌特征逐步弱化,盆内低凸起和隆起逐渐被夷平形成准平原地貌。此时,白云凹陷西北侧通道完全打开,与盆外物源区连通^[46]。

4 “盆—源”系统动态演化过程

4.1 白云凹陷盆—源演化过程

陆相沉积盆地内的正断层差异活动致使盆地形成不对称箕状构造,造成盆地一侧表现为陡坡带,另一侧

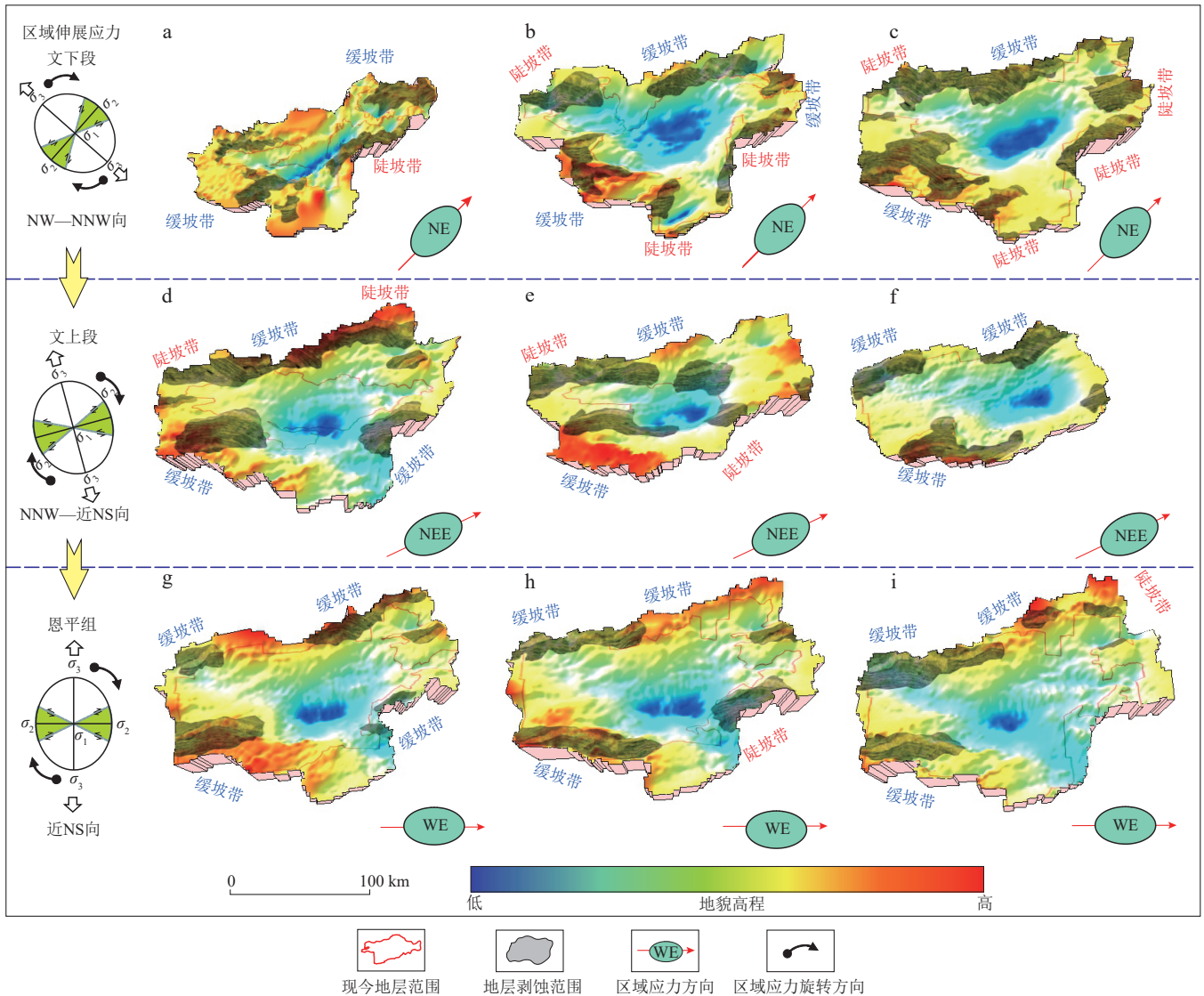


图5 白云凹陷始新世文昌期—恩平期三级层序原型盆地立体示意图

Fig. 5 Contour maps showing the prototype basin of the third-order sequences formed during the deposition of the Eocene Wenchang and Enping formations, Baiyun Sag

a. 文六亚段; b. 文五亚段; c. 文四亚段; d. 文三亚段; e. 文二亚段; f. 文一亚段; g. 恩四亚段; h. 恩三亚段; i. 恩一+二亚段
 σ_1 , 最大主应力; σ_2 , 中间主应力; σ_3 , 最小主应力

为缓坡带^[47-48]。陡坡带坡度在 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 之间,地貌起伏大、近物源,常发育扇三角洲沉积体系。缓坡带坡度通常小于 15° ,构造活动弱,发育辫状河三角洲相及滨浅湖相沉积。学者们依据地貌空间结构类型和成因机制,将陆相沉积盆地详细划分近源-陡坡-深水、远源-缓坡-深水和远源-缓坡-浅水3种盆-源系统^[1,6],并明确原型盆地是控制盆地物源供给变化及沉积充填演化的重要影响因素^[49]。本文分析白云凹陷周缘番禺低隆起、云荔低隆起、顺鹤隆起带和云开低凸起4个物源区地貌空间结构特征,认为研究区文昌期—恩平期经历了“双源三型”(近源和远源及近源-陡坡型、近源-缓坡型和远源-缓坡型)的盆-源动态演化。同时,依

据前人研究表明^[50-51],白云凹陷文昌组至恩平组沉积期共形成辫状河三角洲相、扇三角洲相、三角洲相、半深湖-深湖相和滨浅湖相5种沉积相类型。本文通过对研究区三级层序格架下的典型地震相特征分析,包括地震反射单元的内部结构、外部形态、振幅、频率和连续性等地震反射参数,共识别出5种典型地震相类型,并将典型地震相转化为对应沉积相(图6)。

本文选取白云凹陷主洼、东洼和西洼典型剖面刻画沉积相(图7)。其中,辫状河三角洲相的主体部分由辫状河三角洲平原和其前缘组成。垂向上呈正韵律,多发育于文昌组沉积时期。辫状河三角洲主要分布在地形起伏较低的区域,如低隆起区、低凸起边缘的

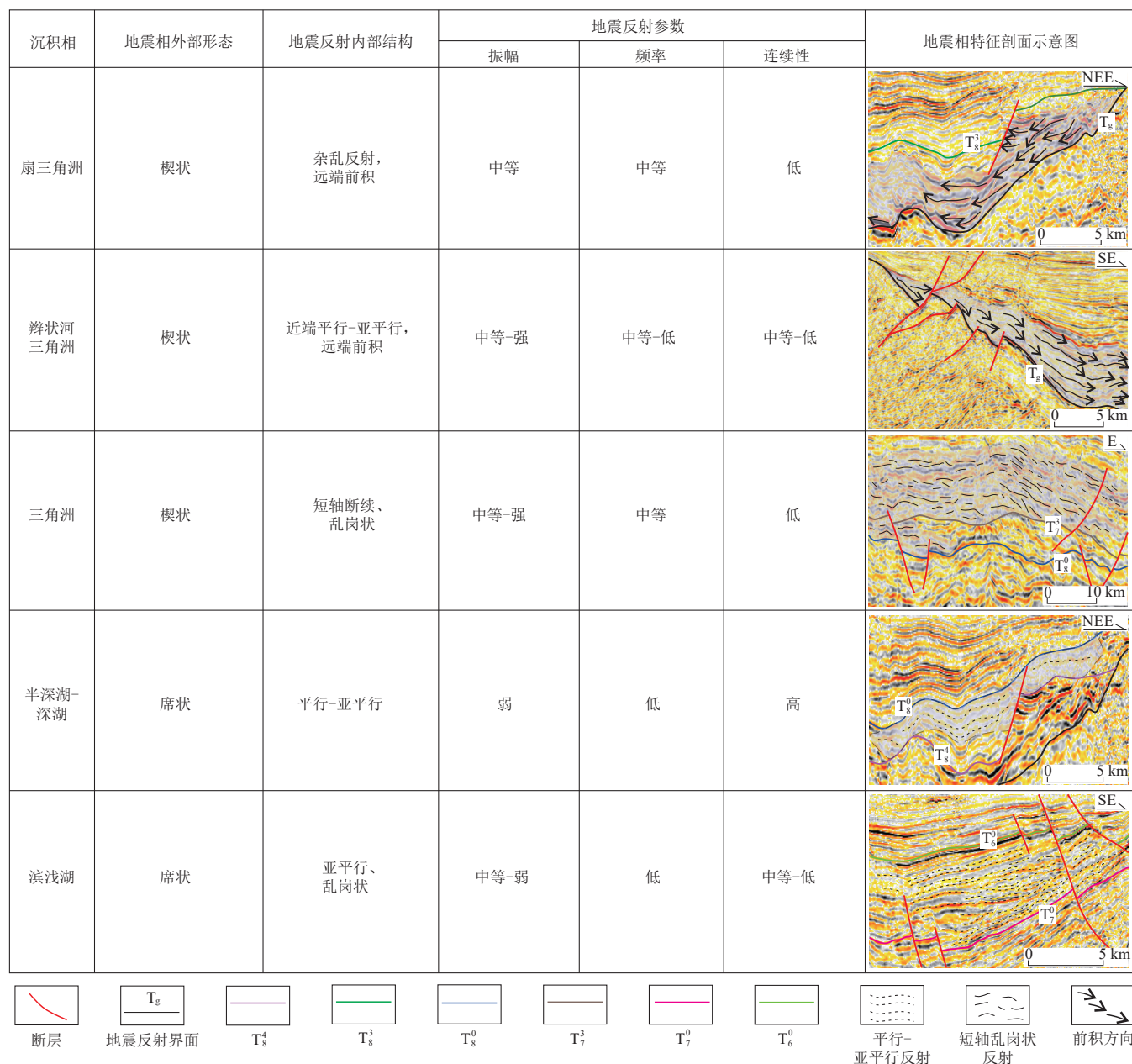


图6 白云凹陷典型地震相识别

Fig. 6 Typical seismic facies identified in the Baiyun Sag

斜坡带周缘以及断陷湖盆的缓坡带。在这些区域内, 辫状河三角洲平原的分流河道在不同沉积期内呈现垂向叠置现象, 这揭示了文昌组沉积时期河道系统的频繁交错变迁以及充沛的碎屑物源供给。扇三角洲相以粗粒砂岩或含砾砂岩为主, 常见于白云东洼和白云西洼陡坡带周缘同沉积边界断层附近, 以冲积扇作为物源, 阵发性水流搬运沉积为主, 常伴有重力滑塌和近源迅速堆积现象。搬运距离短, 快速堆积, 分选差, 具正递变层理。通常, 断陷湖盆内的扇三角洲水上平原亚相由于受到后期强烈改造和剥蚀作用, 难以得到有效保存。三角洲相主体部分包括三角洲平原和三角洲前

缘。恩平组沉积时期, 白云凹陷北西侧广泛发育大型薄层的三角洲进积体, 其地震反射特征表现为叠瓦状强振幅反射。湖泊相主要体现为滨浅湖、滩坝及半深湖沉积。文五段沉积期在白云凹陷南部开始发育半深湖沉积, 表明该阶段后期出现了湖侵现象。文昌组时期则呈现出深湖相与滨浅湖相沉积体系大面积展布的特征。至恩平期末期, 沉积环境才开始逐步由湖相向浅海相演变。

约 66 ~ 55 Ma 时(图 8a), 太平洋板块的快速高角度俯冲导致地幔物质在大地幔楔区域垂直上涌^[52], 欧亚大陆东部地壳在新生代逐渐减薄^[53], NW-SE 向的伸

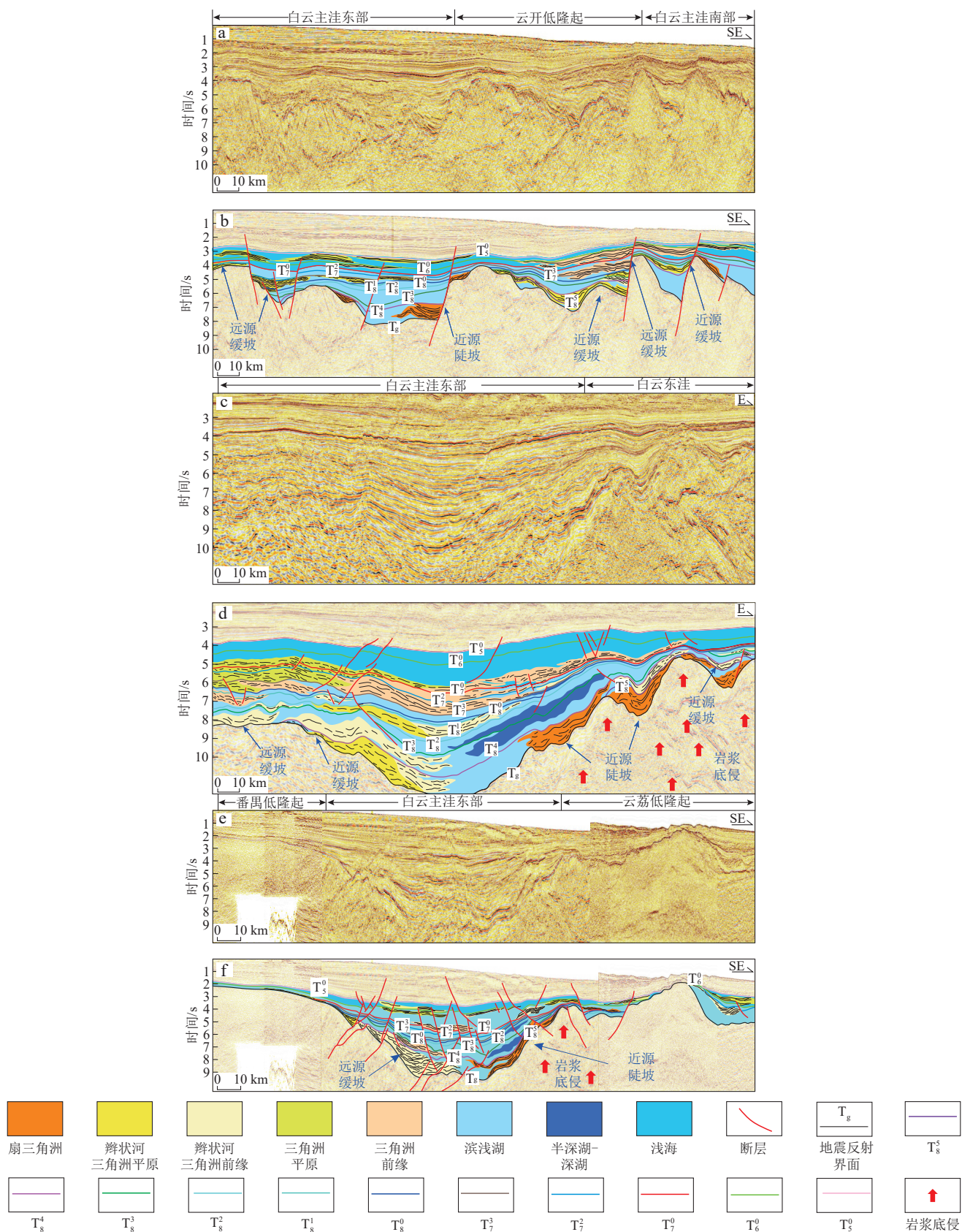


图7 白云凹陷典型沉积相剖面图

Fig. 7 Original seismic profiles and corresponding sedimentary facies profiles of the Baiyun Sag

a, b. 分别为白云凹陷西部原始地震剖面及沉积相剖面; c, d. 分别为白云主洼原始地震剖面及沉积相剖面; e, f. 分别为白云凹陷东部原始地震剖面及沉积相剖面(各剖面位置见图 1d。)

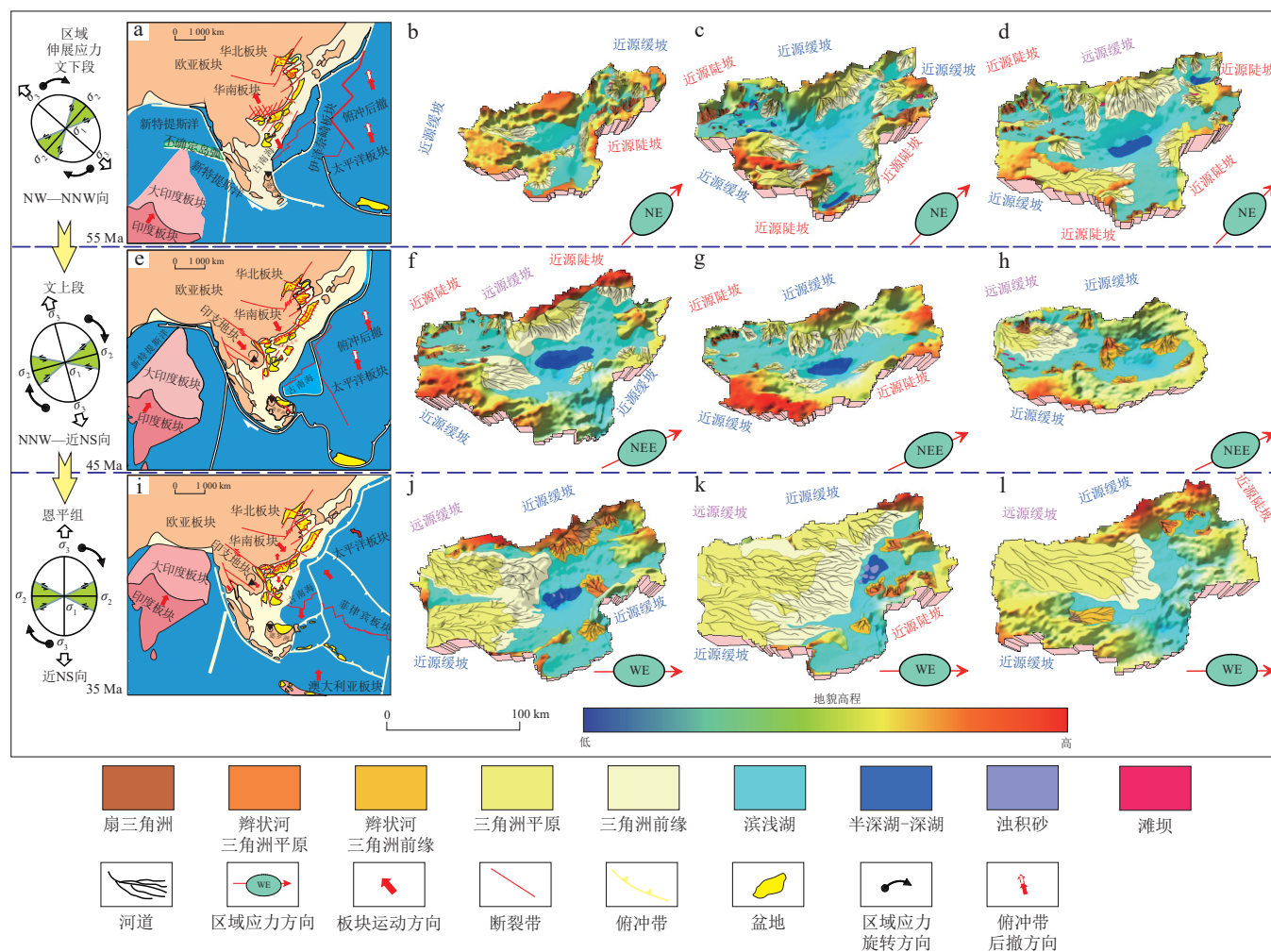


图8 白云凹陷始新世文昌组-恩平组沉积期三级层序盆-源演化过程(左列动力学模式图据文献[54-56]修改)

Fig. 8 Basin-source evolution processes of third-order sequences during the deposition of the Eocene Wenchang and Enping formations in the Baiyun Sag (dynamic model diagrams in the left column modified after references [54-56])

a. 55 Ma时中国近海盆地成盆动力学模式;b, c, d. 分别为55 Ma时文六亚段、文五亚段和文四亚段盆-源体系模式立体示意图;e. 45 Ma时中国近海盆地成盆动力学模式;f, g, h. 分别为45 Ma时文三亚段、文二亚段和文一亚段盆-源体系模式立体示意图;i. 35 Ma时中国近海盆地成盆动力学模式;j, k, l. 分别为35 Ma时恩四亚段、恩二亚段和恩一+二亚段盆-源体系模式立体示意图

σ_1 : 最大主应力; σ_2 : 中间主应力; σ_3 : 最小主应力

展作用形成了NE向铲式控盆断裂,导致了珠江口盆地进入初始裂陷期,盆地呈NE向展布。约55~39 Ma时(图8e),太平洋板块俯冲到欧亚板块之下^[57]。印度板块向北冲撞叠加太平洋板块NNW向俯冲带后撤共同导致东南亚大陆边缘的持续裂谷作用^[54,58]。珠江口盆地进入强烈裂陷期,文昌组地层在此期间形成。强烈伸展作用同样促进岩浆底辟体沿着深大断裂或次级断裂带垂向上涌。在高温背景下,早期脆性上地壳发育的高角度正断层受到深部韧性下地壳底辟上涌的改造,逐渐发生旋转形变,演变为低角度正断层并拆离于上拱的韧性下地壳之上,形成白云凹陷西南缓坡区的结构形态。白云凹陷东部岩浆活动期次比西部多^[45]。多期幕式的岩浆上涌足以改变上地壳脆韧性结构,破

坏和改造原始盆地构造格局,致使沉积地层不断遭受隆升剥蚀,发育复杂多期且具有拆离特点的高角度正断层,形成东南陡坡区。白云凹陷在此时期已然具有陆相断陷湖盆特征,凹陷边缘隆起及凹陷内部低凸起为首要物源供给来源。边界正断层控制陡坡带和缓坡带沉积体系的展布,发育扇三角洲、辫状河三角洲、滨浅湖和半深湖沉积充填体系。

文六亚段沉积期(图8b),白云凹陷内形成众多小型、孤立箕状半地堑,湖盆整体呈现出小盆窄湖的构造格局。物源规模小、轴向为主,沉积扇体孤立不连续,盆-源体系为近源-陡坡和近源-缓坡两种类型。白云凹陷东北部缓坡带辫状河三角洲呈近WE向展布,沉积物规模较小且分布零散。南部云荔低隆起陡坡带形

成NW向扇三角洲,云开低凸起为白云凹陷西南部提供轴向物源,发育多个辫状河三角洲朵叶体。文五亚段沉积期(图8c),在强伸展构造背景下,湖盆迅速扩大,由滨浅湖演变为半深湖-深湖,但此时仍以轴向物源供给为主,三角洲规模不等,逐渐连片,盆-源体系同样为近源-陡坡和近源-缓坡两种类型。白云凹陷东部凸起形成近源-缓坡型辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系。云荔低隆起北侧发育近源-陡坡型扇三角洲。白云凹陷南部,逐渐形成近南北向的近源-陡坡型扇三角洲-半深湖沉积体系,其沉积物主要集中在边界断层周缘,向外推进距离相对有限。云开低凸起向凹陷西南部延伸出多个小规模辫状河三角洲。白云西洼周缘主要形成断控的扇三角洲朵叶体。白云北坡发育辫状河三角洲主导的近源-缓坡沉积体系。文四亚段沉积期(图8d),伴随强伸展作用与岩浆活动,湖盆进一步扩大,表现为大盆深湖格局,盆-源体系涵盖近源-陡坡、近源-缓坡和远源-缓坡3种类型。白云凹陷东北部与西南部轴向物源规模缩小,导致辫状河三角洲分布范围减小,沉积中心开始向北迁移。云荔低隆起北侧供源能力减弱,致使扇三角洲萎缩或消失,但云荔低隆起西侧仍持续供源,发育多支连片分布的辫状河三角洲。云开低凸起继续向凹陷西南部供源,辫状河三角洲规模增大,并发育局部岩浆隆升形成的点状物源。与此同时,番禺低隆起向白云北坡和白云西洼的供源能力增强,使得文五亚段沉积期白云北坡发育的辫状河三角洲演化为多支大规模朵叶体,白云西洼近源扇三角洲沉积体系逐步转变为远源长距离搬运辫状河三角洲沉积体系,具有大规模、多分支物源特征。

文三亚段沉积期(图8f),控注断层活动减弱,区域抬升显著,湖盆逐渐收缩,沉降中心持续向湖盆中心迁移,盆-源体系同样包括近源-陡坡、近源-缓坡和远源-缓坡3种类型。此时期,白云凹陷南部扇三角洲消失,凹陷周缘隆起供给能力均有所下降,西南云开低凸起仅保留一个WE向辫状河三角洲沉积体。白云西洼形成多个规模较小且分布零散的扇三角洲和辫状河三角洲沉积体。文二亚段沉积期(图8g),控注断层几乎停止活动,加上强烈构造抬升作用,后期剥蚀程度高,导致残存沉积体范围小,盆-源体系为近源-陡坡和近源-缓坡两种类型。白云东洼未沉积文二亚段,湖盆持续萎缩,呈宽缓湖盆特征,轴向物源消失。北部番禺低隆起成为主要物源区,西南云开低凸起次之,云荔低隆起供源能力近乎消失,仅保留一个小型辫状河三角洲。此外,白云东洼缺乏输砂通道,扇形特征不明显,

缺乏完整沉积体。白云西洼沉积扇体零散分布,湖盆中心位置未明显北移,末期受强烈抬升遭受剥蚀。文一亚段沉积期(图8h),湖盆范围持续收缩,原始地貌遭受剥蚀,逐渐被夷平,缓坡地貌特征显著,残存沉积范围非常有限,仅主洼、西洼残留文一亚段沉积,发育滨浅湖环境,盆-源体系为远源-缓坡和近源-缓坡两种类型。在文一亚段沉积末期,受构造抬升作用影响,周缘隆起向凹陷中心汇聚供源,发育小型辫状河三角洲沉积体。凹陷北西侧形成长距离远源-缓坡型三角洲,推测为韧性地壳隆升导致沉积体系向湖盆中心迁移,形成局部NW向轴向供源体系。

约39~30 Ma时期(图8i),太平洋板块俯冲方向从NNW向转变为NWW向,且俯冲速率持续增大。大印度板块继续向NE方向移动,并与欧亚板块碰撞,印支地块继续被挤压和发生顺时针旋转^[59]。古南海开始潜没在逆时针旋转的婆罗洲地块之下。伴随古南海的俯冲拖拽和印度板块与太平洋板块的间接碰撞,改变了东南亚地区软流圈深部流动方向,导致地幔物质向东南方向上涌^[60]。因此,珠江口盆地向东南方向的裂谷作用也得以继续进行。由于印度-欧亚板块的持续碰撞,致使珠江口盆地的区域伸展应力场发生NW向—NNW向—近NS向转变。此时期,白云凹陷内部缓坡带辫状河三角洲继承性发育,陡坡带扇三角洲规模逐渐变小,但是盆外华南大陆碎屑物质供给充足,形成宽广湖盆,恩平组沉积在此形成,盆地逐渐进入断拗转换期。恩四亚段沉积期(图8j),盆内凸起或隆起萎缩,以凹陷西部和北西部缓坡规模宏大、连片分布的富砂三角洲沉积体系为主要物源,该时期沉积地层较厚,浅水广盆特征明显,盆-源体系为远源-缓坡和近源-缓坡两种类型。白云凹陷北部缓坡带,整体地貌表现为两侧低、中部高的特点。高势区受到番禺低隆起短程物源供给,发育扇三角洲沉积体。白云凹陷南部与荔湾凹陷尚未连通。凹陷内部仍为滨浅湖沉积环境。恩三亚段沉积期(图8k),与恩四亚段沉积特征基本保持一致,发育近源-陡坡、近源-缓坡和远源-缓坡3种盆-源类型。3种凹陷东南部云荔低隆起经历岩浆底侵作用,致使局部地层上拱凸起,形成陡坡带点状物源。凹陷西北部三角洲规模砂体持续向盆内进积,受湖浪等水动力作用改造,也发育小规模浊积砂体。恩一+二亚段沉积期(图8l),盆内凸起或隆起准平原化,构造活动整体趋于稳定。盆-源体系同样涵盖近源-陡坡、近源-缓坡和远源-缓坡类型。此时白云凹陷处于过补偿沉积环境中,白云凹陷东南部与荔湾凹陷逐渐连通,转变为半封闭局限海沉积环境。盆外华南褶

皱带的古珠江水系跨越北部隆起带,通过白云凹陷西北缘开辟的物源通道,向凹陷内部输送大量碎屑沉积物,成为该时期白云凹陷的主要物源,形成了规模宏大且持续向盆地中心推进的三角洲沉积体,从而实现了白云凹陷由盆内物源过渡到盆外物源的转变。

综上所述,白云凹陷文昌组至恩平组沉积期经历了由强伸展向稳定沉降的构造-沉积格局转型。研究区受周缘低凸起提供碎屑沉积物,局部岩浆活动提供火山碎屑物。在文昌组沉积期呈现出典型的宽广连通型陆相断陷湖盆特征。从文六亚段至文四亚段的近源-陡坡型轴向供源的辫状河三角洲-半深湖体系转变为文三亚段至文一亚段的近源-缓坡型南北缓坡带供源的大型三角洲-滨浅湖体系。恩平组沉积期受海侵作用影响,湖相逐渐向局限海环境过渡,盆内凸起准平原化作用增强,盆外物源逐渐占据主导地位,恩四亚段至恩一+二亚段发育远源-缓坡型盆外长轴三角洲体系,完成盆-源体系的全面转变。

4.2 与其他边缘海盆地盆-源演化对比

珠江口盆地白云凹陷盆-源演化与琼东南盆地松南-宝岛凹陷相似,都经历了伸展拉张—断—拗转换—热沉降的构造演化序列。两区均处于南海北部超伸展带,构造伸展减弱与海侵增强共同塑造盆-源体系的时空迁移,且盆-源要素均受古地貌与构造耦合控制,表现为伸展断层差异抬升形成陡坡或缓坡组合,物源区剥蚀—搬运与沉积水动力配合决定规模砂体,呈现“多物源分散到远源主控”的总体趋势。但白云凹陷在断陷期表现为剥蚀中心自盆内轴向至西北盆外迁移、由近源-陡坡向远源-缓坡递变的“双源三型”盆-源充填模式,而琼东南盆地在断陷期则发育外源型(海南隆起和神狐隆起)与内源型(松南低凸起)“两类三区”沉积充填格局。这种差异源于白云凹陷剥蚀供源受顺时针区域应力旋扭与岩浆活动耦合控制,边界断层活动速率差异活化;而琼东南盆地盆-源体系则长期受继承性古隆起剥蚀供给。因此,珠江口盆地与琼东南盆地在盆-源动态演化上既具共同的被动陆缘伸展背景与源-汇系统阶段性演替,也因古地貌格局及沉积通道差异而表现出显著的盆内-盆外供源耦合方式差异。将两区盆-源演化特征综合对比分析,能为南海及全球类似边缘海深水盆地的含油气盆地勘探提供重要借鉴。

5 结论

1) 剥蚀中心自文昌组沉积期由盆内轴向源区逐

渐迁移至北部缓坡,并在恩平组沉积期进一步迁移至西北部盆外源区。

2) 白云凹陷原型盆地呈现文下段沉积时期强伸展背景小盆窄湖—文上段沉积时期弱伸展背景宽浅湖盆—恩平期稳定沉降背景浅水广盆的转变特征。

3) 白云凹陷经历“双源三型”(近源和远源及近源-陡坡型、近源-缓坡型和远源-缓坡型)的盆-源动态充填演化。从文六亚段—文四亚段的盆内近源-陡坡型轴向供给转变为文三亚段—文一亚段的近源-缓坡型北部缓坡带供给,直到转变为恩四亚段—恩一+二亚段的远源-缓坡型盆外长轴供给。

4) 白云凹陷剥蚀中心迁移和盆-源体系转变皆受控于南海北部区域应力场的顺时针变化(NW向—NNW向—近NS向伸展拉张)。

参 考 文 献

- [1] 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. Progress in “Source-to-Sink” system research[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 116-131.
- [2] 解习农, 林畅松, 李忠, 等. 中国盆地地动力学研究现状及展望[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 877-887.
XIE Xinong, LIN Changsong, LI Zhong, et al. Research reviews and prospects of sedimentary basin geodynamics in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 877-887.
- [3] 龚承林, 齐昆, 徐杰, 等. 深水源—汇系统对多尺度气候变化的过程响应与反馈机制[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 231-252.
GONG Chenglin, QI Kun, XU Jie, et al. Process-product linkages and feedback mechanisms of deepwater source-to-sink responses to multi-scale climate changes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 231-252.
- [4] 徐长贵. 渤海古近系坡折带成因类型及其对沉积体系的控制作用[J]. 中国海上油气, 2006, 18(6): 365-371.
XU Changgui. Genetic types of Paleogene slope-break zones and their controls on depositional system in Bohai offshore[J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(6): 365-371.
- [5] WALSH J P, WIBERG P L, AALTO R, et al. Source-to-sink research: Economy of the Earth's surface and its strata[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 1-6.
- [6] HELLAND-HANSEN W, SØMME T O, MARTINSEN O J, et al. Deciphering Earth's natural hourglasses: Perspectives on source-to-sink analysis[J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86(9): 1008-1033.
- [7] COWIE P A, WHITTAKER A C, ATTAL M, et al. New constraints on sediment-flux-dependent river incision: Implications for extracting tectonic signals from river profiles[J]. Geology, 2008, 36(7): 535-538.

- [8] SYVITSKI J P, MOREHEAD M D. Estimating river-sediment discharge to the ocean: Application to the Eel margin, northern California[J]. *Marine Geology*, 1999, 154(1/4): 13–28.
- [9] SYVITSKI J P M, MILLIMAN J D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean[J]. *The Journal of Geology*, 2007, 115(1): 1–19.
- [10] SØMME T O, HELLAND-HANSEN W, MARTINSEN O J, et al. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: A basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems [J]. *Basin Research*, 2009, 21(4): 361–387.
- [11] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 1–11.
- XU Changgui, DU Xiaofeng, XU Wei, et al. New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 1–11.
- [12] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垒田凸起前古近系基岩分布及源-汇过程[J]. *地球科学*, 2016, 41(11): 1935–1949.
- LIU Qianghu, ZHU Xiaomin, LI Shunli, et al. Pre-Palaeogene bedrock distribution and source-to-sink system analysis in the Shaleitian uplift[J]. *Earth Science*, 2016, 41(11): 1935–1949.
- [13] 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. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1851–1870.
- [14] 朱红涛, 徐长贵, 杜晓峰, 等. 陆相盆地古源-汇系统定量重建、级次划分及耦合模式[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 539–552.
- ZHU Hongtao, XU Changgui, DU Xiaofeng, et al. Quantitative reconstruction, hierarchical division and coupling mode establishment for ancient source-to-sink systems in continental basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 539–552.
- [15] 朱筱敏, 康安, 王贵文. 陆相拗陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨[J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 283–287
- ZHU Xiaomin, KANG An, WANG Guiwen. Sequence stratigraphic models of depression and faulted-down lake basins [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 283–287.
- [16] 侯元立, 邵磊, 乔培军, 等. 珠江口盆地白云凹陷始新世—中新世沉积物物源研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(2): 19–28.
- HOU Yuanli, SHAO Lei, QIAO Peijun, et al. Provenance of the Eocene-Miocene sediments in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(2): 19–28.
- [17] KLEMME H D. Petroleum basins-classifications and characteristics [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1980, 3(2): 187–207.
- [18] MARTIN R. Paleogeomorphology and its application to exploration for oil and gas (with examples from western Canada) [J]. *AAPG Bulletin*, 1966, 50(10): 2277–2311.
- [19] 林杨松, 杨海军, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代中央隆起带古构造地貌及其对沉积相发育分布的制约[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2009, 39(3): 306–316.
- LIN Changsong, YANG Haijun, LIU Jingyan, et al. Paleostuctural geomorphology of the Paleozoic central uplift belt and its constraint on the development of depositional facies in the Tarim Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2009, 39(3): 306–316.
- [20] 施振生, 袁渊, 赵群, 等. 川南地区五峰组—龙马溪组沉积期古地貌及含气页岩特征[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(12): 1969–1985.
- SHI Zhensheng, YUAN Yuan, ZHAO Qun, et al. Paleogeomorphology and oil-bearing shale characteristics of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(12): 1969–1985.
- [21] 杨婷婷, 许光泉, 张著, 等. 淮南舜耕山奥陶系古岩溶发育特征及古地貌恢复[J]. *地质论评*, 2024, 70(4): 1595–1606.
- YANG Tingting, XU Guangquan, ZHANG Zhu, et al. Characteristics of paleokarst development in Ordovician System in Shungeng Mountain, Huainan, and paleogeomorphic restoration [J]. *Geological Review*, 2024, 70(4): 1595–1606.
- [22] KINGSTON D R, DISHROON C P, WILLIAMS P A. Global basin classification system [J]. *AAPG Bulletin*, 1983, 67(12): 2175–2193.
- [23] 刘和甫. 沉积盆地地球动力学分类及构造样式分析[J]. *地球科学*, 1993, 18(6): 699–724, 814.
- LIU Hefu. Dynamic classification of sedimentary basins and their structural styles[J]. *Earth Science*, 1993, 18(6): 699–724, 814.
- [24] DICKINSON W R, WERNICKE B P. Reconciliation of San Andreas slip discrepancy by a combination of interior Basin and Range extension and transrotation near the coast [J]. *Geology*, 1997, 25(7): 663–665.
- [25] RODRÍGUEZ-TOVAR F J, DORADOR J, MAYORAL E, et al. Outcrop and core integrative ichnofabric analysis of Miocene sediments from Lepe, Huelva (SW Spain): Improving depositional and paleoenvironmental interpretations[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 349: 62–78.
- [26] 翟咏荷, 何登发, 开百泽. 鄂尔多斯盆地及邻区早二叠世构造-沉积环境与原型盆地演化[J]. *地学前缘*, 2023, 30(2): 139–153.
- ZHAI Yonghe, HE Dengfa, KAI Baize. Tectono-depositional environment and prototype basin evolution in the Ordos Basin during the Early Permian [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(2): 139–153.
- [27] 甄宇, 陈旋, 焦立新, 等. 东疆地区石炭纪—二叠纪构造古地理与原型盆地演化[J]. *古地理学报*, 2024, 26(1): 78–99.
- ZHEN Yu, CHEN Xuan, JIAO Lixin, et al. Carboniferous-Permian tectonopaleogeography and prototype basin evolution in eastern Xinjiang, NW China [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2024, 26(1): 78–99.

- [28] 刘太勋, 孙丰春, 彭光荣, 等. 珠江口盆地白云凹陷东部古近系文昌组沉积演化特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 77-90.
- LIU Taixun, SUN Fengchun, PENG Guangrong, et al. Sedimentary evolution characteristics of Paleogene Wenchang Formation in eastern Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(1): 77-90.
- [29] 郭伟, 徐国强, 陈兆明, 等. 珠江口盆地白云主洼古近系文昌组沉积充填特征及演化[J]. 古地理学报, 2022, 24(1): 112-128.
- GUO Wei, XU Guoqiang, CHEN Zhaoming, et al. Sedimentary filling characteristics and evolution of the Paleogene Wenchang Formation in Baiyun main sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2022, 24(1): 112-128.
- [30] 刘军, 彭光荣, 郑金云, 等. 珠江口盆地白云凹陷西区始新世张裂-拆离作用下沉积转换及源-汇响应[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 600-612.
- LIU Jun, PENG Guangrong, ZHENG Jinyun, et al. Sedimentary transformation and source-to-sink response to the Eocene rifting-detachment in the western Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 600-612.
- [31] 唐武, 谢晓军, 熊连桥, 等. 陆架边缘三角洲-深水扇源汇耦合关系及成因机制——以珠江口盆地白云南洼古近系珠海组为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(3): 513-525.
- TANG Wu, XIE Xiaojun, XIONG Lianqiao, et al. Coupling relationship and genetic mechanisms of shelf-edge delta and deep-water fan source-to-sink: A case study in Paleogene Zhuhai Formation in South subsag of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 513-525.
- [32] 任建业. 中国近海海域新生代成盆动力机制分析[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3337-3361.
- REN Jianye. Genetic dynamics of China offshore Cenozoic basins [J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3337-3361.
- [33] HALL R, SPAKMAN W. Mantle structure and tectonic history of SE Asia[J]. Tectonophysics, 2015, 658: 14-45.
- [34] 彭光荣, 王绪诚, 陈维涛, 等. 珠江口盆地惠州26洼东南缘古近系恩平组上段断-拗转换期源-汇系统及勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 613-625.
- PENG Guangrong, WANG Xucheng, CHEN Weitao, et al. Source-to-sink system during rifting-depression transition period and its exploration significance: A case study of the Upper Enping Formation at southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 613-625.
- [35] 王梓颐, 李洪博, 郑金云, 等. 珠江口盆地番禺27洼裂陷期构造演化及其对源-汇系统的控制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 626-636.
- WANG Ziyi, LI Hongbo, ZHENG Jinyun, et al. Structural evolution and its control on source-to-sink system of Panyu 27 Sag in Pearl River Mouth Basin during rifting[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 626-636.
- [36] MORLEY C K. Late Cretaceous-Early Palaeogene tectonic development of SE Asia [J]. Earth-Science Reviews, 2012, 115(1/2): 37-75.
- [37] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的基本构造特征与成因模型: 问题与进展及论争[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 35-53.
- LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basic structural pattern and tectonic models of the South China Sea: Problems, advances and controversies [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(6): 35-53.
- [38] ZHANG Cuimei, SUN Zhen, MANATSCHAL G, et al. Syn-rift magmatic characteristics and evolution at a sediment-rich margin: Insights from high-resolution seismic data from the South China Sea [J]. Gondwana Research, 2021, 91: 81-96.
- [39] DING Weiwei, SUN Zhen, MOHN G, et al. Lateral evolution of the rift-to-drift transition in the South China Sea: Evidence from multi-channel seismic data and IODP Expeditions 367&368 drilling results [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 531: 115932.
- [40] HAO Shihao, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. Rift migration and transition during multiphase rifting: Insights from the proximal domain, northern South China Sea rifted margin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 123: 104729.
- [41] 马凌, 单玄龙, 向绪洪, 等. 珠江口盆地白云凹陷裂陷期断裂活动特征与动力学机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 1968-1985.
- MA Ling, SHAN Xuanlong, XIANG Xuhong, et al. Fault activity and dynamic mechanisms during the rifting stage in the Baiyun Depression of the Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1968-1985.
- [42] YANG Linlong, REN Jianye, MCINTOSH K, et al. The structure and evolution of deepwater basins in the distal margin of the northern South China Sea and their implications for the formation of the continental margin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92: 234-254.
- [43] HAO Shihao, MEI Lianfu, PANG Xiong, et al. Rifted margin with localized detachment and polyphase magmatism: A new model of the northern South China Sea [J]. GSA Bulletin, 2023, 135(7/8): 1667-1687.
- [44] KUEHL S A, ALEXANDER C R, BLAIR N E, et al. A source-to-sink perspective of the Waipaoa River margin [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 301-334.
- [45] YAN Bo, SHAN Xuanlong, WEI Zhe, et al. Differential magmatism and tectonic evolution during the rift stage within the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin in the northern South China Sea [J]. Gondwana Research, 2025, 142: 185-211.
- [46] 单玄龙, 王志豪, 卫哲, 等. 珠江口盆地白云凹陷始新统物源体系展布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54

- (6): 1896–1911.
- SHAN Xuanlong, WANG Zhihao, WEI Zhe, et al. Eocene provenance system distribution in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(6): 1896–1911.
- [47] 慕德梁, 孟卫工, 李成, 等. 断陷盆地陡坡带构造样式与油气聚集——以渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷陡坡带为例[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(5): 635–642.
- MU Deliang, MENG Weigong, LI Cheng, et al. Structural style and hydrocarbon accumulation in the steep slope zone of faulted basin—an example from the western sag of the Liaohe Depression, the Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 635–642.
- [48] 和子琛, 刘豪, 林鹤鸣, 等. 断陷湖盆坡折带-古沟谷对沉积的控制作用——以珠江口盆地海丰33洼陷古近系文昌组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 441–451.
- HE Zichen, LIU Hao, LIN Heming, et al. Controlling effect of slope-break zone and paleovalley on sedimentation in rifted lake basins: A case study of the Paleogene Wenchang Formation in Haifeng 33 Subsag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 441–451.
- [49] ZENG Zhiwei, ZHU Hongtao, YANG Xianghua, et al. Multistage progradational clinoform-set characterisation and evolution analysis of the Early Oligocene in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 112: 104048.
- [50] 曾智伟. 南海北部珠江口盆地古近纪源-汇系统耦合研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020.
- ZENG Zhiwei. Source-to-sink (S2S) system analysis of the Paleogene in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020.
- [51] 高阳东, 彭光荣, 张向涛, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近系文昌组源-汇系统特征及演化[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 584–599.
- GAO Yangdong, PENG Guangrong, ZHANG Xiangtao, et al. Characteristics and evolution of the source-to-sink system of the Paleogene Wenchang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 584–599.
- [52] ZHAO Dapeng. Seismic imaging of northwest Pacific and East Asia: New insight into volcanism, seismogenesis and geodynamics [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103507.
- [53] ZHU Rixiang, XU Yigang. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(9): 1340–1350.
- [54] LIU Zhifei, LI Chunfeng, KULHANEK D. Preface: Evolution of the Deep South China sea: integrated IODP expedition 349 results [J]. *Marine Geology*, 2017, 394: 1–3.
- [55] MENG Jun, GILDER S A, WANG Chengshan, et al. Defining the limits of greater India [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(8): 4182–4191.
- [56] CHENG Yanjun, WU Zhiping, ZHANG Jie, et al. Cenozoic tectonic evolution of offshore Chinese Basins and its response to geodynamic processes of the East Asian Continental Margin [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 232: 104140.
- [57] MÜLLER R D, SETON M, ZAHIROVIC S, et al. Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, 44: 107–138.
- [58] REN Jianye, TAMAKI K, LI Sitian, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 2002, 344(3/4): 175–205.
- [59] LELOUP P H, ARNAUD N, LACASSIN R, et al. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106 (B4): 6683–6732.
- [60] ZHAO Dapeng, TIAN You, LEI Jianshe, et al. Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia: Role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173(3/4): 197–206.

(编辑 王迪)