



构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

李法坤, 戴黎明, 杜晓东, 蔡国富, 李三忠, 董昊, 王宇

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

LI Fakun, DAI Liming, DU Xiaodong, CAI Guofu, LI Sanzhong, DONG Hao, and WANG Yu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021040601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021040601

构造-沉积耦合过程的数值模拟:以南海北部阳江凹陷为例

李法坤^{1,2}, 戴黎明^{1,2}, 杜晓东³, 蔡国富³, 李三忠^{1,2}, 董昊^{1,2}, 王宇^{1,2}

1. 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000

摘要:以构造变形为核心的内动力过程和以沉积“源-汇”过程为核心的外动力过程,如何动态塑造盆地精细地貌景观,是油气精准勘探必须突破的关键技术。本研究以南海北部陆缘珠江口盆地的阳江凹陷为例,试图探索NW向阳江—一统暗沙深大断裂带对周缘新生代沉降中心分布的控制作用。为此,本文采用Badlands沉积数值模拟方法,定量分析阳江—一统暗沙断裂带的运动学特征,模拟阳江凹陷新生代地层构造-沉积耦合过程。模拟结果显示,阳江—一统暗沙断裂带在始新世末期是一条左行走滑断裂带,其走滑过程主要可分为两个阶段。其中,在早期慢走滑阶段,走滑位移量约800 m,沿断裂带走滑方向,恩平19洼的沉降中心发生迁移;在后期快走滑阶段,走滑位移量约1200 m,模拟剖面可识别出明显的花状构造,恩平19洼的沉降中心加速向北迁移,并发生逆时针旋转。

关键词:运动学性质;数值模拟;阳江—一统暗沙断裂带;阳江凹陷

中图分类号:P736.1 文献标识码:A

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

LI Fakun^{1,2}, DAI Liming^{1,2}, DU Xiaodong³, CAI Guofu³, LI Sanzhong^{1,2}, DONG Hao^{1,2}, WANG Yu^{1,2}

1. *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*
2. *Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*
3. *Nanhai East Petroleum Research Institute, Shenzhen Branch, CNOOC China Limited, Shenzhen 518000, China*

Abstract: To dynamically shape the fine geomorphic landscape of a basin is a key technology required in efficient oil and gas exploration. In this paper, the Yangjiang Sag in the Pearl River Mouth Basin on the northern margin of the South China Sea is selected as a case to explore the NW-trending Yangjiang-Yitong'ansha Blind Fault Zone (YYBFZ) and its control over the distribution patterns of Cenozoic depocenters in its periphery. Badlands' numerical sedimentation simulation is used to quantitatively analyze the kinematic characteristics of the YYBFZ for further understanding the Cenozoic tectono-sedimentary coupling process of the Yangjiang Sag. The simulation results suggest that the YYBFZ was a sinistral strike-slip fault zone formed by the end of Eocene, and the strike slip process can be divided into two stages. The early stage is a slow strike slip stage, with a strike-slip displacement of about 800 m, and the depocenters of the Enping 19 Subsag migrate along the slip direction of the fault; In the late stage, however, the slip was fast and the displacement of the strike slip may reach the figure about 1200 m, and along the simulation section, obvious flower-like structures are observed. At the same time, the depocenters of the Enping 19 Subsag accelerated its move northward with rotation anticlockwise.

Key words: kinematics; numerical modeling; Yangjiang-Yitong'ansha Blind Fault Zone; the Yangjiang Sag

资助项目:国家自然科学基金重大研究项目“台湾岛弧及邻区新生代古地形地貌数值模拟与动态重塑”(91958214);青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划项目(2017ASKJ02);青岛市创新领军人才计划项目(19-3-2-19-zhc);泰山学者攀登计划项目(李三忠)

作者简介:李法坤(1995—),男,硕士研究生,从事盆地数值模拟研究, E-mail: lifakun@stu.ouc.edu.cn

通讯作者:戴黎明(1980—),男,副教授,从事构造地质学及其数值模拟研究, E-mail: dlming@ouc.edu.cn

李三忠(1968—),男,教授,从事海洋地质学与构造地质学研究, E-mail: sanzong@ouc.edu.cn

收稿日期:2021-04-06; 改回日期:2021-04-22. 周立君编辑

海洋油气勘探成本高、难度大,特别是在地震勘探资料有限的海域,勘探风险也巨大。随着新技术发展,现代超算技术和流固耦合技术的结合,有助于实现沉积“源-汇”过程动态模拟,以再现盆地构造演化过程中的内外地貌景观和四维层序结构演变,从而实现精准勘探。为此,本文以南海北部陆缘的珠江口盆地阳江凹陷为例,进行技术探索,并试图揭示构造-沉积耦合过程,以开拓数字油气勘探新技术、新途径。

南海位于欧亚板块、印澳板块和太平洋板块的交汇处,发育有多条NW向的大型断裂带,断裂带对其周缘的新生代沉积充填和地层堆叠样式有重要的控制作用^[1-11]。阳江—统暗沙断裂带便是切过南海北部阳江凹陷的一条NW向深大断裂带,它活动时间长,切割深度大,对上覆地层沉降中心的迁移有重要的控制作用。定量分析阳江凹陷新生代构造变形和沉积“源-汇”的耦合过程,对理解该断裂带的运动性质及其与周缘构造-沉积的响应关系具有重要意义,也有助于岩性油气藏的精准勘探。

关于阳江—统暗沙断裂带在新生代的运动学性质迄今还存在争论,目前主要有三种观点:第一种观点认为阳江—统暗沙断裂带目前只表现出一条构造转换带的特征,并没有足够的证据证明其是一条走滑断裂带。第二种观点认为,进入新生代后,欧亚、印澳、太平洋板块之间的相互作用以及岩石圈深部的动力变化改变了南海北缘的区域应力场,使该断裂带从中生代时的左行走滑断裂带转变为一条右行走滑断裂带^[12-13]。第三种观点则认为,在新生代初期,阳江—统暗沙断裂带是一条调节盆地内NE-NEE向伸展构造的差异变形的转换调节带,在始新世末开始左行走滑,并在渐新世末期形成左行左阶拉分断裂体系^[14-17]。上述三种观点都是基于区域应力场的宏观分析或现今的地震剖面定性研究得出的,并没有定量研究断裂带的特征。而定性分析有一定的主观因素,对于断裂带的性质仍没有形成统一意见。因此,如何定量分析阳江—统暗沙断裂带在新生代的运动学性质是解决争议的关键。

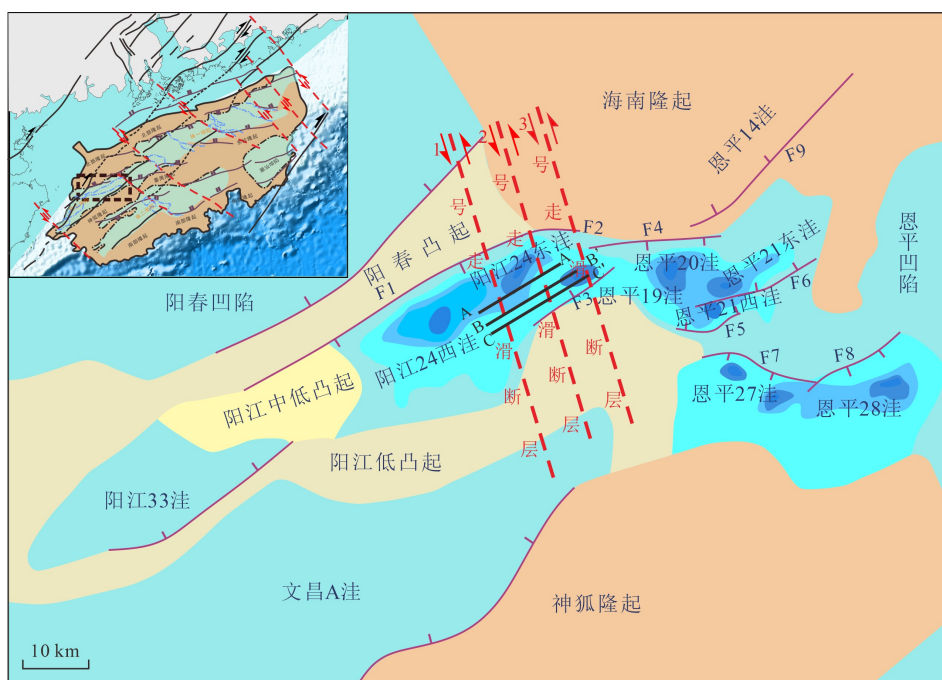
为了解决上述问题,本文利用Badlands沉积数值模拟方法,对阳江—统暗沙断裂带的运动学性质开展了量化数值模拟研究。研究过程中,可视化了阳江凹陷自始新世以来构造-沉积的耦合过程,通过与地球物理资料和地质资料的对比,确定了阳江—统暗沙断裂带的运动学性质,探讨了在断裂带控制下恩平19洼沉降中心的迁移规律。

1 区域地质背景

阳江凹陷位于珠江口盆地(西部)珠三拗陷的北东端,是一个在古生界变质岩基底上发育起来的新生代陆缘拉张型断陷盆地,其西部以阳江凸起为界,东部毗邻恩平凹陷,南北两端被夹持在北部隆起带和神狐隆起之间(图1)。受多期构造运动的影响,阳江凹陷内部发育9个次级洼陷和多条控洼断层^[18-23],其中,阳江33洼由于缺乏必要的资料,不在本次研究范围内;恩平19洼位于阳江凹陷中西部,主要受一条NE向断层(F3)的控制,是阳江凹陷新生代主要沉降中心之一^[24]。

珠江口盆地新生代沉积地层主要经历了早期(文昌组和恩平组)的湖泊相沉积、中期(珠海组)的海湾过渡相沉积以及晚期(珠江组及以后)的开阔海相沉积三个阶段^[25-33]。其中,文昌组和恩平组处于盆地断陷期,经历过多次区域性升降,断层活动频繁,非常适合研究断层对构造-沉积的控制作用,是本研究模拟的主要时期。同时,文昌组沉积时期中小型物源输入为烃源岩的发育提供了良好的条件,恩平组则发育辫状河三角洲相沉积地层,这两组地层是阳江凹陷新生代烃源岩发育的主要地层,是该地区重要的生油层^[34-36]。

阳江—统暗沙断裂带位于南海北部,呈NW-SE向延展,向陆地方向可延伸至紫罗垭断裂,是横切珠江口盆地的重要断裂带之一^[37]。该断裂带属于潜伏深大断裂带,自陆架至洋陆边界可分为北段的阳江东凹段、中段的神狐隆起东缘开平东洼段和南段的云开低凸起段^[38],全长超过400 km,宽度约30 km,在阳江凹陷地区也有所出露,航磁异常和岩浆展布显示,其主断裂切割了盆地基底地层^[39-40]。阳江—统暗沙断裂带在新生代由多条NW向分支断裂组成,各单支断裂在平面上多表现为右阶雁列构造或马尾状构造,整体上则呈左阶展布。在平面上,根据遥感资料和派生断裂的平面组合样式,阳江—统暗沙断裂带在恩平19洼的表现形式为多条NW向、近平行的分支断层,分别切割阳江24东洼东部和恩平19洼的中西部;在地震剖面上,阳江—统暗沙断裂带在恩平19洼周围表现为高角度板式或铲式断层,单支断裂陡立,整体呈“Y”字型展布,对断裂带周缘新生代地层分布有较强的控制作用^[27];但目前对阳江—统暗沙断裂带如何影响周缘地层的分布特征及沉降中心的迁移规律并不清楚。

图 1 阳江凹陷区域构造单元及走滑断层位置^[15, 23]Fig.1 Regional tectonic units and strike-slip faults in the Yangjiang Sag^[15, 23]

2 模拟方法和模型构建

2.1 模拟方法

Badlands 数值模型是一款基于盆地浅部构造控制的地貌和深部构造诱发的动力地形叠加的动态效应,并结合古气候、古侵蚀/古沉积速率、古海平面变化等因素,模拟盆地“4D”沉积充填过程和盆地地貌演变的软件^[41-45]。基于地形演化数据,利用该数值模型还可精细刻画阳江—统暗沙断裂带对阳江凹陷恩平 19 洼的控制作用。模拟过程中,模型主要遵循质量守恒方程,方程如下:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\nabla \cdot q_s + u \quad (1)$$

其中,公式左侧为 z (地面高程)的单位时间增量, u 表示构造运动引起的地形变化,单位是 m/a ; ∇ 表示梯度; q_s 表示在深度上整合为一体的、每单位宽度的总体沉积物通量,单位是 m^2/a 。

山坡滑移是指山坡上的部分物质在重力作用下沿一软弱面整体向下移动,其过程由简单蠕移法则定义^[46-48],方程如下:

$$-\nabla \cdot q_d = -\kappa \nabla^2 z \quad (2)$$

其中, κ 表示扩散系数,其值取决于岩性及平均降水量、河道宽度、洪水频率以及其他潜在的参数和过程^[49-52]。

岩石圈的挠曲是在外动力作用下弹性地球外壳弯曲的一个过程,不同于流体静力学方法,挠曲模型假设岩石圈是一个复合层,上地壳近似于弹性板块,而下地壳和上地幔的行为则和黏性流体相似^[53-55]。地表过程造成的沉积物再分配改变了地球弹性外壳上地表沉积物载荷的分配^[56-57]。在抗弯刚度统一且不考虑水平作用力的情况下,控制弹性变形的方程如下:

$$D\nabla^2 \nabla^2 \omega + \Delta \rho g \omega = q_1 \quad (3)$$

其中, ω 代表板块的垂直偏转量; $\Delta \rho = \rho_m - \rho_f$ 表示地幔和充填物(沉积物、空气、水或是它们的组合)之间的密度差; $q_1 = \rho_1 g h_1$ 表示每单位面积上所施加的载荷的合力; ρ_1 是载荷物的密度; h_1 是载荷物的高度; g 为重力加速度; D 是弹性板块的抗弯强度。

2.2 模型构建

在构建模型时,本文考虑的主要参数有构造地形、古气候、侵蚀率系数和阳江—统暗沙断裂带在阳江凹陷地区的走滑性质及走滑位移量等。

(1) 构造地形

构造地形是地质构造形态的外部表现,它由构造运动直接影响产生,控制着盆地的沉积作用^[58-62]。为保证模拟的精度,使模型最大程度地贴合实际地质构造,本文基于精确的三维数据体,结合测井数据和平衡剖面等,利用三维平衡恢复法(包括剥蚀量恢复、去断层、层拉平、去压实和热沉降等),对

阳江凹陷进行三维构造恢复,以恢复后的基底古地形为初始模型,根据基底沉降量和地层的沉积时间,加载相应的构造地形数据(图2)。

根据阳江—统暗沙断裂带在阳江凹陷的基本特征,模型设置了3条走滑断层(1号、2号和3号走滑断层),各断层平面分布位置如图1所示;并按照走滑断层的性质及位移量的不同,设置了6组模型,具体参数见表1。整个模型的模拟时间为18.4 Ma,对应于始新世到渐新世早期(47.8~29.4 Ma)。其中,在33.9 Ma时,模型开始进入走滑断层活动期,此时1号走滑断层开始活动(图2a),2号走滑断层在32.4 Ma时开始活动(图2b),3号走滑断层在30.9 Ma时开始活动(图2c);到29.4 Ma时,所有断层均停止走滑,至此模拟结束(图2d)。

(2)古气候

在Badlands中,古气候变化对沉积作用的影响主要通过古海平面和降水量的变化来体现。由于珠江口盆地文昌组和恩平组为陆相沉积建造,其沉积时全部位于海平面之上,因此,海平面的绝对位置对模型的控制作用有限。本文以Haq等^[63]恢复的全球海平面变化曲线为基础,设置模型的海平面变化。区域降水量也是体现古气候的重要参数,它可以影响岩石的风化速率以及河流的径流量,从而驱动河流侵蚀和河流体系的演化,对此,根据前人的经验值,本文将模型降水量设置为1 m/a。

(3)侵蚀率系数

侵蚀率系数直接控制盆地侵蚀和沉积速率的大小,对地层的沉积有很强的控制作用。本文设置

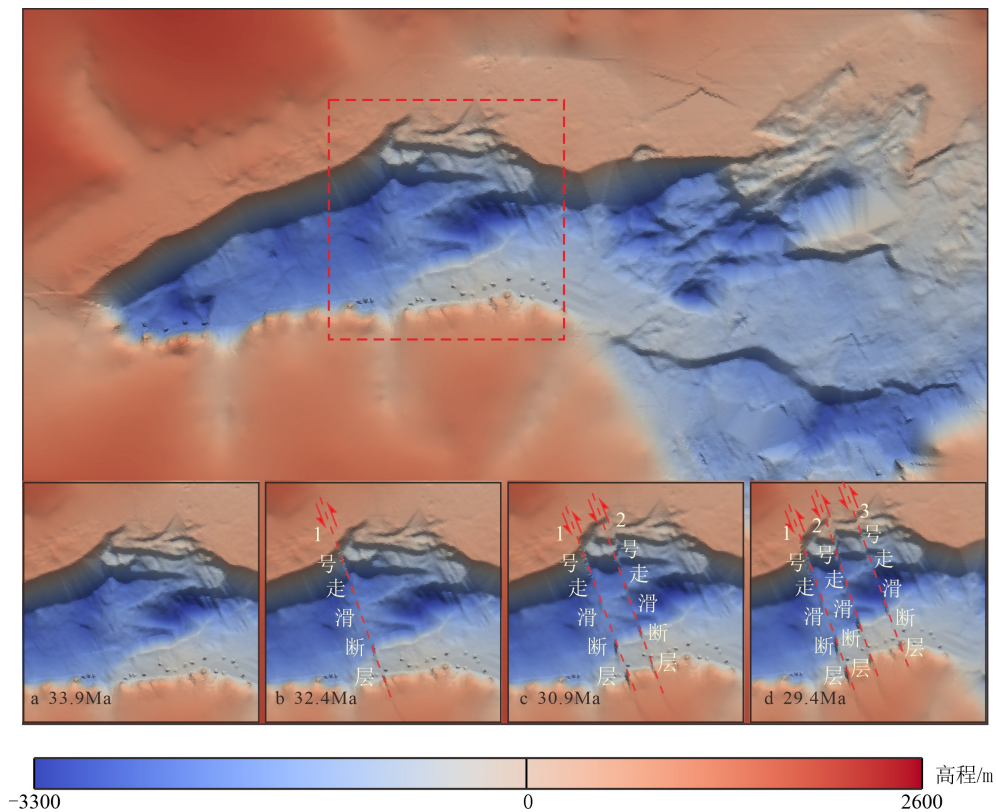


图2 模型基底走滑断裂演化

Fig.2 The evolution of strike-slip faults in the basement

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

模型	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6
性质	非走滑	右行	左行	左行	左行	左行
走滑量/m	2000	2000	2000	1500	2500	3000
侵蚀系数/a ⁻¹	3×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁷
降水量/(m/a)	1	1	1	1	1	1

了多组侵蚀率系数进行模拟分析, 对比地震剖面和沉积厚度等地球物理资料后发现, 当侵蚀率系数为 $3 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$ 时, 模拟结果和实际地质资料的匹配度最高。由于模型不深入讨论地层的沉积速率, 因此设置所有模型均加载此统一的侵蚀率系数。

由于阳江凹陷的沉积范围有限, 本文认为能显著影响盆地构造格局变化的是构造地形, 而深部动力地形对盆地的影响很小, 且研究区在文昌组和恩平组沉积时期并未发生大的热沉降事件, 在本文中不讨论深部动力地形对模型的影响。

3 结果

3.1 阳江—统暗沙断裂带运动学性质的剖面对比

为了分析阳江—统暗沙断裂带在新生代的运动学性质, 本文在阳江凹陷自西向东提取了 3 条模拟剖面与真实的地震剖面进行对比 (图 3), 各剖面位置如图 1 所示。其中, 图 3a、3b、3c 为转换带模式 (模型 1) 下的模拟剖面, 图 3d、3e、3f 为右行走滑模式 (模型 2) 下的模拟剖面, 图 3g、3h、3i 为左行走滑模式 (模型 3) 下的模拟剖面, 图 3j、3m、3n 为真实的地震剖面, 阴影区为走滑断层活动的主要区域。与地震剖面不同, 在模拟剖面中, 断层主要是通过地层产状的变化来体现的。模拟结果显示, 转

换带模式和右行走滑模式下的模拟剖面形态相似, 在阴影区, 地层发育平缓, 没有产状上的变化, 即没有断层发育的迹象, 3 条剖面的沉积厚度都为 300~2000 m。左行走滑模式下模拟剖面的地层在倾角上有明显的突变, 显示有多条断层发育, 剖面受到强烈的改造作用, 形态呈近“W”型; A-A' 剖面的地层厚度为 1000 m 左右, B-B' 和 C-C' 剖面的地层厚度为 800~2000 m。对比 3 条测线的模拟剖面 and 地震剖面, 发现地震剖面的阴影区无论是在地层厚度 (尤其是 A-A' 剖面的厚度都为 1000 m)、剖面形态 (明显受断层的改造作用) 还是地层产状 (有多处发生产状突变) 等方面都和左行走滑模式下模拟剖面的阴影区相一致。

3.2 阳江—统暗沙断裂带走滑位移量的剖面对比

根据上述三组剖面的对比结果, 左行走滑模式更符合始新世末期阳江—统暗沙断裂带在阳江凹陷的走滑特征, 但该断裂带的走滑位移量还不清楚。这里设置了四组模型 (模型 3、4、5、6), 以研究断层在始新世末期时的走滑位移量, 各模型在 A-A' 位置的模拟剖面如图 4 所示。图 4a 表示走滑量为 1500 m (模型 4) 时的模拟剖面, 模拟结果显示, 该模式下模拟剖面在演化过程中的整体形态基本保持不变, 阴影区的地层厚度约为 1200 m。图 4b 表示走滑量为 2000 m (模型 3) 时的模拟剖面, 该模式下

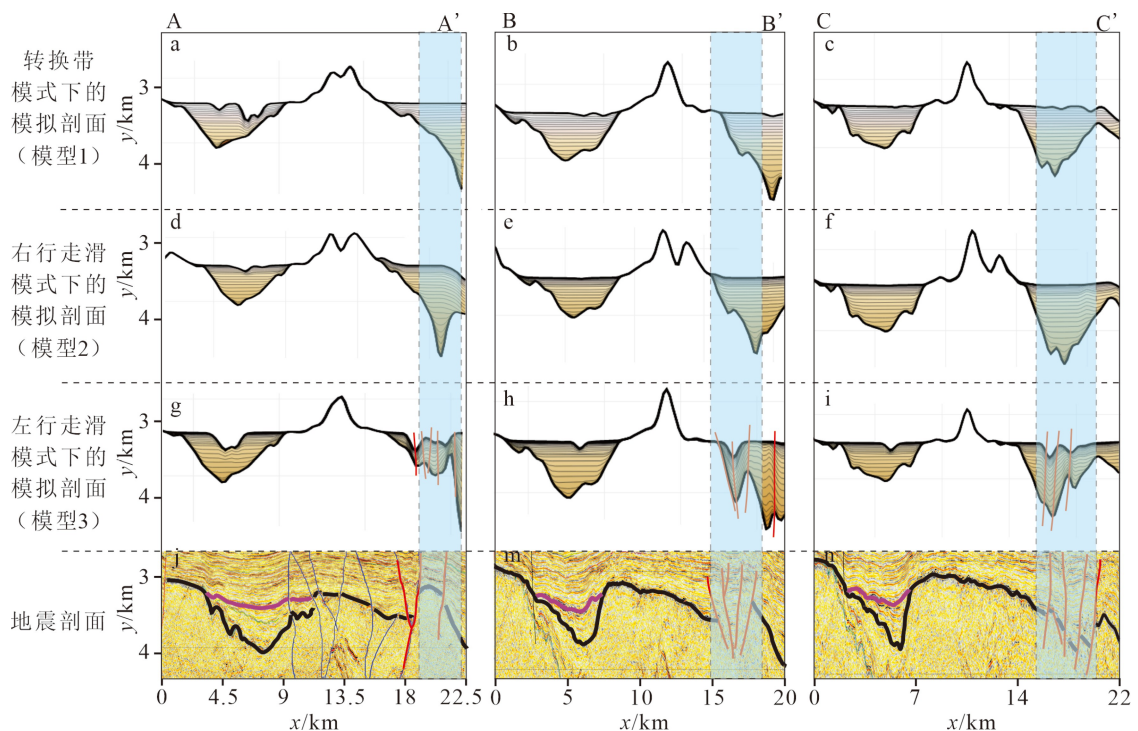


图 3 不同位置的模拟剖面和地震解释对比

Fig.3 Comparison of simulated sections and seismic sections at different locations

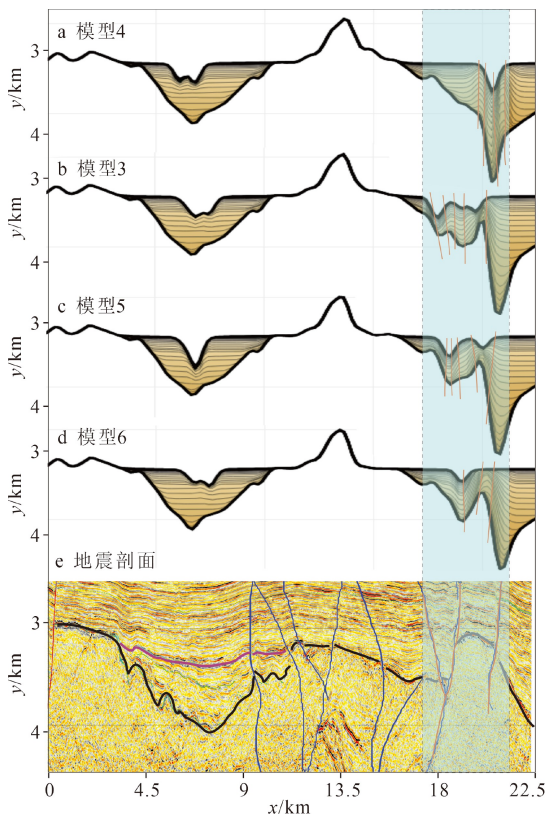


图4 不同走滑位移量的剖面对比

Fig.4 comparison of strike-slip displacements in different sections

阴影区的剖面形态有明显改变,最终呈现为“W”型,地层厚度大约为1000m。图4c表示走滑量为2500m(模型5)时的模拟剖面,该模型的模拟结果和模型3相似,阴影区的地层厚度也为1000m左右。图4d表示走滑量为3000m(模型6)时的模拟剖面,阴影区内的剖面地层被断层切割成“V”字型,地层厚度约1200m。将模拟剖面(图4)和地震剖面(图4e)进行对比后发现,模型4与模型6的模拟剖面形态和地震剖面有较大差别,且地层厚度大于地震剖面(厚度约1000m)的地层厚度;模型5的地层厚度和地震剖面相吻合,但剖面形态和地震剖面稍有差别,模拟剖面受断层的改造作用更强烈,模型3的模拟结果无论是在地层厚度还是在剖面形态上都和地震剖面有较好的一致性。

3.3 阳江凹陷始新世时期沉积厚度对比

通过断裂带走滑性质和走滑位移量的对比,发现模型3在剖面上最能反映阳江—统暗沙断裂带对阳江凹陷的控制作用。为了验证该模型在平面上与地质资料的吻合度,这里提取了模型3的模拟沉积厚度和真实地层厚度以进行对比(图5)。其中,图5a为阳江凹陷(模型3)的模拟沉积厚度,图5b

为根据地球物理资料得出的阳江凹陷现今真实的地层厚度。从全区来看,模拟厚度和真实地层厚度都显示,阳江凹陷自西向东共发育有阳江24西洼等8个沉降中心,且西部的平均沉积厚度大于东部;其中,恩平19洼和恩平28洼的沉积厚度最大,沉降中心的厚度超过3000m;恩平27洼的沉积厚度最小,平均沉积厚度不到2000m。从走滑断层周缘的沉降中心来看,真实地层厚度显示阳江24东洼内部又可分为3个更次级的洼陷,模拟结果也显示出相似的特征,并且中部和东部的次级洼陷被1号走滑断层切过,中部的次级洼陷呈NE走向,东部的次级洼陷靠近北部边界,这可能与1号走滑断层的左行走滑作用有关。阳江24东洼东部边界和恩平19洼西部边界都被2号走滑断层切过,且两者的边界线几乎处于同一直线上,这可能是受2号走滑断层NW向牵引作用的结果。恩平19洼被3号走滑断层切割为东、西两部分,东部沉积厚度较大;模拟厚度和真实地层厚度在恩平19洼的展布方向(近NE向)、沉降中心范围(约30km²)、平均沉积厚度(约2500m)和最大沉积厚度(约3000m)等方面都有很好的一致性。这也说明模型3的模拟结果在平面和剖面上都较好地反映了阳江—统暗沙断裂带在始新世末对阳江凹陷的控制作用。

4 讨论

4.1 阳江—统暗沙断裂带的走滑性质

根据前人的研究成果,关于阳江—统暗沙断裂带在新生代的运动学性质主要有三种观点,其中,第一种观点认为该断裂带在始新世末只是一条转换带,第二种观点认为该断裂带是一条右行走滑断裂带。但模拟结果显示,如果阳江—统暗沙断裂带在始新世末是一条转换带或右行走滑断裂带,那该断裂带对周缘地层的控制作用非常弱,尤其是在走滑后期,模拟剖面内甚至无法识别出断层,剖面形态主要受基底构造的影响。第三种观点认为阳江—统暗沙断裂带在新生代初期是一条调节带,但在始新世末受太平洋动力机制的控制转变为左行走滑断裂带。模拟结果显示,该模式下阳江—统暗沙断裂带在走滑早期也具有一定的转换带特征,没有明显的走滑性质,但在模拟剖面上可识别出多条断层,且断距不断增长,在走滑后期发育明显的花状构造,对剖面有强烈的改造作用,和地震剖面的特征很匹配。因此,本文认为阳江—统

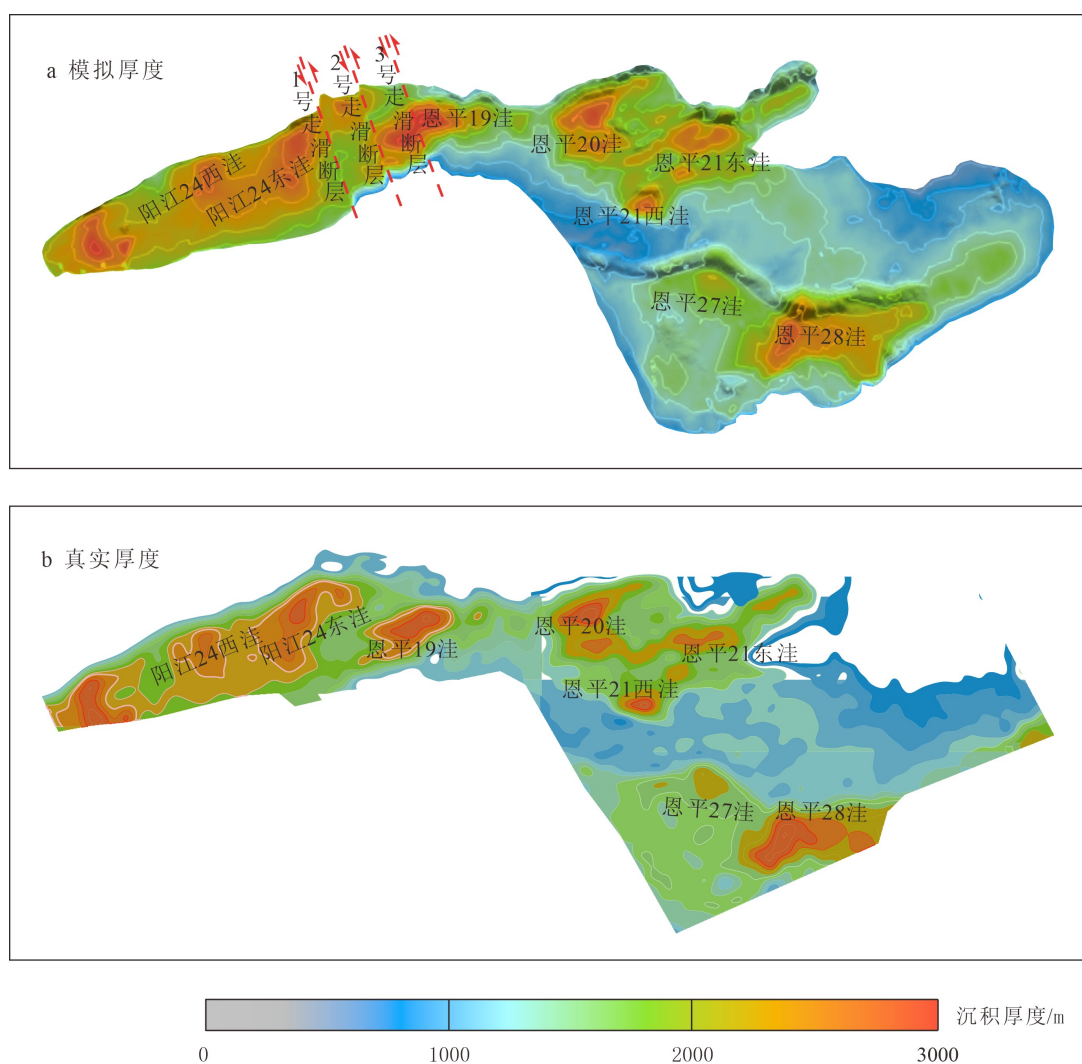


图 5 模拟的沉积厚度和真实沉积厚度对比

Fig.5 Comparison of simulated thickness and real deposition thickness

暗沙断裂带在始新世末是一条左行走滑断裂带。

4.2 阳江—统暗沙断裂带的走滑位移量

走滑断层位移量的研究一直是走滑断层研究的重点和难点^[64], 针对大型走滑断层, 人们已经提出了多种走滑量的计算方法, 如两盘地质参考点对比法^[65-68]、古地磁学研究方法^[69-70]、地壳变形速度估算法^[71]以及基于物理模拟实验的方法^[72]等。虽然近年来对阳江—统暗沙断裂带和阳江凹陷的研究已经取得了一些重大进展^[73-75], 但目前还未对该断裂带在新生代的走滑量进行过详细分析。

根据模拟结果, 当断层的走滑量较小时(模型 4), 走滑速度的增加在模拟剖面上主要体现为分支断层数量的增加, 而断距的变化并不大(图 6a); 在该模式下断层有明显的走滑性质, 但对剖面形态的改造作用有限。当走滑量为 2000 m 时(模型 3), 按照断层的走滑速度及其对地层的改造作用, 断层的

活动主要可分为两个阶段:

第一阶段为早期慢走滑阶段, 时间大约在 33.9 Ma 到 30.9 Ma 之间, 断层的走滑速度较慢, 约为 0.3 mm/a。在此阶段内, 模拟剖面的主要特点是断距不断增大(当断层走滑量增加到 2500 m 和 3000 m 时, 也有相同的规律, 这可能和走滑量的增大能使各分支断层持续活动有关)。第二阶段为后期快走滑阶段, 时间大约在 30.9 Ma 到 29.4 Ma 之间, 断层的走滑速度约为 0.8 mm/a; 与早期相比, (在第二阶段的模拟剖面内)断层的数量增加, 剖面具有明显的走滑性质(图 6b), 对应于地震剖面(图 4e)的花状构造。

随着走滑量的继续增大, 断层的走滑性质在模拟剖面上越来越明显, 断层对剖面的控制作用也越来越强, 当走滑位移量增大到 2500 m 时(模型 5), 模拟剖面受断层的改造效应比真实的地震剖面(图 6c)更强烈, 原因可能是此时模型的走滑量已经大于断层的实际走滑量。当走滑量为 3000 m 时

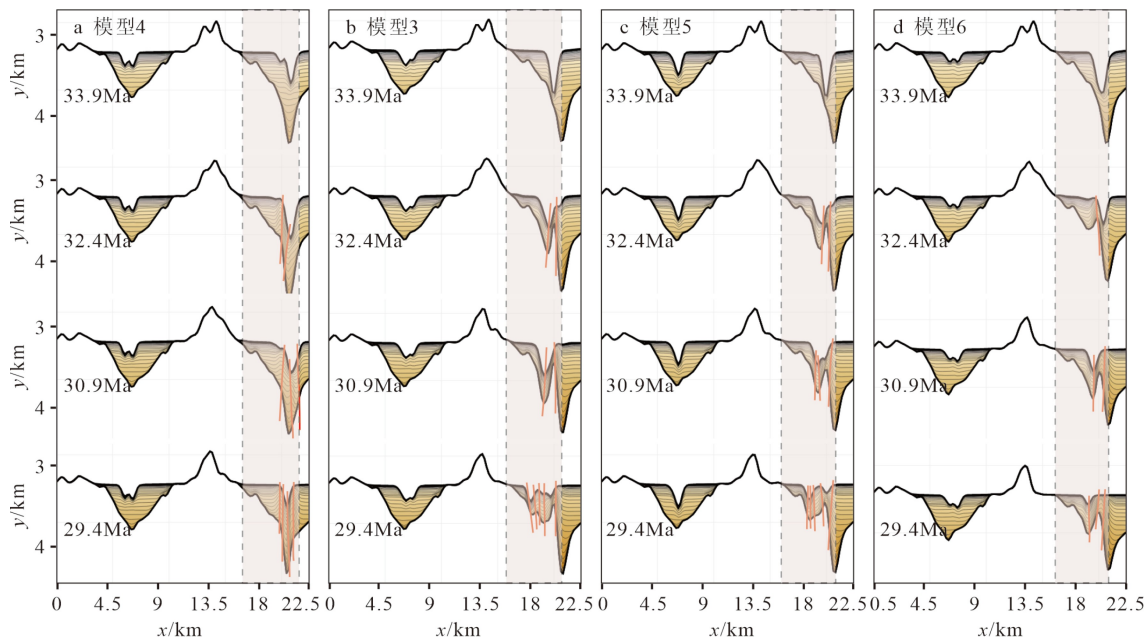


图6 不同走滑分量模式下构造-沉积耦合过程

Fig.6 Tectono-sedimentary coupling under different strike-slip displacements

(模型6), 相较于模型5, 其模拟剖面的形态和地震剖面差别更大, 且走滑断层控制作用有向东扩展的趋势(图6d), 可能是随着走滑量的增大, 断裂带带动了恩平19洼东部地层进行走滑, 地震剖面也显示发育在恩平19洼东侧的分支断层对地层有更强的控制作用。综上所述, 始新世末, 阳江—统暗沙断裂带在阳江凹陷地区的走滑位移量大约为2000 m。

4.3 阳江—统暗沙断裂带对恩平19洼的改造作用

沉降中心的迁移方向和盆地的走滑方向一致是走滑盆地的显著特征^[76]。根据模拟剖面, 走滑断层对地层的控制作用可以分为两个阶段, 恩平19洼沉降中心的迁移也显示出相同的规律(图7)。在早期慢走滑阶段(33.9~30.9 Ma), 沉降中心的迁移方向和走滑断层的滑动方向几乎完全一致, 由于走滑量较小, 沉降中心的迁移速度也较小, 约为0.18 mm/a; 在后期快走滑阶段(30.9~29.4 Ma), 走滑位移量的增大以及走滑速度的增快使沉降中心加速迁移, 移动速度约为0.3 mm/a。与前期相比, 在后期快走滑阶段, 恩平19洼的沉降中心向北迁移的趋势更加明显, 而且沉降中心发生逆时针旋转(图7d), 这可能与3条走滑断层的移动速度不同有关。发育于最东侧的3号走滑断层走滑速度最大, 其牵引作用带动沉降中心加速向北迁移, 同时, 其与1号、2号走滑断层的速度差导致沉降中心发生逆时针旋转, 这也与地震剖面上观察到的恩平

19洼东侧的分支断层对地层的控制最明显相吻合。

走滑断层控制的沉降中心的迁移和油气赋存密切相关, 大型走滑断裂带本就是油气的富集地带, 其运动学性质对圈闭形成与分布及油气的输导与保存等有重要的控制作用。文昌组和恩平组沉积时期是阳江凹陷烃源岩发育的主要时期, 而NW向的张扭断裂带有较好的侧向封堵能力^[39], 因此, 恩平19洼沉降中心向北迁移, 可能会改变烃源岩的存储和油气的运移规律, 使靠近北部边界的储油构造存储更多的烃源岩。

5 结论

(1) 阳江—统暗沙断裂带在新生代始新世末是一条左行走滑断裂, 其沿NW向穿过阳江凹陷恩平19洼, 走滑量约为2000 m。

(2) 阳江—统暗沙断裂带在始新世末对阳江凹陷恩平19洼有明显的改造作用, 且在模型的走滑后期对其构造-沉积的控制作用明显增强。在早期慢走滑阶段, 断裂带在阳江凹陷的走滑位移量约为800 m, 恩平19洼的沉降中心沿断裂带走滑方向迁移; 在后期快走滑阶段, 其走滑位移量约为1200 m, 在剖面上可识别出明显的花状构造, 恩平19洼的沉降中心加速向北迁移, 并发生逆时针旋转。对阳江凹陷恩平19洼精细沉积充填样式的模拟有助于研究阳江—统暗沙断裂带对沉降中心的改造作用, 对岩性油气藏精准勘探具有一定的指导意义。

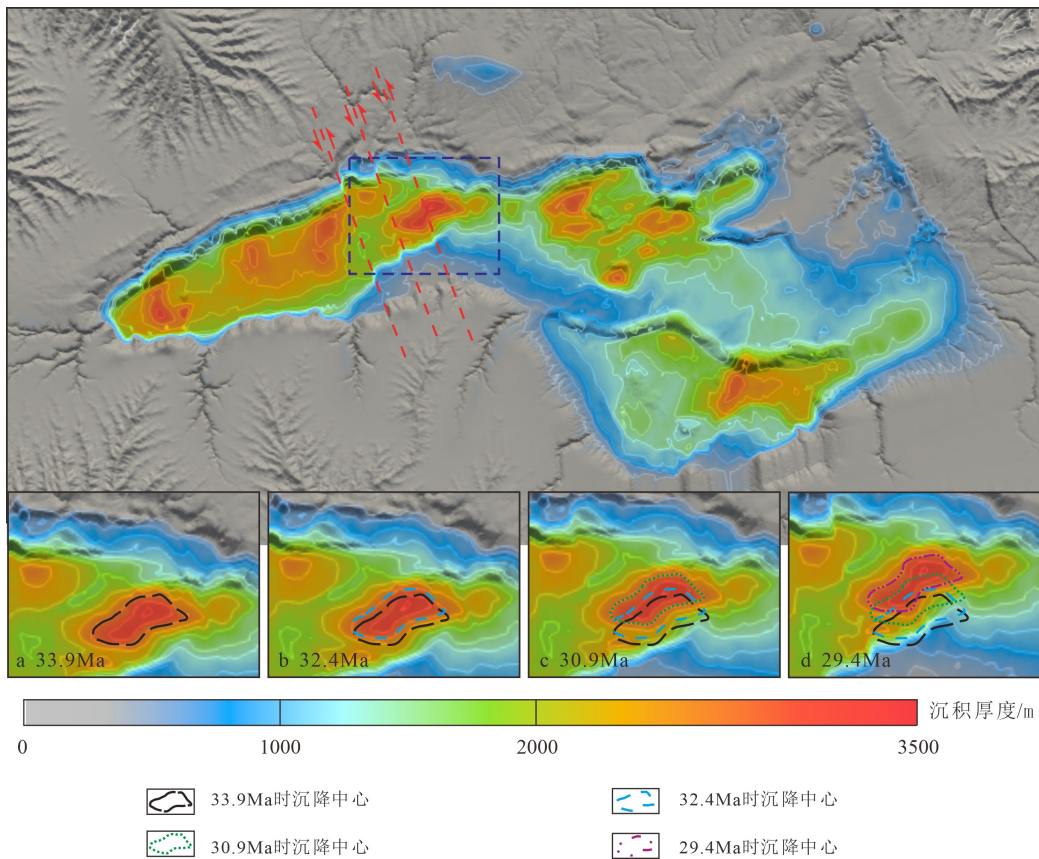


图 7 阳江凹陷恩平 19 洼沉降中心演化

Fig.7 Evolution of depocenters of the Enping 19 Subsag in the Yangjiang Sag

参考文献 (References)

- [1] 姜衍, 张向涛, 龙祖烈, 等. 南海北部珠江口盆地烃源岩成因: 阳江凹陷的资源潜力[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 90-107. [JIANG Yan, ZHANG Xiangtao, LONG Zulie, et al. Formation of source rocks in the Pearl River mouth basin, northern south China sea: resource potential of the Yangjiang Sag [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 90-107.]
- [2] 杜晓东, 刘军, 徐乐意, 等. 南海北缘东部揭阳凹陷的东沙运动: 对油气成藏的影响[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 201-210. [DU Xiaodong, LIU Jun, XU Leyi, et al. The Dongsha movement in the Jieyang Sag at the Northern South China Sea Margin: control on hydrocarbon traps [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 201-210.]
- [3] 朱定伟, 彭光荣, 张忠涛, 等. 油气“穿断运移”模式、评价方法与应用: 以珠江口盆地恩平凹陷为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 140-147. [ZHU Dingwei, PENG Guangrong, ZHANG Zhongtao, et al. Model of oil-gas cross-fault migration, evaluation and application: a case in the Enping sag of pearl river mouth basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 140-147.]
- [4] 刘雨晴, 吴智平, 程燕君, 等. 南海北缘古近纪裂陷结构时空差异及控制因素: 以珠江口盆地为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(2): 367-376. [LIU Yuqing, WU Zhiping, CHENG Yanjun, et al. Spatial and temporal difference of Paleogene rift structure and its controlling factors in the northern South China Sea: a case study of Pearl River Mouth basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(2): 367-376.]
- [5] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 55-78. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(6): 55-78.]
- [6] 程世秀, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 79-93. [CHENG Shixiu, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Cenozoic tectonics and dynamics of basin groups of the northern South China sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(6): 79-93.]
- [7] Tang X Y, Yang S C, Zhu J Z, et al. Tectonic subsidence of the Zhu 1 sub-basin in the pearl river mouth basin, northern South China Sea [J]. Frontiers of Earth Science, 2017, 11(4): 729-739.
- [8] Li Y J, Jiang Z L, Liang S, et al. Hydrocarbon generation in the lacustrine mudstones of the Wenchang formation in the Baiyun sag of the pearl river mouth basin, northern South China Sea [J]. Energy & Fuels, 2016, 30(1): 626-637.
- [9] 吕宝凤, 殷征欣, 蔡周荣, 等. 南海北部新生代构造演化序列及其油气成藏意义[J]. 地质学报, 2012, 86(8): 1249-1261. [LV Baofeng, YIN Zhengxin, CAI Zhouong, et al. Cenozoic tectonic evolution sequence in northern South China Sea and its oil/gas significance [J].

- Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(8): 1249-1261.]
- [10] Ma B S, Qi J F, Chen W C, et al. Fault interaction and evolution during two - phase rifting in the Xijiang sag, pearl river mouth basin, northern South China Sea [J]. *Geological Journal*, 2020, 55(2): 1128-1147.
- [11] 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.]
- [12] 吕彩丽, 张功成, 杨东升. 珠江口盆地珠二坳陷文昌组构造差异性与动力学成因机制[J]. *地学前缘*, 2017, 24(6): 333-341. [LV Caili, ZHANG Gongcheng, YANG Dongsheng. Differential structure and dynamic mechanism of Wenchang formation in the Zhu H depression of the Pearl River mouth basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(6): 333-341.]
- [13] 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等. 珠江口盆地中生代主要断裂特征和动力背景分析[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(2): 52-61. [CHEN Hanzong, WU Xiangjie, ZHOU Di, et al. Meso-cenozoic faults in Zhujiang river mouth basin and their geodynamic background [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(2): 52-61.]
- [14] Li Y H, Zhu R W, Liu H L, et al. The cenozoic activities of Yangjiang-Yitongdong fault: insights from analysis of the tectonic characteristics and evolution processes in western Zhujiang (Pearl) river mouth basin [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(9): 87-101.
- [15] 刘欣颖, 吴静, 朱定伟, 等. 珠江口盆地多期走滑构造与叠合型拉分盆地: 以阳江东凹为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 6-19. [LIU Xinying, WU Jing, ZHU Dingwei, et al. Superimposition of Strike-slip Faults and Pull-apart Basins in the Pearl River mouth basin: a case study from the eastern Yangjiang sag [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 6-19.]
- [16] 高阳东, 张向涛, 彭光荣, 等. 珠江口盆地成盆-成烃-成藏: 代序[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 1-5. [GAO Yangdong, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Basin formation, hydrocarbon maturation and oil accumulation of the Pearl River mouth basin: preface [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 1-5.]
- [17] 陆蕾蕾, 姜素华, 索艳慧, 等. 南海珠江口盆地走滑构造与油气成藏机制[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 108-122. [LU Leilei, JIANG Suhua, SUO Yanhui, et al. Relationship Between Strike-slip structure and hydrocarbon accumulation in the Pearl River mouth basin in the northern South China Sea [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 108-122.]
- [18] 杨海长, 徐建永, 武爱俊, 等. 珠三坳陷阳江凹陷构造特征及其对油气成藏的影响[J]. *海洋石油*, 2011, 31(2): 20-24. [YANG Haichang, XU Jianyong, WU Aijun, et al. Structural features and impact on hydrocarbon accumulation in Yangjiang Sag of Zhu III depression [J]. *Offshore Oil*, 2011, 31(2): 20-24.]
- [19] 李辉, 陈胜红, 张迎朝, 等. 珠江口盆地珠三坳陷断裂特征与油气成藏[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3): 115-124. [LI Hui, CHEN Shenghong, ZHANG Yingzhao, et al. Faults in the Zhu-3 depression of pearl river mouth basin and their control over hydrocarbon accumulation [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 115-124.]
- [20] 彭光荣, 张向涛, 许新明, 等. 南海北部珠江口盆地阳江凹陷油气勘探重要发现与认识[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(3): 267-279. [PENG Guangrong, ZHANG Xiangtao, XU Xinming, et al. Important discoveries and understandings of oil and gas exploration in Yangjiang sag of the Pearl River mouth basin, northern South China Sea [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(3): 267-279.]
- [21] 田立新, 张向涛, 彭光荣, 等. 珠江口盆地阳江凹陷石油地质特征及成藏主控因素[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(1): 13-22. [TIAN Lixin, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Petroleum geological characteristics and main controlling factors of the Yangjiang sag in Pearl River mouth basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(1): 13-22.]
- [22] 陈雯雯. 珠江口盆地珠III坳陷北部文昌组沉积相研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2012. [CHEN Wenwen. Study on Wenchang formation in northern Zhu III depression of Pearl River mouth basin [D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2012.]
- [23] 占华旺, 蔡国富, 张志伟, 等. 南海北缘古近纪断裂活动规律及控盆特征: 以阳江东凹为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 20-39. [ZHAN Huawang, CAI Guofu, ZHANG Zhiwei, et al. Paleogene fault activity and basin controlling characteristics in the northern south China sea margin: a case study of the eastern Yangjiang sag [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 20-39.]
- [24] 汪晓萌, 彭光荣, 吴静, 等. 珠江口盆地恩平21洼文昌组沉积期原型盆地及其对优质烃源岩的控制[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 158-167. [WANG Xiaomeng, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Prototype basin and its control on high-quality source rocks during the depositional period of Wenchang formation in Enping 21 sub-sag, Pearl River mouth basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 158-167.]
- [25] 姜华, 王华, 李俊良, 等. 珠江口盆地珠三坳陷层序地层样式分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(1): 87-93. [JIANG Hua, WANG Hua, LI Junliang, et al. Analysis on sequence formation styles of Zhu-3 depression in Pearl River mouth basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(1): 87-93.]
- [26] 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及10 Ma以来的构造事件[J]. *科学通报*, 1999, 44(1): 10-23. [LI Sitian, LIN Changsong, ZHANG Qiming, et al. Episodic rifting of continental marginal basins and tectonic events since 10 Ma in the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(1): 10-23.]
- [27] 杜晓东, 彭光荣, 吴静, 等. 珠江口盆地阳江东凹断层特征及其对油气成藏的影响[J]. *新疆石油地质*, 2020, 41(4): 414-421. [DU Xiaodong, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Faults and its impacts on petroleum accumulation in eastern Yangjiang Sag, Pearl River mouth basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2020, 41(4): 414-421.]
- [28] Peng J W, Pang X Q, Xiao S, et al. Secondary migration of hydrocarbons in the Zhujiang formation in the Huixi half-Graben, Pearl River mouth basin, South China Sea [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2016, 53(2): 189-201.
- [29] Lyu C F, Chen G J, Du G C, et al. Diagenesis and reservoir quality evolution of shelf-margin sandstones in Pearl River mouth basin, South

- China Sea [J]. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 2014, 4(1): 1-19.
- [30] Su M, Alves T M, Li W, et al. Reassessing two contrasting late Miocene-Holocene stratigraphic frameworks for the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 102: 899-913.
- [31] Wang X D, Zhang X T, Lin H M, et al. Paleogene geological framework and tectonic evolution of the central anticlinal zone in Lufeng 13 sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Petroleum Research*, 2019, 4(3): 238-249.
- [32] 刘志峰, 刘志鹏, 肖伶俐, 等. 珠三坳陷北部珠海组—韩江组沉积演化及储盖组合[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(9): 25-31. [LIU Zhifeng, LIU Zhipeng, XIAO Lingli, et al. Facies evolution and reservoir-seal assemblages in the Zhuhai and Hanjiang formations, north of Zhu III depression, Pearl River mouth basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(9): 25-31.]
- [33] 方竞男. 珠江口盆地第三系沉积体系演变与生储盖组合[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2013. [FANG Jingnan. Evolution of sedimentary system and source-reservoir-caprock association in tertiary of Pearl River Mouth Basin[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2013.]
- [34] 于海洋, 索艳慧, 杜晓东, 等. 珠江口盆地渐-中新世古气候及物源特征: 以阳江东凹为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 53-63. [YU Haiyang, SUO Yanhui, DU Xiaodong, et al. Oligocene-Miocene provenance and paleoclimate of the Pearl River Mouth basin: a case study of the eastern Yangjiang Sag [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 53-63.]
- [35] 梁卫, 彭光荣, 朱定伟, 等. 珠江口盆地阳江东凹古近系构造特征与勘探潜力[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 168-178. [LIANG Wei, PENG Guangrong, ZHU Dingwei, et al. Paleogene structures and exploration potential in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River mouth basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 168-178.]
- [36] 杨悦, 彭光荣, 朱定伟, 等. 珠江口盆地阳江东凹裂陷期沉积环境及其构造控制[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 79-89. [YANG Yue, PENG Guangrong, ZHU Dingwei, et al. Syn-rifting sedimentary environment and its tectonic control in the eastern Yangjiang Sag of the Pearl River mouth basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 79-89.]
- [37] 刘军, 彭光荣, 朱定伟, 等. 珠江口盆地阳江凹陷东部地区断控成藏条件[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 123-130. [LIU Jun, PENG Guangrong, ZHU Dingwei, et al. Fault-controlled hydrocarbon accumulation in the eastern Yangjiang Sag, Pearl River mouth basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 123-130.]
- [38] 蔡国富, 张向涛, 彭光荣, 等. 南海北部阳江-一统暗沙断裂带与新近纪岩浆活动[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 40-52. [CAI Guofu, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Neogene volcanism and tectonics along the Yangjiang-Yitong'an-sha fault zone in the northern South China Sea margin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 40-52.]
- [39] 宋海斌, 郝天珧, 江为为, 等. 南海地球物理场特征与基底断裂体系研究[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(1): 24-34. [SONG Haibin, HAO Tianyao, JIANG Weiwei, et al. Researches on geophysical field characteristics and basement fault system of South China Sea [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(1): 24-34.]
- [40] 鲁宝亮, 王璞珺, 张功成, 等. 南海北部陆缘盆地基底结构及其油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2011, 32(4): 580-587. [LU Baoliang, WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, et al. Basement structures of an epicontinental basin in the northern South China Sea and their significance in petroleum prospect [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 580-587.]
- [41] Salles T, Hardiman L. Badlands: An open-source, flexible and parallel framework to study landscape dynamics [J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 91: 77-89.
- [42] Salles T. Badlands: A parallel basin and landscape dynamics model [J]. *SoftwareX*, 2016, 5: 195-202.
- [43] Braun J, Sambridge M. Modelling landscape evolution on geological time scales: a new method based on irregular spatial discretization [J]. *Basin Research*, 1997, 9(1): 27-52.
- [44] Tucker G, Lancaster S, Gasparini N, et al. The channel-hillslope integrated landscape development model (CHILD)[M]//Harmon R S, Doe W W. *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. Boston, MA: Springer, 2001: 319-388.
- [45] 刘泽, 李三忠, Bukhari S W H, 等. 动态古地貌再造: Badlands软件在盆地分析中的应用[J]. *古地理学报*, 2020, 22(1): 29-38. [LIU Ze, LI Sanzhong, Bukhari S W H, et al. Reconstruction of dynamic palaeogeomorphology: Application of Badlands software in basin analysis [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(1): 29-38.]
- [46] Chen A, Darbon J, Morel J M. Landscape evolution models: A review of their fundamental equations [J]. *Geomorphology*, 2014, 219: 68-86.
- [47] Pelletier J D. Fluvial and slope - wash erosion of soil - mantled landscapes: detachment - or transport - limited? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(1): 37-51.
- [48] Fernandes N F, Dietrich W E. Hillslope evolution by diffusive processes: the timescale for equilibrium adjustments [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(6): 1307-1318.
- [49] Perron J T, Kirchner J W, Dietrich W E. Formation of evenly spaced ridges and valleys [J]. *Nature*, 2009, 460(7254): 502-505.
- [50] Lague D, Hovius N, Davy P. Discharge, discharge variability, and the bedrock channel profile [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 110(F4): F04006.
- [51] Whipple K X, Tucker G E. Dynamics of the stream-power river incision model: implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B8): 17661-17674.
- [52] Tucker G E, Hancock G R. Modelling landscape evolution [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(1): 28-50.
- [53] Howard A D. Thresholds in river regimes[M]//Coates D R, Vitek J D. *Thresholds in Geomorphology*. London: George Allen and Unwin Ltd., 1980: 227-258.
- [54] Wickert A D. Open-source modular solutions for flexural isostasy: gFlex v1.0 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(3): 997-1017.
- [55] Tucker G E, Slingerland R L. Erosional dynamics, flexural isostasy, and long-lived escarpments: A numerical modeling study [J]. *Journal*

- of *Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99 (B6): 12229-12243.
- [56] Ruetenik G. Long-term landscape evolution modeling: the role of dynamic topography, flexural isostasy, and sea level [D]. Doctor Dissertation of Syracuse University, 2017.
- [57] Hodgetts D, Egan S S, Williams G D. Flexural modelling of continental lithosphere deformation: a comparison of 2D and 3D techniques [J]. *Tectonophysics*, 1998, 294 (1-2): 1-20.
- [58] 杜文波, 邱燕, 黄文凯, 等. 南海西缘曾母西断裂构造特征及其对盆地沉积发育的控制作用 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41 (2): 100-108. [DU Wenbo, QIU Yan, HUANG Wenkai, et al. Zengmu Xi fault on the western-border of South China Sea and its control over the sedimentation of the Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41 (2): 100-108.]
- [59] 胡小猛, 郭家秀, 胡向阳. 汾河地堑湖盆第四纪地貌—沉积特征的构造控制 [J]. *地理学报*, 2010, 65 (1): 73-81. [HU Xiaomeng, GUO Jiaxiu, HU Xiangyang. The development of morpho-sediment of quaternary in Fenhe river Graben basins and the neotectonic movement [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65 (1): 73-81.]
- [60] 李磊, 王英民, 张莲美, 等. 尼日尔三角洲坡脚逆冲带沉积样式及构造控制 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2008, 33 (5): 643-650. [LI Lei, WANG Yingmin, ZHANG Lianmei, et al. Sedimentary patterns and structural control across toe thrust belts, Niger Delta [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33 (5): 643-650.]
- [61] 姜雪, 刘丽芳, 孙和风, 等. 气候与构造控制下湖相优质烃源岩的差异分布: 以渤中凹陷为例 [J]. *石油学报*, 2019, 40 (2): 165-175. [JIANG Xue, LIU Lifang, SUN Hefeng, et al. Differential distribution of high-quality lacustrine source rocks controlled by climate and tectonic: a case study from Bozhong sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40 (2): 165-175.]
- [62] 高红芳, 钟和贤, 孙美静, 等. 南海海盆东南部大型深水浊积扇体系及其成因的构造控制 [J]. *中国地质*, 2020, 47 (5): 1395-1406. [GAO Hongfang, ZHONG Hexian, SUN Meijing, et al. The large deep-water turbidity fan system in southeastern South China Sea Basin: Formation and tectonic constraint [J]. *Geology in China*, 2020, 47 (5): 1395-1406.]
- [63] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic [J]. *Science*, 1987, 235 (4793): 1156-1167.
- [64] 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制 [J]. *地质学报*, 1999, 73 (3): 193-205. [XU Zhiqin, YANG Jingsui, ZHANG Jianxin, et al. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altyn Sinistral Strike-slip fault and the Mechanism of lithospheric Shearing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73 (3): 193-205.]
- [65] 李海兵, 许志琴, 杨经绥, 等. 阿尔金断裂带最大累积走滑位移量: 900km? [J]. *地质通报*, 2007, 26 (10): 1288-1298. [LI Haibing, XU Zhiqin, YANG Jingsui, et al. The maximum cumulative strike-slip displacement of the Altyn Tagh Fault: 900 km? [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26 (10): 1288-1298.]
- [66] Zhang Y Q, Wei S, Dong S W. Cenozoic deformation history of the Tancheng-Lujiang Fault Zone, north China, and dynamic implications [J]. *Island Arc*, 2003, 12 (3): 281-293.
- [67] Hsiao L Y, Graham S A, Tilander N. Seismic reflection imaging of a major strike-slip fault zone in a rift system: Paleogene structure and evolution of the Tan-Lu fault system, Liaodong Bay, Bohai, offshore China [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88 (1): 71-97.
- [68] Liu Y J, Neubauer F, Genser J, et al. Geochronology of the initiation and displacement of the Altyn Strike-Slip Fault, western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29 (2): 243-252.
- [69] Gilder S A, Coe R S, Wu H R, et al. Cretaceous and Tertiary paleomagnetic results from Southeast China and their tectonic implications [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1993, 117 (3-4): 637-652.
- [70] Gilder S A, Leloup P H, Courtillot V, et al. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104 (B7): 15365-15390.
- [71] 万天丰, 朱鸿. 郯庐断裂带的最大左行走滑断距及其形成时期 [J]. *高校地质学报*, 1996, 2 (1): 14-27. [WAN Tianfeng, ZHU Hong. The maximum sinistral Strike slip and its Forming age of Tancheng-Lujiang Fault zone [J]. *Geological Journal of Universities*, 1996, 2 (1): 14-27.]
- [72] 吴奎, 何京, 张中巧, 等. 基于构造物理模拟实验的走滑量求取 [J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54 (4): 891-900. [WU Kui, HE Jing, ZHANG Zhongqiao, et al. Strike-slip fault displacement calculation based on structure physical simulation [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54 (4): 891-900.]
- [73] 马晓倩, 刘军, 朱定伟, 等. 多期走滑拉分盆地的沉积响应: 以南海北部珠江口盆地为例 [J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45 (1): 64-78. [MA Xiaolian, LIU Jun, ZHU Dingwei, et al. Sedimentary response of multi-stage pull-apart basin: insights from the Pearl River Mouth Basin in the Northern South China Sea margin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45 (1): 64-78.]
- [74] 吴静, 朱定伟, 赵鹏, 等. 断裂复合汇聚脊对新近系油气远距离富集的控制作用: 以珠江口盆地阳江东凹与恩平凹陷为例 [J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45 (1): 131-139. [WU Jing, ZHU Dingwei, ZHAO Peng, et al. Controls of faulted composite accumulation ridge on the Long distance migration and accumulation of Neogene hydrocarbon: a case study of the Eastern Yangjiang Sag and the Enping Sag in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45 (1): 131-139.]
- [75] 林鹤鸣, 刘培, 汪旭东, 等. 珠一坳陷始新世文昌组沉积期构造转换对源-汇体系的控制 [J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45 (1): 188-200. [LIN Heming, LIU Pei, WANG Xudong, et al. Influences of structural transformation on source-to-sink system during the depositional period of Wenchang formation of Eocene in the Zhu I depression [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45 (1): 188-200.]
- [76] 肖坤泽, 童亨茂. 走滑断层研究进展及启示 [J]. *地质力学学报*, 2020, 26 (2): 151-166. [XIAO Kunze, TONG Hengmao. Progress on strike-slip fault research and its significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26 (2): 151-166.]