

信延芳, 闫义, 罗阳. 沉积过程对被动大陆边缘构造热演化影响研究[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(7): 1-10.

XIN Yanfang, YAN Yi, LUO Yang. Influence of surface processes on tectono-thermal evolution of rifted margins[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(7): 1-10.

沉积过程对被动大陆边缘构造热演化影响研究

信延芳^{1,2,3}, 闫义^{1,2,4,5*}, 罗阳⁶

(1 中国科学院广州地球化学研究所, 边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510640; 2 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广州 510640; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458; 5 中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 广州 510301; 6 中石化胜利油田发展规划部, 东营 257001)

摘要:在被动大陆边缘形成过程中, 沉积过程会促进岩石圈挠曲均衡调整和产生沉积热披覆效应, 影响大陆边缘结构和热演化过程, 是被动大陆边缘伸展破裂机制研究和油气盆地烃源岩演化的重要控制因素。本文总结了被动大陆边缘构造热演化研究进展, 分析了沉积过程对其构造热演化的影响。多种地质证据表明, 沉积-剥蚀过程会通过调整裂谷体系中的负载分布和地壳后续变形等, 对裂谷断层发育、大陆边缘形态及对称性、裂后异常构造沉降和岩浆作用等有重要影响。然而, 目前被动大陆边缘形成过程数值模拟研究仍较少考虑二维(2D)或三维(3D)剥蚀-沉积过程, 不能较好地恢复沉积盆地热史和生烃史。通过耦合 2D 或 3D 沉积过程的岩石圈构造演化模型, 可以对被动大陆边缘构造热演化带来新的、全面的认识。

关键词:被动大陆边缘; 裂谷盆地; 沉积过程; 数值模拟

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.070

0 引言

被动大陆边缘及裂谷盆地构造热演化分析对大陆岩石圈伸展破裂动力学研究及烃源岩潜力评估均具有重要意义。温度是控制被动大陆边缘及裂谷盆地演化过程的重要因素之一。从盆地规模上来说, 温度可以影响源岩的成熟度^[1]、石英的填充^[2]和蒙脱石向伊利石的转变^[3]等。这些过程直接影响着烃源岩发育、流体压力及油气藏质量。从岩石圈规模上来说, 温度控制着裂后沉降^[4]、应变变形^[5-6]以及地幔熔融作用^[7]等。

数值模拟是探讨大陆边缘及裂谷盆地构造热

演化的重要手段。裂谷盆地数值模拟研究的一个关键目的是预测沉积盆地和大陆边缘的热演化史。经典的 MCKENZIE 模型^[4]展示了大陆岩石圈瞬时拉张的热流史: 裂谷阶段热流迅速达到峰值, 在裂后阶段热流逐渐降低, 到达热平衡之前热流呈指数衰减。较高的伸展系数可以产生较高的热流, 但是, 大陆边缘热史并非只受伸展系数控制, 还受裂谷作用持续时间、沉积速率以及沉积物的热传导系数等的影响^[8]。目前, 关于被动大陆边缘及裂谷盆地演化史研究的数值模型很多, 从经典的 MCKENZIE 模型^[4]及其衍生模型^[9-10], 至整个大陆边缘动力学模型^[5-6]。但是, 这些模型经常忽略沉积过程(surface process)对构造热史及岩石圈伸展作用的影响。

近年来, 随着油气勘探开发技术和计算机模拟技术的快速发展, 沉积过程对被动大陆边缘及裂谷盆地构造热史影响研究取得了许多新的进展。本文回顾被动大陆边缘构造热演化研究进展, 分析了沉积过程对其构造热演化的影响, 并对其存在的问题进行了评述, 以为后续研究提供方向。

收稿日期: 2021-03-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(U1701641); 南方海洋科学与工程广东省实验室团队项目(GML 2019ZD0205); 中国科学院南海生态环境工程创新研究院(ISEE2020YB07)

第一作者: 信延芳(1991—), 女, 博士, 主要从事大地构造与数值模拟方面的研究工作. E-mail: xinyanfang1990@163.com

* 通讯作者: 闫义(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事边缘海构造与盆地演化方面的研究工作. E-mail: yanyi@gig.ac.cn

1 被动大陆边缘构造热演化研究进展

热演化史在盆地模拟的模块中具有较为重要的作用,其内容实际上是对盆地热流史、地温史等的重建和模拟,可以为后期盆地生、排烃史和运聚史研究提供借鉴。裂谷盆地的构造热演化数值模拟建立在盆地成因的模型基础之上。在被动大陆边缘裂谷盆地构造热演化模拟中,MCKENZIE^[4]瞬时均匀拉张模型(图 1a)对于定量描述沉降和热流演化等方面取得了很好的结果。该模型认为,地壳和岩石圈瞬时拉张后,软流圈被动上涌使地温梯度升高,随后岩石圈随时间逐渐冷却。JARVIS 等^[9]改进了 MCKENZIE 瞬时拉张模型,并指出对于大部分裂谷盆地,只要张裂作用持续时间 < 20 Ma, MCKENZIE^[4]模型即可模拟出合理的构造热演化史。但是,JARVIS 等^[9]的模型中只考虑了垂向热传导,忽略了横向热传导。COCHRAN^[8]指出,有限裂谷作用(finite rifting)和横向热流会导致在同裂谷阶段热的流失,从而对构造沉降、热演化史和沉积物的分布有很大影响。同时,此种类型的纯剪模型只可以预测高度对称型裂谷盆地,而很多裂谷是非对称的,如 Iberian-Newfoundland 大陆边缘、Labrador-SW Greenland 大陆边缘等。为此,WERNICKE 等^[11-13]提出了简单剪切模型(图 1b),即岩石圈的伸展减薄区域在低角度拆离断层下盘一端,形成不对称大陆边缘。在以上两者模型的基础上,发展出很多介于其间的混合模型(图 1c),从而不仅可以解释共轭大陆边缘的对称性,也可预测被动大陆边缘和陆内裂谷盆地的很多现象,如裂谷肩部抬升^[14-15]、裂后异常沉降^[16-20]以及边缘海台^[21-22]等。

在以上 3 种模型的基础上,前人引入了流变学和运动学的约束^[23-32],将被动大陆边缘的构造演化归结为平面应力及应变问题来处理,能够很好地耦合热学和流变学。这些数值模拟方法允许在耦合很好的动态框架中研究裂谷,分析各种参数组合(如放射源产热、非线性流变学和拉张速率等)对大陆边缘裂谷样式的控制作用。

近 20 年来,被动大陆边缘数值模拟的研究取得了快速发展,2D 数值模拟已经成为了研究裂谷作用的标准工具。由于地壳厚度、岩石圈流变结构、岩石圈热结构、岩浆作用、拉张速率及气候和沉积物充填等因素的影响,全球裂谷和大陆边缘在结构上有着很大不同^[5,6,18,33-51]。如 BRUNE 等^[33]通过设

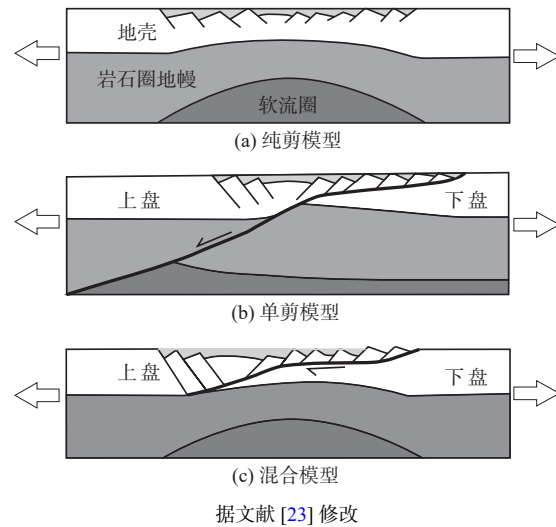


图 1 裂谷盆地岩石圈拉张模式

Fig.1 Different modes of lithospheric extension proposed to explain the formation of rift basins and passive continental margins

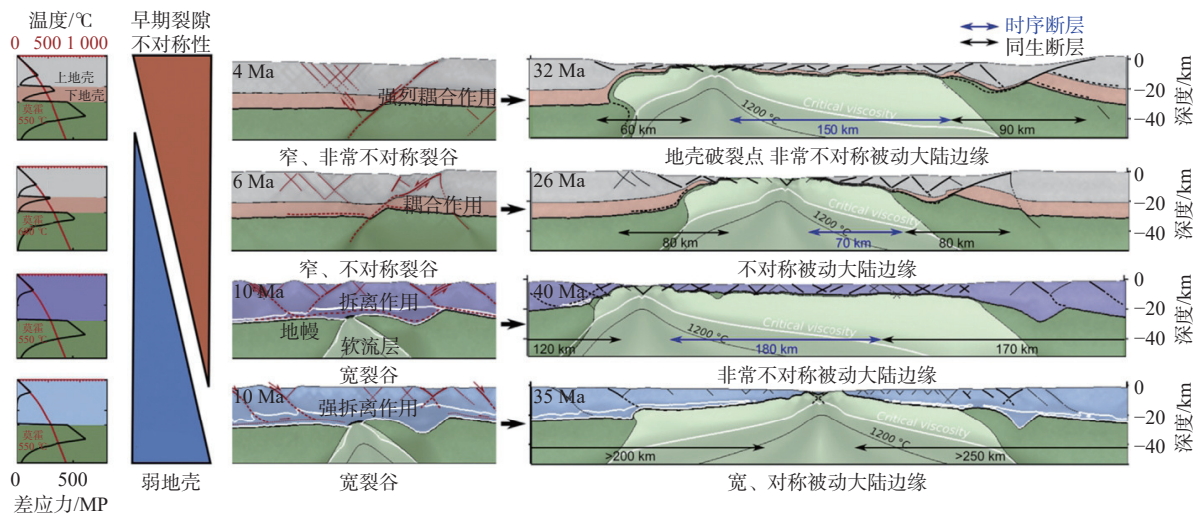
置不同类型的岩石圈初始流变结构和热结构,对 Iberian-Newfoundland、南大西洋裂谷中部地块和南海 3 种类型的贫岩浆型大陆边缘进行了数值模拟(图 2),总结了岩石圈初始流变结构和裂谷作用中挠曲变化、下地壳流动和断裂作用等过程的关系。从图 2a 和 2b 中可以看出,由强上地壳-下地壳-岩石圈地幔为初始流变结构的模型,其早期拉张作用主要以壳幔耦合作用为主,主要形成窄的、不对称的初始裂谷,初始地壳温度越高,形成的大陆边缘宽度越小。而由弱地壳-岩石圈地幔为初始流变结构(图 2c 和 2d)的模型,其早期拉张作用主要以拆离断层作用为主,主要形成宽裂谷,最终形成对称或不对称的宽大陆边缘。被动大陆边缘的演化过程可以概括为同断裂阶段、裂谷迁移阶段以及岩石圈破裂阶段,其中,裂谷迁移阶段可以解释大陆边缘的非对称性和地壳的过度减薄^[6]。

2 被动大陆边缘沉积过程引起的挠曲均衡调整和热披覆效应

岩石圈伸展过程中会发生沉积剥蚀作用、沉积/剥蚀过程引起的挠曲、断裂、岩石圈和地幔的减薄、矿物相变、地幔对流和地幔底侵等地质作用。其相互影响,使被动大陆边缘结构的研究非常复杂。最近研究发现,沉积过程对被动大陆边缘构造演化有着很大的影响,其动力学机制主要为以下 2 方面。

(1) 沉积过程引起的挠曲均衡响应

沉积过程可以调节地貌和沉积地层厚度。图 3



据文献 [33] 修改

图 2 被动大陆边缘构造演化模式

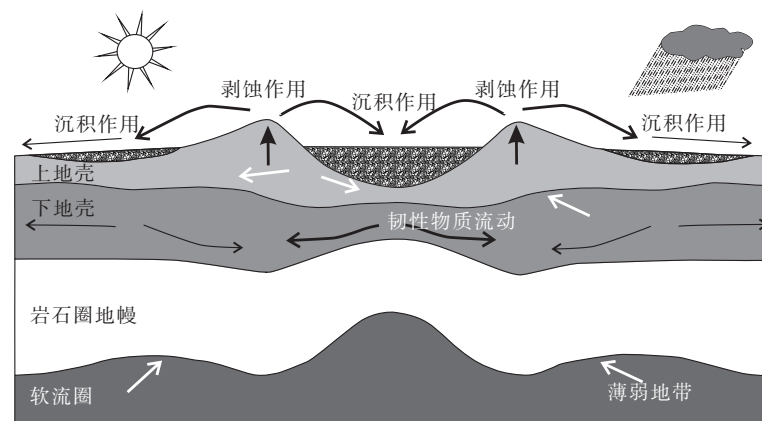
Fig.2 Rifted margin structure in different initial configurations

是沉积过程对裂谷盆地挠曲均衡响应概念图^[52]。在裂谷肩部发生剥蚀作用, 风化产物在裂谷盆地中心沉积。沉积物的负载增加裂谷盆地所受的挠曲应力, 岩石圈发生挠曲作用, 岩石圈强度变弱, 从而促进变形的集中化, 导致裂谷颈部迁移。同时, 裂谷肩部的剥蚀作用会导致岩石圈应力卸载^[14,52-54]。挠曲应力从裂谷中心向裂谷肩部传播, 由于均衡作用, 裂谷肩部隆升, 剥蚀速率增加。裂谷中心的沉降和裂谷肩部的隆起, 在下地壳产生横向压力梯度, 并且这个压力梯度足够驱使下地壳低黏度物质从裂谷中心向裂谷肩部韧性流动^[18,55]。下地壳从裂谷中心向两侧的流动, 在一定程度上促进了颈缩区地壳的减薄, 有助于裂谷肩部的隆起, 甚至可以驱使裂后期的“拉张”作用^[52]。由于传统的回剥技术没有考虑沉积-剥蚀过程引起的岩石圈挠曲均衡作用,

可能需要重新评估利用其预测盆地演化的效果^[52]。

(2) 沉积热披覆效应

冷的沉积物沉积在岩石圈之上所引起的热效应称为沉积物的热披覆效应 (thermal blanketing effect)^[56]。沉积物的热披覆效应, 主要表现在 3 方面: ①沉积物的热传导系数比地壳岩石的低, 因此会降低基底热流, 减缓裂后沉降冷却的速度^[57-58]; ②沉积速率会影响岩石圈系统的瞬间热状态, 可以降低沉积表面的地温梯度^[56,59-61]; ③沉积物内放射性物质的热辐射会改变岩石圈地温梯度, 降低基底热流。沉积热披覆效应会影响岩石圈体系内的热状态。由于岩石圈的变形作用受温度影响极大, 沉积热披覆效应会导致基底温度升高, 可能发生脆性变形向黏性变形的转变, 从而影响被动大陆边缘的构造演化。此外, 岩石圈热状态的改变, 会影响岩石圈的挠曲均



据文献 [52] 修改

图 3 沉积过程引起的岩石圈挠曲均衡效应模式

Fig.3 Scenario of flexural effect on the continental lithosphere by surface processes

衡状态,从而进一步影响被动大陆边缘的发育。

3 沉积过程对被动大陆边缘结构和热演化的影响

3.1 沉积过程影响大陆裂谷断裂发育

沉积过程对大陆裂谷断裂发育的影响是多方面的,包括断距、断层的活动时间、数量和分布。在贝加尔湖裂谷中,其中心盆地具有超过 9 km 的同裂谷期湖相沉积^[62],边界断层约为 8~12 km^[63],中心盆地内部散布着一些小断距的断层^[64-65]。同样,在东非大裂谷体系的西支存在类似的情况,湖湘沉积的盆地和隆升侧翼之间的边界断裂约有 7 km 的大断距^[66]。数值模拟研究结果显示,这些边界断层的大断距,主要是高效率的沉积、剥蚀作用引起的负载和卸载造成的应变集中化导致的^[55,67]。OLIVE 等^[67]通过耦合 2D 热动力学模型和地貌演化模型,探讨了拉张背景下沉积过程和断裂作用的关系,发现沉积过程可以提高一个断裂停止活动之前可容纳的水平拉张量。当剥蚀速率比较低时,15 km 厚脆性层会发育一系列活动时间较短的断裂。当剥蚀速率较大,甚至和区域拉张速率相当时,变形作用主要形成大的、活动时间较长的断裂。ANDRÉS-MARTÍNEZ 等^[55]研究了不同搬运效率下沉积过程对大陆边缘结构的影响,结果显示,随着沉积效率提高,不仅断层断距增加,断层间间距增加,断层数量减少,断层活动时间也更长。

3.2 沉积过程对被动大陆边缘的结构和对称性的影响

大部分关于共轭大陆边缘对称性的研究主要考虑岩石圈流变结构和拉张速率^[6,50],但是沉积过程对共轭大陆边缘对称性的影响也不容小视。BUIER 等^[68]认为,沉积过程通过抑制非对称性盆地发育促进多剪切带模式的特点,可以有利于对称性盆地的发育。但是,其研究没有涉及不同沉积量对不同流变结构下大陆边缘结构的影响。ANDRÉS-MARTÍNEZ 等^[55]将沉积物搬运模型^[69-72]与构造模型耦合,通过改变河流搬运效率系数和岩石圈流变结构,系统研究了不同的沉积量对大陆边缘结构的影响(图 4)。研究结果显示,在没有耦合沉积过程、发育非对称性大陆边缘的模型中,如果注入足

够沉积物,非对称性大陆边缘会转变为对称性大陆边缘。即沉积环境的改变会明显影响共轭大陆边缘的对称性。这主要是由于大量沉积物导致变形集中在盆地中心的断裂上,沉积物的热披覆效应和纯剪切韧性变形联合作用所导致的。

3.3 沉积过程与裂后期异常构造沉降

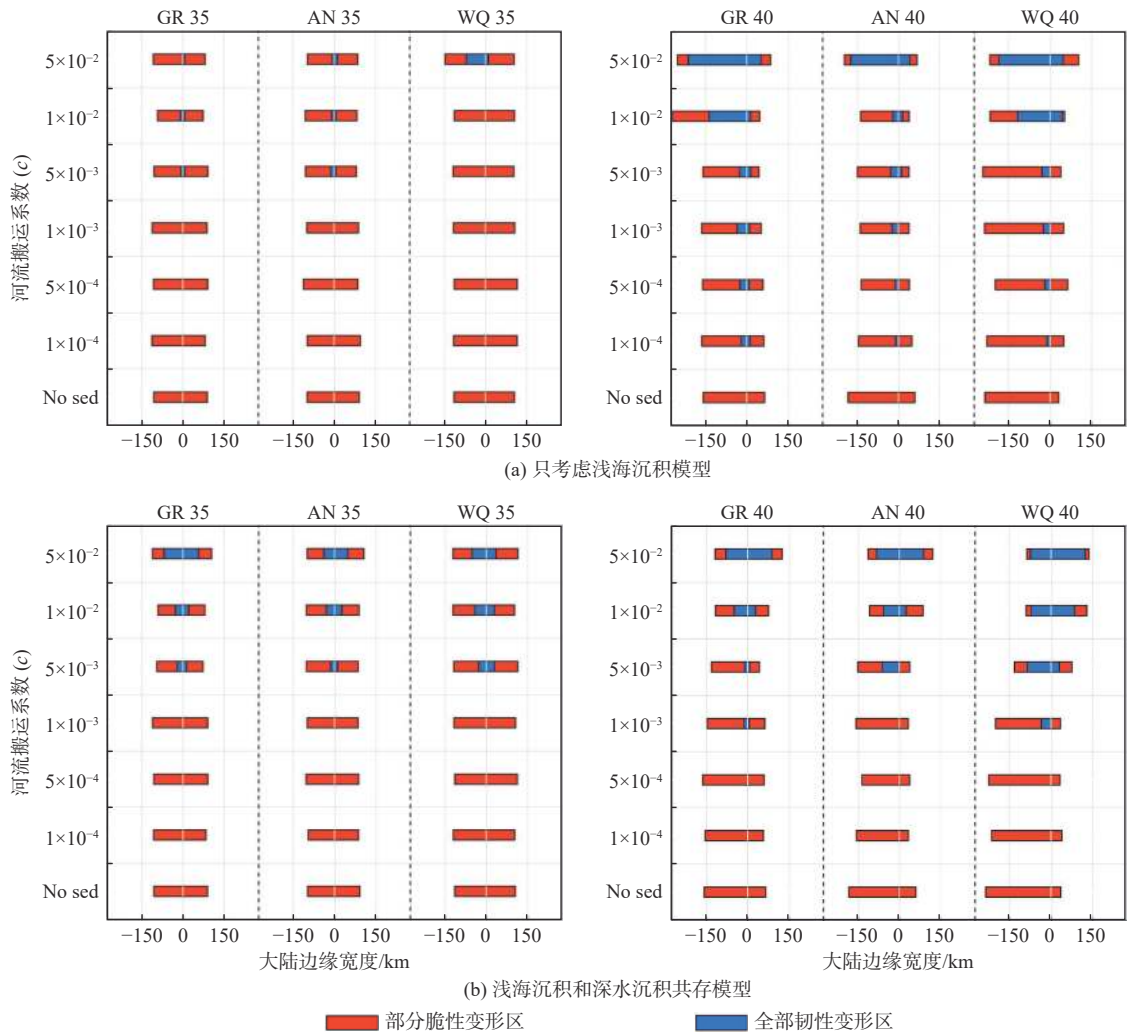
很多被动大陆边缘裂谷盆地在裂后期产生远大于 MCKENZIE^[4]模型所预测的热沉降,如南海北部大陆边缘珠江口盆地^[73]、白云凹陷^[18]和琼东南盆地^[20,74]等。CLIFT 等^[18]利用地球物理数据和数值模拟的方法显示,由于气候变化,近岸盆地剥蚀作用增强,导致近海盆地沉积物负载增加,地壳强度变弱,在裂后期引起了韧性下地壳的流动,从而导致了裂后期的异常沉降。在北卡那封盆地上地壳具有很厚的同裂谷期沉积,但是缺少同生断层,并且在早白垩世存在异常多的区域沉降^[75]。KARNER 等^[19]认为这种异常沉降是下地壳通过低角度拆离断层减薄的结果。这种低角度的拆离断层,可能是在大量沉积物情况下形成的低角度、低黏度的韧性剪切带^[55]。

3.4 沉积过程对基底的热演化及岩浆作用的影响

加利福尼亚湾北部地区岩浆多,发育窄裂谷;而南部地区岩浆作用比较少,发育宽裂谷。LIZAR-RALDE 等^[76]认为这种大陆边缘结构的差异性,用初始流变结构、热结构及拉张速率的模型来解释不适宜。他们认为这种裂谷结构上的差异,主要是由于北部存在比较多的沉积物,下地壳受沉积物热披覆作用影响发生熔融作用,从而产生了北部地区富岩浆,南部地区贫岩浆的现象,即南北岩浆作用的差异是沉积过程引起的。

THEISSEN 等^[58]通过对 Vøring 盆地正演(数值模拟)和反演(回剥技术),研究了在岩石圈伸展过程中沉积作用对基底热流的影响。结果显示,由于沉积物的热披覆作用,随沉积速率增大,基底热流变越小。另外,在数值模拟过程中,岩石圈拉张的同时会引起沉积物的拉张减薄,在多幕拉伸过程中,张裂早期地层会发生多次拉伸和减薄,新提出的伸展校正回剥技术不仅可以对张裂早期地层进行去压实,还可以去除后期张裂对其厚度的影响,恢复了真实的沉积速率和总的沉降量。

LESCOUTRE 等^[77]利用热动力学模型,结合西部 Pynerean 裂谷区域最新的温度数据测定结



GR 为下地壳为镁铁质麻粒岩; AN 为湿辉长岩; WQ 为湿石英; 35 或 40 为地壳厚度, 单位 km。据文献 [55] 修改

图 4 不同的沉积环境和沉积效率下大陆边缘宽度

Fig.4 The margin width of models with different surface processes

果, 研究裂谷阶段非对称性大陆边缘的构造热演化 (图 5)。研究结果显示, 由于裂谷迁移作用, 热流以裂谷中心呈非对称分布 (图 5a), 且沉积过程 (同裂谷期沉积物厚度 < 6 km) 不会影响热流的非对称性分布; 但是随着沉积物厚度的增加 (图 5d), 基底温度增加 (图 5e、f), 热流峰值持续时间增长。这个模型并没有真实模拟沉积过程, 而只是在模型表面每个时步增加一定数量的沉积物, 并设置沉积物的地温梯度为 80 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

4 被动大陆边缘耦合沉积过程的数值模拟研究

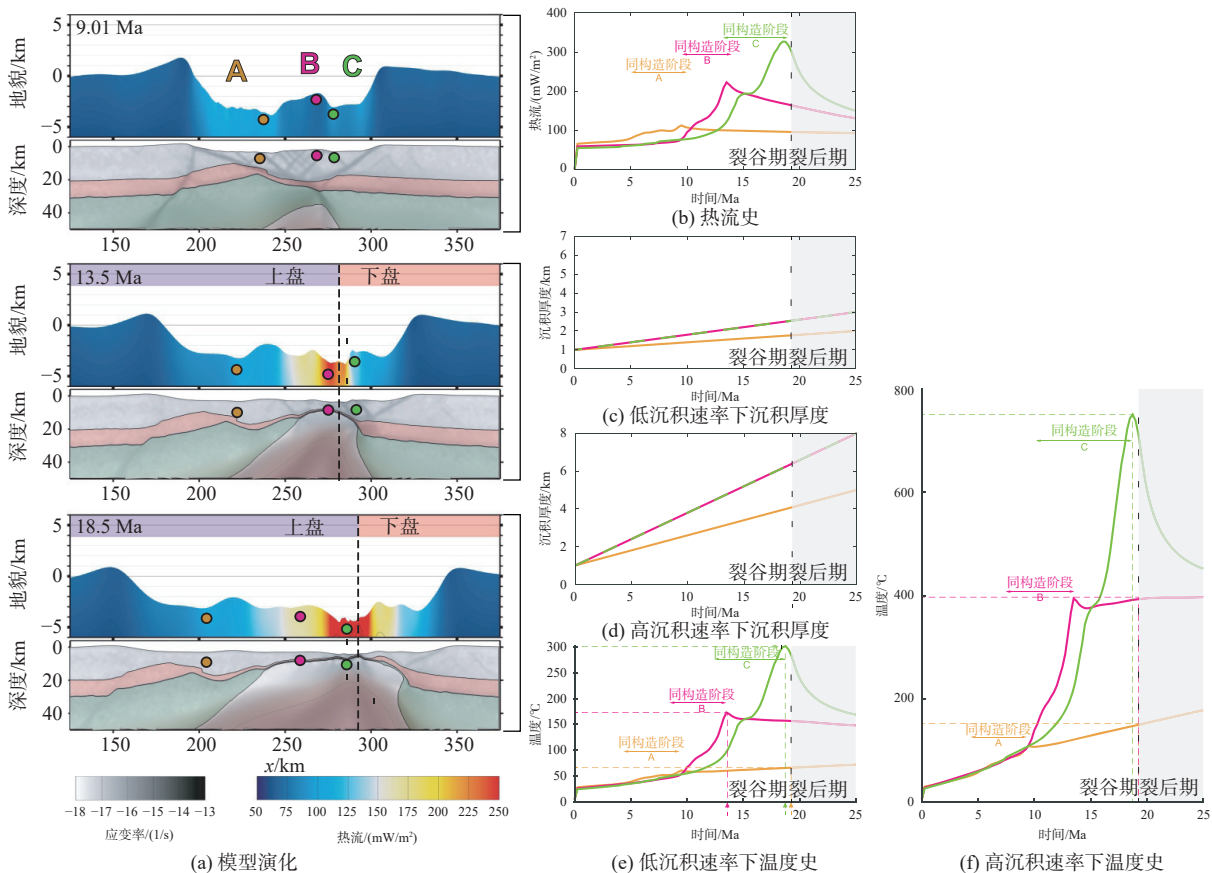
4.1 沉积过程理论模型

CULLING^[78] 首次提出应用地貌迁移规律

(geomorphic transport laws), 通过质量守恒方程探讨地貌演化过程和动力学机制。随后, KIRKBY^[69] 和 SMITH 等^[79] 提出了一般化 (generalized) 迁移规律 (方程 1), 可以根据对排水区的依赖性区分斜坡和河道沉积剥蚀过程。质量守恒方程中运用迁移规律的基本方法, 现今已经广泛应用在数值模型中, 解决各种各样的问题^[35,55,71,80-82]。与大陆边缘构造模型相耦合的沉积过程数值模型, 就是基于地貌迁移规律。剥蚀速率依赖于构造变形过程中地貌的高度和坡度^[52,83-84]。假设沉积物和基岩的密度等物理性质均相同, 并忽略压实作用的影响, 地貌 (h) 和沉积物通量 (q_s) 随时间 (t) 和水平距离 (x) 有如下关系^[78-79]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (1)$$

在陆上, 沉积物通量由水通量 (q_w) 定义, 即:



据文献 [77] 修改

图 5 无沉积过程条件下模型演化及不同沉积过程下热史

Fig.5 Model evolution with no sedimentary processes and the thermal history under different sedimentary processes

$$q_s = -(K + cq_w^n) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

式中: K 为斜坡扩散率;

c 为河流搬运系数;

n 为定义沉积物搬运和水流量关系类型的幂指数^[79]。

由于波浪和潮汐作用的影响, 沉积物的搬运只在浅水区发生, 且随着水深的增加, 搬运能力越来越弱。在深水环境中, 沉积物通量随着水深呈指数降低^[85]:

$$q_s = K_s e^{-\lambda_s h_w} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

式中: K_s 为深水环境中扩散系数;

λ_s 为深水环境中扩散衰减系数;

h_w 为水深。

由地貌迁移规律可以看出, 填充速率和沉积物体积受限于基岩风化作用产生的风化产物量和河流系统的搬运能力。所以, 根据基底物质是如何通过剥蚀或风化作用搬运至沉积盆地的, 将沉积过程数值模型大致分为 2 类: 拆离限制模型(detachment-

limited model) 和搬运限制模型(transport limited model)^[69-72]。沉积物的产量, 可以用陡坡来定义: 坡度越陡, 剥蚀速度越快, 沉积物产量越多, 最后会导致形成与河流沉积比较像的地貌。拆离限制模型是假设一个恒定的沉积厚度, 剥蚀作用控制着地貌演化, 但是这种模型, 并没有沉积作用的进行。搬运限制模型是假设一直有足够的沉积物源供给, 水流搬运沉积物源的能力影响着沉积物的沉积, 所以是沉积物的搬运过程控制着地貌演化, 地貌即时的变化只与沉积物通量变化有关。

4.2 被动大陆边缘构造热演化耦合沉积过程的数值模拟研究进展与不足

目前, 关于沉积过程对被动大陆边缘结构影响的研究比较多。De BREMAECKER^[59] 采用一维有限元方法, 探讨了伸展盆地中温度、沉积物和烃源岩成熟史的关系, 但是其中的沉积物, 只是简单的从基底至海平面填充, 没有考虑沉积过程。TER VOORDE 等^[60] 通过二维有限元数值模型研究了裂

谷盆地形成过程中正断层的热效应,模型中沉积物简单的填充于基底与模型表面之间,未考虑沉积物源供给、海平面、压实作用、盆地地貌以及岩性,同时沉积物的填充方式,直接与拉张速率相关,从而夸大了沉积物的量。BUROV 等^[52]更细致地探讨了沉积过程与大陆边缘的挠曲均衡响应关系,与 MCKENZIE^[4]模型相比,其使用二维非线性弹-塑-黏性模型求解二维温度传导方程,而且耦合了沉积过程(公式 1)。CLIFT 等^[18]和 LESCOUTRE 等^[77]均使用二维 SLIM3D 模型探讨了沉积过程与裂后期沉降或基底温度演化的关系,但是其沉积物的填充方式比较简单,未耦合沉积过程模型。OLIVE 等^[67]使用耦合了沉积过程的二维弹-塑性模型探讨了沉积过程与裂谷形成过程中断裂发育的关系,但是,此模型中的沉积过程只考虑了短距离沉积方程。ANDRÉS-MARTÍNEZ 等^[55]基于 MILAMIN 方程的二维弹-塑-黏性模型,并且在耦合沉积过程时,使用的是搬运限制模型,考虑了不同沉积环境对大陆边缘构造演化的影响,但是模型中没有考虑沉积物的压实作用以及沉积物的岩性。

综上所述,除 OLIVE 等^[67]和 ANDRÉS-MARTÍNEZ 等^[55]的模型外,其他大部分数值模拟研究中,模型的初始设置比较简单,模型中没有对岩石圈应用非线性初始温度结构,或者没有设置依赖温度的黏度模型,或者是缺乏弹性变形。这些不足之处表明,沉积过程对于被动大陆边缘构造热演化的研究还有很多的发展空间。

此外,在整个被动大陆边缘尺度上,关于沉积过程对被动大陆边缘构造热演化影响的研究比较缺乏。目前关于裂谷盆地热演化的研究主要是着眼于某口井,或者某个盆地的一维研究^[59]和少量的二维研究^[60],不足以代表整个大陆边缘从近陆端至远陆端的热演化。利用耦合沉积过程的 2D 岩石圈构造演化模型研究沉积过程对被动大陆边缘同裂谷期和后裂谷期构造热演化是地学未来研究的热点之一。

5 结论与展望

(1)沉积过程对被动大陆边缘影响的动力学机制主要是岩石圈的挠曲均衡响应和沉积物的热披覆效应,两者相互作用,影响着被动大陆边缘的构造演化。

(2)沉积过程对被动大陆边缘结构和构造演化

影响的研究比较详实,目前主要包括断裂的发育、大陆边缘的宽度及对称性、裂后异常构造沉降和岩浆作用等。

(3)沉积过程对被动大陆边缘热影响的研究比较缺乏。通过耦合沉积过程的 2D 岩石圈构造演化模型来研究被动大陆边缘构造热演化是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] PEPPER A S, CORVI P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part I: oil and gas generation from kerogen[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(3): 291-319.
- [2] MCBRIDE E F. Quartz cement in sandstones: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 1989, 26(1/3): 69-112.
- [3] HOWER J, ESLINGER E V, HOWER M E, et al. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 1. mineralogical and chemical evidence[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1976, 87(5): 868.
- [4] MCKENZIE D. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40(1): 25-32.
- [5] HUISMANS R, BEAUMONT C. Depth-dependent extension, two-stage breakup and cratonic underplating at rifted margins[J]. *Nature*, 2011, 473(7345): 74-78.
- [6] BRUNE S, HEINE C, PÉREZ-GUSSINÉ M, et al. Rift migration explains continental margin asymmetry and crustal hyper-extension[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-9.
- [7] KOOPMANN H, BRUNE S, FRANKE D, et al. Linking rift propagation barriers to excess magmatism at volcanic rifted margins[J]. *Geology*, 2014, 42(12): 1071-1074.
- [8] COCHRAN J R. Effects of finite rifting times on the development of sedimentary basins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 66: 289-302.
- [9] JARVIS G T, MCKENZIE D P. Sedimentary basin formation with finite extension rates[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 48(1): 42-52.
- [10] WAPLES D W. A new model for heat flow in extensional basins: radiogenic heat, asthenospheric heat, and the McKenzie model[J]. *Natural Resources Research*, 2001, 10(3): 227-238.
- [11] WERNICKE B. Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: nappe tectonics in an extending orogen[J]. *Nature*, 1981, 291(5817): 645-648.
- [12] WERNICKE B. Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1985, 22(1): 108-125.
- [13] WERNICKE B, BURCHFIEL B C. Modes of extensional tectonics[J]. *Journal of Structural Geology*, 1982, 4(2): 105-115.
- [14] WEISSEL J K, KARNER G D. Flexural uplift of rift flanks due to mechanical unloading of the lithosphere during extension[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B10):

- 13919-13950.
- [15] EBINGER C J, GARRY D K, JEFFREY K W. Mechanical strength of extended continental lithosphere: constraints from the western rift system, East Africa[J]. *Tectonics*, 1991, 10(6): 1239-1256.
- [16] BOILLOT G, MALOD J. The north and north-west Spanish continental margin: a review[J]. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 1988, 1(3/4): 295-316.
- [17] DRISCOLL M D, SATHYA G, MUYAN M, et al. Sequence requirements for estrogen receptor binding to estrogen response elements[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1998, 273(45): 29321-29330.
- [18] CLIFT P D, BRUNE S, QUINTEROS J. Climate changes control offshore crustal structure at South China Sea continental margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 420: 66-72.
- [19] KARNER G D, DRISCOLL N W, BARKER D H N. Syn-rift regional subsidence across the West African continental margin: the role of lower plate ductile extension[J]. *Geological Society*, 2003, 207(1): 105-129.
- [20] ZHAO Z X, SUN Z, LIU J B, et al. The continental extension discrepancy and anomalous subsidence pattern in the western Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 501: 180-191.
- [21] ETHERIDGE M A, Symonds P A, Lister G S. Application of the detachment model to reconstruction of conjugate passive margins: chapter 3: concepts[M]//TANKARD A J, BALKWILL H R. *Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins*. AAPG Memoir 46, 1989: 23-40.
- [22] LISTER G S, ETHERIDGE M A, Symonds P A. Detachment models for the formation of passive continental margins[J]. *Tectonics*, 1991, 10(5): 1038-1064.
- [23] KEEN C, PEDDY C, VOOGD B D, et al. Conjugate margins of Canada and Europe: results from deep reflection profiling[J]. *Geology*, 1989, 17(2): 173-176.
- [24] 何丽娟. 沉积盆地构造热演化模拟的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 661-665.
- [25] ENGLAND P. Constraints on extension of continental lithosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88(B2): 1145-1152.
- [26] KUSZNIR N J, PARK R G. The extensional strength of the continental lithosphere: its dependence on geothermal gradient, and crustal composition and thickness[J]. *Geological Society*, 1987, 28(1): 35-52.
- [27] SONDER L J, ENGLAND P C. Effects of a temperature-dependent rheology on large-scale continental extension[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B6): 7603-7619.
- [28] BUCK W R. Modes of continental lithospheric extension[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B12): 20161-20178.
- [29] BASSI G, KEEN C E, POTTER P. Contrasting styles of rifting: models and examples from the eastern Canadian margin[J]. *Tectonics*, 1993, 12(3): 639-655.
- [30] GOVERS R, WORTEL M J R. Initiation of asymmetric extension in continental lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 1993, 223(1/2): 75-96.
- [31] GOVERS R, WORTEL M J R. Extension of stable continental lithosphere and the initiation of lithospheric scale faults[J]. *Tectonics*, 1995, 14(4): 1041-1055.
- [32] BOUTILIER R R, KEEN C E. Geodynamic models of fault-controlled extension[J]. *Tectonics*, 1994, 13(2): 439-454.
- [33] BRUNE S, HEINE C, CLIFT P D, PÉREZ-GUSSINYÉ M. Rifted margin architecture and crustal rheology: reviewing Iberia-Newfoundland, central South Atlantic, and South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 257-281.
- [34] ELDHOLM O, COFFIN M F. Large igneous provinces and plate tectonics[J]. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 2000, 121: 309-326.
- [35] BUROV E, POLIAKOV A. Erosion and rheology controls on synrift and postrift evolution: verifying old and new ideas using a fully coupled numerical model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106(B8): 16461-16481.
- [36] BOILLOT G, FROITZHEIM N. Non-volcanic rifted margins, continental break-up and the onset of sea-floor spreading: some outstanding questions[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2001, 187(1): 9-30.
- [37] DAVIS M, KUSZNIR N J. Depth-dependent lithospheric stretching at rifted continental margins[J]. *Proceedings of NSF Rifted Margins Theoretical Institute*, 2004, 136: 92-137.
- [38] MANATSCHAL G. New models for evolution of magma-poor rifted margins based on a review of data and concepts from West Iberia and the Alps[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2004, 93(3): 432-466.
- [39] HUISMANS R S, BEAUMONT C. Effect of lithospheric stratification on extensional styles and rift basin geometry[C]//*Petroleum Systems of Divergent Margin Basins*. Houston, Texas: 25th Gulf Coast Section, Society Sedimentary Geology, Bob F. Perkins Research Conference, 2005: 4-7.
- [40] PÉREZ-GUSSINYÉ M, MORGAN J P, RESTON T J, et al. The rift to drift transition at non-volcanic margins: insights from numerical modelling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244(1/2): 458-473.
- [41] LAVIER L L, MANATSCHAL G. A mechanism to thin the continental lithosphere at magma-poor margins[J]. *Nature*, 2006, 440(7082): 324-328.
- [42] KARNER G D, GAMBÔA L A P. Timing and origin of the South Atlantic pre-salt sag basins and their capping evaporites[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2007, 285(1): 15-35.
- [43] GUEYDAN F, MORENCY C, BRUN J P. Continental rifting as a function of lithosphere mantle strength[J]. *Tectonophysics*, 2008, 460(1/4): 83-93.
- [44] VAN AVENDONK H J, LAVIER L L, SHILLINGTON D J, et

- al. Extension of continental crust at the margin of the eastern Grand Banks, Newfoundland[J]. *Tectonophysics*, 2009, 468(1/4): 131-148.
- [45] PÉRON-PINVIDIC G, MANATSCHAL G. The final rifting evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: a new point of view[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(7): 1581-1597.
- [46] GEOFFROY L, BUROV E B, WERNER P. Volcanic passive margins: another way to break up continents[J]. *Scientific reports*, 2015, 5(1): 1-12.
- [47] SVARTMAN DIAS A E, LAVIER L L, HAYMAN N W. Conjugate rifted margins width and asymmetry: the interplay between lithospheric strength and thermomechanical processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(12): 8672-8700.
- [48] DURETZ T, PETRI B, MOHN G, et al. The importance of structural softening for the evolution and architecture of passive margins[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-7.
- [49] MÜLLER R D, HASSAN R, GURNIS M, et al. Dynamic topography of passive continental margins and their hinterlands since the Cretaceous[J]. *Gondwana Research*, 2018, 53: 225-251.
- [50] TETREAULT J L, BUITER S J H. The influence of extension rate and crustal rheology on the evolution of passive margins from rifting to break-up[J]. *Tectonophysics*, 2018, 746: 155-172.
- [51] LUNDIN E R, DORÉ A G, REDFIELD T F. Magmatism and extension rates at rifted margins[J]. *Petroleum Geoscience*, 2018, 24(4): 379-392.
- [52] BUROV E, CLOETINGH S A P L. Erosion and rift dynamics: new thermomechanical aspects of post-rift evolution of extensional basins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 150(1/2): 7-26.
- [53] PETIT C, FOURNIER M, GUNNELL Y. Tectonic and climatic controls on rift escarpments: Erosion and flexural rebound of the Dhofar passive margin (Gulf of Aden, Oman)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B3).
- [54] REDFIELD T F, OSMUNDSEN P T. The long-term topographic response of a continent adjacent to a hyperextended margin: a case study from Scandinavia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2013, 125(1/2): 184-200.
- [55] ANDRÉS-MARTÍNEZ M, PÉREZ-GUSSINYE M, ARMITAGE J, et al. Thermomechanical implications of sediment transport for the architecture and evolution of continental rifts and margins[J]. *Tectonics*, 2019, 38(2): 641-665.
- [56] WANGEN M. The blanketing effect in sedimentary basins[J]. *Basin Research*, 1994, 7(4): 283-298.
- [57] ZHANG Y. The thermal blanketing effect of sediments on the rate and amount of subsidence in sedimentary basins formed by extension[J]. *Tectonophysics*, 1993, 218(4): 297-308.
- [58] THEISSEN S, RÜPKE L H. Feedbacks of sedimentation on crustal heat flow: new insights from the Vøring Basin, Norwegian Sea[J]. *Basin Research*, 2010, 22(6): 976-990.
- [59] DE BREMAECKER J C. Temperature, subsidence, and hydrocarbon maturation in extensional basins: a finite element model[J]. *AAPG Bulletin*, 1983, 67(9): 1410-1414.
- [60] TER VOORDE M, BERTOTTI G. Thermal effects of normal faulting during rifted basin formation, 1. A finite difference model[J]. *Tectonophysics*, 1994, 240(1/4): 133-144.
- [61] RÜPKE L H, SCHMID D. W, PEREZ-GUSSINYE M, et al. Interrelation between rifting, faulting, sedimentation, and mantle serpentinization during continental margin formation-including examples from the Norwegian Sea[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(10): 4351-4369.
- [62] TEN BRINK U S, TAYLOR M H. Crustal structure of central Lake Baikal: insights into intracontinental rifting[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B7): ETG-2.
- [63] ZONENSHAIN L P, KAZ'MIN V G, KUZMIN M I. New data on the history of the Lake Baikal: results of surveys by submersibles[J]. *Geotectonics*, 1995, 29(3): 235-247.
- [64] HUS R, POORT J, CHARLET F, et al. Lake Baikal[M]// ROBERTS D G, BALLY A W. *Regional Geology and Tectonics: Phanerozoic Rift Systems and Sedimentary Basins*. Elsevier, 2012, 1: 258-276.
- [65] HUTCHINSON D R, GOLMSHTOK A J, ZONENSHAIN L P, et al. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 589-592.
- [66] MORLEY C K. Variable extension in lake Tanganyika[J]. *Tectonics*, 1988, 7(4): 785-801.
- [67] OLIVE J A, BEHN M D, MALATESTA L C. Modes of extensional faulting controlled by surface processes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(19): 6725-6733.
- [68] BUITER S J, HUISMANS R S, BEAUMONT C. Dissipation analysis as a guide to mode selection during crustal extension and implications for the styles of sedimentary basins[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B6).
- [69] KIRKBY M J. Hillslope process-response models based on the continuity equation[J]. *Institute of British Geographers Special Publication*, 1971, 3(1): 5-30.
- [70] CARSON M A, KIRKBY M J. *Hillslope Form and Process*[M]. New York: Cambridge University Press, 1972.
- [71] HOWARD A D. A detachment-limited model of drainage basin evolution[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(7): 2261-2285.
- [72] DIETRICH W E, BELLUGI D G, SKLAR L S, et al. Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics[J]. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 2003, 135: 103-132.
- [73] WESTAWAY R. Re-evaluation of extension across the Pearl River Mouth Basin, South China Sea: implications for continental lithosphere deformation mechanisms[J]. *Journal of Structural Geology*, 1994, 16(6): 823-838.
- [74] ZHAO Z X, SUN Z, WANG Z F, et al. The dynamic mechanism of post-rift accelerated subsidence in Qiongdongnan Basin,

- northern South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2013, 34: 295-308.
- [75] DRISCOLL N W, KARNER G D. Lower crustal extension across the Northern Carnarvon Basin, Australia: evidence for an eastward dipping detachment[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B3): 4975-4991.
- [76] LIZARRALDE D, AXEN G J, BROWN H E, et al. Variation in styles of rifting in the Gulf of California[J]. *Nature*, 2007, 448(7152): 466-469.
- [77] LESCOUTRE R, TUGEND J, BRUNE S, et al. Thermal evolution of asymmetric hyperextended magma-poor rift systems: results from numerical modeling and Pyrenean field observations[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(10): 4567-4587.
- [78] CULLING W E H. Analytical theory of erosion[J]. *The Journal of Geology*, 1960, 68(3): 336-344.
- [79] SMITH T R, BRETHERTON F P. Stability and the conservation of mass in drainage basin evolution[J]. *Water Resources Research*, 1972, 8(6): 1506-1529.
- [80] WILLGOOSE G, BRAS R L, RODRIGUEZ-ITURBE I. A coupled channel network growth and hillslope evolution model: 1. Theory[J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(7): 1671-1684.
- [81] WILLGOOSE G, BRAS R L, RODRIGUEZ-ITURBE I. A coupled channel network growth and hillslope evolution model: 2. Nondimensionalization and applications[J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(7): 1685-1696.
- [82] KOOI H, BEAUMONT C. Large - scale geomorphology: classical concepts reconciled and integrated with contemporary ideas via a surface processes model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B2): 3361-3386.
- [83] VAN DER BEEK P, ANDRIESEN P, CLOETINGH S. Morphotectonic evolution of rifted continental margins: inferences from a coupled tectonic - surface processes model and fission track thermochronology[J]. *Tectonics*, 1995, 14(2): 406-421.
- [84] VAN BALEN R T, VAN DER BEEK P A, CLOETINGH S A P L. The effect of rift shoulder erosion on stratal patterns at passive margins: implications for sequence stratigraphy[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 134(3/4): 527-544.
- [85] KAUFMAN P, GROTZINGER J P, MCCORMICK D S, et al. Depth-dependent diffusion algorithm for simulation of sedimentation in shallow marine depositional systems[J]. *Kansas Geological Survey Bulletin*, 1991, 233: 489-508.

Influence of surface processes on tectono-thermal evolution of rifted margins

XIN Yanfang^{1,2,3}, YAN Yi^{1,2,4,5*}, LUO Yang⁶

(1 Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2 CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou 510640, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Guangzhou), Guangzhou 511458, China; 5 Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 6 Department of developing and Planning in Shengli Oil Field, Sinopec Group, Dongying 257001, China)

Abstract: Tectono-thermal modelling is one of the key means in exploring the continental rifted margins. During rifting, erosion and sedimentation will modulate the distribution of loading and deformation of the crust, and thus influence the tectono-thermal evolution of passive continental margins. Surface processes are important controlling factors of rifting process and the evolution of hydrocarbon source rocks in oil and gas basins. We summarized the tectono-thermal evolution of passive continental margins, and showed two mechanism of the impact of surface processes: flexural isostatic balance of the lithosphere and thermal blanketing effect of sediments. Multiple-sourced geological evidence suggests that the surface process has a significant impact on the development of rift faults, the morphology and symmetry of continental margins, post-rift anomalous tectonic subsidence, and magmatism, by adjusting the load distribution and subsequent crustal deformation in the rift system. However, current numerical modeling studies on the formation of passive continental margins still rarely consider 2D or 3D surface processes, which limits their ability to accurately reconstruct the thermal history and hydrocarbon generation history of sedimentary basins. By coupling the lithospheric tectonic evolution model with 2D or 3D surface processes, a new and comprehensive understanding of the tectono-thermal evolution of passive continental margins can be brought.

Key words: passive continental margins; rifted margins; surface processes; numerical modelling