

文章编号: 1004-5589(2004)02-0123-05

裂谷盆地构造控制地形—沉积体系演化研究与面临的问题

于秀英¹, 程日辉², 王璞珺²

(1. 大庆石油管理局地球物理勘探公司, 黑龙江大庆 163357; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061)

摘要:裂谷盆地早期构造作用强烈, 充填作用发生在由构造控制的盆地内。盆地的古地形通过物源区侵蚀和沉积物流的盆内输送而影响沉积体的类型与堆积样式。断裂的生长、传播、相互作用、连接与死亡控制了古地形的周期演化, 对沉积体系的演化施加了强烈的影响或控制。伸展盆地地层发育的控制与过程的研究主要反映在断层的生长过程、裂谷盆地的侵蚀、汇水和沉积物流等方面的精细研究。此方面研究面临的问题不仅包括研究的精细程度和技术, 而且包括相关分支学科的合作。

关键词:裂谷盆地; 古地形; 沉积体系; 断裂作用

中图分类号: P542

文献标识码: A

Study of evolution of faulted controlled topography-sedimentary systems and some problems

YU Xiu-ying¹, CHENG Ri-hui², WANG Pu-jun²

1. Geophysical E & P Corporation, Daqing Petroleum Administration, Daqing 163357, Heilongjiang, China;

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China

Abstract: Tectonic activities were violent in the early stage of rifting and the filling occurred within basins controlled by faults. The paleotopographies of basin impacted types of sedimentary body and stacking styles through the erosion of source area and sediment flux to the basin. The cyclic evolution of paleotopographies controlled by growth, propagation, interaction, linkage and death of faults impacted the evolution of sedimentary systems. The study of processing and controlling in the stratigraphic development of extensional basins are documented by the precious studies in review of fault growth, erosion, catchment and sediment flux. The study is facing some problems at present, including study precision and technology, and cooperation of related subdisciplines.

Key words: rift; paleotopography; sedimentary system; faulting

0 引言

裂谷盆地鉴于在大陆动力学(板块破裂大陆裂谷早期的记录和板块汇聚弧后伸展的记录)和油气资源方面的意义, 一直受到广泛的关注。近年来在伸展盆地的地层发育控制与过程的研究方面取得了显著的进展, 其主题是过程—驱动。驱动的直接

因素涉及到构造沉降与抬升、物源区侵蚀、海/湖平面变化和气候变化等多方面。然而, 虽然沉积岩被认为在提供盆地演化的外力驱动的信息方面是唯一和完全的^[1], 但却是难解的。由于缺乏驱动的独立证据, 使得难于直接把地层记录与驱动因素联系在一起, 并很好地了解其过程—驱动。为此, 相关学者运用一些新的手段, 如测年技术、异常地球化学和数

收稿日期: 2004-02-09; 改回日期: 2004-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(49894190-12)

作者简介: 于秀英(1965—), 女, 黑龙江大庆人, 工程师, 从事物探工作。

通讯作者简介: 程日辉(1963—), 男, 吉林德惠人, 副教授, 从事沉积地质学研究。E-mail: chengrh@email.jlu.edu.cn

值模拟等,寻找和检验更多的来自地层与岩石的信息。目前的发展趋势是,一方面建立多种有特色的反映特殊作用特点的地质模型(构成模型的参数尽量量化或半量化),便于实现模拟;另一方面是运用模型通过野外露头 and 地下的实例进行检验,而不仅仅是比较和类比。

近年来针对伸展盆地地层发育的控制与过程的研究取得了显著的进展,其中断裂控制的古地形演化及其对盆地沉积作用及演化具有代表性。本文介绍了断层的生长过程、裂谷盆地的侵蚀、汇水和沉积物流等方面的研究,并分析目前面临的一些问题。

1 断层的生长过程

伸展盆地正断层是普遍发育的,控制着盆地及其周缘地形。正断层的生长过程是由断层的形成、传播、相互作用、连接与死亡等阶段构成的。在伸展背景下具有地震成因的断裂形成或出现以后,断层的传播就开始了,其包括侧向和垂向的传播。

断层双向侧向传播模型^[2-9]定量地表达了断层最大累积位移 D 与断层走向长度 L 的关系:

$D=cL^n$, 其中 c 是与岩石特性有关的常数,指数 n 的值在 1~2 之间。最大位移的位置通常位于断层的中点,而在断层的两个断端 (fault tip) 位移逐渐变为 0。一个大型的断裂在其发育的早期都是沿着走向分段的^[10-12],因此存在断段 (fault segment) 的相互作用与连接。它的 $D-L$ 关系中存在着许多离散^[8-13],也就是对于一个包含有若干断段的不连续断裂带来说,它的 $D-L$ 刻度与单断裂的情况一致。但每个断段 $D-L$ 剖面经常是不对称,并具有陡的变化梯度。在断段连接之前存在着机械相互作用,而在相互作用和连接过程中遵从:连接的断层必须是累积位移而不是减少其长度^[14],达到一个合适 D/L 率。

断层的垂向生长是通过垂向传播来实现的。选择性断层生长模型显示断层生长发生在深部,从上地壳脆性基底向上发育^[14]。出现在地下的众多小断层之间的“自然选择”最终导致一个地震成因的断裂在地表破裂形成,并快速地侧向传播,达到它的平衡长度(近似于地震成因层的厚度)^[15]。这反映断层的垂向和侧向传播遵循一个统一动力机制。Cowie 和 Shipton^[16]认为在复杂的断段生长历史中,明显的位移积累与少量的传播和有限的位移与明显的传播是间歇出现的。在断段间的机械相互作用

上一个断段上的破裂加强或抑制了邻近断段的破裂,以适应静应力变化。

褶皱在正断层带发育过程中起到一个重要的作用,尤其是横向褶皱(与断层走向高角度相交)。在正断层下降盘横向向斜发育在断层的最大位移处,而横向背斜在其最小位移处。与正断层伴生的平行褶皱是传播断层前端韧性变形形成的。这些断层传播褶皱通常在上升盘保存为单斜,在下降盘为向斜。Allmendinger^[17]和 Hardy 等^[18]运用断层传播褶皱的运动学模型研究了褶皱和与正断层传播伴生的应变特征。

Cowie 等^[19]的断阵 (fault array) 模拟结果提供了对于断阵空间演化的认识。演化是从孤立小断段的初始核阶段开始,通过生长和断段间的相互作用,达到一个新阶段,一些主要断层带局部发生变形而其它断层不再活动。快速生长和相对安静交替的幕式位移积累是断段生长的普遍特征。断段长度和位移速率的增加强烈受到周围断段的相对位置的控制。运用位移-长度的刻度关系, Schlische^[19]首先提出伸展边界断层传播控制的沉积中心发育的定量模型。Contreras^[20]等进一步发展了这个方法,包括了挠曲均衡和沉积物加载与侵蚀卸载的效应。Schlische^[19]的结果首次显示盆地演化传统的二维模型可以外推到三维,具有较强的预测能力。

图 1 展示了断阵的三维演化^[19],反映出断段 B 和 Z 的位移历史。在断裂的初始阶段,发育许多小位移的断段。在此阶段断层传播褶皱和表面破裂而形成的断层崖影响着低的表面地形。在相互作用和连接阶段,断段间的应力反馈影响断阵的生长和变形。沿着主要断层 (A、B、C) 相互作用与连接开始区域化。位于应力影的断层 (X、Y、Z) 变得不活动。在贯通断层带阶段,沿着主要边界断层带变形区域化,形成了主要半地堑和地堑沉积中心。由于主断裂带变形区域化,断段 Z 死亡并且断段 B 位移速率增加。

2 裂谷盆地的侵蚀、汇水和沉积物流

裂谷盆地的地层发育不仅受控于构造过程,也受控于地表过程。在地表过程中断裂生成的地形释放出沉积物,并重新分布至沉积凹陷中,即在构造活动盆地上升盘的侵蚀和进入下降盘盆地的沉积物流是通过在裂谷盆地内或邻近裂谷盆地的断控 (fault-controlled) 地形演化而联系起来。活动裂谷

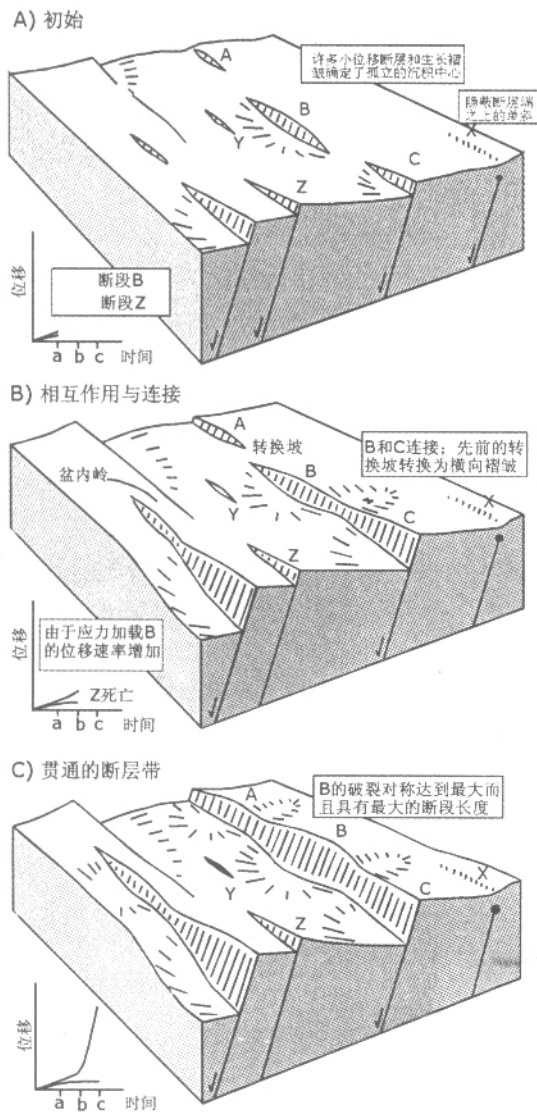


图1 断阵的三维演化图^[14]

Fig. 1 Schematic 3D evolution of a normal fault array^[14]

体系上升盘地貌分析可以确定汇水形态与断裂几何学的空间关系, 例如在希腊中部和美国盆岭省^[21]的实例均清楚地反映了对应关系。然而, 陆地景观只提供了地貌体系演化的一个“快照”, 而伴随构造和气候过程的汇水联合演化只能推断。为强调这个过程, Jorgenson-Harbor^[22]运用空间-时间分析构造了一个模型, 表述美国盆岭省上升盘断块流域的前进式发育。然而由于复杂变动的的原因, 很难清楚地探索景观地貌是如何伴随外部驱动的变化而演化的。

数字景观演化模型的出现允许对景观进行实验, 响应于各种驱动函数, 并且跟踪在侵蚀期间所

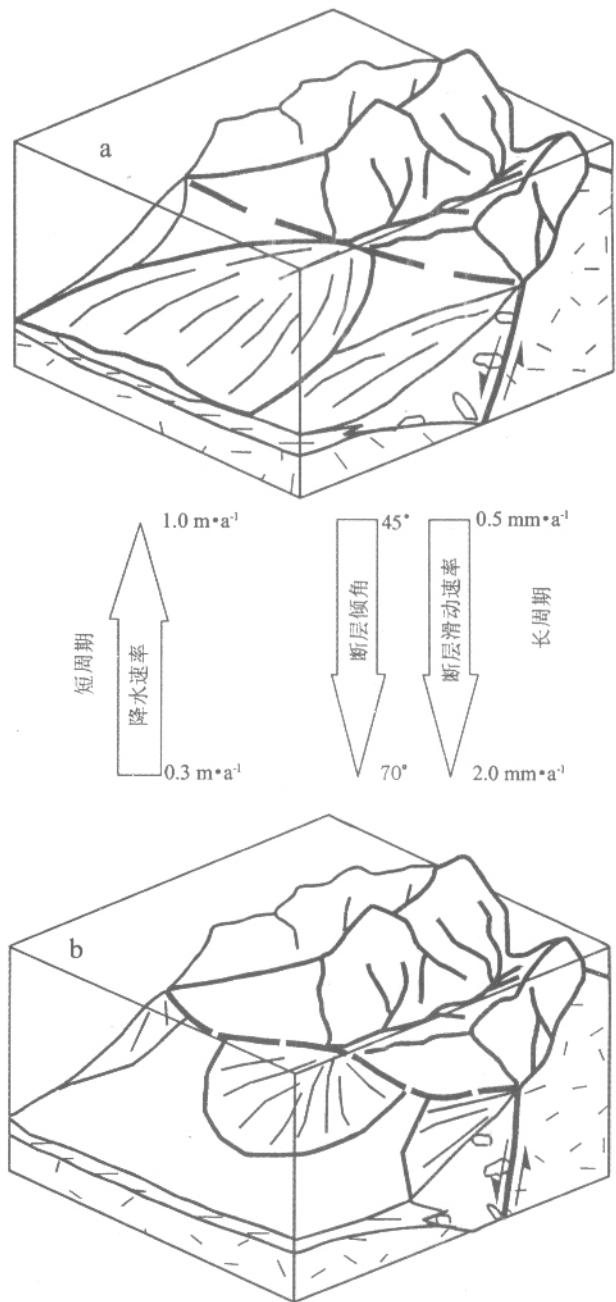


图2 扇进积的充分条件概略图^[23]

Fig. 2 Summary of sufficient conditions for fan progradation^[23]

释放的沉积物的时-空分布。Allen 等^[23]根据活动正断层到构造和气候边界条件的变化, 研究了汇水-扇体系的响应, 并应用了 ZSCAPE—数字陆地景观演化模型。它们集中于断层滑动速率的变化对汇水-扇体系的作用, 考查这个体系对构造和气候过程变化速率的灵敏性。图2展示了扇进积的充分条件。图2a显示了扇的进积和联合; 图2b显示了非

进积和孤立的扇。大箭头展示了用于评价的参数,它们的值控制了扇的进积或非进积。在短周期中($<10^4$ a),虽然断层滑动速率和断层倾角很大,但扇进积受到降水速率的控制。在长周期中($>10^4$ a),虽然降水速率值很大,但断层几何学和滑动速率则占有优势。数字模拟显示了汇水-扇体系对断层滑动的滞后响应,相反对沉积速率和气候变化产生了非常快的体系响应。最重要的结论是盆地边缘扇沉积记录更可能保存高频气候变化而不是断层速率短周期变化所形成的沉积物流的记录。

Marr 等^[24]应用数字模拟检查外力驱动的波动与盆地地层响应间的相互关系,提出了冲积盆地充填模型,基于一个单一的线性方程。但有两个不同的搬运联合功效,一个是河流体系中近端的砾岩区,另一个是远端的砂岩区。模拟的特殊作用是当移动边界时能够处理冲积扇前端和砾-砂转化。这是个动力边界,响应于外部驱动而前进或者后退。这个方法对于地层学研究是非常有用的,因为在模型中的地层标志、冲积前端和砾岩前缘是很容易通过粒度的空间变化在野外得到观察和记录。应用这个方法可以检验对沉积物供给、水供给、沉降速率和砾岩部分波动的地层响应。驱动变化对应着冲积前端与砾岩前缘位置的变化。研究结果显示,异地地层响应依赖于外力驱动周期与盆地自身调节周期的关系^[25],依赖于盆地筛选外力驱动的能力。在外力驱动周期小于盆地自然响应时间的地方,地层响应将通过由河流搬运体系的自我控制的盆地响应得到调整。在驱动周期大于盆地内部响应时间的地方,地层响应将通过驱动速率,而不是由搬运系统控制的速率得到控制。Allen 等^[26]的汇水-扇对断裂速率的快速变化响应的研究,提供了一个新的观点,即好的年龄值可验证地层记录。

3 面临的问题

Gupta 等^[1]在回顾伸展盆地的地层发育过程与控制研究进展时,提出了一些今后需要加强研究的方面,以便进一步了解伸展盆地过程—驱动的地层响应:①更好地了解断层系统中断层如何传播、生长和相互作用的,尤其是断层如何相互作用,这些过程在一个裂谷盆地生命周期中是如何时空变化的,解释裂谷盆地地层结构;②要仔细地检验,而不是仅

仅应用地貌和地层的数据来比较断层的演化特征,形成对于不同的与断层相关的沉积中心演化阶段(从裂谷初始期,通过断段相互作用到完全的断层连接)的地层和地貌系统指纹;③排水体系演化和响应断层演化的沉积物散布通道的野外研究,与断层生长和地貌演化的模拟相比较,将提供控制同裂谷地层过程的重要认识;④评价盆地边缘剥落的长周期记录,提供上升盘侵蚀速率和时间的重要约束;⑤需要一个有效的模型,包含用于探索侵蚀过程的地貌演化模型和调查沉积作用的地层模型,就是需要更好地约束许多模型内过程连接;⑥很好地了解气候变化对沉积物流的作用,与气候触发机制相关的在幅度和时间上的地层响应是怎么样的。

上述问题虽然是裂谷盆地构造控制地形—沉积体系演化研究需要解决的问题,但面临的问题不只是这些具体的研究内容,还包括技术与合作方面。技术方面主要是测年技术、异常地球化学方法和数字模拟手段的运用,尤其是在测年方面。在裂谷盆地方面的主要差距是因为目前在沉积物、断裂和地形方面测年资料的不足。如在松辽盆地;合作一方面是指学科交叉的真正的合作,包括构造地质学、地层学、沉积学、地球物理学和数字模拟。正如 Gupta^[1]所谈到的“数字模拟需要与以野外为基础的地层学家相互作用,询问什么样的观察能在野外形成,能够被数字模型潜在地追踪。地层学家在野外调研时需要问自己,在给定的野外研究时间内能在野外用数字模型定量地测量些什么”。人们需要对地层对外力驱动的野外关键证据进行识别、测量和定量制图。特别需要仔细考虑什么样的沉积学和地层学特征将成为测量地层响应与不同驱动函数的标准,而且是否它们的物理放大将变得在野外可以识别或具有模型化的能力。合作的另一个方面是野外和(室内)地下研究的交叉合作。只有这样才可能有完整的数据,3D 地震数据系列的分析将成为裂谷盆地活动和过程研究的主要方面。

参考文献:

- [1] Gupta S, Cowie P. Processes and controls in the stratigraphic development of extensional of extensional basins [J]. *Basin Research*, 2000, **12** (3/4): 185-194.
- [2] Watterson J. Fault dimension, displacements and growth [J]. *Pure & Appl Geoph*, 1986, **124**: 365-373.

- [3] Walsh J J, Waterson J. Distribution of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface [J]. *J Struct Geol*, 1987, **10**: 1039-1046.
- [4] Marrett R, Allmendinger R W. Estimates of strain due to brittle faulting: sampling of fault populations [J]. *J Struct Geol*, 1991, **13**: 137-149.
- [5] Cowie P A, Scholz C H. Physical explanation for displacement-length relationship for fault using a post-yield fracture mechanics model [J]. *J Struct Geol*, 1992, **14**: 1133-1148.
- [6] Dawers N H, Anders M H, Scholz C H. Growth of normal faults: displacement-length scaling [J]. *Geology*, 1993, **21**: 1107-1110.
- [7] Cartwright J A, Trudgill B D, Mansfield C S. Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Graben of S. E. Utah [J]. *J Struct Geol*, 1995, **17**: 1319-1326.
- [8] Dawers & Anders M H. Displacement length scaling and fault linkage [J]. *J Struct Geol*, 1995, **17**: 607-614.
- [9] Gillespie R L, Walsh J J, Waterson J. Limitations of dimension and displacement data from single faults and the consequences for data analysis and interpretation [J]. *J Struct Geol*, 1992, **25**: 795-798.
- [10] Jackson J A. Active normal faulting and crustal extension in continental extensional tectonics [M]. London: Geol Soc, 1987, **28** (Spec.): 1-17.
- [11] DePolo C M, Clark D G, Slemmons D B, et al. Historical surface faulting in the basin and range province, western North America: implications for fault segmentation [J]. *J Struct Geol*, 1991, **13**: 123-136.
- [12] Machette M N, Personius S F, Nelson A R, et al. The Wasatch fault zone, Utah—segmentation and history of Holocene earthquakes [J]. *J Struct Geol*, 1991, **13**: 137-149.
- [13] Peacock D C P, Sanderson D J. Displacements, segment linkage and relay ramp in normal fault zone [J]. *J Struct Geol*, 1991, **13**: 721-733.
- [14] Gawthope R L, Leeder M R. Tectonic sedimentary evolution of active extensional basins [J]. *Basin Research*, 2000, **12** (3/4): 195-218.
- [15] Jackson J A, White N J. Normal faulting in the upper continental crust: observations from regions of active extension [J]. *J Struct Geol*, 1989, **11**: 15-36.
- [16] Cowie P A, Shipton Z K. Fault tip displacement gradient and process zone dimension [J]. *J Struct Geol*, 1998, **20**: 983-997.
- [17] Allmendinger R W. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds [J]. *Tectonics*, 1998, **17**: 640-656.
- [18] Hardy S, McClay K. Kinematic modeling of extensional forced folding [J]. *J Struct Geol*, 1999, **21**: 695-720.
- [19] Schlische R W. Half graben basin filling models: new constraints on continental extensional basin development [J]. *Basin Research*, 1991, **3**: 123-141.
- [20] Contreras J, Scholz C H, King G C P. A model of rift basin evolution constrained by first-order stratigraphic observations [J]. *J Geophys Res*, 1997, **B102**: 7673-7690.
- [21] Leeder M R, Jackson J A. The interaction between normal faulting and drainage in active extensional basin stratigraphy [J]. *Basin Research*, 1993, **5**: 79-102.
- [22] Jorgenson-Harbor D. Landscape evolution at the margin of basin and range [J]. *Geology*, 1997, **25**: 1111-1114.
- [23] Allen P A, Densmore A L. Sediment flux from an uplifting fault block [J]. *Basin Research*, 2000, **12**: 367-380.
- [24] Marr J G, Swenson J B, Paola C, et al. A two diffusion model of fluvial stratigraphy in closed depositional basin [J]. *Basin Research*, 2000, **12**: 381-398.
- [25] Paola C. Quantitative models of sedimentary basin filling [J]. *Sedimentology*, 1992, **47**: 121-178.