

文章编号: 0253-9985(2007)05-0634-07

伸展盆地的结构形态及其主控动力学因素

漆家福^{1,2}, 杨 桥²

(1 中国石油大学 油气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249; 2 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

摘要: 岩石圈伸展变形可以以不同方式发生, 导致伸展盆地表现出不同特征的结构形态。根据盆地横剖面上的变形特征, 伸展盆地的结构形态可以分为“拗陷”“拗断”“断陷”和“断拗”4种基本类型。岩石圈的伸展变形机制包括上地幔的热作用、岩石圈下部的韧性伸展和岩石圈上部(可能只是地壳浅层)的正断层作用。“拗陷”是地壳尺度的均匀伸展变形; 而“拗断”和“断拗”都是地壳均匀挠曲变形和非均匀断裂变形叠加的产物。“拗断”和“断拗”这两种结构形态的伸展盆地的沉积充填部分是受伸展断层作用的影响, 部分是伸展地壳挠曲变形的响应。虽然各种动力学因素同时存在, 但是不同区域、不同时期各动力因素所占比例有所差异, 导致伸展盆地在不同时期或同一时期不同区域的盆地结构形态有所差异。

关键词: 断陷; 拗陷; 盆地结构; 动力学; 伸展盆地

中图分类号: TE111.1 **文献标识码:** A

Structural styles of extensional basins and their main controlling factors of dynamics

Q i Jiafu^{1,2}, Y ang Q iao²

(1 Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism in Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing

102200 China; 2 School of Resources and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102200 China)

Abstract The extensional deformation of lithosphere can occur by different patterns and results in different structures of extensional basins. According to the deformational characteristics on the cross-section of extensional basins, they can be divided into the following four types: “sag basin”, “faulted-sag basin”, “fault-downthrown basin”, and “sag fault-downthrown basin”. The extensional deformation mechanisms of lithosphere include thermal action of the upper mantle, ductile extension of the lower lithosphere, and normal faulting of the upper lithosphere (perhaps it is just shallow crust). The “sag basin” is formed by homogeneous extensional deformation at crust scale, while the “fault-downthrow basin” is shaped by faulting of nonhomogeneous extensional deformation at crust scale. Both “faulted-sag basin” and “sag fault-downthrow basin” are the result of superposition of homogeneous flexural deformation and non-homogeneous faulting deformation at crust scale, and their subsidence is controlled partly by extensional faulting and partly by flexural deformation of the extending crust. Although all of the mechanisms work simultaneously, the contribution of each dynamic mechanism varies in different parts of basin and at different periods, causing differences in extensional basin structures at different periods and in different parts of the basin at the same period.

Key words fault basin; sag basin; basin structure; dynamics; extensional basin

伸展盆地(extensional basin)是区域引张应力场作用使岩石圈发生伸展变形形成的沉积盆地。伸展盆地的结构形态可以用横剖面上区域尺度的

构造变形样式来描述。剖面构造样式不仅反映了盆地沉积层序的基本变形特征, 也包含有构造运动学和动力学信息^[1~6]。本文讨论伸展盆地的结

收稿日期: 2007-07-13

第一作者简介: 漆家福(1957—), 男, 教授、博士生导师, 含油气盆地分析与油区构造解析

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB202301); 国家自然科学基金项目(40772085)

构形态及其主控动力学因素, 并以渤海湾盆地黄骅拗陷南区为例分析伸展盆地结构形态在盆地演化过程中的变化。

1 伸展盆地的结构形态

依据垂直于盆地总体走向的横剖面上的构造变形样式, 将伸展盆地的结构形态分为“拗陷”“拗断”“断陷”和“断拗”4种基本类型。本文使用“拗陷”来区分盆地构造单元划分时经常使用的“拗陷”一词, 并强调它是岩石圈构造变形的一种方式。所谓“拗陷”是指盆地为碟状的宽缓向斜构造, 盆地任何边界都不受断层的限制, 盆地内部也基本不发育对盆地沉降-沉积作用有影响的基底

断层。所谓“断陷”是指盆地至少一侧边界受基底断层限制的地堑、半地堑或复式地堑、半地堑构造, 盆地内部也常常发育基底断层, 断裂活动引起的断块升降对盆地的沉降-沉积作用有显著影响。伸展盆地的剖面结构形态还可以表现为“拗断”或“断拗”特征。所谓“拗断”是指在拗陷基础上发生断裂, 盆地总体上为碟状的宽缓向斜构造, 盆地边界不受断层限制, 拗陷仍然是控制盆地沉降-沉积作用的主要因素, 但是盆地内部发育有若干对盆地沉降-沉积作用有一定影响的基底断层。“断拗”则是指在断陷基础上发生拗曲, 盆地至少一侧边界受基底断层限制, 并对盆地的沉降-沉积作用有显著影响, 但是盆地的沉降-沉积中心并不沿基底断层分布。图 1 简要地表示了几种典型的伸展

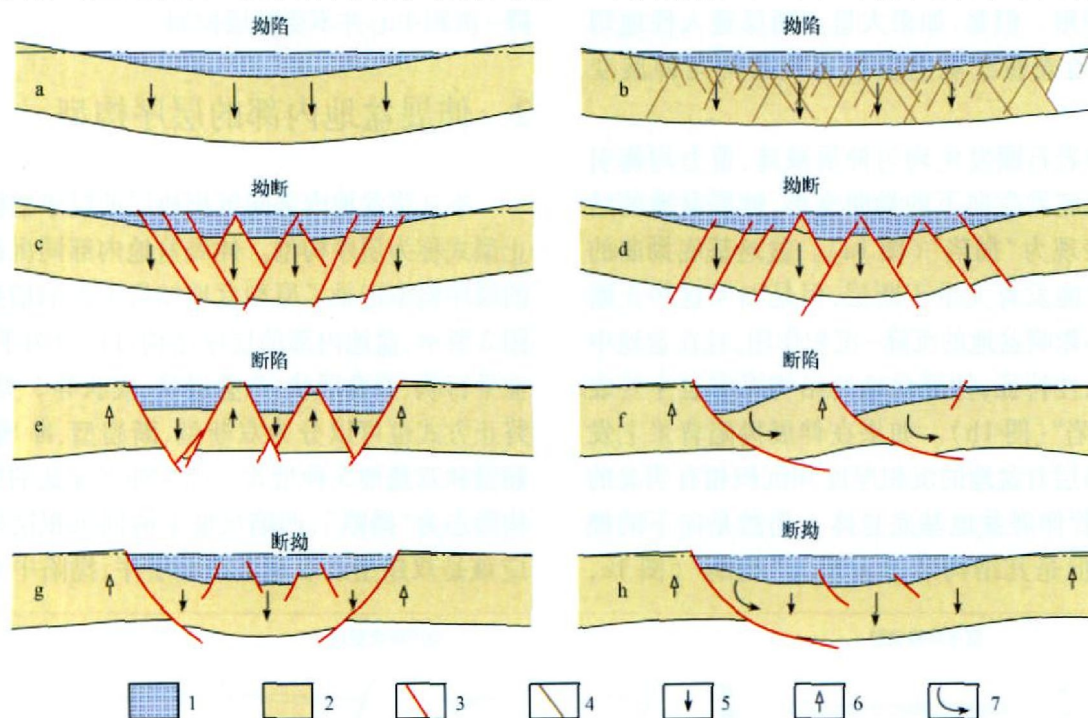


图 1 伸展盆地结构模型

Fig. 1 Structural models of an extensional basin

(向下的箭头表示盆地基底面沉降; 向上的空心箭头表示盆地基底面上升; 弯曲的箭头表示断块掀斜旋转)

1. 盆地沉积盖层; 2. 盆地基底; 3. 主干正断层; 4. 透入性小位移正断层; 5. 盆地基底沉降; 6. 盆地基底均衡上升; 7. 盆地基底断块旋转
a. 拗陷, 岩石圈韧性伸展变形, 基本不发育断层; b. 拗陷, 发育大量小位移断层, 但是断层并不控制沉降-沉积作用; c. 拗断, 拗陷基础上发育相向倾斜的平面式正断层, 断层对沉积厚度有影响, 但是一般不控制沉积相分布; d. 拗断, 拗陷基础上发育背向倾斜的平面式正断层, 断层对沉积厚度有影响, 但是一般不控制沉积相分布; e. 断陷, 相向倾斜的正断层上盘沉降, 形成地堑, 下盘相对均衡上升使地堑肩部遭受剥蚀; f. 断陷, 同向倾斜的平面式或铲式正断层组构成多米诺式构造, 主干正断层上盘掀斜下降形成半地堑, 下盘相对均衡上升使半地堑主干断层一侧的肩部遭受剥蚀, 另一侧则形成宽缓的构造斜坡; g. 断拗, 盆地两侧边界由正断层限制, 相向倾斜的正断层上盘明显发生拗陷, 下盘相对均衡上升使地堑肩部遭受剥蚀; h. 断拗, 盆地一侧边界由正断层限制, 正断层上盘明显发生拗陷, 下盘相对均衡上升使地堑肩部遭受剥蚀

在盆地构造单元的划分中, 习惯将盆地内部的二级负向构造单元称为“拗陷”, 三级负向构造单元称为“凹陷”, 更次级的负向构造单元则常称为“次凹”“洼陷”等。它们对应不同级别的正向构造单元, 分别称为“隆起”“凸起”“次凸”等等。这些术语在我国几乎已是约定俗成, 不应该再用“拗陷”一词表达盆地的结构形态特征。

盆地结构形态。“断陷”应该有明显的主边界正断层;“拗陷”则必须是盆地基底面的向下拗曲,且这种拗曲不是断层上盘下降引起的。伸展盆地的边缘、盆地内部发育的伸展断层可以构成不同的组合样式,因此图 1 尚不能概括伸展盆地结构形态的复杂性。

伸展“拗陷”(extensional sag)和伸展“断陷”(extensional fault-basin)是岩石圈在区域引张环境中发生伸展变形的两种极端方式。前者可以是地壳均匀伸展变形的结果;后者则完全由区域正断层控制。地壳伸展变形主要由区域正断层完成。均匀与非均匀也是相对的,与观测尺度有关。在宏观上,地壳的韧性伸展减薄可以视为均匀的伸展变形;而区域性正断层引起的伸展则是非均匀的伸展变形。但是,如果大量正断层透入性地切割地壳,地壳在宏观上也就表现出均匀伸展变形。

如果岩石圈发生均匀伸展减薄,重力均衡引起盆地基底发生向下的拗曲变形,伸展盆地的结构形态表现为“拗陷”(图 1a)。盆地基底拗曲的同时也可能发育大量正断层,但是如果这些正断层基本不影响盆地的沉降-沉积作用,且在盆地中具有透入性特征,伸展盆地的结构形态也主要表现为“拗陷”(图 1b)。如果在伸展拗陷背景上发生的正断层对盆地的沉积厚度和沉积相有明显的影响,尽管伸展盆地基底总体上仍然是向下的拗曲变形,但是其结构形态表现为“拗断”(图 1c

d)。如果岩石圈伸展变形主要为区域性正断层,正断层上、下盘的差异升降导致发育伸展盆地,盆地结构形态则表现为“断陷”(图 1e f)。“断陷”的结构形态受正断层的几何学、运动学特征影响。如图 1e 是相向倾斜正断层上盘断块下降形成的地堑式“断陷”;图 1f 是旋转平面式正断层或铲式正断层上盘断块旋转下降形成的半地堑式“断陷”,也可以是坡坪式正断层上盘滚动变形形成的复杂半地堑式“断陷”。如果盆地两侧或一侧边界受正断层限制,但是边界正断层上盘断块又有明显的拗陷变形,盆地结构形态总体上表现为“断拗”(图 1g f)。伸展断拗受伸展断裂系统约束,伸展断裂系统中的正断层对沉积厚度、沉积相有一定的影响,但是盆地整体上表现为拗陷特征,沉降-沉积中心并不受断层控制。

2 伸展盆地内部的层序构型

本文将盆地内部同沉积地层的层序结构及终止型式称为层序构型。伸展盆地内部同沉积地层的层序构型记录了原型盆地结构形态的信息。如图 2 所示,盆地内部的层序结构可以分为平行状、亚平行状、凹叠层状、凸叠层状、楔状等 5 类,层序终止方式也可以分为双断型、断超型、断翘型、双超型和双翘型 5 种型式。如果伸展盆地的原始结构形态为“拗陷”,凹陷尺度上的同沉积层序构型应该是双超型或双翘型凹叠层序,拗陷中央部位

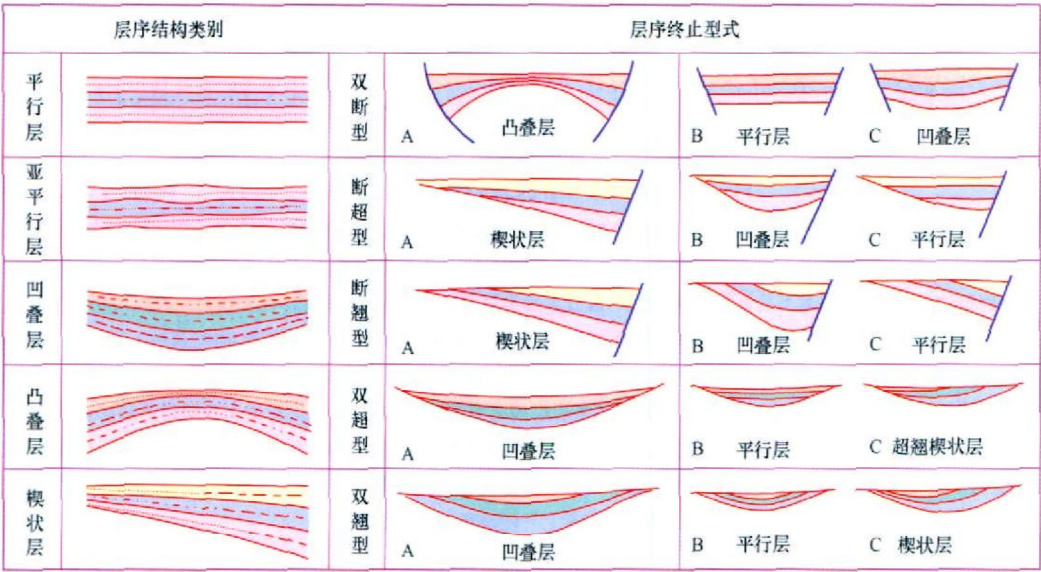


图 2 伸展盆地层序构型示意图

Fig. 2 Sketch map showing the sequence configuration of an extensional basin

可能为平行、亚平行层序, 表明盆地沉积充填不受断层控制, 盆地边界不发育断层。如果伸展盆地的原始结构形态为“断陷”, 半地堑式断陷在凹陷尺度上的同沉积层序构型表现为断超型、断翘型的楔状层序, 地堑式断陷则表现为双断型平行、亚平行或凸叠层序, 表明盆地一侧或两侧以同沉积断层为边界, 断层上盘断块发生同沉积的掀斜运动并接受沉积充填。如果伸展盆地的原始结构形态为“拗断”, 其凹陷尺度上的同沉积层序构型应该总体上表现为双超型或双翘型平行、亚平行、凹叠层序, 同生断层两侧地层原始倾斜基本一致而厚度有差异。如果伸展盆地的原始结构形态为“断拗”, 其凹陷尺度上的同沉积层序构型应该总体上表现为断超型或断翘型凹叠层序, 边界断层对沉积厚度有明显影响, 限制了同沉积地层向凹陷肩部超覆, 凹陷内部同沉积地层厚度轴线与边界断层大致平行, 但并不位于边界断层旁侧。

理论上, 正断层上盘下降形成断陷盆地的同时, 其下盘一定会有不同程度的均衡上升^[7, 8]。因此, 断陷盆地在主边界断层下盘一侧的盆地肩部应该是剥蚀区域, 或地层反向倾斜。然而, 伸展盆地的原始结构形态可能因后期构造变形而发生变化, 原始盆地同沉积层序构型也同样受到不同程度的改造。凹陷尺度上的同沉积层序构型可能仍然保留有指示原型盆地结构形态特征的信息, 同时也叠加了后期构造变形的信息, 残留地层的层序构型必然存在可能的多种解释。如图 2 所示的断超型、断翘型凹叠层序构型, 可能意味着原型盆地结构形态为“断拗”或“拗断”, 也可以是“拗陷”被后期断层切割所致。双断型的平行、亚平行层序构型, 可能意味着原型盆地结构形态为“断陷”, 也可以是“拗陷”“拗断”基础上断层上升盘被强烈剥蚀所致。超翘型、双翘型楔状层序构型的原型盆地结构形态可能是“拗陷”, 也可能是“断陷”, 盆地反转造成的强烈剥蚀可能使原型盆地的边界断层与残留层序分离开来。因此, 当原始盆地层序及终止关系受后期构造变形和剥蚀作用改造后, 其层序结构及终止型式还不能作为判断原型盆地结构形态的位移依据, 还要根据沉积相、沉积中心的迁移与断层活动的关系等来加以综合分析。断陷盆地的边界断层和内部主干断层是控制盆地沉降的主要因素, 也必定影响沉积充填过程, 对沉积相的分布也有明显的影响。如果残留地层

的层序构型中的“边界断层”对沉积相分布没有影响, 盆地内部的主干断层甚至对沉积厚度也没有影响, 这些断层很可能是后期构造活动形成的, 它们与盆地原始层序构型的叠加造成了对原始盆地结构形态推断的难度。

3 伸展盆地结构形态的主控因素

从岩石圈尺度上看, 伸展盆地只是地壳浅表层的构造变形, 但是它是整个地壳甚至岩石圈尺度伸展变形的结果。因此, 伸展盆地的结构形态与岩石圈伸展变形方式有密切关系。岩石圈伸展变形可以使地壳浅表层发生断陷, 也可以使地壳浅表层发生拗陷。如果岩石圈主要表现为韧性变形, 地壳浅表层的沉积盆地以拗陷为主; 如果岩石圈主要表现为脆性破裂, 断块的差异升降导致地壳浅表层发育以断陷为主的沉积盆地。

岩石圈的变形行为受多种因素影响, 包括岩石圈应力场状态、岩石圈物质组成、地温场、变形速率和流体溶液等等。一般来说, 岩石圈物质具有成层性, 其流变学总体特征从地壳表层向深部逐渐由脆性向韧性过渡, 壳内还存在一些近水平的韧性层。因此, 在区域引张应力场作用下, 岩石圈深层总体上是以韧性伸展变形为主; 浅表层可能表现出脆性伸展变形, 发育正断层。深层岩石圈的韧性伸展变形是相对均匀的; 地壳浅表层的脆性伸展变形也可以是相对均匀的, 而多数情况下都是非均匀的, 甚至是极不均匀的。如果地壳浅表层发育的正断层数量较多、尺度相近、分布均匀、单条断层位移较小, 地壳就会表现出相对均匀的伸展变形宏观特征; 如果地壳浅表层发育的正断层分布不均匀、尺度和断距差异较大, 地壳就会表现出不均匀的伸展变形特征。地壳均匀伸展变形形成的沉积盆地一般表现为“拗陷”; 而非均匀或极不均匀伸展变形形成的沉积盆地可能表现为“断陷”。然而正断层两盘不能通过断层面传递引张应力, 浅表层地壳的正断层活动只能依靠深层岩石圈韧性伸展的拖曳或断层上盘断块自身的重力作用来驱动。区域性岩石圈的伸展变形只可能是由深及浅的, 即深层岩石圈的韧性伸展拖曳浅层地壳发生正断层活动。深层岩石圈的韧性伸展变形引起中、下地壳减薄和岩石圈地幔减薄, 重力均衡作用导致地幔上隆和地壳浅表层拗陷^[9]。当

然,如果地幔上隆幅度较大,地壳表层也可以表现为隆升而不是拗陷。地温通过影响岩石圈的流变学特征来影响其变形行为。地温增高,岩石圈的韧性增强。变形速率也影响岩石圈的变形行为。伸展速率较慢,岩石圈的伸展变形也相对均匀,伸展盆地的形态可能表现为“拗陷”;反之,岩石圈伸展速率较快,伸展盆地的形态则可能表现为“断陷”。

影响岩石圈变形行为的各种因素是相互作用的,浅表层地壳变形又与深层岩石圈变形有密切关系,因此伸展盆地的结构形态受多种因素控制。均匀的岩石圈伸展变形,重力均衡引起地表的沉降或隆升也是相对均匀的,沉积盆地则表现为“拗陷”结构形态。正断层上盘断块下降的同时,重力均衡作用下使下盘断块相应上升,断层上盘发育的沉积盆地表现为“断陷”结构形态^[7-8]。但是,浅表层地壳正断层的伸展变形是与深层地壳韧性伸

展变形同步发生的,因此伸展盆地的结构形态会同时受深层、浅表层地壳变形的影响。单就变形而论,如果浅表层地壳发生相对均匀的伸展变形,且深层岩石圈的韧性伸展是引起地表均衡沉降,则沉积盆地的形态表现为“拗陷”或“拗断”;如果浅表层地壳是非均匀伸展变形,即使深层岩石圈的韧性伸展是引起地表均衡沉降,则沉积盆地的形态也可能表现为“断拗”;只有在浅表层是非均匀伸展变形、深层岩石圈的韧性伸展未能引起地表均衡沉降或引起地表均衡隆升时,沉积盆地的形态才可能表现为真正的“断陷”结构特征。虽然伸展盆地是在岩石圈伸展变形中形成的,但直接驱动盆地沉降的还主要是重力均衡作用。岩石圈伸展变形、热作用及地表地质过程等都可能破坏岩石圈的均衡状态,重力作用则促使岩石圈达到新的均衡。也正因为如此,伸展盆地的结构形态

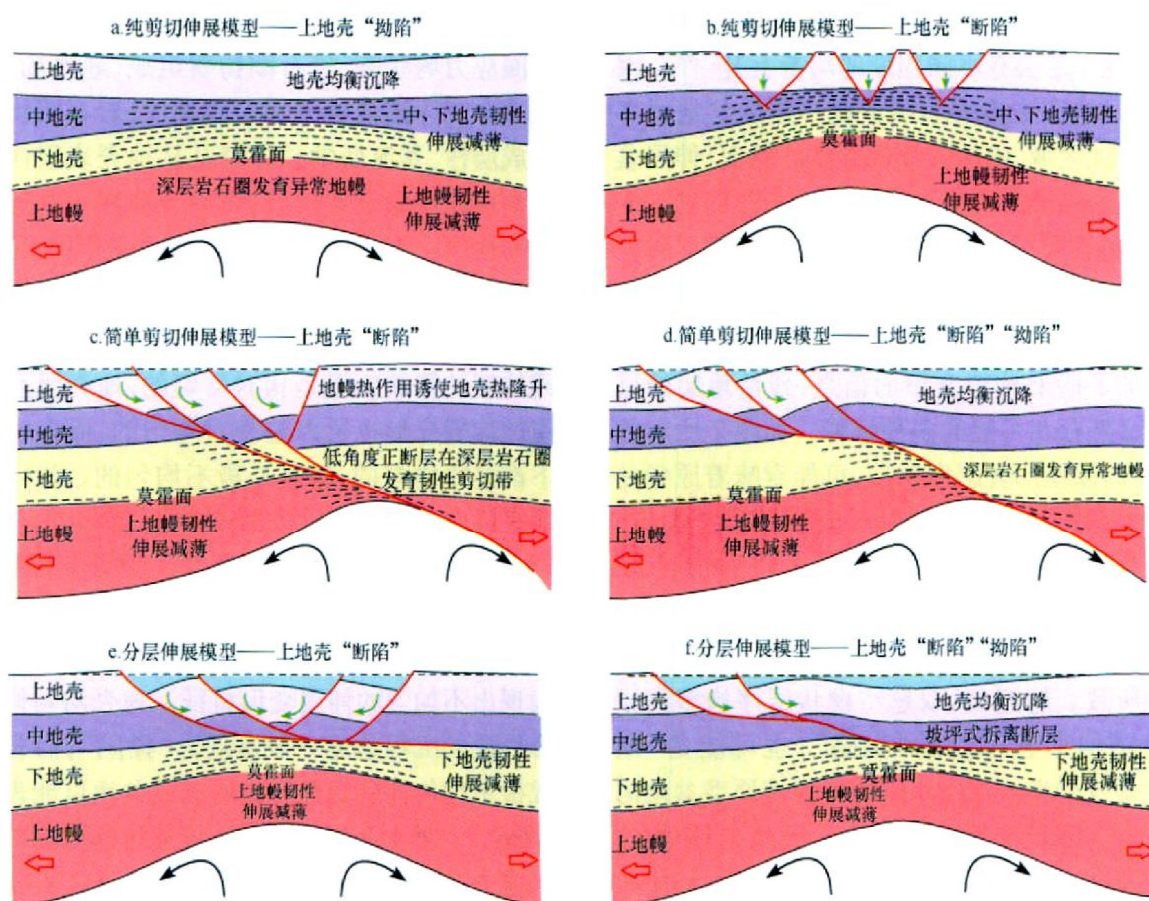


图 3 几种典型的岩石圈伸展模型

Fig. 3 Several typical extensional models of lithosphere

a. 纯剪切伸展模型,异常地幔隆起可能诱导上地壳沉降形成伸展拗陷; b. 纯剪切伸展模型,上地壳发育正断层控制的伸展断陷; c. 简单剪切伸展模型^[10],低角度正断层上盘发育半地堑断陷; d. 简单剪切伸展模型,低角度正断层上盘发育半地堑断陷,深层岩石圈隆起可能引起上地壳沉降形成拗陷; e, f. 分层伸展模型^[11],拆离断层上、下的伸展变形方式可以不同,位置也可以不同,上地壳可以发育断陷,也可以发育拗陷

会在岩石圈均衡状态不断破坏和重建中发生变化。

岩石圈伸展变形方式是多种多样的, 可能存在不同的模型^[10-11], 流行的有纯剪切伸展变形模型、简单剪切伸展模型和分层伸展模型(图 3), 无论那种模型都可能引起上地壳发生“断陷”或“拗陷”。“断陷”主要是上地壳在伸展变形中发育区域性正断层, 正断层上盘下降形成伸展盆地。“拗陷”的原因可能有两种: 一种是深层岩石圈发育有高密度异常地幔, 均衡作用使上地壳发生拗曲变形形成拗陷; 另一种原因则可能是拆离断层产状为坡坪式, 深层断坡对应的上地壳发生拗陷。地幔热作用对伸展盆地结构形态的影响是不可忽视的^[12]。岩石圈伸展减薄引起的热作用可以使地壳隆升, 也可以由于异常地幔的下拉而使地壳拗陷。加热的岩石圈在逐渐冷却过程中也会改变地壳的均衡状态, 使地壳发生拗陷沉降。伸展盆地的结构形态是复杂的动力学过程作用于复杂结构的岩石圈的综合结果。随着岩石圈伸展构造递进变形或构造演化的不同阶段、期次岩石圈动力学和结构特征的变化, 导致盆地结构形态也相应发生变化。即使是同一时期, 不同区域的岩石圈动力学和结构特征也会有所差异, 因而盆地的结构形态也会有所差异。

正断层活动直接控制盆地沉降作用是界定伸展断陷盆地的主要依据。一般来说, 断层的延伸长度与断层位移成正比^[13]。区域性正断层的位移导致上盘下盘形成断陷盆地, 作为断陷边界的正断层所能控制的断陷宽度与断层产状、切割深度(滑脱深度)和位移也有密切关系^[14-15]。在图 4 所示的理论模型中, 正断层位移诱导上盘断块发生反向剪切变形形成伸展盆地, 反向剪切带的最大宽度受拆离断层面变为水平的位置所控制(图 4 中的 S)。因此, 伸展半地堑断陷的结构形态、宽度受边界断层产状和滑脱深度的影响^[16-17]。如果边界断层产状(图 4 中的 BF)和拆离断层深度(图 4 中的 h)保持不变, 在补偿沉积条件下边界正断层所能控制的断陷宽度应该保持不变。在地壳渐进伸展变形过程中, 伸展量的递增可以导致伸展盆地总体宽度随之增大, 但是同沉积地层覆盖的宽度并不能增大, 早期充填的沉积层在断陷斜坡上剥露出来(图 4a)形成断翘型楔状或凹叠层序构

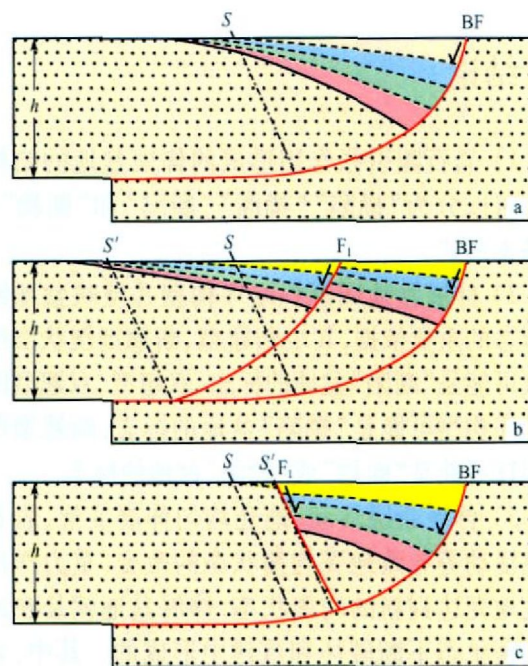


图 4 半地堑断陷的理论模型

Fig. 4 Theoretical models of a half-graben fault basin

- a. 简单半地堑断陷; b. 内部发育同向断层的半地堑断陷;
c. 斜坡发育反向断层的半地堑断陷, 显示不对称地堑特征
BF: 边界正断层; F₁: 边界断层上盘的次级正断层; S: 边界断层控制的上盘断块的反向剪切变形带位置, 与拆离断层产状变为近水平位置对应; S': 由于边界断层上盘发育调节断层导致 S 位置变化后的位置

型^[18]。如果一个伸展盆地的宽度远大于其边界断层可能的滑脱深度, 这一盆地的沉降-沉积作用显然不只是由边界断层控制, 可能叠加了岩石圈热活动等因素引起的拗陷, 盆地结构也必然会表现为“断拗”或“拗断”的结构形态特征。如果边界断层上盘发育同向正断层, 这些断层控制的断陷叠加在边界断层控制的断陷之上, 可能使盆地宽度增大(图 4b); 反之, 如果边界断层上盘在其控制的断陷沉降区域之内发育反向正断层, 这些断层下盘的隆升叠加在边界断层控制的断陷斜坡上, 可能使断陷宽度减小(图 4c)。

总之, 伸展盆地结构形态主要表现在边界正断层与沉积中心的关系上, 但受多种因素影响, 归根到底还是受盆地形成和演化过程中的动力学机制控制。而不同区域、不同时期控制盆地形成和演化的各种动力因素所占比例有所差异, 导致在不同时期或同一时期的不同区域所发育的伸展盆地的结构形态有所差异。

4 结论

1) 岩石圈引张作用形成的伸展盆地的结构形态可以分为“拗陷”“拗断”“断陷”和“断拗”4 种基本形式。

2) 伸展盆地同沉积层序构型是反映盆地结构形态的重要依据, 其中断超型、断翘型楔状层序构型可能是“断陷”盆地的标志, 双超型、双翘型凹叠层序构型可能是“拗陷”盆地的标志, 断超型凹叠层序可能是“断拗”或“拗陷”盆地的标志。

3) 伸展断层活动、地壳均匀伸展变形、岩石圈热活动等导致地壳均衡状态的改变, 重力作用又使地壳达到新的均衡状态, 伸展盆地就是在地壳均衡状态不断破坏和重建中形成的。其中, 岩石圈热活动、地壳均匀伸展减薄后的均衡作用是控制地表“拗陷”的主要因素; 浅层地壳的区域性伸展断层活动是控制地表“断陷”的主要因素。不同区域、不同时期各动力因素所占比例有所差异, 导致在不同时期或同一时期的不同区域所发育的伸展盆地的结构形态有所差异。

致谢: 本文第一作者曾于 1987—1990 年间师从陈发景先生学习盆地分析和石油地质。陈发景先生渊博的学识远非 3 年可以学到手的, 他严谨的学风却一直在影响作者对盆地构造理论的孜孜探寻。本文是关于伸展盆地理论研究的一篇心得, 感谢陈发景先生在成文过程中给予的启发和指点。值陈发景先生 80 寿辰之际, 以此文献给先生, 并祝他寿比南山、永葆学术青春。

参 考 文 献

- 1 Jackson J A. Active normal faulting and crustal extension[A]. In: Coward M P, Dewey J F, Hancock P L, eds. Continental extensional tectonics[C]. Geological Society of London Special Publication, 1987, 28: 3–17
- 2 王胜利, 卢华复, 李刚, 等. 南黄海盆地北部凹陷古近纪伸展断层转折褶皱作用[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 495–503
- 3 何明喜, 杜建波, 古哲, 等. 下扬子北缘前陆盆地构造变形样式[J]. 石油实验地质, 2006, 28(4): 322–324, 329
- 4 Schlische R W. Halfgraben basin filling models: new constraints on continental extensional basin development[J]. Basin Research, 1991, 3: 123–141
- 5 Morley C K. Patterns of displacement along large normal faults: implications for basin evolution and fault propagation based on examples from East Africa[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83: 613–634
- 6 漆家福, 王德仁, 陈书平, 等. 兰聊断层的几何学、运动学特征对东濮凹陷构造样式的影响[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 451–459
- 7 Jackson J A, McKenzie D P. The geometrical evolution of normal fault systems[J]. Journal of Structural Geology, 1983, 5: 471–482
- 8 Wernicke B P, Axen G J. On the role of isostasy in the evolution of normal fault systems[J]. Geology, 1988, 16: 848–851
- 9 Kamer G D, Driscoll N W, Barker D H N. Synrift subsidence across the West African continental margin: the role of lower plate ductile extension[A]. In: Arthur T J, Macgregor D S, Cameron N R, eds. Petroleum geology of Africa: new themes and developing technologies[C]. Geological Society of London Special Publication, 2003, 207: 105–125
- 10 Wernicke B, Burchfiel B C. Modes of extensional tectonics[J]. Journal of Structural Geology, 1982, 16: 845–851
- 11 Lister G S, Etheridge M A, Symonds P A. Detachment faulting and the evolution of passive continental margins[J]. Geology, 1986, 14: 246–250
- 12 朱建辉. 中国东部构造—热体制与断陷盆地多期性迁移特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 367–370
- 13 Walsh J J, Watterson J. Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults[J]. Journal of Structural Geology, 1988, 10: 239–247
- 14 Gawthorpe R L, Sharp I, Underhill J R, et al. Linked sequence stratigraphic and structural evolution of propagating normal faults[J]. Geology, 1997, 25: 795–798
- 15 Contreras J, Scholz C H, King G C P. A general model of rift basin evolution: constraints of first order stratigraphic observations[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 7673–7690
- 16 Gibson J R, Walsh J J, Watterson J M. Modelling of bed contours and cross-sections adjacent to planar normal faults[J]. Journal of Structural Geology, 1989, 11: 317–328
- 17 Withjack M O, Schlische R W. Geometric and experimental model of extensional fault bend folds[J]. Geological Society of London Special Publication, 2006, 253: 285–305
- 18 漆家福, 杨桥, 童亨茂. 构造因素对半地堑盆地层序充填的影响[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(6): 603–608

(编辑 李 军)