

文章编号: 1006-6616 (2000) 01-0022-11

# 用物理模拟研究地幔上隆与大陆裂陷伸展

周永胜, 李建国, 王绳祖

(中国地震局地质研究所构造物理开放实验室, 北京 100029)

**摘要:** 通过脆延性双层模型, 在满足相似要求的前提下, 模拟了三种边界条件下的上隆与伸展。模拟结果表明: 两侧边界固定时, 上隆能产生拱张断裂, 然而它引起的侧向分流比较小, 基本不能形成伸展; 存在半开放或开放边界时, 可以产生大规模的伸展, 但伸展主要沿上隆早期产生的张裂进行, 显然, 上隆产生的张裂为后续伸展奠定了基础, 同时上隆加速了延性层向开放边界方向流动, 促进了伸展; 另外, 在上隆—伸展过程中普遍存在延性层被动上隆。这些实验结果说明, 地幔主动上隆引起伸展是有条件的, 需要边界条件的配合; 被动上隆是普遍存在的, 它是重力均衡作用的必然结果。

**关键词:** 上隆; 伸展; 物理模拟; 边界条件

**中图分类号:** P542.2, P554

**文献标识码:** A

## 0 引言

在大陆裂陷盆地动力学研究中, 人们习惯把裂陷盆地划分为主动裂谷 (active rift) 和被动裂谷 (passive rift), 而且主动裂谷模型普遍被用来解释盆地成因。近年来, 人们逐渐认识到“主动”和“被动”模型是理想化了的两个端元模型。大陆内部实际裂陷盆地具有许多复杂性和多样性, 因此, 对地幔主动上隆能否引起岩石圈大规模伸展提出了许多争论。例如: Ziegler<sup>[1]</sup>认为地幔上隆不是裂谷形成的主要动力, 地幔对流对岩石圈底部和地壳的摩擦牵引力, 以及岩石圈下部和软流圈部分熔融是岩石圈伸展和减薄的主要原因; 王绳祖<sup>[2]</sup>强调地幔主动上隆只能发生在地幔对流的上升流顶部, 它不是岩石圈伸展的主要机制, 剪切网络引起的拉张区以及网络系统中因泄流伸展而产生的张性构造为地幔被动上隆提供了有利条件, 在重力均衡作用下可以诱发地幔被动上隆, 甚至导致岩浆和火山作用, 并且促进岩石圈伸展裂陷。显然, 这里的地幔主动上隆模型被赋予新的含义。本文通过物理模拟研究, 就这一问题提出一些新的见解。

收稿日期: 1999-04-27

基金项目: 地震科学联合基金 (196065) 及中国地震局构造物理开放实验室基金项目; 中国地震局地质研究所论著, 编号: 99B0023

作者简介: 周永胜 (1969—), 男, 博士, 中国地震局地质研究所助理研究员, 从事高温高压实验和物理模拟实验研究。

# 1 模型设计和相似性

## 1.1 模型设计

有关地幔上隆的模拟实验比较少，主要是在离心机中进行<sup>[3~5]</sup>，在常规重力作用下目前还没有。本模型强调“地幔”上隆引起延性下层塑性流动牵引和控制脆性上层拉张伸展，因此，把岩石圈多层构造模型简化为两层，即脆性上层和延性下层。延性层采用粘度可调的塑化松香，脆性层采用强度极小的松散玉米粉，并且对有关参数进行了测定<sup>①</sup>。在模型中，采用水囊上隆实现上隆驱动力（图1），模型底部为完整玻璃板，中间设置可隆起的水囊，通过导水管向水囊内注水达到上隆目的。调节导水管上的开关，保持单位时间流入水囊内的水滴数相同，这样就可以控制水流量大小和速率。根据实验需要，模型两端采用三种边界：固定边界、半开放边界及模型一端边界固定，中部设置上隆带，另一端边界开放。前两种模型采用准“平面”模型，后一种采用准“剖面”模型，用它研究断裂空间分布和产状等，与“平面”模型互相补充。在模型表面垂直于隆起带的方向放置一系列标志点，定期测量这些标志点的位置，研究上隆与伸展的关系，其中“平面”模型以隆起带中心线位置为标志点的坐标零点，“剖面”模型以模型固定边界位置为标志点的坐标零点。



图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental apparatus

S. 上隆水囊；B. 脆性层；D. 延性层；箭头所指方向为上隆分流方向

## 1.2 模型相似性

本模型实验强调延性下层流动对脆性上层的控制作用，因此，模型相似性首先要考虑延性下层的流动性，可参考岩石圈多层构造和塑性流动网络的模拟研究<sup>[6]</sup>和下层控制上层伸展的模拟实验<sup>①</sup>。在岩石圈变形属性判别中，当松弛期倍数  $\Omega_r \geq 2.3$  时，岩石圈可作为粘性流动处理<sup>[7]</sup>。在20℃和配比  $P/R=1/4 \sim 1/16$  的条件下，测定塑化松香的粘度 ( $\eta$ )、单轴压缩弹性模量 ( $E$ )，按泊松比  $\nu=0.5$  测得剪切模量 ( $G$ ) 和 Maxwell 体松弛期 ( $t_r = \eta/G$ ) 列于表1。模型实验主要是在20℃以下进行，模拟实验的延续时间范围为17 h~6 d，则松弛期倍数  $\Omega_r = t/t_r$  在85.24—235.10之间，远大于2.3，这表明所用塑化松香可以满足岩石圈下层塑性流动的要求。

①周永胜. 渤海湾新生代盆地构造变形机制及其物理模拟研究. 国家地震局地质研究所博士学位论文, 1997.

表1 20℃时不同配比塑化松香的粘度( $\eta$ )、弹性模量( $E$ )、剪切模量( $G$ )和松弛期( $t_r$ )Table 1 Viscosity ( $\eta$ ), elastic module ( $E$ ), shear module ( $G$ ) and relaxation time ( $t_r$ ) of plasticized rosin at 20℃

$R/P$	$\eta/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$E/\text{Pa}$	$G/\text{Pa}$	$t_r/\text{s}$
16	$1.445\times 10^9$	$1.539\times 10^7$	$5.130\times 10^6$	282
10	$6.026\times 10^7$	$2.691\times 10^5$	$8.970\times 10^4$	672
8	$7.943\times 10^6$	$1.250\times 10^4$	$4.167\times 10^3$	1906
6	$4.266\times 10^5$	$5.806\times 10^2$	$1.935\times 10^2$	2205
4	$6.457\times 10^3$	$2.697\times 10^1$	$8.990\times 10^0$	718

由于延性下层缓慢流动,可忽略惯性作用,因此,延性下层相似性主要涉及重力和粘性力。重力与粘性力的相似性要求模型重力与粘性力的比值(重粘比)与原型的相等,即无量纲参数伽利略数(Galileo数 $Ga$ ):

$$Ga = \rho g L^2 / (V \eta) \quad (1)$$

式中 $\rho$ 为密度; $g$ 为重力加速度; $L$ 为特征厚度; $V$ 是变形速度; $\eta$ 是粘度。在牛顿流动的情况下,根据原型与模型 $Ga$ 数相等的准则,可导出时间相似比 $K_t$ 为:

$$K_t = (K_\rho K_g K_L)^{-1} K_\eta \quad (2)$$

式中 $K_\rho$ 是密度相似比; $K_g$ 是重力加速度相似比; $K_L$ 是线长相似比; $K_\eta$ 是粘度相似比。岩石圈下层有关参数取值:密度 $3.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,粘度 $10^{21}\text{Pa}\cdot\text{s}$ [7];模型延性下层的密度约 $1.05\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,粘度 $1.64\times 10^3\sim 4.27\times 10^5\text{Pa}\cdot\text{s}$ ( $R:P=3.5\sim 6$ ),则 $K_\rho=3.14$ , $K_g=1$ , $K_\eta=6.10\times 10^{17}\sim 2.35\times 10^{15}$ 。根据相关的线长比 $K_L$ ,得出时间相似比 $K_t$ ;利用时间相似比,可以求出模型与原型的时间对比关系(Ma/h),即模型1小时相当于实际地质时间数(Ma)(表2)。

根据均时性准则,速度比与线长比、时间比的关系为

$$K_v = K_L K_t^{-1} \quad (3)$$

代入模型的线长比和时间相似比,可得速度相似比 $K_v$ ,列于表2。

表2 模型相似参数

Table 2 The similar parameters of models

模型类型	温度/℃	$\eta/\text{Pa}\cdot\text{s}$ ( $P/R$ )	$K_L$	$K_t$	Ma/h	$K_v$	脆性层强度比
“平面”模型	20	$1.64\times 10^3$ (1/3.5) ~	$5\times 10^6$	$3.89\times 10^{10}$ ~	4.44~0.12	$1.29\times 10^{-4}$ ~	$2.37\times 10^7$
		$6.30\times 10^4$ (1/5)		$1.01\times 10^9$		$4.95\times 10^{-3}$	
“剖面”模型	20~24	$6.46\times 10^3$ (1/4) ~	$1\times 10^6$	$4.94\times 10^{10}$ ~	5.64~0.085	$2.02\times 10^{-5}$ ~	$4.74\times 10^6$
		$4.27\times 10^5$ (1/6)		$7.48\times 10^8$		$1.34\times 10^{-3}$	

脆性上层涉及重力和强度(破裂和摩擦)。主要考虑重力与强度之比,即重强比。强度相似比 $K_s$ 按照下式计算:

$$K_s = K_\rho K_g K_L \quad (4)$$

已知,岩石圈脆性上层密度为 $2.7\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,模型的脆性层材料(松散玉米粉)容重为 $0.57\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,故 $K_\rho=2.7/0.57=4.74$ , $K_g=1$ ,根据表2中的线长比,得出脆性层强度比(表2)。后面的实验基本按照上述相似比进行。

## 2 实验结果

为了叙述方便,首先规定后面用到的各符号的物理含义: $L$  模型长度、 $W$  模型宽度、 $h_b$  脆性层厚度、 $h_d$  延性层厚度、 $C_0$  脆性层内聚强度、 $\eta$  延性层粘度、 $d_1 \sim d_5$  隆起量、 $t_1 \sim t_5$  时间、 $t$  温度、 $q$  空气相对湿度。

### 2.1 上隆—伸展的构造特征

**2.1.1 固定边界条件下的上隆与伸展** 模型两侧边界固定,当模型中部的隆起带缓慢上隆时,延性层不能溢出。在隆起量比较小的情况下,仅引起延性层和脆性层垂向拱张,没有出现断裂和伸展;在隆起量比较大时,隆起带上方脆性层垂向拱张断裂,但断裂带仅局限于隆起带的中心部位,隆起带两侧基本没有断裂和伸展。这表明上隆能够引起垂向拱张和断裂,但上隆引起的侧向分流以及侧向拉张应力比较小,不足以形成大规模的裂陷伸展。也就是说,如果没有适当的边界条件,仅靠上隆,不能引起岩石圈裂陷伸展。

**2.1.2 两侧半开放边界条件下的上隆与伸展** 模型两侧挡板位置固定,挡板高度与实验前延性层高度一致。实验过程中因隆起和重力均衡等作用引起延性层增厚,增厚的部分可以通过挡板顶面流出,这样既保持模型延性层厚度不变,又可以实现持续不断的上隆—分流—伸展,促进裂陷伸展,因此把这种模型称为半开放边界模型。实验中还发现,在设置溢流挡板的同时,还要有合理的模型结构配合:模型以隆起带中线为对称轴,每侧延性层宽度是隆起带宽度的3倍,脆性层是隆起带宽度的1.5~2倍,使得在接近两侧边界的区域露出一段延性层缓冲带。这种模型结构既有利于上隆—分流—伸展,又能避免边界溢流引起泄流伸展。

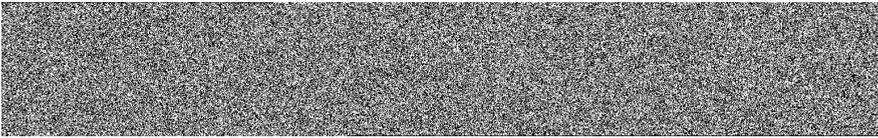


图2 两侧半开放边界条件下主动上隆—伸展模型的断裂特征 (模型 E19)

Fig. 2 The faults character of active uplifting-extensional model at two side half open boundaries

$L=150\text{mm}$ ,  $W=205\text{mm}$ ,  $h_b=3\text{mm}$ ,  $h_d=7.5\text{mm}$ ,  $q=66\%$ ,  $C_0=15.4\text{Pa}$ ,  
 $\eta=1.64 \times 10^3 \text{Pa} \cdot \text{s}$  ( $P/R=1:3.5$ ),  $t=20\text{C}$



图3 两侧半开放边界条件下主动上隆—伸展模型标志点的位移特征 (模型 E19)

Fig. 3 The displacements of marks in active uplifting-extensional model at two side half open boundaries

( $t_1=6.33\text{h}$ ,  $d_1=1.5\text{mm}$ ;  $t_2=11.58\text{h}$ ,  $d_2=2\text{mm}$ ;  $t_3=32.3\text{h}$ ,  $d_3=2.5\text{mm}$ ;

$t_4=49.43\text{h}$ ,  $d_4=3\text{mm}$ ;  $t_5=72.26\text{h}$ ,  $d_5=3\text{mm}$ )

图中  $x$  为标志点的位置;  $dx$  为标志点在不同时间的位移

实验分两个阶段，第一个阶段主动上隆，第二个阶段停止上隆，模型水平静放，处于均衡调整状态。第一个阶段，在缓慢上隆过程中，隆起带上面的延性层拱起弯曲，脆性层表面有轻微隆起，并且从上隆中心开始破裂，断裂形态中间宽，两侧窄。随着上隆高度增加，断裂逐渐向模型两侧近对称扩展，形成裂陷伸展（图2）。由于上隆作用和重力均衡，延性层向两侧分流，并从半开放边界溢出。在边界挡板高度局部大于延性层厚度的区域，延性层不能很快发生泄流，因此在挡板附近出现小规模挤压褶皱。

从三排标志点位移随时间的变化曲线中（图3中  $t_1 \sim t_3$ ）可知，标志点从上隆中心向两侧运动，表明位移主要是由上隆引起的；伸展率与应变率随时间变化曲线（图4中  $t_1 \sim t_3$ ）得出，伸展主要集中在隆起带所在的位置。由于从中心隆起带向两侧分流，在隆起带外侧以及模型边界处局部出现负伸展，即挤压。



图4 两侧半开放边界条件下主动上隆—伸展模型的总伸展量、伸展率与应变率分布（模型 E19）

Fig. 4 The total extensional quantity, extensional rate, “strain rate” of active uplifting-extensional model at two side half open boundaries

( $t_1=6.33\text{h}$ ,  $d_1=1.5\text{mm}$ ;  $t_2=11.58\text{h}$ ,  $d_2=2\text{mm}$ ;  $t_3=32.3\text{h}$ ,  $d_3=2.5\text{mm}$ ;  
 $t_4=49.43\text{h}$ ,  $d_4=3\text{mm}$ ;  $t_5=72.26\text{h}$ ,  $d_5=3\text{mm}$ )

（左）伸展量；（中）伸展率；（右）应变率（模型中间一排标志点为例）

图中  $x$  为标志点的位置； $dl$  为标志点在不同时间的总伸展量； $\epsilon$  为伸展率； $\dot{\epsilon}$  为应变率

在第二阶段，停止上隆，在长时间的均衡调整作用下，隆起带的上方因延性层向两侧流

动而变平,模型表面的隆起特征消失,断裂基本上继承了第一阶段的特征。在位移曲线中,标志点的位移量减小(图3中 $t_4 \sim t_5$ ),伸展率与应变率(图4中 $t_4 \sim t_5$ )极小或者为零。这反映了停止上隆后,均衡调整和边界泄流引起的变形是极小的。

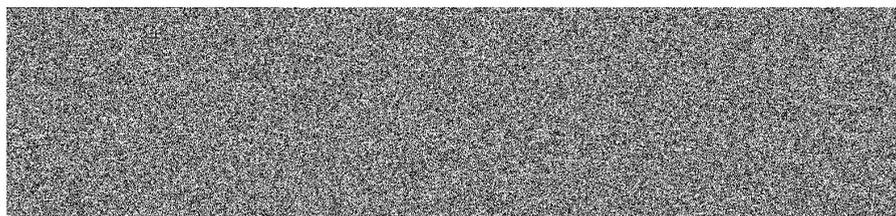


图5 固定—开放边界条件下的上隆与伸展断裂特征(模型E37)

Fig. 5 The faults character of active uplifting-extensional model at fixing and open boundaries

$$L=275\text{mm}, W=40\text{mm}, h_b=19\text{mm}, h_d=12\text{mm}, q=91\%,$$

$$C_0=32.7\text{Pa}, \eta=1.64 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{s} (P/R=1:6), t=24 \text{C}$$

A.  $t=2.5\text{h}$ ; B.  $t=6.33\text{h}$ ; C.  $t=10.33\text{h}$ ; 1. 脆性层; 2. 延性层; 3. 上隆水囊

上述实验表明,存在半开放边界时,上隆可以引起伸展,而且伸展主要集中在隆起带,但这种伸展需要有边界条件的配合,否则不足以引起应力远程传递和大规模伸展裂隙。

2.1.3 一侧固定—一侧开放条件下的主动上隆与伸展 本实验采用“剖面”模型。在模型中部上隆,一侧边界开放,可以泄流伸展,另一侧边界固定,这样就把泄流伸展与上隆伸展结合

在实验中为了减小摩擦，把模型底板靠近“高原”一侧提高，使模型底板倾斜 $10^\circ$ ，模型中部上隆与边界泄流伸展同时进行。

实验初期，气囊非对称上隆，使延性层底界隆起 $4\text{mm}$ ，脆性层表面拱起 $2\text{mm}$ （按模型几何相似，相当于地幔与中上地壳分别隆起 $4\text{km}$ 和 $2\text{km}$ ，明显偏离了实际地质事实，这是因为模型延性层和脆性层垂向厚度不完全符合模型相似比要求，夸大了隆起量）。上隆拱张与泄流拉张形成两个独立的伸展断裂系统（图5-A）。这两个伸展区的伸展程度在位移（图6中 $t_1$ ）与伸展率和应变率曲线（图7中 $t_1$ ）中清楚地反映出来，其中上隆应变率（中间标志点的应变率）大于泄流拉张应变率（右侧标志点的应变率），此外，在隆起带两侧出现相对挤压。随着隆起量增大（上隆高度达到 $8\text{mm}$ ）和持续的泄流拉张伸展，模型伸展断裂发生变化：隆起处最大的断裂转变为铲式断裂，向开放边界倾斜，断裂倾角上部 $40^\circ$ ，下部 $25^\circ$ 。该断裂在脆性层与延性层的边界形成一个“陡坎”，表明断裂延伸到了延性层中（图5-A）。在断裂下降盘，早期拱张断裂发育成反向断裂，并且夹在断裂之间的块体发生掀斜（图5-A）。早期靠近泄流出口的断裂延伸到脆性层和延性层边界，同时泄流伸展发展到距隆起中心 $60\text{mm}$ 的地方，形成另一条铲式断裂（图5-A）。这样，整个模型被三组断裂分成四段，第一段为靠近开放边界的破碎段，脆性层破碎堆积，并随延性层流出；第二段是夹在两条伸展断裂之间的块体，内部含有许多小伸展断裂，它们主要发育于脆性层上面，没有延到脆性层和延性层的边界处；第三段是中部伸展断裂与上隆裂隙之间的块体；第四段是上隆带后方的完整块体，在该区有微弱的挤压。在位移（图6中 $t_2$ ）与伸展率和应变率曲线（图7中 $t_2$ ）上，这两种伸展特点比较明显，而夹在断裂之间的块体呈挤压状态。



图6 固定—开放边界条件下的上隆与伸展模型标志点的位移特征（模型 E37）

Fig. 6 The displacements of marks in active uplifting-extensional model at fixing and open boundaries

$$(t_1=0.33\text{h}, d_1=4\text{mm}; t_2=1.75\text{h}, d_2=8\text{mm}; t_3=4.33\text{h}, d_3=8\text{mm}; \\ t_4=6.33\text{h}, d_4=8\text{mm}; t_5=10.33\text{h}, d_5=8\text{mm})$$

图中  $x$  为标志点的位置； $dx$  为标志点在不同时间的位移

在后续的伸展中停止上隆，在边界伸展作用下，沿隆起处的断裂逐渐裂陷伸展，形成大型“盆地”（图5-B）；模型中部的伸展断裂切穿延性层，转变为铲式断裂，沿该断裂逐渐拉开，

构成第二个大型裂隙伸展“盆地”，在伸展过程中延性层发生了被动上隆（图5-B），夹在两个断陷盆地之间的块体受到挤压而弯曲。位移（图6中  $t_3$ ）与伸展率和应变率曲线（图7中  $t_3$ ）中，两个伸展区之间出现挤压区，体现出相同的特征，靠近泄流出口处的伸展断裂随延性层流出而消失。以后的伸展主要集中在这两个裂隙区，在持续的伸展作用下，盆地逐渐加宽。在泄流伸展裂隙“盆地”中，脆性层从泄流出口流出，引起延性层出露和被动上隆（图5-C）。隆起带上方的裂隙“盆地”拉开，仅剩少量脆性层。此外，在该裂隙盆地边缘形成一条延伸到延性层中的陡倾角断裂，该断裂使裂隙“盆地”中的小块体反向掀斜（图5-C），显示出向泄流出口伸展的特点。由于泄流出口处的脆性层流出边界外，晚期位移（图6中  $t_4$ 、 $t_5$ ）和伸展率（图7中  $t_4$ 、 $t_5$ ）主要集中在隆起带附近。



图7 固定—开放边界条件下的上隆与伸展模型的位移、总伸展量、伸展率与应变率分布（模型 E37）

Fig. 7 The total extensional quantity, extensional rate, “strain rate” of active uplifting-extensional model at fixing and open boundaries

（左）伸展量；（中）伸展率；（右）应变率

$(t_1=0.33h, d_1=4mm; t_2=1.75h, d_2=8mm; t_3=4.33h, d_3=8mm;$

$t_4=6.33h, d_4=8mm; t_5=10.33h, d_5=8mm)$

图中  $x$  为标志点的位置； $dl$  为标志点在不同时间的总伸展量； $\epsilon$  为伸展率； $\dot{\epsilon}$  为应变率

## 2.2 上隆与伸展的关系

2.2.1 主动上隆对伸展构造的贡献 在主动上隆模型中，两侧边界固定时，上隆能产生拱张

断裂，然而它引起的侧向分流比较小，基本不能形成伸展；存在半开放或开放边界时，可以产生大规模的伸展，但伸展主要沿上隆早期产生的张裂进行。因此，上隆产生的张裂为后续伸展奠定了基础，同时上隆加速了延性层向开放边界方向流动，促进了伸展。显然，主动上隆引起伸展是有条件的，需要边界条件的配合。

**2.2.2 主动上隆与伸展量** 在隆起过程中，由于有边界泄流伸展配合，模型伸展量由上隆产生的伸展和边界泄流伸展两部分组成。上隆引起的伸展主要集中在隆起带及其附近，而且在隆起中心；泄流伸展集中在靠近边界的区域，而且伸展量从边界向内部逐渐减小。伸展量的大小主要取决于隆起量和边界泄流量。

**2.2.3 上隆—伸展过程中的被动上隆** 在上隆—伸展过程中，除主动上隆外，还观察到凡是有断裂的部位，就有可能发生延性层被动上隆，它是重力均衡的必然产物，对伸展断裂发育起到促进作用。被动上隆程度取决于延性层粘度、脆性层厚度、密度以及断裂规模等多种因素。在“平面”模型中，被动上隆量一般 $1\text{mm}\sim 5\text{mm}$ ，在“剖面”模型中一般 $3\text{mm}\sim 10\text{mm}$ ，按照几何相似，相当于原型中岩石圈 $3\text{km}\sim 25\text{km}$ 的上隆量。因此，被动上隆是普遍存在的，它对断裂的进一步发育具有促进作用。

### 3 结 论

通过上隆—伸展实验研究，对地幔上隆在岩石圈伸展中的地位和作用提出以下认识：

① 在大陆内部，如果没有边界伸展，地幔上隆可以引起拱张断裂。它引起的侧向分流和水平拉张力相对较小，不足以产生大规模伸展，但上隆形成的张裂为岩浆作用通道和后续伸展奠定了基础。

② 如果存在边界伸展或侧向的让位，它可以引起一定规模的伸展，但首先是上隆拱张产生张裂，为后续伸展裂陷奠定基础；其次，地幔上隆，热流量增加，粘度减小，增加了岩石圈下层的流动性，促进了下层的流动。

③ 地幔上隆引起的伸展主要发生在含有伸展边界的一侧和上隆带附近。因此，主动上隆形成的裂谷盆地的对称性不仅取决于地幔上隆的对称性，而且主要是取决于边界条件的对称性。如果存在两侧泄流伸展，那么地幔上隆可以向两个方向分流和伸展，形成对称盆地。但在大陆内部，一般不存在这种两侧同时让位的边界，特别是对于中国东部地区。这就可以解释许多裂陷盆地的非对称性。

④ 地幔主动上隆引起裂陷伸展是有条件的，辅助的；被动上隆是普遍存在的。它可以发生在伸展、剪切、挤压等各种动力学环境中，是重力均衡作用的必然结果。

本文得到张流研究员、马胜利研究员、何昌荣研究员、徐杰研究员等先生的指导和帮助。在实验方面得到了张宗淳、钟嘉猷、王春华、宋瑞卿、刘树山等同志的帮助，中国地震局地质研究所构造物理实验室提供了便利的实验条件和工作环境，在此深表感谢。

### 参 考 文 献

[1] Ziegler P A. Plate tectonics, plate moving mechanisms and rifting [J]. In: P. A. Ziegler (Editor), Geodynamics of Rifting, Volume III. Thematic Discussions. Tectonophysics, 1992, 215: 9~34.

[2] 王绳祖. 大陆动力学与多级孕震结构构造体系 [A]. 中国地震局预测预防局编. 地震监测预报的新思路和新方法

- [C]. 北京:地震出版社,1997. 24~34.
- [3] Ramberger. Gravity, deformation and the earth's crust [M]. Academic Press, London, 1981.
- [4] 潘秋叶,杨桂枝.用重力模拟实验研究华北地区裂谷与盆地的形成机制[A].国家地震局地质研究所编.现代地壳运动研究(1)[C].北京:地震出版社,1985. 157~164.
- [5] 王春华,廖素珍,徐杰,等.华北东部地区上地幔运动与盆地形成关系的模拟研究[J].地震地质,1991,13(3): 276~281.
- [6] 李建国,周永胜,王绳祖,等.岩石圈塑性流动网络与多层构造变形的物理模拟[J].地震地质,1997,19(3): 248~257.
- [7] 王绳祖.地壳、上地幔变形属性的判别[J].地震地质,1995,17(3): 215~224.

## PHYSICAL EXPERIMENTS ON MANTLE UPLIFTING AND CONTINENT EXTENSION

ZHOU Yong-sheng, LI Jian-guo, WANG Sheng-zu

(*Institute of Geology, CSB, Beijing 100029, China*)

**Abstract:** In the present paper, an experiment of the mantle uplifting and lateral extension is conducted under three different boundary conditions using a ductile/brittle double-layer physical model. The experiment results show that when the model is fixed on two sides, uplifting could cause stretch and faults with very small lateral flow. When the model are half or completely open, uplifting could cause very large extension, mainly in the direction of the faults early produced. Evidently the faults early formed in uplifting would create a favourable condition for the subsequent extension and the uplifting would accelerate the flow of ductile layer towards the direction of open boundary to promote further extension. In addition, some passive updoming of lower ductile layer is found where faults occur in the upper brittle layer in our models. It is therefore clear that no large extension should arise from mantle uplifting without favourable boundary conditions.

**Key words:** uplifting extension; physical experiments; boundary condition