

# 大巴山前陆冲断带构造样式和演化过程的数值模拟

黄光明<sup>1)</sup>, 王岳军<sup>2)</sup>, 赵勇刚<sup>3)</sup>, 皇甫鹏鹏<sup>4)</sup>

1) 恒泰艾普石油天然气技术服务股份有限公司, 北京, 100094;

2) 中山大学地球科学与地质工程学院, 广州, 510275;

3) 大港油田勘探开发研究院, 天津, 300280; 4) 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640

**内容提要:** 由于大巴山地区处于独特的构造背景, 拥有丰富的油气资源, 正吸引人们开展日益深入的研究。本文通过有限差分方法, 利用平面应变的二维弹塑性本构模型, 对大巴山前陆冲断带开展了系列数值模拟研究。结果表明, 前陆区拥有相对软弱的滑脱层(含膏盐岩的中下三叠统), 是大巴山前陆冲断带主滑脱面由后陆向前陆逐渐抬升的主控因素。该滑脱层的分布以及同构造沉积的分布限定了主前缘逆冲断裂(镇巴断裂)的位置, 通过该断裂, 大巴山后陆的强烈缩短应变由深滑脱层(震旦系下部)向南传递至浅滑脱层(三叠系中下统)。镇巴断裂和城口断裂一起, 它们的长期活动性, 可能调节了大巴山一半以上的总缩短应变。同构造沉积发生后, 前陆区浅层侏罗山式褶皱往前扩展的同时, 后陆的先成断裂也继续活动并发生顺时针旋转, 构成无序逆冲扩展序列。主要断层的逆冲扩展和经典背驮式不同, 缩短应变主要由主断层下盘向后陆深部俯冲来实现。模拟结果和大巴山地质原型的近似程度, 说明了利用有限差分软件对地质构造进行模拟的可行性。

**关键词:** 大巴山前陆冲断带; 滑脱层; 同构造沉积; 无序扩展逆冲序列; 剪切强度

前陆冲断带是造山带和盆地之间的复合系统, 是研究盆山耦合的理想场所。该概念首先应用于加拿大的落基山(Price et al., 1971), 随着油气勘探的重大突破, 越来越多的前陆冲断带被关注并深入研究, 如扎格斯山前陆冲断带(Yamato et al., 2011)、新疆库车前陆冲断带(Li Shiqin et al., 2012)。而利用模拟方法对前陆冲断带开展研究是一种非常有效的手段, 其几何学、运动学、动力学等诸方面都可以得到定量而且非常形象的展示。前人的模拟探讨了影响前陆冲断带的多方面因素, 如底部滑脱层力学属性(Costa et al., 2002)、底部滑脱面倾角(Koyi et al., 2003)、表面过程(Mcclay et al., 2004)、地壳均衡作用(Stockmal et al., 2007)、多滑脱层作用(Ruh et al., 2012)等。

大巴山前陆冲断带位于四川盆地的东北部, 处于扬子板块与秦岭微板块的结合部位。对其开展深入研究, 不仅对盆山耦合(Li Qiusheng et al., 2011)、陆内造山(Dong Shuwen et al., 2013; Song Qingwei et al., 2014)等科学命题有理论意义, 对区

内丰富的油气勘探亦有现实意义(Ma Yongsheng et al., 2005)。

对于大巴山及周边地区, 前人也开展了一系列的模拟研究。Wang Ruirui et al. (2011, 2013)分别利用物理模拟和数值模拟探讨了大巴山弧形构造带的成因; Wu Hongling et al. (2009)利用数值模拟讨论了本地区的构造应力场和叠加褶皱; Liu Yuping et al. (2008)利用物理模拟分析了大巴山多滑脱层体系的影响; Hu Mingqing et al. (2012)对大巴山前陆盆地挠曲沉降和沉积过程开展了三维数值模型研究; Xie Guoai et al. (2013)利用物理模拟研究了川东侏罗山式褶皱构造带的控制因素; Yong Liu et al. (2003)利用数值模拟分析了龙门山前陆盆地构造挤压和盆地沉降的关系。这些研究极大地加深了对大巴山构造成因的理解, 但也仍存在诸多问题值得进一步探讨。例如, 虽然已经明确滑脱层的关键作用, 但这些滑脱层的强弱程度有怎样的组合关系? 其初始基底滑脱面是怎样的形态? 同构造剥蚀和沉积的表面过程对其产生了多大的影响? 大巴山前陆

收稿日期: 2014-08-07; 改回日期: 2015-05-07; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 黄光明, 男, 1978年生。硕士, 工程师。能源地质工程专业, 从事油气勘探的相关工作。通讯地址: 100094, 北京市海淀区丰秀中路3号院4号楼; Email: hgm029@163.com。

冲断带经历了怎样的演化过程？本文拟对上述问题展开探讨。

### 1 地质背景

大巴山前陆冲断带位于四川盆地的东北部，平面呈向南西突出的弧形(图1)。从北东往西南，大巴山前陆冲断带可划分出三个特征各异的构造单元：从安康断裂至城口-房县断裂属于北大巴山，宽约100km，由北东往南西逆冲的多条断裂组成逆冲推覆构造，地表出露古生界以及部分前古生界地层；从城口断裂往南西至铁溪-巫溪断裂为南大巴山，宽约40km，本带又可以镇巴断裂为界细分为北东侧的基底拆离带和南西侧的盖层滑脱带，基底拆离带出露震旦系地层，逆冲变形强烈，盖层滑脱带出露古生界和三叠系地层，滑脱面明显变浅；从铁溪-巫溪断裂往南西为大巴山前陆盆地，沉积了从晚三叠统须家河组至下白垩统的地层，总厚度超过3000m，此带浅层发生侏罗山式褶皱(He Jiankun et al., 1997, 1999; Zhang Yueqiao et al., 2010)。

现有研究成果表明，北大巴山形成于印支期的扬子板块与秦岭微板块的俯冲碰撞运动，并经历了燕山期陆内造山的叠加作用(Dong Shuwen et al., 2006, 2013)。南大巴山是北大巴山继续向南西方向逆冲推覆的结果。大巴山前陆盆地发育于晚三叠世，接受了须家河组至下白垩统的陆相碎屑岩沉积，不整合覆盖在前晚三叠统地层之上(Yue Guangyu, 1998)。磷灰石裂变径迹以及镜质体反射率研究表明，盆地大体上经历了晚三叠世—早侏罗世快速沉降、中晚侏罗世—早白垩世慢速沉降、晚白垩世以来以隆升为主的演化过程(Wang Shunyu et al., 2000; Xu Changhai et al., 2010)。

地震勘探和野外考察发现本地区发育多个关键滑脱层，在前陆盆地区，基底滑脱层是下寒武统的泥页岩，而在北大巴山，基底滑脱层发育于更深的新元古界变质岩中(Li Zhiwu et al., 2006; Yan Danping et al., 2008)。除上述两个滑脱层外，中下三叠统膏盐岩也是一个确定的滑脱层，志留系下部泥岩也相对发育。综合多种资料，本文的系列模型采用三个

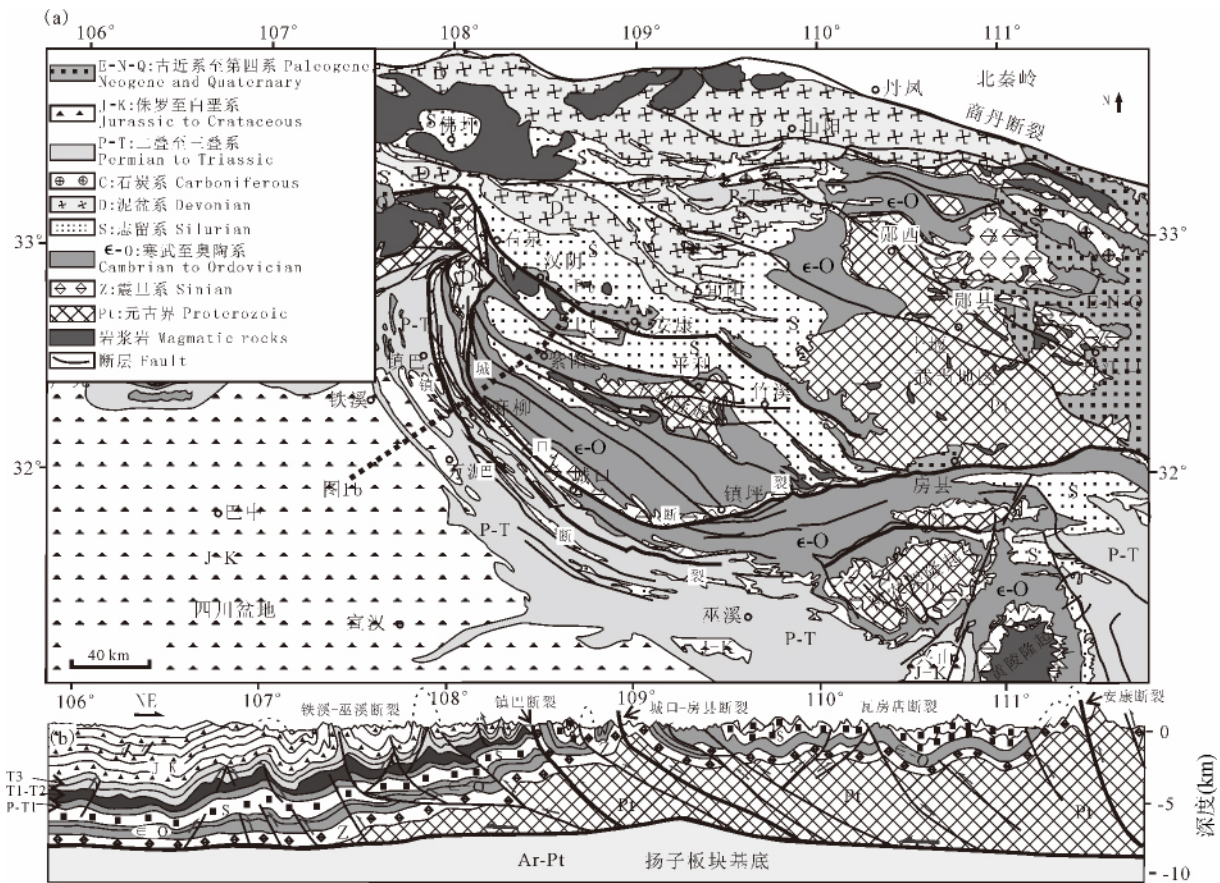


图1 大巴山及邻区构造纲要图(a)和横穿大巴山的构造剖面示意图(b)(据 Wang Ruirui et al., 2013)

Fig 1 Structural outline of the Daba Shan District and its neighboring (a) and schematic structural section across the Daba Shan tectonic belt(b) (after Wang Ruirui et al., 2013)

滑脱层的方案:中下三叠统膏盐岩、下寒武统泥页岩和震旦系下部变质岩。

## 2 研究手段

### 2.1 本构模型

本研究利用 Itasca 公司的 FLAC 软件。FLAC 是 Fast Lagrangian Analysis of Continua(快速拉格朗日分析法)的简称,该软件基于显式有限差分算法,运算过程不需要构建总刚度矩阵(Itasca,2011)。程序运行时,首先调用运动方程通过内外应力导出新的速度和位移,然后根据速度导出应变速率,进而得出新的应力。所有的网格点计算一遍为一个时步,最终的大变形是通过很多时步的小变形叠加而成。

本研究采用莫尔-库伦弹性本构模型,此模型能够很好地模拟上地壳岩石的脆性变形行为。其总应变  $\epsilon_{ij}$  分解为弹性应变  $\epsilon_{ij}^e$  和塑性应变  $\epsilon_{ij}^p$  两部分(Itasca,2011)。

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p \quad (1)$$

岩石在屈服之前处于弹性阶段,应力  $\sigma_{ij}$  和应变  $\epsilon_{ij}$  遵循广义胡克定律变形

$$\sigma_{ij} = 2G\epsilon_{ij}^e + (K - \frac{2}{3}G)\delta_{ij}\epsilon_{kk}^e \quad (2)$$

其中, $G$  为剪切弹性模量(Pa), $K$  为体积弹性模量(Pa), $\delta$  为克罗内克符号。当加载的应力超过岩石的屈服强度,岩石将发生塑性变形。屈服极限遵从莫尔-库伦判据(Vermeer et al.,1984)

$$F = \tau^* - \sigma^* \sin\phi - C \cdot \cos\phi \quad (3)$$

其中, $\tau^* = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}$ , $\sigma^* = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ , $C$  为内聚力(Pa), $\phi$  为内摩擦角( $^\circ$ )。当  $F < 0$  表示岩石材料处于弹性阶段;当  $F \geq 0$ ,材料进入塑性阶段,将遵守塑性流动法则进行变形,偏应变率  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$  和应力  $\sigma_{ij}$  存在如下关系,

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

其中  $\dot{\lambda}$  为非负的塑性因子, $g$  为塑性流动势函数,并有

$$g = \tau^* - \sigma^* \sin\psi \quad (5)$$

$\psi$  为岩石材料的剪胀角( $^\circ$ )。

### 2.2 模型设置

参考图 1b 的地质剖面,该剖面长 180km,根据前人的研究,大巴山前陆冲断带遭受了约 40% 的缩短(He Jiankun et al.,1999),故将模型的初始长度

设置为 300km。关于基底滑脱面的埋深(震旦系底),由高分辨率的地震剖面可见,在镇巴主断裂以南,埋深约为 12km,近水平;镇巴断裂以北至安康断裂,埋深逐渐增加至约 27km(Dong Shuwen et al.,2013)。但基底滑脱面现今的埋深是地层遭受了挤压并发生了均衡沉降的结果,可以和初始形态相去甚远。北大巴山发育诸多岩体,其成岩年龄与北大巴山的逆冲时期相同,推测这些岩体形成与深层次的韧性拆离断层有关,则可根据成岩深度推断基底断层的深度,约 12km(He Jiankun et al.,1999)。但前陆盆地部分震旦系底现今埋深约 12km,扣除三叠系中下统滑脱层及其上地层约 5~6km 的厚度(初始模型不包含这些地层,将在模型缩短 15% 之后同构造沉积),则余下地层厚度约 6~7km。基于上述约束,设置了两个不同初始基底滑脱面埋深的模型,一个是均一埋深 6km,另一个是北倾埋深 8~12km。

为了描述方便,下面对作为最终结果的模型 1 进行详细说明,其它对比模型是在模型 1 的基础上作某些变动。模拟从北大巴山挤压逆冲开始,继而南大巴山构造形成,接着大巴山前陆盆地发生沉积,到沉积结束并接受进一步的挤压隆升。模型 1 初始长 300km,深 12~16km(倾斜底界面),其中底部 4km 地层作为基底(layer7),只起到支撑盖层的作用,不参与变形(图 2)。基底与盖层之间设置了一个界面(interface),该界面同样遵循莫尔-库伦力学行为,由界面内聚力和内摩擦角确定它的剪切强度,其法向刚度和切向刚度分别设置为  $5 \times 10^7$  Pa/m 和  $1 \times 10^7$  Pa/m,这两个值虽然控制着界面在弹性阶段的变形行为,但对总应变影响甚小。盖层由 6 个地层组成,从下往上分别是 layer6 至 layer1。其中 layer6 代表震旦系下部滑脱层,layer4 代表寒武系下部滑脱层,layer2 代表三叠系中下统滑脱层,layer5、layer3 和 layer1 分别代表震旦系上部强硬层、寒武系上部至二叠系强硬层以及上三叠统须家河组以来沉积的强硬层。杨氏模量设为  $2.5 \times 10^{10}$  Pa,但各层有微小变化,这些变化对力学行为影响不大,主要是为了让变形结果更直观(后文的模拟结果中各地层的颜色与其剪切模量值相对应),其它力学参数如表 1 所示。其中强硬层内摩擦角设为  $30^\circ$ ,此值在上地壳的力学模拟中被广泛使用(如 McLellan et al.,2004)。震旦系下部滑脱层(Layer6)和 interface 相邻,两者的内聚力和内摩擦角相同,都是  $2 \times 10^6$  Pa 和  $6^\circ$ 。三叠系中下统滑脱层

(layer2)及其上地层(layer1)在初始模型中不出现,它们是同构造沉积的地层。三叠系中下统滑脱层厚2000m,在模型缩短15%~18%期间沉积;其上地层厚3800m,在模型缩短18%~35%期间沉积,都是每缩短0.5%沉积一次。两厚度的选择参考了实际的地层厚度(He Jiankun et al., 1999; Tang Liangjie et al., 2007)。Layer1和layer2密度为2400kg/m<sup>3</sup>,其它层密度为2600kg/m<sup>3</sup>,此密度设置参考了大巴山地区的岩石密度测量数据并做了简化(Zhang Jisheng et al., 2013)。

大巴山前陆冲断带由北往南扩展,但深部背景是扬子板块向秦岭微板块的俯冲作用(Li Sanzhong et al., 2002)。参考此动力学机制,设置了基底(layer7)主动向右运动,而上覆盖层被驮着向右运动。Layer7所有网格以水平速度0.12m/step以及垂向速度-0.0016m/step向右下方向运动,保持interface倾角不变。盖层左侧边界设置水平速度也是0.12m/step, Y方向自由;右侧边界水平方向固定, Y方向也是自由,上表面是自由表面(图2c)。如此小的加载

速度可以确保应变在准静态应力下发生。

模型的总网格数是600×62(水平方向×垂直方向),其中基底(layer7)纵向上只占用一层网格,每个网格代表500m×4000m;盖层(layer6至layer1)占用60层网格,每个网格单元在初始阶段代表横向500m和纵向133~200m。基底和盖层之间设置一层空网格相连。模型运行的最初3000步不加载速度,模型在重力作用下逐渐达到应力平衡。之后运行100万步,模型最终缩短量为40%,即120km。

文中共展示九个模型,其初始设置和模拟目的如表2所示。

### 3 大巴山前陆冲断带形成的控制因素

#### 3.1 不同地层力学组合对前陆冲断带的影响

构造变形是一种力学作用的结果,地层力学参数不同,其变形结果也就不一样。根据岩石抗变形强度的大小可将地层简化为两大类:能干层和非能干层。能干层抗剪强度高,高应力下易产生脆性破

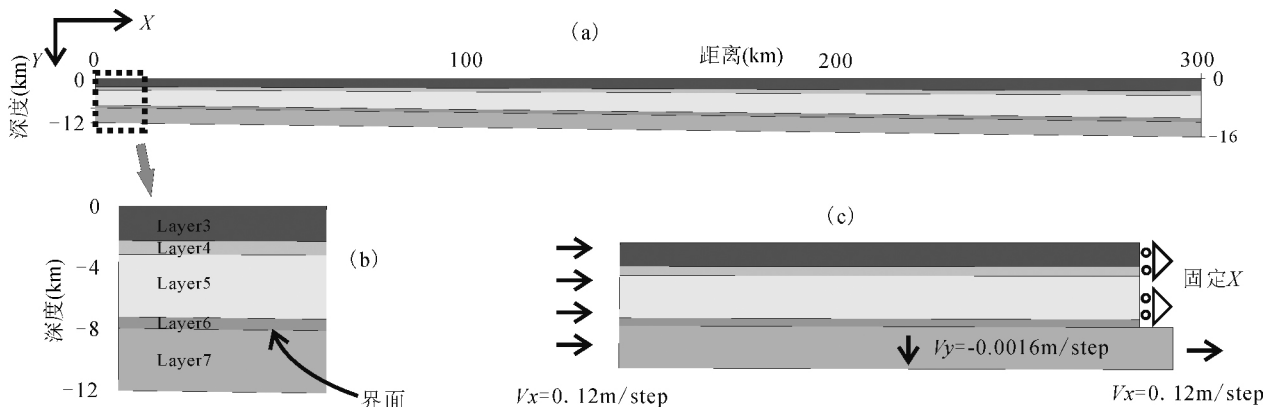


图2 模型1几何设置、边界条件以及加载方式

Fig 2 Geometrical setup, boundary conditions and loading ways of model one

(a)—初始模型;(b)—初始模型局部放大图;(c)—边界条件和加载方式

(a)—Initial model;(b)—partial enlarged detail of the initial model;(c)—boundary conditions and loading ways

表1 模型1地层物理参数

Table 1 Stratum physical parameters of model one

地层	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	杨氏模量 (×10 <sup>10</sup> Pa)	泊松比	内聚力 (×10 <sup>6</sup> Pa)	抗张强度 (×10 <sup>6</sup> Pa)	内摩擦 角(°)	剪胀角 (°)	厚度 (m)	备注
layer1	2400	2.49/2.59	0.25	10	5	30	2	3800	模型缩短18%~35%期间沉积
layer2	2400	2.56	0.25	0.3	0.15	1	2	2000	模型缩短15%~18%期间沉积
layer3	2600	2.47	0.25	10	5	30	2	2400~3600	
layer4	2600	2.53	0.25	1	0.5	3	2	667~1000	
layer5	2600	2.49	0.25	10	5	30	2	4267~6400	
layer6	2600	2.55	0.25	2	1	6	2	667~1000	
interface				2		6	0		
layer7	2600	2.59	0.25	10	5	30	2	4000	

表 2 九个模型的初始设置和模拟目的

Table 2 Initial setups and targets of the nine models

模型	力学参数	基底滑脱面形态	同构造沉积过程	同构造剥蚀过程	模拟目的
模型 1	见表 3	左侧深 8km, 逐渐向右侧加深至 12km	模型缩短 15% 至 18% 期间沉积软弱层 2000m, 18% 至 35% 期间沉积强硬层	无同构造剥蚀	比较各地层不同力学组合对前陆冲断带的影响
模型 2	见表 3				
模型 3	见表 3				
模型 4	见表 3				
模型 5	见表 3				
模型 6	见表 3				
模型 7	同模型 1	埋深 6km	同模型 1	同模型 1	联合模型 1 比较不同基底滑脱面形态对前陆冲断带的影响
模型 8	同模型 1	同模型 1	同模型 1	模型缩短 15% 至 40% 期间, 共剥蚀 2000m	联合模型 1 比较不同表面过程对前陆冲断带的影响
模型 9	同模型 1	同模型 1	无同构造沉积	同模型 1	

裂;非能干层抗剪强度低,较低的应力下即可能发生塑性变形,是主要的滑脱层。前人的研究已经证实本地区存在多个非能干层(Yan Danping et al., 2008),但基于岩石标本的力学参数测量结果并不能直接代表地壳尺度的地层力学数据,两者可以相差很远,这

是因为更大尺度的地层中存在流体超压、断裂等情况将地层的力学复杂化。本文的地层力学参数参考了本地区地层强弱的分布趋势,同时结合数值模拟的经验值来设置(如 Stockmal et al., 2007)。本系列共模拟了六种力学组合的情况,其关键参数见表 3。

表 3 六个模型的关键力学参数对比

Table 3 The comparison of key mechanical parameters of six models

模型	强硬层-layer1、3、5、7		上滑脱层-layer2		中滑脱层-layer4		下滑脱层-layer6		界面	
	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)
模型 1	10	30	0.3	1	1	3	2	6	2	6
模型 2	10	40	0.3	1	1	3	2	6	2	6
模型 3	10	20	0.3	1	1	3	2	6	2	6
模型 4	10	30	0.6	2	2.5	8	3	12	3	12
模型 5	10	30	1.5	5	3	12	5	16	5	16
模型 6	10	30	2	6	2	6	2	6	2	6

注:以强硬层为标准,基本参考各滑脱层与强硬层内摩擦角的比例关系来设置内聚力。

模型 1 和 2、3 是比较强硬层(能干层)力学差异对结果的影响,其内摩擦角分别是 30°、40°和 20°。由图 3 可见,模型 1 和模型 2 结果比较接近,只是模型 1 同构造沉积地层(剖面左半部分浅层)变形范围更大,约为 60km,而模型 2 同构造沉积地层变形范围约为 40km。模型 3 强硬层内摩擦角最小,逆冲带后缘(剖面右半部分,相当于北大巴山)的逆冲断层更密集,发育间距约为模型 1 的两倍。

模型 1 和 4、5、6 强硬层内摩擦角都是 30°,滑脱层内摩擦角不同。模型 4 的滑脱层内摩擦角比模型 1 略大,两模型结果接近,当内摩擦角进一步增大,如模型 5,则结果明显不同,逆冲带后缘表面坡角变得很大。模型 6 三个滑脱层内摩擦角都是 6°,同构造沉积地层滑脱不明显,切割至基底滑脱面的逆冲断层在同构造沉积地层下面继续向前扩展。

地层的变形符合力学原则。寒武系下部滑脱层

(Layer4)和震旦系下部滑脱层(layer6)剪切强度小,模型运行很小的步骤即已进入塑性变形阶段。而震旦系上部(Layer5)是正常的强硬层,抗剪强度大,地层能够承受较大的应力而依然处于弹性阶段(图 4)。

界面作为重要的滑动面,其力学行为也符合莫尔—库伦原理(图 5)。在滑动量较小时,界面处于弹性阶段,剪应力等于界面的错动距离与切向刚度的乘积,如图 5b 中网格横向位置 330 以左。当错动距离比较大后,达到剪应力极限,极限值等于  $\tau^*$  (公式 3)。这时实测最大剪应力和理论屈服剪应力相等,如图 5b 中网格横向位置 330 以右。图 5a 中,界面的实测正应力和上覆地层产生的正应力存在一些差异,是因为界面非水平以及界面的法向刚度起了作用。

由本系列模拟结果可以得出初步结论:① 大巴

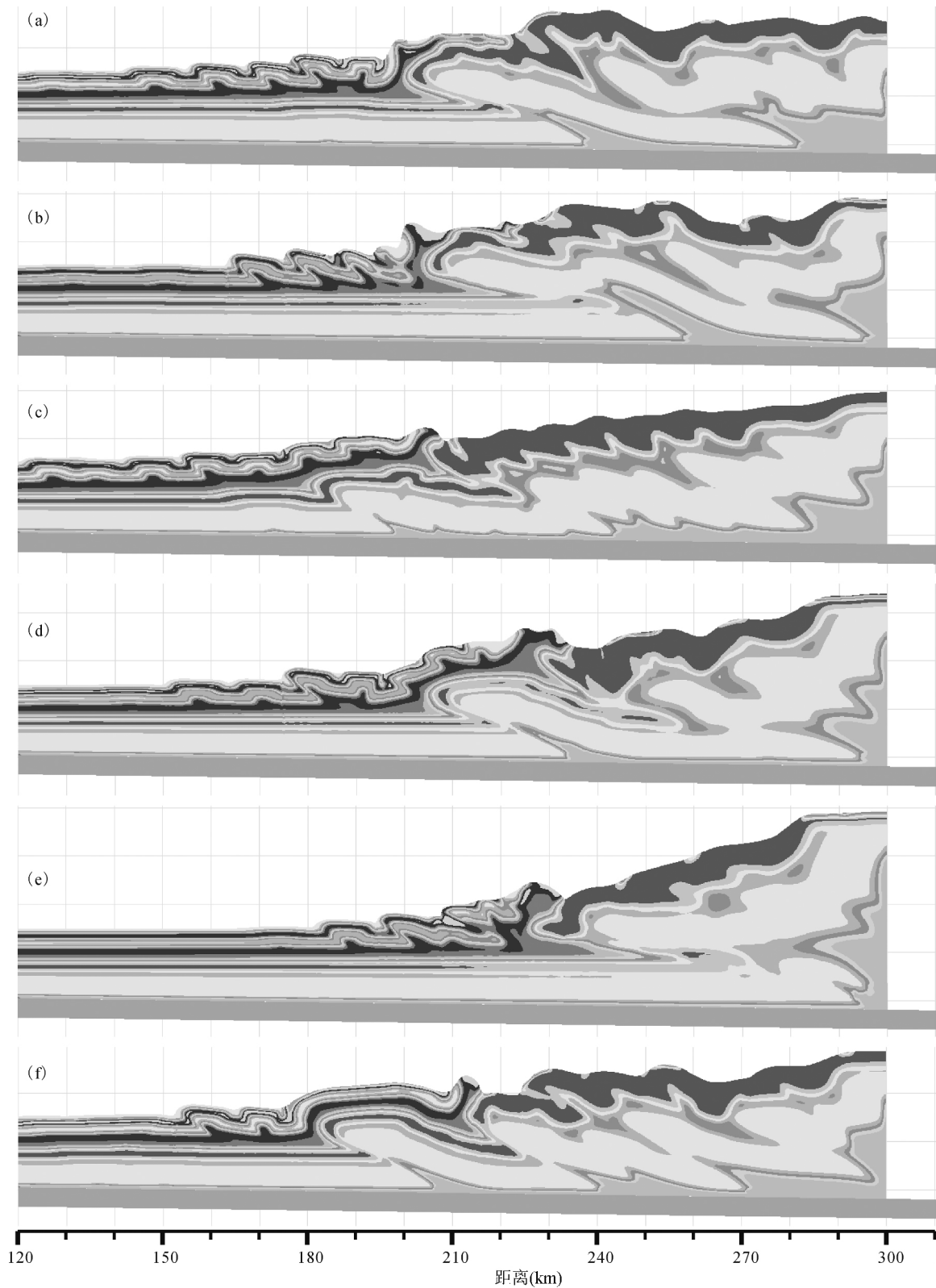


图3 不同地层力学组合(见表3)的模拟结果,纵横比例一致

Fig. 3 The simulation results of different stratum mechanical combination(see table 3), no vertical exaggeration  
 (a)—模型 1,内摩擦角组合(下同), $30^{\circ}\sim 1^{\circ}\sim 3^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ; (b)—模型 2, $40^{\circ}\sim 1^{\circ}\sim 3^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ;  
 (c)—模型 3, $20^{\circ}\sim 1^{\circ}\sim 3^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ;  
 (d)—模型 4, $30^{\circ}\sim 2^{\circ}\sim 8^{\circ}\sim 12^{\circ}\sim 12^{\circ}$ ; (e)—模型 5, $30^{\circ}\sim 5^{\circ}\sim 12^{\circ}\sim 16^{\circ}\sim 16^{\circ}$ ; (f)—模型 6, $30^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}$   
 (a)—Model 1, combination of internal friction angle(the same below),  $30^{\circ}\sim 1^{\circ}\sim 3^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ; (b)—model 2,  $40^{\circ}\sim 1^{\circ}\sim 3^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ;  
 (c)—model 3,  $20^{\circ}\sim 1^{\circ}\sim 3^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ; (d)—model 4,  $30^{\circ}\sim 2^{\circ}\sim 8^{\circ}\sim 12^{\circ}\sim 12^{\circ}$ ; (e)—model 5,  $30^{\circ}\sim 5^{\circ}\sim 12^{\circ}\sim 16^{\circ}\sim 16^{\circ}$ ; (f)—model 6,  $30^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}\sim 6^{\circ}$

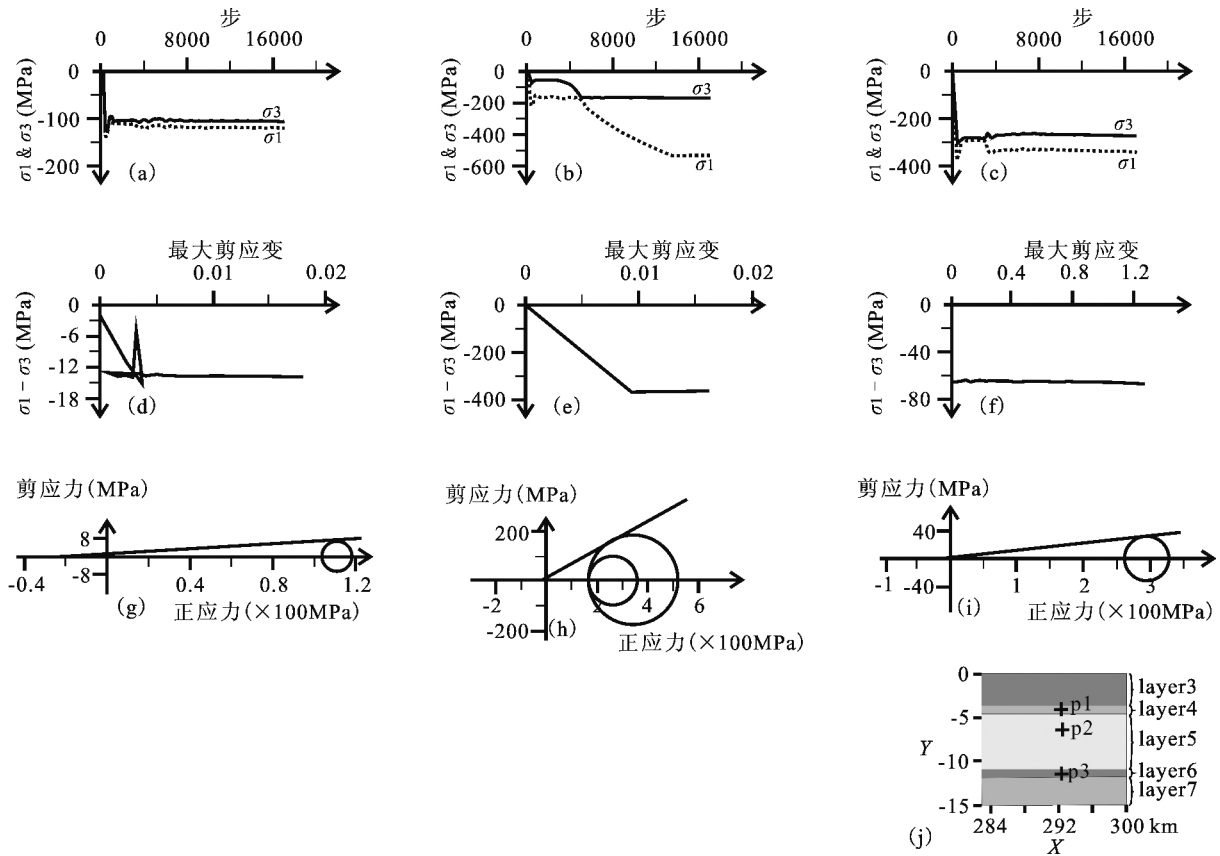


图 4 模型 1 三个记录点的主应力演化曲线(a—p1;b—p2;c—p3)、应力应变曲线(d—p1;e—p2;f—p3)、莫尔强度曲线及应力莫尔圆(g—p1;h—p2;i—p3);莫尔圆的最大和最小主应力选取模型运行 8000 步时(g、h、i)以及 13300 步时(h);(j)三个记录点位置

Fig. 4 The principal stress evolution curves(a—p1;b—p2;c—p3), stress-strain curves(d—p1;e—p2;f—p3), Mohr strength curve and stress Mohr circle(g—p1;h—p2;i—p3) of three recording points in the model one; the maximum and minimum principal stress in stress Mohr circle are measured when model was in 8000 steps(g,h,i) and 13300 steps(h); (j) the position of three recording points

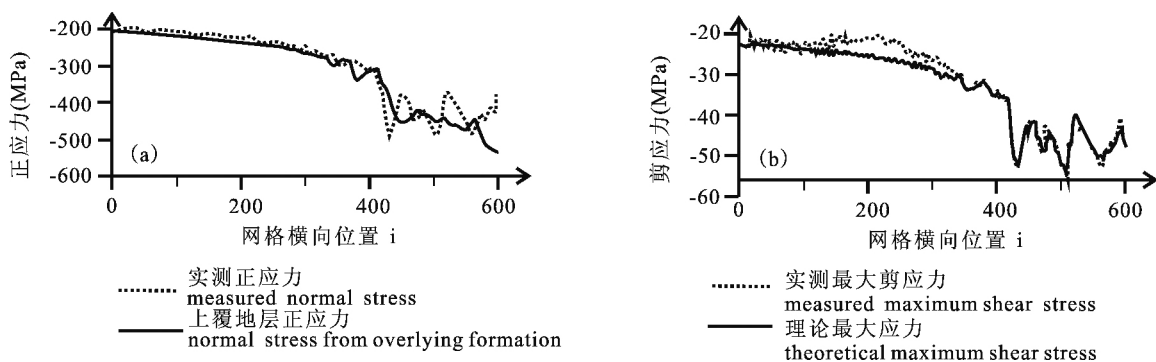


图 5 模型 1 缩短 15%时界面(interface)的受力情况,(a)界面实测正应力和上覆地层产生的正应力对比,(b)界面的实测最大剪应力和理论最大剪应力对比

Fig. 5 Stress conditions of interface when model one is shortened 15%, (a) comparison between measured normal stress and normal stress from overlying formation, (b) comparison between the measured maximum shear stress and theoretical maximum shear stress

山地区非滑脱层的力学强度在常规值范围之内,其摩擦角约为 30°~40°(Byerlee,1978);② 滑脱层

的力学强度比非滑脱层小 3 倍以上;③ 三个滑脱层中,中下三叠统具有相对小的强度。这三个特

征和 Yan Danping et al. (2008) 的岩石测量结果一致。

### 3.2 基底滑脱面初始形态对前陆冲断带的影响

前文已提及,根据现有的资料,可以将基底滑脱面的初始形态限定在一定的范围之内,但仍有较大变化,故设置了两个模型以资对比。其中一个即模型1(图3a),其基底滑脱面埋深8~12km。另一个是模型7(图6),基底滑脱面初始埋深设置为6km。从结果看,两模型的构造样式大体一致,但存在细节差异。第一,模型1的变形范围更广,缩短40%时,模型1向前扩展至140km处,而模型7只扩展至190km处。第二,在模型1中,前陆同构造沉积区浅层滑脱褶皱发育,深层基本无变形;而模型7浅层变形的同时,深层也有一定规模变形。以三叠系中下统滑脱层为界,上下地层变形存在相互消长关系,也即表层褶皱越发育则深层变形越不发育,反之亦然。结合大巴山的地质情况,模型1的结果与地质原型更吻合些。

### 3.3 表面过程对前陆冲断带的影响

已有大量的研究表明,表面过程对前陆冲断带影响很大。当后陆发生同构造剥蚀或者前陆发生同构造沉积时,都会降低逆冲楔的楔角;一旦此楔角低于临界值,逆冲向前扩展停止,而后陆先期形成的断裂重新活动或者在后陆产生新的断层以增加表面坡角(Davis et al., 1983),从而产生无序逆冲扩展序列(Morley, 1988)。

图7的模型8在模型1的基础上,增加了同构造剥蚀。模型从缩短15%之后开始剥蚀,每缩短0.5%剥蚀40m,至模型结束共剥蚀2000m。很显然,因为剥蚀的存在,后缘露出了更深的地层;另外,正如理论预测那样,剥蚀造成的逆冲楔角降低使得逆冲向前扩展变缓,当缩短40%时,变形前缘扩展至170km处,而模型1在相同的缩短量下前缘变形扩展至140km处。但剥蚀速度和剥蚀量与很多因素有关,本模型仅仅是做了初步尝试以观察其对前陆冲断带的影响,更精细的剥蚀模型须要后续更多

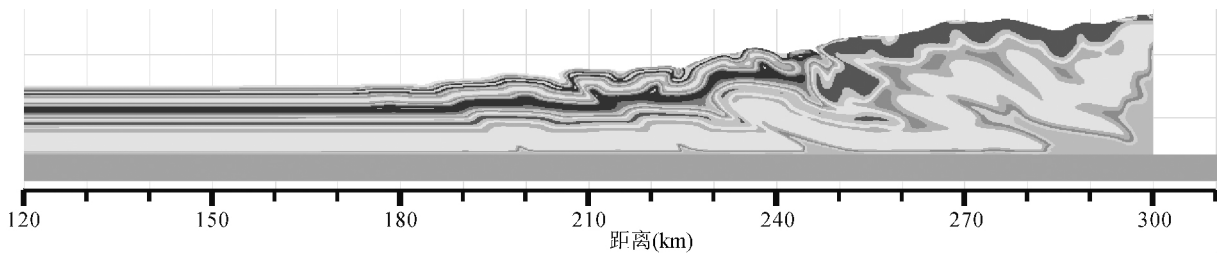


图6 不同基底滑脱面形态(与模型1对比)对前陆冲断带的影响。模型7,基底滑脱面埋深6km。纵横比例一致

Fig. 6 Effect of different basal detachment geometry (comparing to model one) on the foreland thrust belt. Model 7, depth of basal detachment is 6 km, no vertical exaggeration

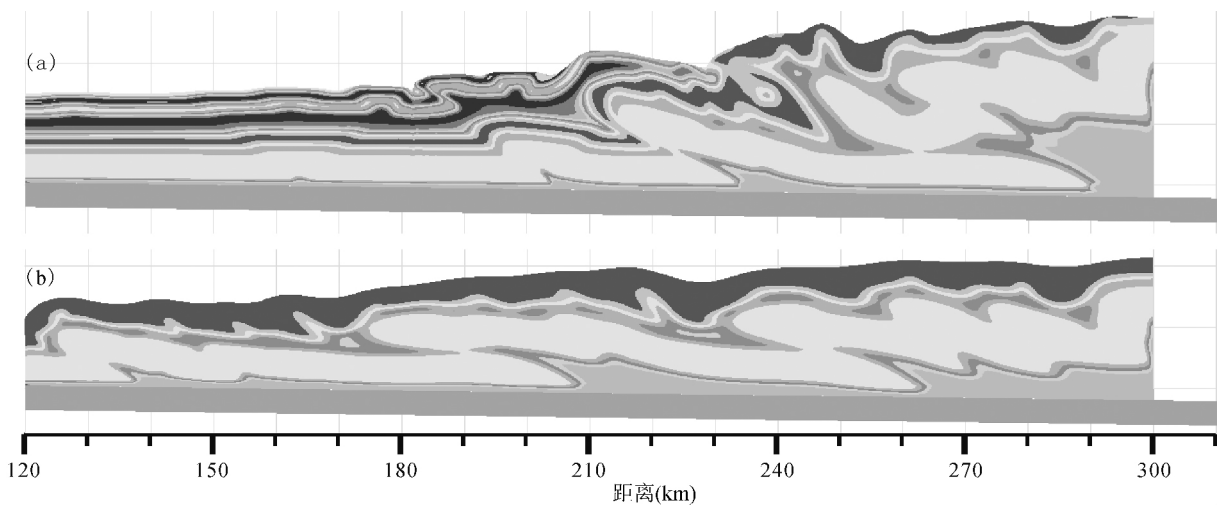


图7 表面过程对前陆冲断带的影响,纵横比例一致

Fig. 7 Effect of surface processes on the foreland thrust belt, no vertical exaggeration

(a)—模型8,同构造剥蚀2000m; (b)—模型9,无同构造沉积和剥蚀

(a)—Model 8, syntectonic erosion thickness 2000m; (b)—model 9, no syntectonic sedimentation or erosion



工作。

模型 9 不发生同构造沉积,也无剥蚀,该模型仅仅是出于比较的目的。虽然模型 9 的寒武系下部滑脱层屈服强度亦小于基底滑脱层强度,但表面没有发育侏罗山式褶皱,构造样式上也没有后陆与前陆的明显差异。由此可见,模型 1 中前陆发生同构造沉积和三叠系中下统滑脱层的共同作用是大巴山前后陆构造分带的关键控制因素。

## 4 模拟结果与大巴山地质原型的对比

### 4.1 几何学特征对比

根据大巴山最新的研究成果(Dong Shuwen et al., 2013),大巴山的前缘主逆冲断裂为镇巴断裂,该断裂以约  $14^{\circ}$  的倾角向北倾斜,浅层切割至地表,向深层延伸至约 27km。城口断裂是另一条大断裂,其深部滑脱面比镇巴断裂浅。模型 1 的断裂 F4、F6 和上述两断裂的结构相似(图 8、9)。城口断裂以北,变形以叠瓦式逆冲为主,镇巴断裂以南变形渐变弱,以三叠系中下统膏盐岩为滑脱面,浅层发育侏罗山式褶皱。与此相对应,断裂 F4 以右,发育叠瓦式构造,断层向下合并于 F4 断裂,最右侧的地层甚至变得陡立近  $90^{\circ}$ 。断裂 F6 以左,变形深度明显变浅,该浅层滑脱面以下,地层基本不变形。根据野外观察(Shi Wei et al., 2012),前陆盆地区的浅层褶皱由北侧的紧闭褶皱向南逐渐过渡到开阔褶皱,也和模型 1 的结果完全一致。

在大巴山地区,大量发育断层相关褶皱—断滑褶皱、断展褶皱和断弯褶皱(Li Zhiwu et al., 2006),在模型 1 中也能看到。断滑褶皱是逆冲岩席顺层滑脱的结果,在褶皱之下断层位移渐变至零。在图 8 和图 9 的变形前缘,应变逐渐消失,可观察到滑脱褶皱。沿此变形前缘往后陆方向,应变加强,褶皱变得紧闭,褶皱之下明显有断层存在而且消失于下盘断坡之上,故该褶皱为断展褶皱。如果变形进一步加强,逆冲岩席向上爬越断坡之后继续沿着上盘断坪向前运动,这时断坡之上可形成断弯褶皱。在图 9 中可识别出断弯褶皱,并可以通过演化史剖面观察到这些褶皱的演化过程。

大巴山地区由于多个滑脱层的存在,沿着上下两个滑脱面常可发育双重逆冲构造(Li Zhiwu et al., 2006)。在图 9 中 F6 断裂以右,可看到双重逆冲构造,底板断层为震旦系下部滑脱层,顶板断层为寒武系下部滑脱层。这些位于后陆的分支断层和断夹块随着挤压的继续而发生顺时针旋转,断面越来越

越陡。这和物理模拟的结果一致(如 Liu Yuping et al., 2008),也和大巴山的系列逆冲断层由北向南倾角逐渐变缓的趋势一致(图 1b)。

大巴山地区甚至整个川东、川北地区,由后陆向前陆逐渐变浅的多层滑脱构造是其普遍的特点,模型 1 的结果也具备此特点,而且通过图 9 还可以观察到断坡产生和断坪切换的过程。模型从开始挤压到缩短 18% 期间,发育两个滑脱层。模型缩短 20% 时,前陆已经沉积了 2000m 的三叠系中下统滑脱层和 800m 的上伏强硬层,这时在变形前缘可看到三叠系中下统滑脱层开始发生应变,但寒武系下部滑脱层的应变仍居主导。当模型缩短 25% 时,在前缘产生了新的逆冲断层 F6,起源于底部滑脱层,而向上与三叠系中下统滑脱层相连。寒武系下部滑脱层被断层 F6 截止,并在进一步的挤压缩短中被抬升,最终被推覆到三叠系中下统滑脱层之上,形成一个断弯褶皱。

### 4.2 运动学特征对比

大巴山前陆冲断带从北往南划分为北大巴山、南大巴山以及大巴山前陆盆地三个带,三者的关系是一个递次发展的过程。但前陆盆地在白垩纪沉积结束以后,大巴山的逆冲运动并没有停止,新生代大巴山经历了进一步的挤压隆升,前陆盆地中的表层褶皱部分在新生代中后期才形成,其年龄年轻至 20 多个 Ma (Cheng Wanqiang et al., 2009; Xu Changhai et al., 2010)。

模型 1 的演化历史能够比较形象地反映这个过程(图 8、9)。从模型开始挤压到缩短 15% 阶段,代表北大巴山形成。逆冲楔以大致相同的表面坡角向前扩展,这符合临界楔理论(Davis et al., 1983)。在缩短 15% 以后,前陆地区开始接受沉积,从缩短 25% 至 40% 期间,切割至基底滑脱面的前缘逆冲断层 F6,其上盘位置基本没变,但 F6 下盘继续向右俯冲。早期的同沉积地层临近后陆部分在后续的挤压中被隆升,因其高出基准面而沉积停止,故上三叠统以后的地层(layer1)较薄,这和大巴山地质实际相吻合(Li Sanzhong et al., 2002)。上三叠统以后的地层其褶皱变形主要发生在模型缩短 30% 之后,这也和实际的地质情况相似。年代学研究表明,前陆盆地的表层褶皱直到 40Ma 左右才卷入变形(Cheng Wanqiang et al., 2009)。

在模型缩短 10% 时,已经产生了切割至基底滑脱层的四条前冲断层(图 9c),随着模型进一步缩短,先形成的右侧三条断层基本停止活动,而前缘断

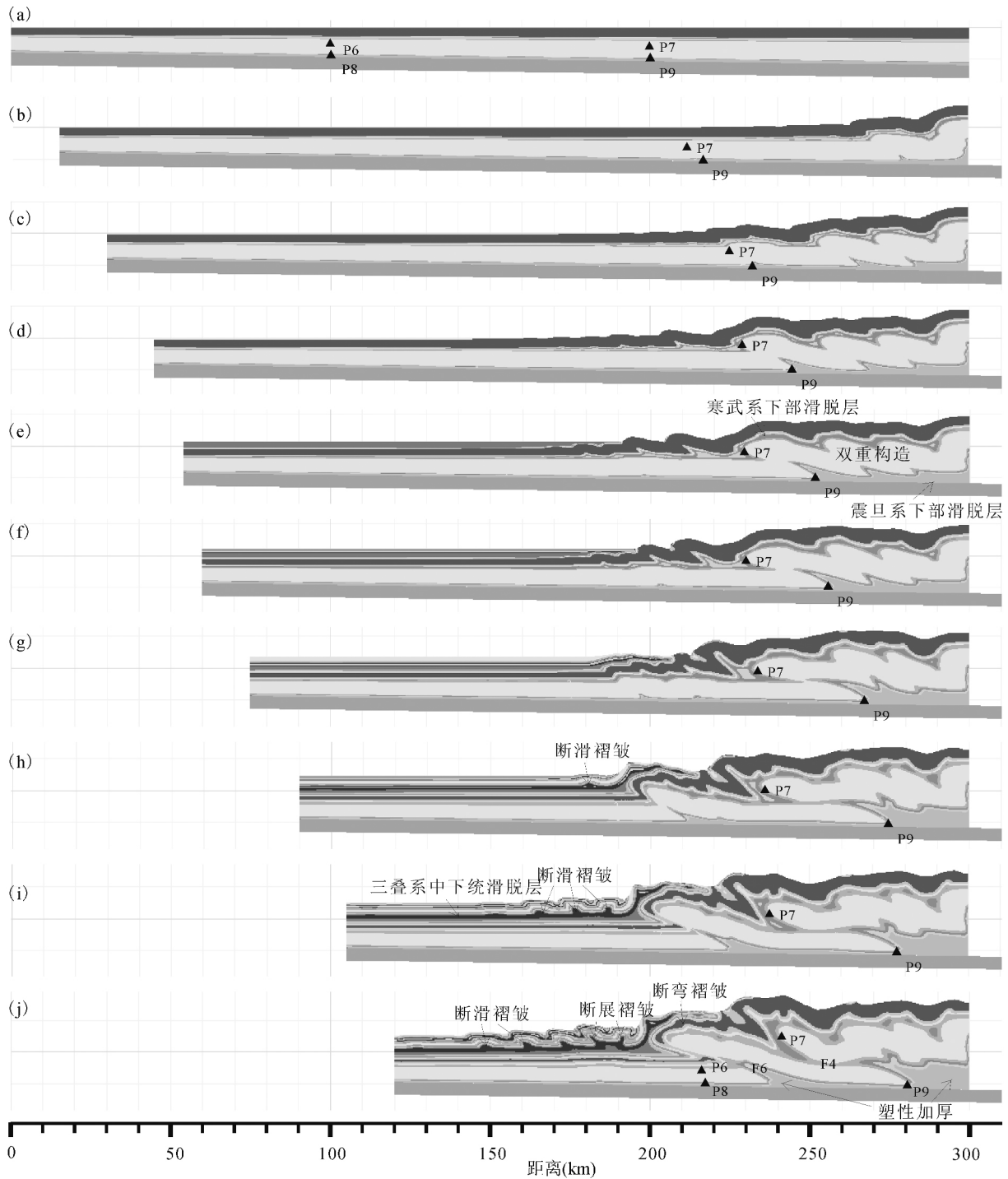


图 8 模型 1 的演化过程,四个记录点用于图 10 的分析,纵横比例一致

Fig 8 The evolution process of model one, four recording points used for analysis in figure 10, no vertical exaggeration (a)—初始模型;(b) —缩短 5%;(c)—缩短 10%;(d)—缩短 15%;(e)—缩短 18%,沉积软弱层 2000m;(f)—缩短 20%,沉积强硬层 800m;(g)—缩短 25%,沉积强硬层 1500m;(h)—缩短 30%,沉积强硬层 1000m;(i)—缩短 35%,沉积强硬层 500m;(j)—缩短 40%

(a)—Initial model;(b) —shortening 5%;(c)—shortening 10%;(d)—shortening 15%;(e)—shortening 18%, depositing weak layer 2000m;(f)—shortening 20%, depositing strong layer 800m;(g)—shortening 25%, depositing strong layer 1500m;(h)—shortening 30%, depositing strong layer 1000m;(i)—shortening 35%, depositing strong layer 500m;(j)—shortening 40%

层 F4 持续活动,逆冲断距持续增大,直至模型运行结束。在模型缩短 25%时,在前缘又产生了两条新的切割至基底滑脱层的前冲断层 F5 和 F6(图 9g),

后来逐渐合并为一条,同样其断裂活动持续到模型的最后阶段。

前陆盆地的同构造沉积发生前(即开始挤压至

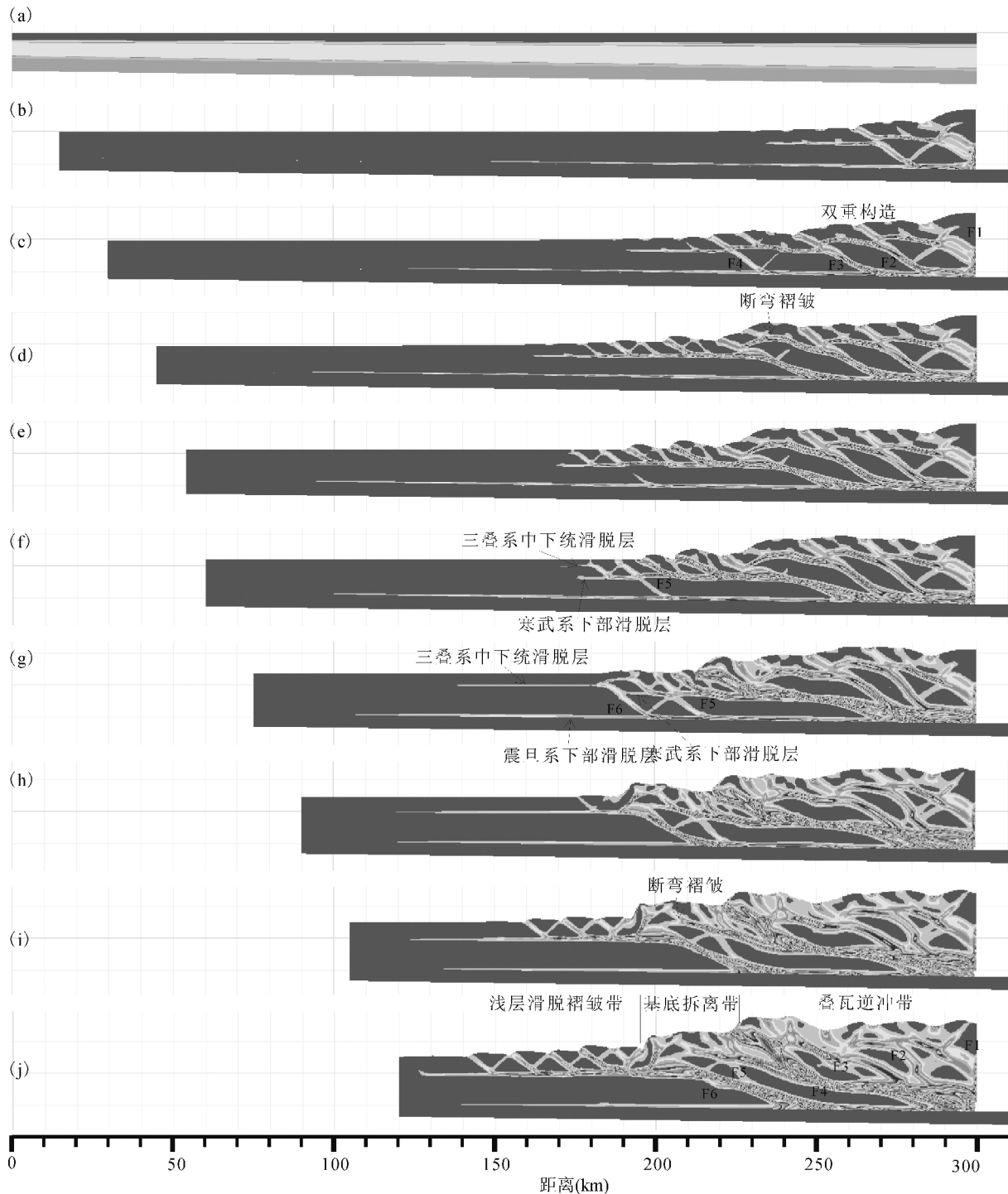


图 9 模型 1 的剪应变演化过程,纵横比例一致,F1 至 F6 代表断层以及发育先后顺序(a~j)的阶段划分与图 8 相同

Fig. 9 The evolution process of model one's shear strain, no vertical exaggeration, F1 to F6 stand for faults and their emerging sequence. The step divisions of (a~j) are similar to fig. 8

缩短 15%),逆冲断层以有序序列向前扩展,即新断层依次出现在老断层的前下方;同构造沉积发生后,浅层侏罗山式褶皱变形向前扩展的同时,后陆的先成断层也持续活动,逆冲扩展序列演变为无序序列。这是因为前陆盆地的同构造沉积降低了逆冲楔的楔角,相应地须要后陆逆冲断层的继续活动来补偿。

这种无序逆冲扩展序列在其它前陆冲断带也很常见,如在西班牙比利牛斯山中南部的 Ebro 前陆盆地,主逆冲断裂 Sierras Marginales 产生于 39.2~37.5Ma,而比它更靠近后陆的逆冲断层 Montsec 产生于 37.5~36.2Ma(Burbank et al.,1992)。

断层扩展的方式和经典的背驮式不同(Boyer

et al., 1982)。该经典模式以后陆向前陆主动挤压为动力来源,断层面上盘主动向前上方仰冲来实现逆冲扩展,断层下盘相对不动。而大巴山构造的地球动力学背景是北缘秦岭微板块相对不动,南缘的上扬子板块主动向北俯冲(Dong Shuwen et al., 2013),所以需要地层由南往北缩短,模拟结果与此结论完全一致。从图 8 的 P7 和 P9 两个记录点的位置演化就能看到,这两点分别位于断层 F4 的上盘和下盘。F4 断层形成后,断层上盘的前缘基本保持不动,而断层下盘继续向右下方俯冲,与后缘挡板的距离越来越近,这也同时造成了后缘基底滑脱层的强烈缩短加厚。

图 10 记录了模型 1 中两个地层(震旦系上部强硬层 layer5 和震旦系下部滑脱层 layer6)的缩短历史。强硬层的右段缩短了 40%,这和北大巴山约 40%的缩短量可以对比(He Jiankun et al., 1999)。中段缩短了 78km,而对重磁资料研究,认为北大巴山与基底之间错断了约 60km(Li Zhankui et al., 2007; Li Qiusheng et al., 2011),两者也有可比性。而左段缩短极少,只缩短了约 5km。滑脱层 layer6

左段的缩短量和 layer5 接近,但中段和右段明显不同。中段缩短了约 38km,而右段由于剧烈的塑性加厚,地层缩短了 80km。两层缩短应变的差异符合地层的力学特征,能干层不易发生塑性变形,其缩短主要通过脆性断裂而后地层重复来实现;而非能干层与此相反,其缩短应变主要由塑性加厚来调节,越靠近后陆,加厚越明显。

强硬层最右段 x1c 虽然最早开始缩短,但在总缩短达到 10% 之后,其缩短应变明显变缓,而此时中段 x1b 开始快速缩短。在最终的 120km 总缩短中,中段的缩短量占据了一半以上,而中段如此大的缩短量是因为两个主要逆冲断层从该段通过。这情形和大巴山的实际情形相似,即总缩短量不是在大巴山中均匀分布,也不是由后陆向前陆渐次减少,而是由主断裂(镇巴断裂和城口断裂)吸收大部分的总缩短应变。

### 5 讨论

前人对大巴山地区或者邻区开展过模拟研究。如 Liu Yuping et al. (2008)通过物理模型成功模拟

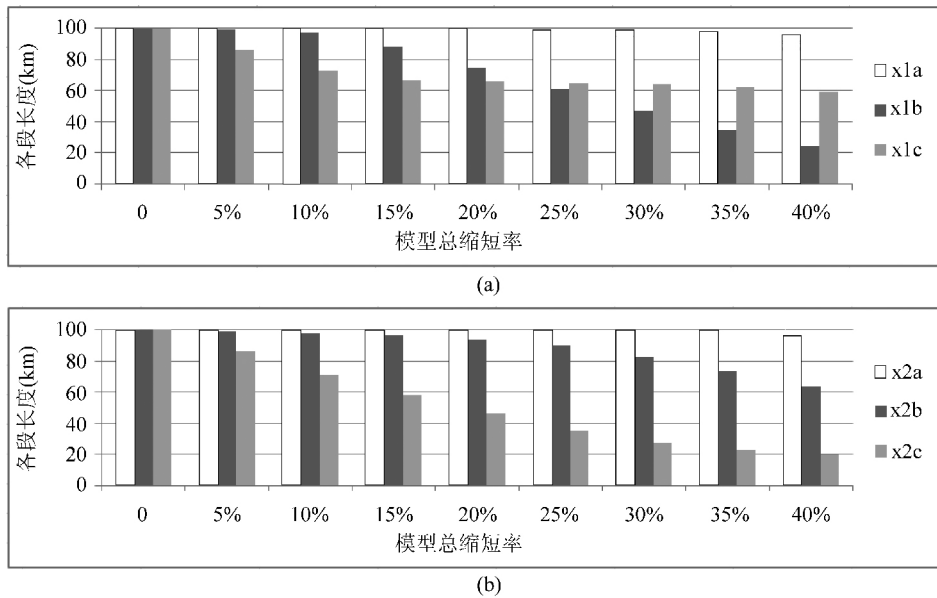


图 10 模型 1 强硬层不同段的水平方向缩短历史(a)和基底滑脱层不同段的水平方向缩短历史(b),记录点位置见图 8。其中, x1a: P6 点到左侧边界水平距离, x1b: P6 点到 P7 点水平距离, x1c: P7 点到右侧边界水平距离, x2a: P8 点到左侧边界水平距离, x2b: P8 点到 P9 点水平距离, x2c: P9 点到右侧边界水平距离, P6、P7 点在强硬层 layer5 中, P8、P9 点在底部滑脱层 layer6 中, 6 个段初始水平距离均为 100km

Fig. 10 Shortened history of different segments in horizontal direction in model one, (a) strong layer, (b) basal detachment layer; the location of the recording points is in fig. 8. x1a: horizontal distance from P6 to left boundary; x1b: horizontal distance between P6 and P7; x1c: horizontal distance from P7 to right boundary; x2a: horizontal distance from P8 to left boundary; x2b: horizontal distance between P8 and P9; x2c: horizontal distance from P9 to right boundary; initial horizontal distance of all segments is 100km

了叠瓦式逆冲构造、断层相关褶皱以及向前陆扩展的有序序列,但那些模型模拟两个滑脱层时,上滑脱层强度设置得不够弱,导致双重构造不明显,另外该模型也不考虑同构造沉积,所以结果和大巴山地质原型还有较大差别。Xie Guoai et al. (2013)通过更丰富的物理模型对川东侏罗山式构造开展了研究,成功地模拟了隔槽式、隔挡式褶皱以及后陆造山带构造等关键构造单元,亦模拟了由后陆向前陆逐渐抬高的滑脱层。但这些模型同样不考虑同构造剥蚀等的影响。另外,最关键的特征之一——向前陆逐渐抬升的滑脱层,是人为设定的结果,连接这些不同埋深滑脱层的断坡同样人为设定。实际上,这些断坡的产生和断坪的选择是不同地层不同力学强度以及同构造沉积共同作用的自然结果。本文的模型对这些不足做了改进。

但本文模型亦存在不足。第一,没有考虑地壳均衡作用的影响,而这个是必定存在而且在前陆冲断带中起重要影响的因素之一(Decelles et al., 1996)。第二,大巴山前陆的中下三叠统发育几十至几百米厚的膏盐岩(Tang Liangjie et al., 2007)。膏盐岩并不遵守莫尔-库伦准则,而遵守蠕变定律(Turcotte et al., 1982),如果利用黏弹性模型,与实际会更接近些。第三,没有考虑应变软化的影响,但研究已经证实,岩石材料应变之后发生软化是非常普遍的行为(如 Selzer et al., 2007)。第四,同构造剥蚀只是做了初步尝试,对剥蚀过程的更多约束没考虑。而这些不足也是以后研究的方向。

## 6 结论

文章通过各地层不同力学组合模型、不同的基底滑脱面形态、不同的表面过程等方面对大巴山前陆冲断带开展了数值模拟。不管从构造样式上还是演化过程上模拟结果和大巴山地质原型都有很好的可比性,充分说明了有限差分法模拟地质构造的可行性。

(1)大巴山前陆冲断带的主滑脱面由后陆向前陆逐渐抬升是因为前陆拥有相对软弱的滑脱层(含膏盐岩的中下三叠统)所致,同时该滑脱层也是前陆区表层侏罗山式褶皱形成的主控因素。

(2)大巴山前陆冲断带主逆冲断裂——镇巴断裂特定的构造位置(分隔强变形的后陆和弱变形的)前陆)与同构造沉积以及中下三叠统滑脱层的分布有关,通过该断裂,大巴山后陆的强烈缩短应变由深滑脱层(震旦系下部)向南传递至浅滑脱层(三叠系

中下统),导致前陆区浅层褶皱变形相对强烈而深层变形不明显。

(3)虽然大巴山前陆冲断带的应变强度总体上由北往南由强变弱,但这并不代表缩短应变也是由北往南递减。本文数值模拟表明,主逆冲断裂(镇巴断裂和城口断裂)可能调节了一半以上的总缩短应变。

(4)同构造沉积发生后,前陆区浅层侏罗山式褶皱往前扩展的同时,后陆的先成断裂也持续活动,逆冲加大并发生顺时针旋转,构成无序逆冲扩展序列。

(5)逆冲扩展和经典背驮式不同,缩短应变主要由主断层下盘向后陆深部俯冲来实现。

致谢:匿名审稿专家对文章提出了富有建设性的修改意见,谨向他们致以深切的谢意!

## References

- Boyer S E, Elliott D. 1982. Thrust systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66(9): 1196~1230.
- Burbank D W, Verges J, Muñoz J A, Bentham P. 1992. Coeval hindward-imbricating and forward-imbricating thrusting in the South-Central Pyrenees, Spain—timing and rates of shortening and deposition. *Geological Society of America Bulletin*, 104(1): 3~17.
- Byerlee J D. 1978. Friction of rocks. *Pure Appl. Geophys.*, 116: 615~626.
- Cheng Wanqiang, Yang Kunguang. 2009. Structural evolution of Dabashan Mountain: Evidence from ESR dating. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 197~206(in Chinese with English abstract).
- Costa E, Vendeville B C. 2002. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belts above a weak, viscous evaporite décollement. *Journal of Structural Geology*, 24(11): 1729~1739.
- Davis D M, Suppe J, Dahlen F A. 1983. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research*, 88(B12): 1153~1172.
- Decelles P G, Giles K A. 1996. Foreland basin systems. *Basin Research*, 8: 105~123.
- Dong Shuwen, Hu Jianmin, Shi Wei, Zhang Zhong yi, Liu Gang. 2006. Jurassic superposed folding and Jurassic foreland in the Daba Mountain, Central China. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(5): 403~410(in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Gao Rui, Yin An, Guo Tonglou, Zhang Yueqiao, Hu Jianmin, Li Jianhua, Shi Wei, Li Qiusheng. 2013. What drove continued continent-continent convergence after ocean closure? Insights from high-resolution seismic-reflection profiling across the Daba Shan in central China. *Geology*, 41(6): 671~674.
- He Jiankun, Lu Huaifu, Zhang Qinglong, Zhu Bin. 1997. The thrust tectonics and it's transpressive geodynamics in southern

- Dabashan Mountains. *Geological Journal of China Universities*, 3(4):419~428(in Chinese with English abstract).
- He Jiankun, Lu Huaifu, Zhu Bin. 1999. The tectonic inversion and its geodynamic processes in northern Daba Mountains of eastern Qinling orogenic belt. *Scientia Geologica Sinica*, 34(2):139~153(in Chinese with English abstract).
- Hu Mingqing, Liu Shaofeng. 2012. 3-D modeling for flexural subsidence and deposition process of foreland basin. *Acta Geologica Sinica*, 86(1):181~187(in Chinese with English abstract).
- Itasca. 2011. *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua, User Manual, Version 7.0*. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- Koyi H A, Vendeville B C. 2003. The effect of décollement dip on geometry and kinematics of model accretionary wedges. *Journal of Structural Geology*, 25(9):1445~1450.
- Li Sanzhong, Zhang Guowei, Li Yalin, Lai Shaocong, Li Zonghui. 2002. Deformation and orogeny of the Mian-Lue suture zone in the Qinling orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 76(4):469~483(in Chinese with English abstract).
- Li Zhiwu, Liu Shugen, Luo Yuhong, Liu Shun, Xu Guoqiang. 2006. Structural style and deformational mechanism of southern Dabashan foreland fold-thrust belt in central China. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(3):294~304(in Chinese with English abstract).
- Li Zhankui, Ding Yanyun. 2007. A tentative discussion on characteristics of the Daba mountain nappe structure. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 31(6):495~498(in Chinese with English abstract).
- Li Qiusheng, Gao Rui, Wang Haiyan, Zhang Jisheng, Li Pengwu, Lu Zhanwu, Guan Ye, Hou Hesheng. 2011. Lithospheric structure of northeastern Sichuan-Dabashan basin-range system and top-deep deformation coupling. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3):612~620(in Chinese with English abstract).
- Li Shiqin, Wang Xin, Supp J. 2012. Compressional salt tectonics and synkinematic strata of the western Kuqa foreland basin, southern Tian Shan, China. *Basin Research*, 24(4):475~497.
- Liu Yuping, Yin Hongwei, Zhang Jie, Xu Shijin, Xie Guoai. 2008. Physical modeling on double décollements structure in fold-and-thrust belt. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(4):424~428(in Chinese with English abstract).
- Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Guo Tonglou, Huang Rui, Cai Xunyu, Li Guoxiong. 2005. Discovery of the large-scale Puguang gas field in the Sichuan basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting. *Geological Review*, 51(4):477~480(in Chinese with English abstract).
- McClay K R, Whitehouse P S. 2004. Analog modeling of doubly vergent thrust wedges. In: McClay K R. ed. *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems*. AAPG Memoir 82, 184~206.
- McLellan J G, Oliver N H S, Schaubs P M. 2004. Fluid flow in extensional environments; Numerical modelling with an application to Hamersley iron ores. *Journal of Structural Geology*, 26(6~7):1157~1171.
- Morley C K. 1988. Out of sequence thrusts. *Tectonics*, 7(6):539~561.
- Price R A, Mountjoy E W. 1971. Geologic structure of the Canadian Rocky Mountains between Bow and Athabasca Rivers—a progress report. In: Wheeler J O. ed. *Structure of the Southern Canadian Cordillera*. Geological Association of Canada Special Paper 6, 7~26.
- Ruh J B, Kaus B J P, Burg J-P. 2012. Numerical investigation of deformation mechanics in fold-and-thrust belts; Influence of rheology of single and multiple décollements. *Tectonics*, 31(TC3005):1~23.
- Selzer C, Buiter S J H, Pfiffner O A. 2007. Sensitivity of shear zones in orogenic wedges to surface processes and strain softening. *Tectonophysics*, 437:51~70.
- Shi Wei, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Hu Jianmin, Wiesinger M, Ratschbacher L, Jonckheere R, Li Jianhua, Tian Mi, Chen Hong, Wu Guoli, Ma Licheng, Li Hailong. 2012. Intracontinental Dabashan orocline, southwestern Qinling, central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 46:20~38.
- Stockmal G S, Beaumont C, Nguyen M, Lee B. 2007. Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts; Insights from numerical models. In: Sears J W, Harms T A, Evenchick C A. ed. *Whence the Mountains? Inquiries into the Evolution of Orogenic Systems. A Volume in Honor of Raymond A. Price*. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*, 433, 63~98.
- Song Qingwei, Yan Danping, Jiao Shoutao, Wu Kang, Dong Zhoubin. 2014. The Response of Compounding Process of Dabashan and Xuefengshan Thrust Belt in J3-K1; the Structural Styles and Formation Mechanism of the Zigui Fold Belt, Western HuBei. *Acta Geologica Sinica*, 88(8):1382~1400.
- Tang Liangjie, Guo Tonglou, Yu Yixin, Jin Wenzheng, Li Rufeng, Zhou Yan. 2007. Salt-related structures in the foreland fold-thrust belt of the northeastern Sichuan basin, South China. *Acta Geologica Sinica*, 81(1):1048~1056(in Chinese with English abstract).
- Turcotte D L, Schubert G. 1982. *Geodynamics; Applications of Continuum Physics to Geological Problems*. Wiley, New York: 450.
- Vermeer P A, De Borst R. 1984. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. Delft Univ. of Technol., Delft, Netherlands.
- Wang Shunyu, Dai Hongming, Wang Haiqing, Huang Qingde. 2000. Source rock feature of the south of the Dabashan and Micangshan. *Natural Gas Geoscience*, 11(4~5):4~16(in Chinese with English abstract).
- Wang Ruirui, Zhang Yueqiao, Xie Guoai, Xu Huaizhi. 2011. Origin of the Dabashan foreland salient; Insights from sandbox modeling. *Acta Geologica Sinica*, 85(9):1409~1419(in Chinese with English abstract).
- Wang Ruirui, Xu Zhiqin, Liang Fenghua. 2013. Origin of the Dabashan salient; Evidence from numerical modelling. *Acta Geologica Sinica*, 87(10):1489~1497(in Chinese with English abstract).

abstract).

- Wu Hongling, Shi Wei, Dong Shuwen, Tian Mi. 2009. A numerical simulating study of mechanical characteristic of superposed deformation in Daba Mountain Foreland. *Earth Science Frontiers*, 16(3):190~196(in Chinese with English abstract).
- Xie Guoai, Jia Dong, Zhang Qinglong, Wu Xiaojun, Shen Li, Lu Yunshan, Zou Xu. 2013. Physical modeling of the Jura-type folds in eastern Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 87(6):773~788(in Chinese with English abstract).
- Xu Changhai, Zhou Zuyi, Chang Yuan, Guillot F. 2010. The correlation of Dabashan arcuate structure with Huangling and Hannan basement uplifts: Constraints from FT, (U-Th/He) low-temperature geochronology. *Science in China (Series D)*, 40(12):1684~1696(in Chinese without English abstract).
- Yamato P, Kaus B J P, Mouthereau F, Castelltort S. 2011. Dynamic constraints on the crustal-scale rheology of the Zagros fold belt, Iran. *Geology*, 39(9):815~818.
- Yan Danping, Jin Zhelong, Zhang Weichen, Liu Shaofeng. 2008. Rock mechanical characteristics of the multi-layer detachment fault system and their controls on the structural deformation style of the Sichuan-Chongqing-Hunan-Hubei thin-skinned belt, South China. *Geological Bulletin of China*, 27(10):1687~1697 (in Chinese with English abstract).
- Yong Liu, Allen P A, Densmore A L, Qiong Xiaoke. 2003. Evolution of the Longmen Shan foreland basin (western Sichuan, China) during the late triassic Indosinian. *Basin research*, 15:117~138.
- Yue Guangyu. 1998. Tectonic characteristics and tectonic evolution of Dabashan orogenic belt and its foreland basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 18(Suppl.):8~15(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Shi Wei, Li Jianhua, Wang Ruirui, Li Hailong, Dong Shuwen. 2010. Formation mechanism of the Dabashan foreland arc-shaped structural belt. *Acta Geologica Sinica*, 84(9):1300~1315(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jisheng, Gao Rui, Li Qiusheng, Guan Ye, Wang Haiyan, Li Wenhui. 2013. Characteristic of gravity and magnetic anomalies in the Daba Shan and the Sichuan basin, China: Implication for architecture of the Daba Shan. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 87(4):1154~1161.
- 程万强, 杨坤光. 2009. 大巴山构造演化的石英 ESR 年代学研究. *地学前缘*, 16(3):197~206.
- 董树文, 胡健民, 施炜, 张忠义, 刘刚. 2006. 大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆. *地球学报*, 27(5):403~410.
- 何建坤, 卢华复, 张庆龙, 朱斌. 1997. 南大巴山冲断构造及其剪切挤压动力学机制. *高校地质学报*, 3(4):419~428.
- 何建坤, 卢华复, 朱斌. 1999. 东秦岭造山带南缘北大巴山构造反转及其动力学. *地质科学*, 34(2):139~153.
- 胡明卿, 刘少峰. 2012. 前陆盆地挠曲沉降和沉积过程 3-D 模型研究. *地质学报*, 86(1):181~187.
- 李秋生, 高锐, 王海燕, 张季生, 李朋武, 卢占武, 管焯, 侯贺晟. 2011. 川东北—大巴山盆地系岩圈结构及浅深变形耦合. *岩石学报*, 27(3):612~620.
- 李三忠, 张国伟, 李亚林, 赖绍聪, 李宗会. 2002. 秦岭造山带勉略缝合带构造变形与造山过程. *地质学报*, 76(4):469~483.
- 李占奎, 丁燕云. 2007. 大巴山推覆构造特征的探讨. *物探与化探*, 31(6):495~498.
- 李智武, 刘树根, 罗玉宏, 刘顺, 徐国强. 2006. 南大巴山前陆冲断带构造样式及其变形机制分析. *大地构造与成矿学*, 30(3):294~304.
- 刘玉萍, 尹宏伟, 张洁, 徐士进, 解国爱. 2008. 褶皱—冲断体系双层滑脱构造变形物理模拟实验. *石油实验地质*, 30(4):424~428.
- 马永生, 郭旭生, 郭彤楼, 黄锐, 蔡勋育, 李国雄. 2005. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示. *地质论评*, 51(4):477~480.
- 宋庆伟, 颜丹平, 焦守涛, 吴钊, 董周宾. 2014. 大巴山与雪峰山逆冲构造带 J3-K1 复合过程的响应——鄂西秭归褶皱带构造样式与形成机制. *地质学报*, 88(8):1382~1400.
- 汤良杰, 郭彤楼, 余一欣, 金文正, 李儒峰, 周雁. 2007. 四川盆地东北部前陆褶皱——冲断带盐相关构造. *地质学报*, 81(1):1048~1056.
- 王瑞瑞, 张岳桥, 解国爱, 许怀智. 2011. 大巴山弧形构造的成因:来自砂箱实验的认识. *地质学报*, 85(9):1409~1419.
- 王瑞瑞, 许志琴, 梁凤华. 2013. 大巴山弧形构造的成因——来自数值模拟的证据. *地质学报*, 87(10):1489~1497.
- 王顺玉, 戴鸿鸣, 王海清, 黄清德. 2000. 大巴山、米仓山南缘烃源岩特征研究. *天然气地球科学*, 11(4~5):4~16.
- 武红岭, 施炜, 董树文, 田密. 2009. 大巴山前陆叠加构造力学特征的模拟研究. *地学前缘*, 16(3):190~196.
- 解国爱, 贾东, 张庆龙, 吴晓俊, 沈礼, 吕赞珊, 邹旭. 2013. 川东侏罗山式褶皱构造带的物理模拟研究. *地质学报*, 87(6):773~788.
- 许长海, 周祖翼, 常远, Guillot F. 2010. 大巴山弧形构造带形成与两侧隆起的关系: FT 和 (U-Th)/He 低温热年代约束. *中国科学(D 辑, 地球科学)*, 40(12):1684~1696(in Chinese with English abstract).
- 颜丹平, 金哲龙, 张维宸, 刘少峰. 2008. 川渝湘鄂薄皮构造带多层剥离滑脱系的岩石力学性质及其对构造变形样式的控制. *地质通报*, 27(10):1687~1697.
- 乐光禹. 1998. 大巴山造山带及其前陆盆地的构造特征和构造演化. *矿物岩石*, 18(增刊):8~15.
- 张岳桥, 施炜, 李建华, 王瑞瑞, 李海龙, 董树文. 2010. 大巴山前陆弧形构造带形成机理分析. *地质学报*, 84(9):1300~1315.

## 参 考 文 献

## Numerical Simulation of Structural Styles and Evolution of the Daba Shan Foreland Thrust Belt

HUANG Guangming<sup>1)</sup>, WANG Yuejun<sup>2)</sup>, ZHAO Yonggang<sup>3)</sup>, HUANGFU Pengpeng<sup>4)</sup>

1) *LandOcean Energy Services Co., Ltd., Beijing, 100094;*

2) *School of Earth Science and geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275;*

3) *Exploration and Development Research Institute of Dagang Oilfield Company, Tianjin, 300280;*

4) *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640*

### Abstract

The Daba Shan region with its unique tectonic setting and rich petroleum resources is attracting people's interest to conduct much in-depth research. Based on the finite difference method and the elastic-plastic constitutive model with two-dimensional plane strain, this study carried out a series of numerical simulations for the Daba Shan foreland and thrust belt. The results show that the foreland area has the relatively weak detachment in the Lower-Middle Triassic which includes gypsum and salt, which led to the main decollement surface transferring from the lower stratum in hinterland into the higher stratum in foreland. The distribution of Lower-Middle Triassic detachment and syntectonic sedimentation put limitation on the position of the Zhenban Thrust, through which strong shortening strain in the hinterland was transmitted from basal detachment of lower Sinian into higher detachment of Lower-Middle Triassic. Long-term activity of the Zhenba thrust and Chenkou thrust might have accommodated more than half of total shortening strain of the Daba Shan foreland and thrust belt. After syntectonic sedimentation, the shallow Jura-type folds in the foreland area propagated forward while those old faults in hinterland continued to thrust and rotate clockwise, thus forming an out-of-order thrusting sequence. Propagation of the main thrusts, which is different from classic piggyback mode, has shortening strain resulting from subduction of the footwall of main fault deeply into the backland. The simulation results are similar to the geological prototype of the Daba Shan foreland and thrust belt, illustrating that using finite difference software to simulate geological structure is feasible.

**Key words:** Daba Shan Foreland Thrust Belt; detachment; syntectonic sedimentation; out of sequence thrust; shear strength