

断层相关褶皱的三维构造几何学分析:以川西三维地震工区为例*

贾东 李一泉 王毛毛 李海滨

JIA Dong, LI YiQuan, WANG MaoMao and LI HaiBin

南京大学能源科学研究院,地球科学与工程学院,南京 210093

Institute of Energy Sciences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2011-01-10 收稿, 2011-02-13 改回.

Jia D, Li YQ, Wang MM and Li HB. 2011. Three-dimensional structural geometry of fault-related folds: Examples from 3-D seismic explored blocks in the western Sichuan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3):732-740

Abstract All the current fault-related fold theories are based on the principle of balanced cross sections. The pseudo-3D model is constructed with the combination of 2D cross sections, while the true 3D fault-related fold model has not been built and is still under exploration. In this paper, we use Trishear 4.0 and GoCad programs to build a series of 2D forward cross-sections including fault-bend folds and trishear fault-propagation folds with different displacements. These sections are arrayed according to settled linear displacement gradients to construct the pseudo-3D model of fault-bend fold and trishear fault-propagation fold for our analysis and discussions. Further more, we choose the Qiongxian fault-bend fold and Yanjinggou fault-propagation fold covered by 3D seismic data as the two examples for the interpretations of the true 3D models. This research indicates that the Qiongxian anticline is a typical shear fault-bend fold and the Yanjinggou anticline a typical trishear fault-propagation fold. Through the comparison between the conceptual model and the true model, we find that the strike displacement gradients are the basic factor to control the 3D geometric features, whereas, the complexities of fault geometry and rocks mechanics anisotropy are the main difficulties to construct the true 3D conceptual model of the fault-related folds.

Key words Fault-related fold; Pseudo-3D conceptual model; True 3D model; Structural geometry

摘要 现有的断层相关褶皱理论均基于平衡剖面原理而建立的二维几何学模型。所谓的假三维模型则是通过一系列的二维剖面复合而成的,真正意义上的三维断层相关褶皱理论尚未确立,仍然处于探索阶段。本文采用 Trishear 4.0 和 GoCad 软件,分别构建一系列不同位移量的断层转折褶皱和三剪断层传播褶皱的二维正演剖面,将这些正演剖面按照一定的线性位移梯度平行排列,从而建立起断层转折褶皱和三剪断层传播褶皱的假三维理论模型并加以分析和讨论。进而选取川西南盆地中三维地震勘探所覆盖的邛西断层转折褶皱和盐井沟断层传播褶皱,作为真三维实际解释模型的两个实例。研究表明,邛西背斜是一个典型的剪切断层转折褶皱,盐井沟背斜是一个典型的三剪断层传播褶皱;断层相关褶皱的假三维理论模型与实际解释模型的对比分析,可以看出沿背斜走向的位移梯度是控制三维构造几何学特征的基本因素,然而自然界断层面几何学的复杂多变以及岩层力学性质的各向异性,是造成断层相关褶皱真三维理论模型难以建立的主要原因。

关键词 断层相关褶皱;假三维理论模型;真三维解释模型;构造几何学

中图分类号 P542

* 本文受国家科技重大专项(2008ZX05003-001,2009ZX05009-001)和国家教育部博士点基金项目(20090091110020)联合资助。

第一作者简介:贾东,男,1960年生,教授,主要从事盆地构造与活动断层研究,E-mail: djia@nju.edu.cn

1 引言

近 20 多年来, 断层相关褶皱的二维几何学和运动学模型研究已经取得了十分显著的进展, 许多学者致力于将二维几何学模型扩展到三维领域 (Wilkerson *et al.*, 1991; Shaw *et al.*, 1994; Fischer and Wilkerson, 2000; Rowan and Linares, 2000; Wilkerson *et al.*, 2002, 2007; 管树巍等, 2003)。1999 年 10 月在丹佛召开的美国地质学会上, 构造地质学家就集中讨论了在三维空间内对断层相关褶皱的描述, 恢复以及建模方法。2005 年 6 月贾承造院士和 Suppe 教授在北京主持召开了“断层相关褶皱理论与应用国际学术讨论会”, 进一步强调了从二维向三维的转化。这些研究不管是通过 2D/3D 的地震反射剖面解释, 详细的野外填图, 还是物理模拟或者计算机模拟都为我们对断层相关褶皱的三维几何学, 运动学和动力学性质的理解提供了更为广泛的途径。现有的断层相关褶皱理论都是基于平衡剖面原理之上, 建立的二维几何学和运动学模型。断层相关褶皱三维几何学分析多数则是通过一系列相邻的二维剖面复合而构建的假三维模型。这种假三维模型的建立主要是考虑形成褶皱的逆冲断层在其走向上的位移量、断层面几何形态或者褶皱变形机制的变化。真正意义上的三维断层相关褶皱的体积平衡和位移场理论尚未确立, 仍然处于探索阶段。Strayer and Suppe (2002) 采用三维离散元数值模拟方法, 探究了一个逆冲断层沿走向扩展的面外运动方式 (out-of-plane motion) 及其引发的相关褶皱。Dischinger and Mitra (2006) 利用测井资料在怀俄明褶皱冲断带建立了一个滑脱褶皱的三维构造实例模型。本文试图通过对川西南盆地中三维地震勘探所覆盖的邛西断层转折褶皱和盐井沟断层传播褶皱, 进行精细的构造解析, 建立起真三维的解释模型。再将真三维解释模型与二维正演模拟构建的假三维模型进行比对, 揭示两者之间的相似性和差异性, 分析三维建模的关键问题和难点, 进而探讨如何实现断层相关褶皱几何学分析从二维向三维的转化。

2 假三维理论模型的建立

断层相关褶皱的三维几何学特征强调的是断层及其上盘褶皱构造在走向上的变化。构造地质学家早就清楚地意识到褶皱冲断带中的单个断层相关褶皱是不能无限制延伸的, 这些褶皱一般在逆冲断层中部达到其最大褶皱幅度, 同时向着断层的侧向端元褶皱幅度逐渐降低, 从而在断层及其相关褶皱的终端形成倾伏背斜 (Dahlstrom, 1969; Elliott, 1976; Wheeler, 1980; Coward and Potts, 1983; Liu and Dixon, 1991; 魏国齐和贾承造, 1998; 肖安成等, 2000a, b; 卢华复等, 2001; Wilkerson *et al.*, 2002; 汪新等, 2002; 何登发等, 2004; 陈汉林等, 2006, 2009; 李本亮等, 2007)。目前学者普遍认为造成断层相关褶皱三维几何形态在走向

上变化的可能机制有 3 种: (1) 沿逆冲断层走向上存在位移梯度, 比如说在褶皱中部位移量最大, 向两端位移量逐渐递减直至为零, 从而形成终端倾伏背斜; (2) 断层面几何学在走向上的变化, 可以在两端产生侧断坡或者斜断坡, 也能形成终端倾伏背斜; (3) 变形机制在褶皱走向上的变化, 例如从断层转折褶皱转变为断层传播褶皱 (Fischer *et al.*, 1992)。自然界的断层相关褶皱实际上可能是这 3 种机制在不同状态下的复合, 由此使得三维建模的研究十分困难。通过一系列二维剖面构建的假三维模型尽管是不真实的, 但是它有助于我们理解三维断层相关褶皱的发育机制, 也许是实现从二维向三维转化过程中的必经之路。

这里, 我们采用 GeoSec 和 Trishear 4.0 软件, 正演模拟出一系列断层相关褶皱的二维剖面, 再将这些二维正演剖面导入 GoCad 软件构建断层相关褶皱的假三维理论模型并分别加以分析和讨论。假如只考虑位移梯度, 断层面几何学不随走向变化 (即不存在侧断坡/斜断坡发育) 的情况下, 断层相关褶皱的断层面就保持稳定的平面状, 即断层转折褶皱为断坪-断坡-断坪, 断层传播褶皱则为断坪-断坡。在这一前提之下, 我们分别构建一系列不同位移量的简单断层转折褶皱 (Suppe, 1983) 和三剪 (trishear) 断层传播褶皱 (Allmendinger, 1998) 的二维正演剖面, 将这些正演剖面按照一定的线性位移梯度平行排列, 通过连接相邻剖面的地层线和断层线, 从而建立起简单断层转折褶皱和三剪断层传播褶皱的假三维模型 (图 1、图 2)。

2.1 断层转折褶皱的假三维模型

按照断层转折褶皱的经典理论 (Suppe, 1983), 当上盘岩层沿着断坪-断坡-断坪式的台阶状逆冲断层相对于其下盘运动时, 在断层转折点将产生 2 对褶皱轴面, 一对是向斜轴面, 另一对是背斜轴面。这种成对轴面随着运动而迁移, 就造成翼部膝折变形产生断层转折褶皱。断层转折褶皱的运动学特征是断层扩展速率 (P) 明显大于岩层滑动速率 (S), 上盘岩层沿下部层位的后断坪, 经过断坡, 到达上部层位的前断坪, 褶皱前翼倾角稍大于后翼倾角。这里我们在保持断层几何学不随走向变化 (断坡倾角 $\theta = 30^\circ$) 的前提下, 设定线性位移梯度角 $\delta = 15^\circ$, 选择运动学参数 $P/S = 15$, 构建 11 条断层转折褶皱正演剖面 (图 1a), 通过组合排列形成断层转折褶皱的假三维模型 (图 1b)。从这些三维立体模型中可以清楚看出, 随着位移量沿断层走向的递减, 上盘褶皱的几何学形态随之变化, 褶皱翼部宽度稳定一段后逐渐变窄, 顶部宽度先逐渐变窄然后又渐渐加宽, 并且向断层零位移端倾斜形成倾伏背斜 (终端背斜倾伏角 $\mu = 10^\circ$)。

2.2 三剪断层传播褶皱的假三维模型

Suppe and Medwedeff (1990) 采用层间挠曲滑动和膝折变形机制建立了理想的断层传播褶皱模型, 强调在断坪-断坡组合的逆断层面上, 上盘岩层随着断层滑动发生膝折带迁移,

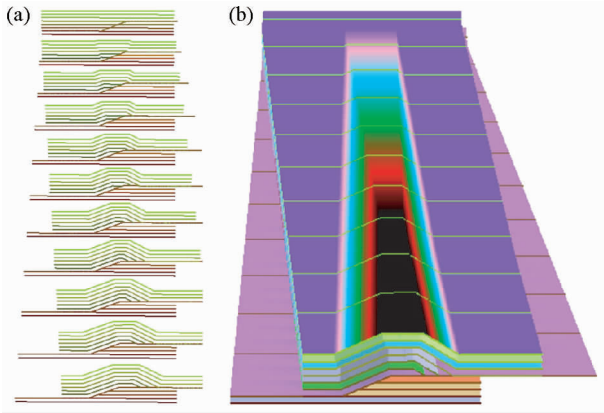


图1 断层转折褶皱的假三维模型

(a)-位移线性变化的系列剖面;(b)-假三维模型

Fig.1 The pseudo-3D model of the fault-bend fold

(a)-a series of 2D cross sections with linear displacement gradients;

(b)-the pseudo-3D model

同时断层端点沿着断坡不断向上扩展,从而形成前翼陡倾的不对称褶皱。然而,自然界中许多断层传播褶皱不同于膝折变形的图案,褶皱前翼通常出现地层厚度和倾角的变化以及发育下盘向斜,并且褶皱岩层既有角度化的膝折弯曲又有圆弧状弯曲,褶皱的几何学随着构造层次和接近断层端线的程度而变化。三剪变形机制能够较好的解释这些现象(Erslev, 1991; Allmendinger, 1998),在三剪变形中褶皱作用发育在断层扩展前方具有分散剪切的三角带之内,复杂褶皱的几何学及其应变场可以由不同的断层几何学和运动学参数来决定。而且,与 Suppe and Medwedeff (1990) 模型不同的是,三剪模型得出的结果是数值解而不是单纯的几何解,有可能更加适应于自然界复杂多样的褶皱变形过程。因此,我们采用三剪变形机制来构建断层传播褶皱的假三维模型,同样保持断层几何学不随走向变化(断坡倾角 $\theta = 30^\circ$) 的前提下,选择运动学参数 $P/S = 1.5$, 构建 12 条三剪断层传播褶皱正演剖面(图 2a),按照线性位移梯度角 $\delta = 15^\circ$ 方式排列,复合产生断层传播褶皱的假三维模型(图 2b)。与断层转折褶皱假三维模型比较来看,随着位移量沿断层走向的线性递减,同样在断层零位端形成倾伏背斜(终端背斜倾伏角 $\mu = 10^\circ$)。在断层传播褶皱后翼由于采用膝折变形模式因此其几何学形态具有与断层转折褶皱相似的变化,其明显不同的几何学主要出现在三剪变形的后翼,表现为向前突出的弧形,并且可以观察到前翼地层在厚度和倾角上的变化。注意背斜顶部宽度在越高的层位就越宽,然而每一单层的顶部宽度在走向方向上却基本保持稳定。

Wilkerson *et al.* (1991) 同样在仅考虑位移梯度的情况下,推导出描述简单断层转折褶皱(Suppe, 1983)和断层传播褶皱(Suppe and Medwedeff, 1990)假三维几何学的基本公式:1) 断层转折褶皱 $\tan\mu = \sin\theta \tan\delta$, 2) 断层传播褶皱 $\tan\mu = 2\sin\theta \tan\delta$, 其中 μ 为终端背斜倾伏角, θ 为断坡倾角, δ 为线性

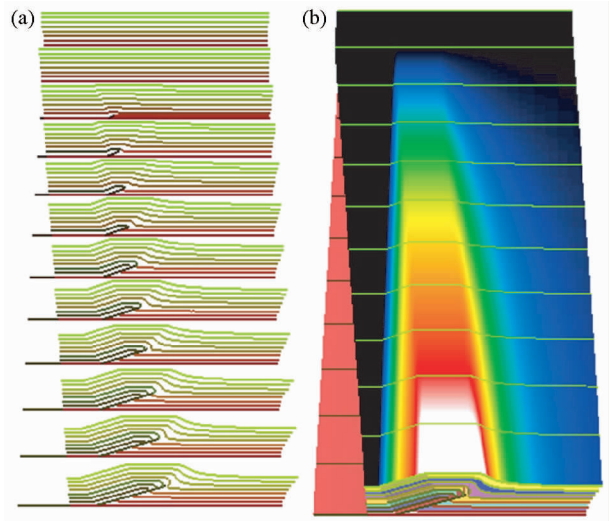


图2 三剪断层传播褶皱的假三维模型

(a)-位移线性变化的系列剖面;(b)-假三维模型

Fig.2 The pseudo-3D model of the trishear fault-propagation model

(a)-a series of 2D cross sections with linear displacement gradients;

(b)-the pseudo-3D model

位移梯度角,进而确定了断层位移梯度与褶皱终端倾伏角之间的角度谱关系(图3)。Suppe (1983)、Suppe and Medwedeff (1990)的论证表明断层转折褶皱和断层传播褶皱的下盘断坡最大倾角分别为 30° 和 60° 。我们知道自然界非变质逆冲岩片的位移梯度不可能达到 $0 \sim 90^\circ$ 区间的变化范围。Wilkerson *et al.* (2002) 通过统计单个逆冲构造的缩短量与走向长度关系时,发现一个连续逆冲岩片的位移梯度(δ)不会超过 $35^\circ \sim 40^\circ$ (即 $0.70 \sim 0.84$ 的剪应变)。据此假设天然逆冲岩片的最大位移梯度为 35° , 那么就可以得到简单断层转折和断层传播褶皱的终端背斜倾伏角(μ) 分别最大可达 20° 和 50° 。换言之,可以推测一旦发现自然界的断层相关褶皱的终端背斜倾伏角(μ) 大于相应值的话,就可以判断褶皱构造下部有可能存在侧断坡/斜断坡(Wilkerson *et al.*, 2002)。

3 真三维解释模型的实例分析

在四川盆地西南部发育有许多 NE 和 NNE 向的褶皱构造,它们是青藏高原东缘新生代变形作用所产生的薄皮褶皱冲断构造,构造几何学上主要表现为各种类型的断层相关褶皱(Burchfiel *et al.*, 1995; Burchfiel, 2004; 贾东等, 2003; 陈竹新等, 2005; Jia *et al.*, 2006)。其中的邛西和盐井沟背斜是两个正在生产的天然气田,它们位于龙门山前与龙泉山构造之间。由于油气勘探的需要,这两个相对孤立的背斜现已三维地震所覆盖并且有多口探井,为我们从事三维构造解析提供了十分难得的机遇。这 2 个北东走向的背斜具有

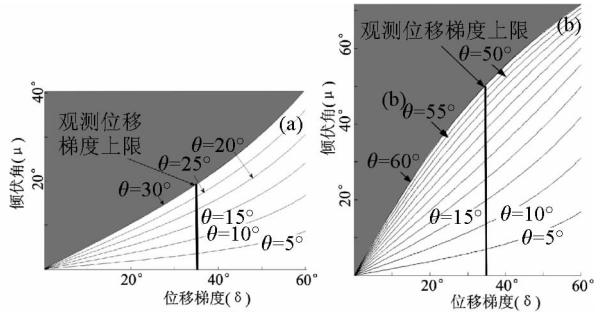


图3 位移梯度与褶皱终端倾伏的角度谱(据 Wilkerson *et al.*, 2002 修改)

(a)-断层转折褶皱;(b)-断层传播褶皱

Fig.3 Graph showing the displacement gradients versus the fold terminal plunge (after Wilkerson *et al.*, 2002)

(a)-fault-bend fold; (b)-fault-propagation fold

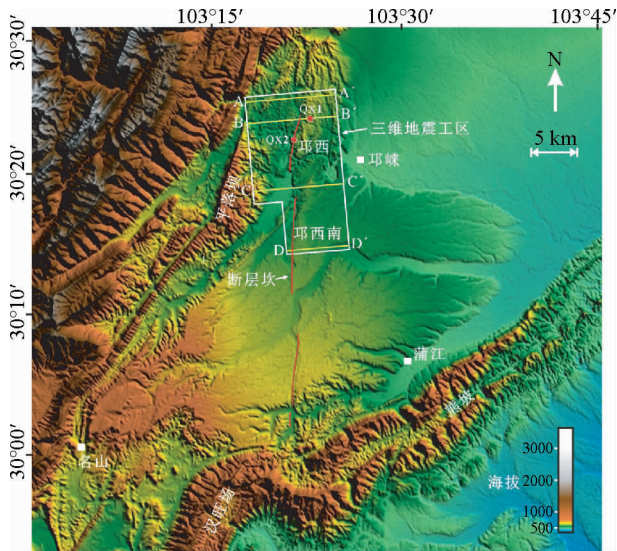


图4 邛西背斜和名邛洪积扇构造位置的数字地形图像
Fig.4 DEM of the Qiongxian anticline and the Mingqiong alluvial fan

典型的断层相关褶皱特征。而且,一个属于断层转折褶皱,另一个属于三剪断层传播褶皱,它们代表了自然界普遍存在的2种基本形式。

3.1 实例1:邛西背斜——一个典型的断层转折褶皱

邛西背斜位于川西南晚更新世时期的名邛洪积扇之上(图4),数字地形图像显示出一条南北向邛西断层明显切割了这个晚更新世名邛洪积扇表面,说明它是一条活动断层(Jia *et al.*, 2009)。中石油西南油气田分公司在此采集了约200km²的三维地震数据。三维地震工区覆盖了全部的邛西背斜和部分的邛西南背斜。地震数据记录了2.5s的双程反射时间,对应大约5km的深度。利用邛西1井的VSP测井数据提供的速度信息,我们将钻井的分层

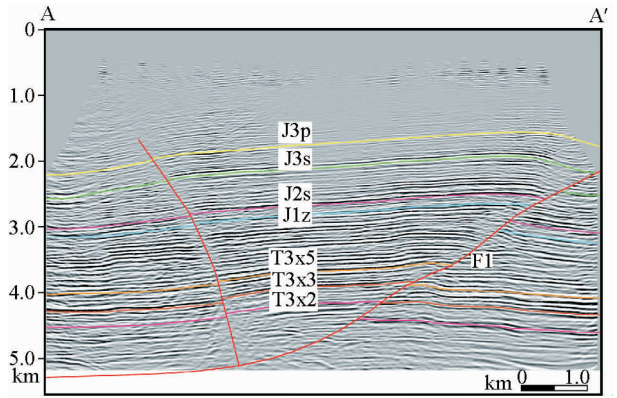


图5 横切邛西背斜的地震剖面 AA'

T₃x²-上三叠统须家河组二段底;T₃x³-上三叠统须家河组三段底;T₃x⁵-上三叠统须家河组五段底;J₁z-下侏罗统自流井组底;J₂s-中侏罗统沙溪庙组底;J₃s-上侏罗统遂宁组底;J₃p-上侏罗统蓬莱镇组底。剖面位置见图4

Fig.5 Cross section AA' of Qiongxian anticline

T₃x²-bottom of the second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation; T₃x³-bottom of the third member of the Upper Triassic Xujiahe Formation; T₃x⁵-bottom of the fifth member of the Upper Triassic Xujiahe Formation; J₁z-bottom of the Lower Jurassic Ziliujing Formation; J₂s-bottom of the Middle Jurassic Shaximiao Formation; J₃s-bottom of the Upper Jurassic Suining Formation; J₃p-bottom of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation. The section is shown in Fig. 4

数据标定到三维地震数据体之中。利用 Landmark SeisWorks 3D 软件详细解释了58条地震测线并拾取了7套地层层位和12条断层。下面我们选择其中典型的剖面进行分析和讨论:

剖面 AA'位于三维地震工区的最北端,横切邛西背斜(图5)。主断面 F1 表现出断坪-断坡的构造几何样式,没有明显的前翼断坪。顶部地层平缓,前翼东倾,倾角为17°。下伏断坡倾角为32°,其背斜后翼倾角明显小于下伏断坡倾角,与经典的断层转折褶皱显著不同。断距沿着断面 F1 向下逐渐减小,表明邛西背斜具有剪切断层转折褶皱的特征(Suppe *et al.*, 2004)。

剖面 BB'位于三维地震工区北部,横切邛西背斜,测线长约10km,与邛西活动断层踪迹近乎垂直。在剖面 BB'中,主断面 F1 表现出断坪-断坡-断坪的几何样式(图6)。F1 切割了上三叠统,侏罗系和白垩系地层,滑脱层推测在中三叠统雷口坡膏盐层之中。F2 是一条沿着褶皱后翼轴面突破的反冲断层,切割了上三叠统,侏罗系和白垩系地层,并一直向上贯通至地表。构造剖面解释表明邛西背斜表现出剪切断层转折褶皱的构造几何形态,具有缓而长的后翼和狭窄而紧闭的前翼,并且沿着主断面,两侧地层断距向下逐渐减小。

剖面 CC'位于邛西背斜和邛西南背斜的过渡带(图7)。从剖面依然可以识别出 F1,表现出断坪-断坡的几何形态。

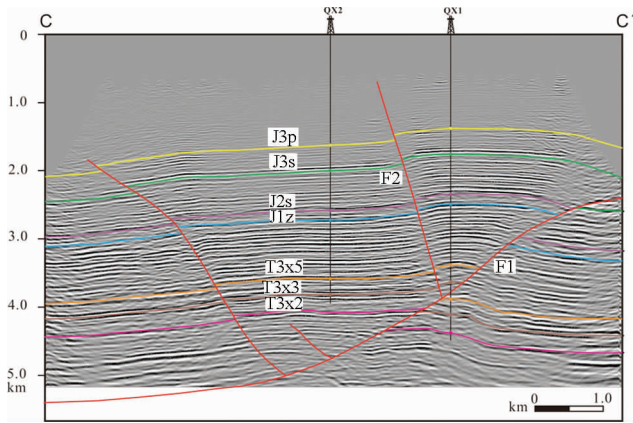


图6 横切邛西背斜的构造剖面 BB'

位置见图4,图例见图5

Fig. 6 Cross section BB' of Qiongxi anticline

The section is shown in Fig. 4, and the legend is shown in Fig. 5

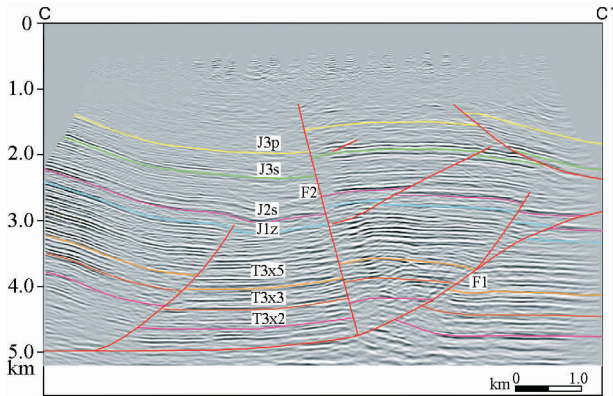


图7 横切邛西背斜的构造剖面 CC'

位置见图4,图例见图5

Fig. 7 Cross section CC' of Qiongxi anticline

The section is shown in Fig. 4, and the legend is shown in Fig. 5

反向逆冲断层沿着后翼突破,切割上三叠统,侏罗系,白垩系地层,并一直向上可能贯通至地表。在剖面的西部,可以清晰的识别出平落坝背斜的前翼。

剖面 DD'位于三维地震工区最南端,横切邛西南背斜,剖面长约8km(图8)。主断面 F1 表现出断坪-断坡-断坪的几何形态,但与经典断层转折褶皱不同的是其前断坪是倾斜而非水平的。主断面 F1 的滑脱层推测落在软弱的雷口坡组膏岩中。存在两条沿轴面突破的反向断层 F2a, F2b, 其中 F2b 一直向上突破至地表,引起地表冲积扇的错断变形。虽然背斜的后翼倾角为 14° 远小于断坡角 41° ,但是邛西南背斜并不是剪切断层转折褶皱。因为经剪切断层相关褶皱理论计算表明,邛西南背斜的剪切角为 $88^\circ \sim 90^\circ$,是经典断层的断层转折褶皱。此外我们在断坡的底端鉴别出一弯曲的膝折带 aa', 在其内部地层和断层相平行,与 Suppe *et al.* (2004) 提出的弯曲的断层转折褶皱相符合,而在具有剪切的断层转折褶皱中却无法鉴定出这样的膝折带。邛西断层及

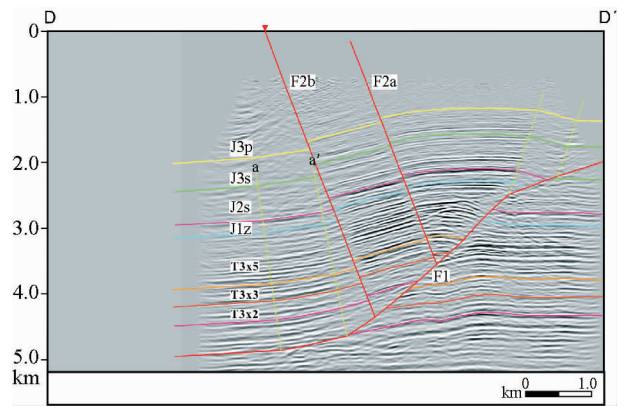


图8 横切邛西南背斜的构造剖面 DD'

位置见图4,图例见图5

Fig. 8 Cross section DD' of Qiongxi anticline

The section is shown in Fig. 4, and the legend is shown in Fig. 5

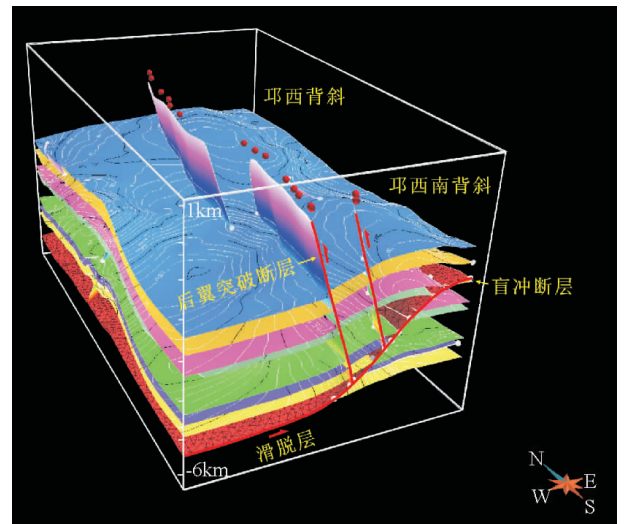


图9 基于三维地震数据构建的邛西背斜和邛西南背斜(部分)的真三维模型

Fig. 9 True 3D model of the Qiongxi and Qiongxinan anticline (part of) based on the 3D seismic data

其相关的邛西背斜和邛西南背斜在三维模型中可以分辨的非常清楚(图9)。邛西断层表现出明显的断坪-断坪的几何形态,反冲断层沿着后翼从转折位置向上传播至地表。邛西背斜的后翼坡度远小于其前翼坡度,表现出剪切断层转折褶皱的特征。在邛西背斜中,位移量沿着背斜核部向南北两侧递减,背斜形态也随之发生变化,顶部宽度先逐渐变窄然后又渐渐加宽,背斜顶部与底部存在一定程度的旋转可能与底部塑性软弱层发生剪切作用有关。邛西南背斜的三维形态特征非常吻合断层转折褶皱的三维理论模型,随着位移量沿断层走向的递减,顶部宽度先逐渐变窄然后又渐渐加宽,并且向断层位移递减的方向倾斜形成倾伏背斜。

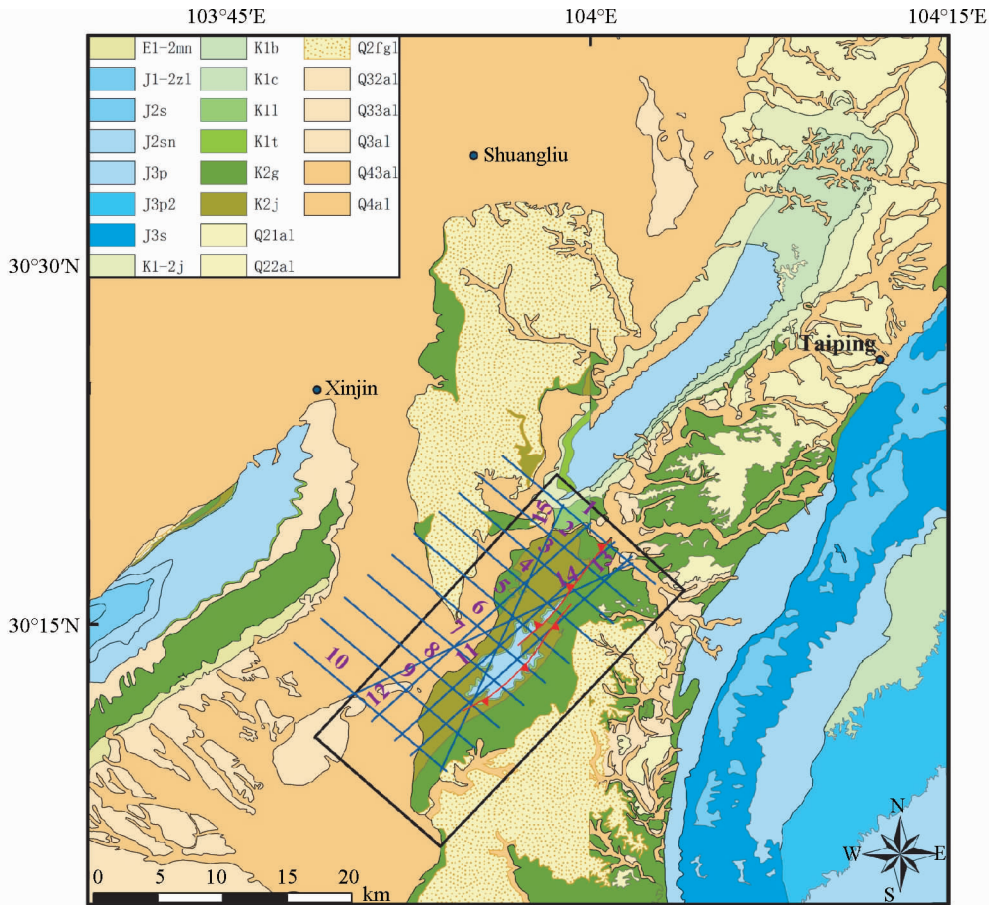


图 10 盐井沟背斜及邻区地质简图,蓝色线代表该区的地震剖面位置(据 Li *et al.* , 2007)

Fig. 10 Geological map of the Yanjinggou anticline and adjacent areas with seismic reflection profiles in blue lines obtained from PetroChina (after Li *et al.* , 2007)

3.2 实例 2:盐井沟背斜——一个三剪断层传播褶皱

盐井沟背斜是川西南盆地典型的断层传播褶皱之一,其西侧和东侧分别与熊坡和龙泉山毗邻(图 10)。盐井沟三维地震工区覆盖了约 20km 长,8km 宽的区域,背斜出露地层主要为上侏罗蓬莱镇组和白垩系夹关组和灌口组地层,岩性以河流和湖泊相的砂岩为主。为了便于建立三维构造模型我们从盐井沟背斜三维地震数据体上萃取 15 条高质量的地震剖面,双程时间达到 2.5s。基于井数据,考虑到盐井沟背斜只是一个很小的区域,这里采用 4000m·s⁻¹ 的地震波速,把解释出的地层和断层转化为深度域,剖面到达约 4km 的深度(图 11)。

解释模型中包含了 1 个主要的滑脱层,4 个地层和 2 条断层面,这些断层分别切割了地层。褶皱卷入了上三叠统到白垩统地层(图 11、图 12),正如四川盆地其它地方一样,缺失新生代地层。盐井沟背斜的 3D 模型表明它是一个断层相关褶皱(图 11、图 12),就像世界很多其它前陆盆地内的褶皱一样。很多几何学和运动学模型被建立起来用来描述断层相关褶皱,包括等厚模型和固定轴面模型(Suppe, 1983;

Suppe and Medwedeff, 1990),还有三剪模型(Allmendinger, 1998)。因为三剪模型主要为变形的区域提供了更多的运动学描述,这和其它运动学模型是互补的,而不是相互竞争的,并且很容易和其他模型区分。根据选取的地震反射剖面,在盐井沟背斜的前翼可以清楚的观测到三剪变形带,在这里,地层有明显的增厚现象,褶皱前翼相对于后翼相对狭窄、陡峭;褶皱在核部变得更加紧闭;地层滑移量向上逐渐减小并在褶皱内部逐渐消失(图 11)。所有的这些特征表明盐井沟背斜是一个典型的三剪断层传播褶皱,滑脱层位于大约 4km 深的上三叠统的蒸发岩层内。断层的传播终止在上三叠统地层内,并没有截断侏罗系及其以上的地层。此外,褶皱最大滑移量发生在褶皱的中部(地震侧线 6)(图 11),向 NE 和 SW 方向逐渐递减,表现为一个位移梯度近乎对称递减的断层传播褶皱形态。

断层传播量和滑移量的比值(P/S)对断层传播褶皱的形态有很重要的影响。低的 P/S 值通常会生成陡峭的而紧闭的褶皱前翼,并带有显著的褶皱增厚现象。高 P/S 值通常会生成宽缓的褶皱前翼,并且地层增厚也没那么显著(Allmendinger, 1998; Ernesto and Allmendinger, 2001)。盐

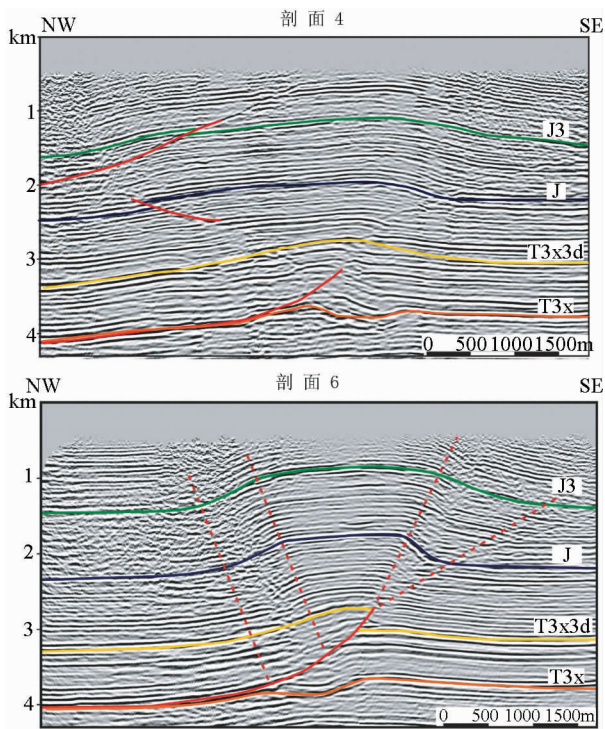


图 11 盐井沟构造的地震剖面 4 和 6 的解释

T_3x -上三叠统须家河组底; T_3x^3d -上三叠统须家河组三段底; J-侏罗系底; J_3 -上侏罗统底. 剖面位置见图 10

Fig. 11 Seismic interpretations of cross section 4 and 6 across the Yanjinggou anticline

T_3x -bottom of the Upper Triassic Xujiahe Formation; T_3x^3d -bottom of the third member of the Upper Triassic Xujiahe Formation; J-bottom of the Jurassic; J_3 -bottom of the Upper Jurassic. The section is shown in Fig. 10

井沟背斜相对比较宽缓, 前翼地层并不陡立, 说明这个断层传播褶皱的 P/S 值可能比较大, 褶皱并没有被强烈缩短, 还处于褶皱形成的初级阶段. 盐井沟背斜的三维几何学模型

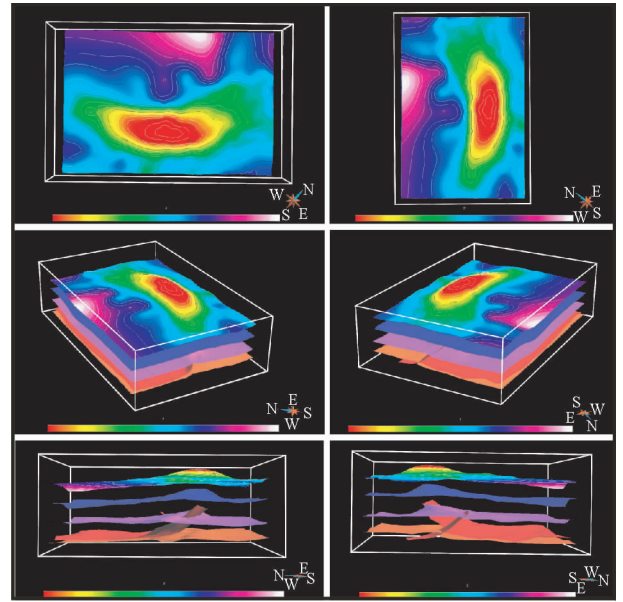


图 12 盐井沟构造的真三维解释模型

Fig. 12 The true 3D model of the Yanjinggou anticline

表现出一个几乎对称的曲线几何学, 在背斜核部凸向 SE, 换言之, 这个背斜发生了相对于垂直轴的小幅度旋转 (图 12)。对比断层传播褶皱理论模型的断层面和盐井沟背斜实际解释的断层面, 可以发现理论的断层面断层位移量是线性递减的, 而盐井沟断层面位移量不呈线性递减, 因此端线表现为弧形。另外, 理论模型中的断面平整, 而实际模型断面的走向不是一个确定的值, 向 SE 方向拱起, 其原因是断层传播量 P 值, 地层滑移量 S 值, 以及 P/S 值在位于褶皱不同部位的值不一样, 导致在形态上, 这些剖面的断坡角不一样, 褶皱两端的断面太高, 甚至翘起, 形成了一个类似侧断坡的构造 (图 13)。侧断坡的形成是为了调节构造沿着走向差异的滑移量而形成的, 往往可以作为连接相邻 2 个构造的桥梁, 盐井沟背斜既简单又经典, 为我们研究川西南盆地的构造演化提供了一个非常好的实例。

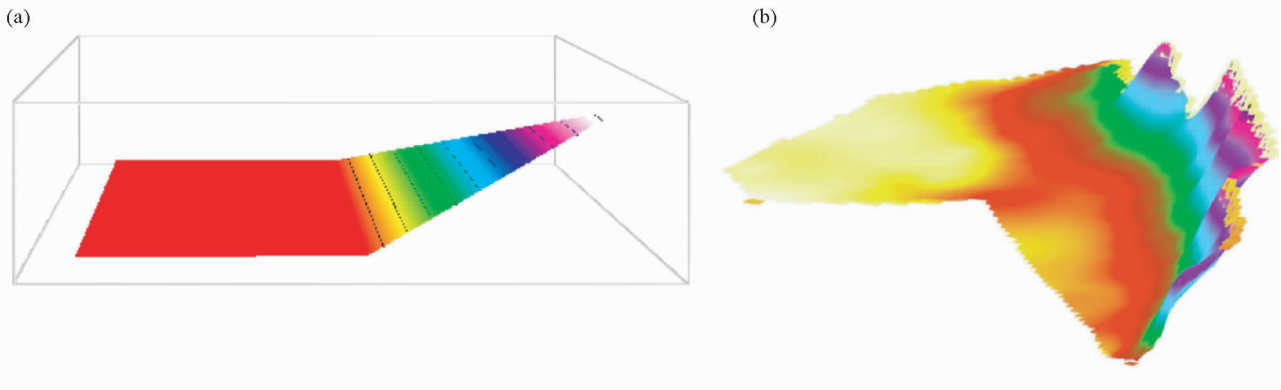


图 13 断层传播褶皱断层面理论模型 (a) 和盐井沟断层实际解释模型 (b) 的比较

Fig. 13 The comparison of the fault geometry between the conceptual model (a) and the true model (b)

4 结论

任何理论模型都是不真实的,但确是有用的。它仅仅是一种近似,能够帮助我们理解自然界断层相关褶皱的几何学及其发育过程。我们构建的假三维模型是建立在某种假设的几何学和运动学边界条件基础上的,例如只有单一的断坡,没有下盘叠瓦构造,不存在翼旋转等等。自然界的断层相关褶皱不可能按照这些模型提供的简单路径发生和发展,就像我们在邛西和盐井沟背斜中所看到的那样。从三维地震数据体建立的实际解释模型中可以看出,邛西背斜是一个典型的剪切断层转折褶皱,背斜后翼坡度远小于其前翼坡度,表现出剪切断层转折褶皱的特征。同时位移量沿着背斜核部向南北两侧递减,背斜形态也随之发生变化,顶部宽度先逐渐变窄然后又渐渐加宽,背斜顶部与底部存在一定程度的旋转可能与底部塑性软弱层发生剪切作用有关。盐井沟背斜是一个典型的三剪断层传播褶皱,对比断层传播褶皱理论模型的断层面和盐井沟背斜实际解释的断层面,可以发现理论的断层面位移量是线性递减的,而盐井沟断层面位移量不呈线性递减,断层面表现为不规则的曲面。由此可见断层相关褶皱的假三维理论模型与实际解释模型的对比分析,可以看出沿背斜走向的位移梯度是控制三维构造几何学特征的基本因素,然而自然界断层面几何学的复杂多变以及岩层力学性质的各向异性,是造成断层相关褶皱真三维理论模型难以建立的主要原因。

目前的断层相关褶皱三维几何学,运动学和动力学的描述已经有个简单的雏形。值得庆幸的是随着地下三维地震数据的逐渐改进,三维可视化/模拟技术的不断发展,将为我们将来的地质学家更好地了解断层相关褶皱从三维到四维的发育过程打下良好的基础。

致谢 衷心感谢中石油勘探开发研究院盆地构造与油气成藏实验室李本亮主任提供 Landmark 和 Gocad 软件平台并给予多方面的帮助。浙江大学教育部盆地构造研究中心杨树锋、陈汉林和肖安成教授多次与作者研讨断层相关褶皱的三维建模问题和技术方法,并对本文提出具体的指导性意见和建议,帮助极大,在此深表谢意。野外工作期间得到中石油四川油气田勘探开发研究院杨光副院长和曾庆高工的指导和帮助,在此一并致谢。

References

Allmendinger RW. 1998. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, 17(4): 640–656
 Burchfiel BC, Chen Z, Liu Y and Royden LH. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, Central China. *Int. Geol. Rev.*, 37: 661–735
 Burchfiel BC. 2004. 2003 presidential address: New technology, new

geological challenges. *GSA Today*, 14: 4–9
 Chen HL, Yang SF, Xiao AC, Pan ZZ, Cheng XG, Chen JJ, Fan MT and Tian DW. 2006. Deformation characteristics and time of Cenozoic thrust belt in southern margin of Jiuquan basin. *Oil & Gas Geology*, 27(4): 488–494 (in Chinese with English abstract)
 Chen HL, Luo JC, Guo QY, Liao L, Xiao ZY, Cheng XG and Yang SF. 2009. Deformation history and tectonic evolution of southeastern Tarim basin in Mesozoic and Cenozoic. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 38–45 (in Chinese with English abstract)
 Chen ZX, Jia D, Zhang Q, Wei GQ, Li BL, Wei DT and Shen Y. 2005. Balanced cross-section analysis of the fold-thrust belt of the Longmen Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 38–45 (in Chinese with English abstract)
 Coward MP and Potts GJ. 1983. Complex strain patterns developed at the frontal and lateral tips to shear zones and thrust zones. *Journal of Structural Geology*, 5: 383–395
 Dahlstrom CA. 1969. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6: 743–757
 Dischinger JD and Mitra S. 2006. Three-dimensional structural model of the Painter and East Painter reservoir structures, Wyoming fold and thrust belt. *AAPG Bulletin*, 90(8): 1171–1185
 Elliott D. 1976. The motion of thrust sheets. *Journal of Geophysical Research*, 81: 949–963
 Ernesto OC and Allmendinger RW. 2001. Pseudo 3-D modeling of trishear fault-propagation folding. *Journal of structural Geology*, 23: 1–2
 Erslev EA. 1991. Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19: 617–620
 Fischer MP, Woodward MB and Mitchell MM. 1992. The kinematics of break-thrust folds. *J. Struc. Geol.*, 143: 335–342
 Fischer MP and Wilkerson MS. 2000. Predicting the orientation of joints from fold shape: Results of pseudo-three-dimensional modeling and curvature analysis. *Geology*, 28(1): 15–18
 Guan SW, Wang X, Yang SF, Zhao WD, Xu F and Lei GL. 2003. 3-D structural analysis on the Kuqa's Qilitag anticline zone of the southern Tianshan Mountains, China. *Geological Review*, 49(5): 464–473 (in Chinese with English abstract)
 He DF, Yin C, Du SK, Shi X and Ma HS. 2004. Characteristics of structural segmentation of foreland thrust belts: A case study of the fault belts in the northwestern margin of Junggar basin. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 91–101 (in Chinese with English abstract)
 Jia D, Chen ZX, Jia CZ, Wei GQ, Li BL, Zhang Q, Wei DT and Shen Y. 2003. Structural features of the Longmen Shan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, Central China. *Geological Journal of China Universities*, 19(3): 402–410 (in Chinese with English abstract)
 Jia D, Wei GQ, Chen ZX, Li BL, Zeng Q and Yang G. 2006. Longmen Shan fold-thrust belt and its relation to western Sichuan basin in Central China: New insights from hydrocarbon exploration. *AAPG Bulletin*, 90: 1425–1447
 Jia QP, Jia D, Luo L, Chen ZX, Li YQ, Deng F, Sun SS and Li HB. 2009. Three-dimensional evolutionary models of the Qiongx structures, southwestern Sichuan basin, China: Evidence from seismic interpretation and geomorphology. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 372–385
 Li BL, Jia CZ and Pang XQ. 2007. The spatial distribution of the foreland thrust tectonic deformation in the circum-Tibetan Plateau basin and range system. *Acta Geologica Sinica*, 81(9): 1200–1207 (in Chinese with English abstract)
 Li YQ, Jia D, Luo L, Jia QP, Chen ZX, Deng F, Sun SS and Zhang YY. 2007. Three dimension construction and magnetic fabric analysis of the Yanjinggou fault-propagation fold in western Sichuan, China. *Earth Science Frontiers*, 14(4): 74–84
 Liu S and Dixon JM. 1991. Centrifuge modelling of thrust faulting: Structural variation along strike in fold-thrust belts. *Tectonophysics*, 188: 39–62
 Lu HF, Jia CZ, Jia D, Chen CM, Liu ZH, Wang GQ and Wang SL. 2001. Features of the thrust wedge of deformation belt in Kuqa

- rejuvenation foreland basin. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 257–271 (in Chinese with English abstract)
- Rowan MG and Linares R. 2000. Fold-evolution matrices and axial-surface analysis of fault-bend folds: Application to the Medina anticline, eastern Cordillera, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 84: 741–764
- Shaw JH, Hook SC and Suppe J. 1994. Structural trend analysis by axial-surface mapping. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 78: 700–721
- Strayer LM and Suppe J. 2002. Out-of-plane motion of a thrust sheet during along-strike propagation of a thrust ramp: A distinct-element approach. *Journal of Structural Geology*, 24: 637–650
- Suppe J. 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 283: 684–721
- Suppe J and Medwedeff DA. 1990. Geometry and kinematics of fault propagation folding. *Eclogae Geologicae Helveticae* 83: 409–454
- Suppe J, Connors CD, and Zhang YK. 2004. Shear fault-bend folding. In: McClay KR (ed.). *Thrust and Hydrocarbon Systems*. AAPG Memoir, 82: 303–323
- Wang X, Jia CZ and Yang SF. 2002. Geometry and kinematics of the Kuqa fold-and-thrust belt in the southern Tianshan. *Chinese Journal of Geology*, 37(3): 372–384 (in Chinese with English abstract)
- Wei GQ and Jia CZ. 1998. Structural characteristics and oil & gas of thrust belts in Tarim basin. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 11–17 (in Chinese with English abstract)
- Wheeler RL. 1980. Cross-strike structural discontinuities: Possible exploration tool for natural gas in the Appalachian overthrust belt. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 64: 2166–2178
- Wilkerson MS, Medwedeff DA and Marshak S. 1991. Geometrical modeling of fault-related folds: A pseudo-three-dimensional approach. *Journal of Structural Geology*, 13(7): 801–812
- Wilkerson MS, Apotria TG and Farid T. 2002. Interpreting the geologic map expression of contractional fault-related fold terminations: Lateral/oblique ramps versus displacement gradients. *Journal of Structural Geology*, 24: 593–607
- Wilkerson MS, Smaltz SM, Bowman DR, Fischer MP and Higuera-Diaz IC. 2007. 2-D and 3-D modeling of detachment folds with hinterland inflation: A natural example from the Monterrey Salient, northeastern Mexico. *Journal of Structural Geology*, 29: 73–85
- Xiao AC, Jia CZ, Yang SF, Wei GQ, Chen HL and Zhang CS. 2000a. The kinematics characters of the thrust-fold belts western front regions in southern Tianshan, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 439–444 (in Chinese with English abstract)
- Xiao AC, Yang SF, Chen HL, Jia CZ and Wei GQ. 2000b. Structural characteristics of thrust system in the front of the west Kunlun Mountains. *Earth Science Frontiers*, 7(Suppl.): 128–136 (in

Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈汉林, 杨树锋, 肖安成, 潘正中, 程晓敢, 陈建军, 范铭涛, 田多文. 2006. 酒泉盆地南缘新生代冲断带的变形特征和变形时间. *石油与天然气地质*, 27(4): 488–494
- 陈汉林, 罗俊成, 郭群英, 廖林, 肖中尧, 程晓敢, 杨树锋, 王步清. 2009. 塔里木盆地东南缘新生代变形史与构造演化. *大地构造与成矿学*, 33(1): 38–45
- 陈竹新, 贾东, 张愷, 魏国齐, 李本亮, 魏东涛, 沈扬. 2005. 龙门山前陆褶皱冲断带的平衡剖面分析. *地质学报*, 79(1): 38–45
- 管树巍, 汪新, 杨树峰, 赵卫东, 徐峰, 雷刚林. 2003. 南天山库车里里塔格褶皱带三维构造分析. *地质论评*, 49(5): 464–473
- 何登发, 尹成, 杜社宽, 石昕, 马辉树. 2004. 前陆冲断带构造分段特征——以准葛尔盆地西北缘断裂构造带为例. *地学前缘*, 11(3): 91–101
- 贾东, 陈竹新, 贾承造, 魏国齐, 李本亮, 张愷, 魏东涛, 沈扬. 2003. 龙门山前陆冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育. *高校地质学报*, 19(3): 402–410
- 李本亮, 贾承造, 庞雄奇, 管树巍, 杨庚, 石昕, 李传新. 2007. 环青藏高原盆山体系内前陆冲断构造变形的空间变化规律. *地质学报*, 81(9): 1200–1207
- 卢华复, 贾承造, 贾东, 陈楚铭, 刘志宏, 王国强, 王胜利. 2001. 库车再生前路盆地冲断构造楔特征. *高校地质学报*, 7(3): 257–271
- 汪新, 贾承造, 杨树锋. 2002. 南天山库车褶皱冲断带构造几何学和运动学. *地质科学*, 37(3): 372–384
- 魏国齐, 贾承造. 1998. 塔里木盆地逆冲带构造特征与油气. *石油学报*, 19(1): 11–17
- 肖安成, 贾承造, 杨树锋, 魏国齐, 陈汉林, 张春生. 2000a. 中国南天山西部冲断褶皱系前缘区的运动学特征. *沉积学报*, 18(3): 439–444
- 肖安成, 杨树锋, 陈汉林, 贾承造, 魏国齐. 2000b. 西昆仑山前冲断带的结构特征. *地学前缘*, 7(增刊): 128–136