

断层相关褶皱理论与应用研究新进展

何登发^{1,2}, John SUPPE², 贾承造¹

11 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

21 美国普林斯顿大学 地球科学系, 新泽西州 08544

HE Dengfa^{1,2}, John SUPPE², JIA Chengzao¹

11 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

21 Department of Geosciences, Princeton University, New Jersey 08544, USA

HE Dengfa, SUPPE J, JIA Chengzao. New advances in theory and application of fault-related folding. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 353-364

Abstract: Rich introduced the geometry of fault-bend fold of the Appalachian Mountains in 1934. Half a century later, Suppe first quantified it, and established relationships between fold geometry, fault geometry and fault slip that led to the foundation of the theory of fault-related folding. Since then, much of progress has been made not only in establishing the geometric and kinematic models of the end-members such as fault-propagation folding and fault-detachment folding, but also in putting forward a series of superimposed models of fault-related folds such as imbricate structures, tectonic wedges, and interference structures, etc. Concerning syntectonic sedimentation, growth fault-related folding theory was set forth giving a quantitative representation between sedimentation and the fault-slip rate, folding rate, and uplifting rate. As far as the mechanical stratigraphy and deformation character are concerned, the shear fault-bend folding is put forward. A series of mechanical models are established as being well based on experimental analog models and the numerical modeling techniques. During the years since its foundation, the basic methodology of fault-related folding theory has seen the transition from 2D cross-section or map-view to full 3D analysis, and advances in geometric and kinematic models to mechanical analytical models. The theory and methodology of fault-related folding have played an important role in engineering geology, the earthquake hazard assessment and preparedness, and, more important, the petroleum exploration and development. It has been used worldwide in the study of the above mentioned domains.

Key words: faulting; folding; fault-related folding; geometry; kinematics; mechanical models; growth strata; earthquake hazard; petroleum exploration and development

摘要: 自 Rich(1934)提出断层转折褶皱的几何学概念以来, Suppe(1983)首次将其定量化, 建立了褶皱形态与断层形态和断层滑动之间的定量关系, 奠定了断层相关褶皱理论的基本模型。20 年来, 不但建立了断层传播褶皱、断层滑脱褶皱等基本端员类型的几何学与运动学模型, 也建立与完善了断层相关褶皱叠加样式的几何学与运动学模型, 例如叠瓦构造、构造楔与干涉构造等。研究同构造沉积作用, 建立了生长断层相关褶皱的几何学与运动学模型, 将沉积作用与断裂作用、褶皱作用及构造隆升作用等有机地联系起来。考虑地层的力学性质与变形差异, 提出与建立了剪切断层转折褶皱理论, 并建立了断层相关褶皱的一系列力学模型。20 年来, 断层相关褶皱的基本研究方法经历了由二维剖面与平面分析向全三维空间分析的转变, 由几何学、运动学模型向力学模型的转变, 实验模拟技术与数值模拟技术在断层相关褶皱理论模型的建立与检验中发挥了重

收稿日期: 2005-04-15; 修回日期: 2005-05-23

基金项目: 国家/十五重大科技攻关项目 04 课题(2004BA616A204)

作者简介: 何登发(1967), 男, 博士, 教授级高级工程师, 构造地质学专业。

要作用。断层相关褶皱的理论和方法在工程地质、地震灾害预报与油气勘探开发等领域获得了广泛的应用。中国在天山、祁连山和龙门山等相邻的前陆盆地的活动构造与含油气圈闭研究中,应用断层相关褶皱的理论与方法取得了重要进展。

关键词: 断裂作用; 褶皱作用; 断层相关褶皱; 几何学; 运动学; 力学模型; 生长地层; 工程地质; 地震灾害; 油气勘探开发

中图分类号: P542; P618.13 文献标识码: A 文章编号: 1005-2321(2005)04-0353-12

0 前言

褶皱与断层是自然界最为常见的构造样式。褶皱体现为岩石的连续韧性变形^[1]; 断层是岩石不连续的破裂变形, 大多数断层都是脆性剪切裂缝带。两者常常出现在同一地区或同一构造单元内。岩石沿着断面滑动可以转变为多种类型的褶皱, 褶皱在发育过程中在枢纽带、背斜顶部也可以形成次级断层^[2]。关于两者关系的讨论由来已久, 至于是形成断层还是褶皱主要取决于具体的构造环境, 例如应力场、温度、压力、流体及岩石的组成等。在地壳浅层, 例如在造山带向盆地过渡的前陆部位或在沉积盆地内, 断层以脆性破裂变形为主, 断层相关褶皱就非常发育。

断裂作用与褶皱作用之间存在着密切的关系^[2]。大量的地表地质露头、地震反射剖面与探井资料表明, 大多数褶皱起源于下伏断层倾角的变化(如断层转折褶皱)^[3~6], 或是断层滑动量向褶皱位移的逐渐传替(如断层传播褶皱、断层滑脱褶皱)^[7~10]。断层转折褶皱的几何学首先是由 Rich (1934) 在研究阿巴拉契亚山低角度逆掩断裂作用时提出的^[3], 半个世纪之后, Suppe (1983) 将其定量化, 建立了断层形态与褶皱形态之间的几何学关系, 以及断层滑动与褶皱发育的运动学模型^[4]。这种定量关系成为前陆褶皱冲断带构造解释, 正演与反演模拟技术中平衡剖面方法的重要基础^[11~14]。对于逆冲断层端点处的褶皱, 近年来, 也陆续建立了相对完善的断层传播褶皱的几何学与运动学模型^[7~9, 15~20], 断层滑脱褶皱的几何学与运动学模型^[10, 21~27]。这样, 对于自然界常见的三种断层相关褶皱类型^[1, 9], 都已建立了较为成熟的几何学与运动学模型。对于伸展构造环境, 也建立了断层滑动与褶皱变形之间相应的几何学与运动学模型^[28, 29]; 对于走滑构造环境, 断裂变形与褶皱变形之间的关系也已引起密切关注^[30, 31]。

对于断裂作用、褶皱作用、隆升剥蚀作用与地层沉积作用(或称为生长作用)之间的关系也建立了定量的几何学与运动学模型^[32]。隆升速率、沉积速率、断层滑动速率之间的定量关系为研究构造活动与沉积作用之间的关系提供了新的思路与方法。生长地层的特点也可以为褶皱机制分析提供新的证据^[32, 33], 这在于下伏断层的滑动及褶皱作用将在上覆的同构造沉积中留下特征记录。

由于地层的岩石组成变化很大, 例如地层的能干性存在差异, 这样在发生变形时, 岩石的流变学性质将对变形机制、变形的运动学过程及变形的最终形态产生深刻影响。对此, John Suppe 最近建立了剪切断层转折褶皱理论^[34], 并将其成功地应用在前陆冲断带、洋壳俯冲带等不同环境的构造解释中。

平衡地质剖面的概念为构造解释提供了基本的思路与方法^[11]。断层相关褶皱理论将平衡的观念定量化, 在构造建模与构造解析中, 给出一种合理的、可行的方案。由于地质构造存在于三维空间中, 物质的运动发生在三度空间内, 因此, 二维剖面法还难以完全反映其全貌。对此, John Shaw 等提出了轴面制图法, 反映褶皱沿走向的变化细节^[35~37], 对轴面平面图进行分析, 可以进行平面上的面积平衡^[37], 从而对构造在三维空间上进行约束。而对于构造在空间上的变化, 石油公司已熟知构造图的编制技术, 可以应用三维可视化软件反映构造的细节。近来, 构造分析的趋势之一就是三维分析^[38]。

恢复断层或褶皱的演化历史, 近年来也取得重要进展。利用一系列正演或反演方法可以再现构造演化的过程^[38~44], 数值模拟技术取得重要进步。考虑到地层的岩石组成及岩石变形的行为, 断层相关褶皱研究也向力学模型迈进^[45]。由于可以更多地了解应变特征, 例如裂缝带发育位置、强应变带分布部位, 从而为油气储集体预测与开发方案服务, 因此, 力学模型在油气勘探开发中将获得广泛应用。

除了在油气勘探开发中获得广泛应用外, 断层相关褶皱在地质工程、地震灾害预报、行星地质学研究等方面也得到了广泛应用^[46~53]。尤其是在地震研究中, John Shaw 的研究组应用断层相关褶皱理论研究洛杉矶盆地的发展断层取得了重大突破。

下面从理论研究进展、研究方法与新技术、应用现状三个方面对近年来断层相关褶皱理论与方法的新进展进行简要分析。

1 断层相关褶皱理论研究进展

1.1 断层转折褶皱作用

1.1.1 断层转折褶皱作用的几何学与运动学特征

上盘岩石在下伏断层转折部位发生运动时就会形成断层转折褶皱^[4]。上盘岩石以形成膝折带式褶皱来调节沿断层面的滑动。膝折褶皱是自然界常见的褶皱形式^[54]。断层转折褶皱作用沿固定在断层转折处的活动轴面发生, 当地层在活动轴面处发生褶皱以后, 将沿上部断层段发生平移。不活动轴面表示断层滑动刚刚发生时沿活动轴面的质点颗粒的位置。它与活动轴面界定的膝折带的宽度与断层滑动量成正比^[4]。

上凹式断层转折形成向斜型断层转折褶皱, 上凸式断层转折形成背斜型断层转折褶皱。假定褶皱过程中地层厚度与层长守恒, 则断层形态与褶皱形态之间存在如下的关系^[4]:

$$\tan^{-1} \left\{ \frac{-\sin(C-H)[\sin(2C-H)-\sin H]}{\cos(C-H)[\sin(2C-H)-\sin H]-\sin C} \right\} = B = H - \alpha + (180 - 2C) \quad (1)$$

其中, H 是断层转折之前上盘地层的切截角; B 是断层转折之后上盘地层的切截角; C 是褶皱翼间角的半角; α 是断层倾角的变化量(即断层转折角)。当知道其中两个角度值时, 另外两个角度值就可以计算出来或据(1)式的图谱查出来。因此, 该公式首次定量地表述了褶皱形态与断层形态之间的定量关系。据此可以对褶皱与断层的几何形态进行定量计算或预测。

断层的滑动量在转折前、后将发生变化。断层转折之后的滑动量(S_1)与断层转折之前的滑动量(S_0)的比值 $R(= S_1/S_0)$ 可据上述 4 个角度值进行确定。当 H 不为 0 时, 背斜式断层转折吸收滑动量, 即经过断层转折之后断层滑动量减小; 向斜式断层

转折增加滑动量, 即经过断层转折之后断层滑动量增大。

当存在冲断层断坡时, 将形成断坡背斜。连接上、下滑脱层(断坪)的断坡经历了两次断层转折, 因此, 断坡背斜实际上是前翼背斜式断层转折褶皱与后翼向斜式断层转折褶皱的复合体, 即复合式断层转折褶皱作用。断层面可能会经历多次转折, 在每一个断层转折处将经历一次褶皱, 这样随着断层滑动的持续发生, 上盘岩石在向冲断方向运动的过程中经历了多次褶皱, 结果出现了具复杂结构形态的断层转折褶皱^[55]。同样, 断层转折也可能呈弯曲型(有别于前述的棱角状转折), 在该弯曲带的边界处(这时有两个边界), 当上盘地层沿断面滑动进入该边界时将发生褶皱, 这些边界相当于进入轴面(为活动轴面); 与其相应的退出轴面(为不活动轴面)随滑动量增大而向断层上方迁移, 褶皱幅度增大, 褶皱形态与(传统的)棱角状断层转折褶皱较为相似。

1.1.2 剪切断层转折褶皱

20 年后, John Suppe 教授提出了剪切断层转折褶皱作用理论^[34]。剪切断层转折褶皱在变形时具有较大的非弯滑分量, 形成一类特征鲜明的断坡背斜。表现在^[34]: 背斜后翼倾角较断坡角要小, 在很多情况下远远小于断坡角; 后翼的生长构造具有翼旋转的特点; 背斜前翼短、后翼长, 后翼的宽度不等于断层滑动量。

剪切断层转折褶皱由于受到了额外的剪切而与前文讨论的传统的断层转折褶皱有别。由于剪切通常集中在一些软弱层(例如页岩或蒸发岩)中, 因而表现出层平行简单剪切的特点。剪切断层转折褶皱有两个端员类型(图 1)。简单剪切型: 滑脱层遭受外部施加的层平行简单剪切, 无底部断层; 纯剪型: 滑脱层在底部断层上滑动, 在断坡之上发生缩短与加厚, 而无外加的层平行单剪。单剪和纯剪断层转折褶皱与传统非剪切断层转折褶皱相比, 其特点是后翼倾角小于断坡角。两种剪切端员都与断坡底部具有有限厚度的软弱滑脱层(图中用灰色表示)内分布式变形有关。在单剪断层转折褶皱作用中, 滑脱层遭受外部施加的层平行单剪, 但无底部断层滑动; 在纯剪断层转折褶皱作用中, 底部层在底部断层上滑动, 在断坡上缩短与增厚, 而没有遭受外部作用的单剪。生长地层表明剪切断层转折褶皱受到翼旋转及膝折带迁移导致的翼增长的联合作用,

然而,传统的断层转折褶皱只会随膝折带的迁移而发育。

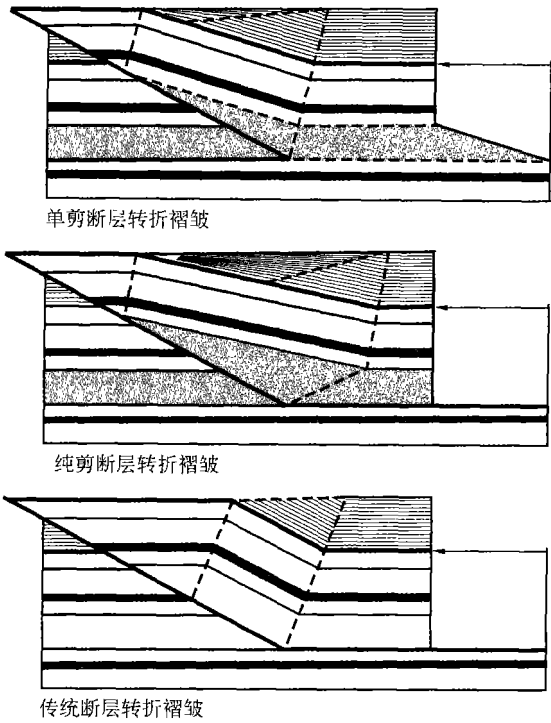


图 1 剪切断层转折褶皱模型
(据 John Suppe 等, 2004)
Fig.1 Shear fault bend fold models
(after John Suppe et al., 2004)

Simple shear and pure shear fault bend folds characteristically show back limb dips that are less than the ramp dip, in contrast with classical no-shear fault bend folds

单剪断层转折褶皱作用理论的假设条件和传统断层转折褶皱作用相同(层厚守恒, 层长不变, 有角度的断层转折和褶皱枢纽), 但有限厚度的滑脱层遭受外部施加的均一单剪 A 。在这种条件下, 后翼倾角 D 与断坡角 H 和剪切角 A 的关系是:

$$\cot A = \frac{\sin D}{2C} \left[\frac{1}{\sin D \cot H + 1 - \cos D} \right]^2 - \frac{1}{\sin D \cot H + 1 - \cos D} \quad (2)$$

参数 $C = 1/2$ 。对于纯剪断层转折褶皱作用, $C = 1$ 。

纯剪断层转折褶皱作用理论的假设也与传统断层转折褶皱作用相同(层厚不变, 层长守恒, 有角度的断层转折和褶皱枢纽), 只是有限厚度(h)的滑脱层在断坡之上遭受了层平行纯剪缩短, 从而出现了垂直层面方向上的加厚。后翼内滑脱层的纯剪缩短与加厚要求后翼向斜轴面虽然平分上覆地层的向斜, 但不平分滑脱层的向斜(图 1)。滑脱层内的向斜轴面倾角 U 为

$$\cot U = 2C \left[\cot H + \frac{1}{\sin D} - \cot D \right] - \cot H \quad (3)$$

对于纯剪 $C = 1$ 。上述公式可以用图解表示。一般的剪切断层转折褶皱可能是单剪与纯剪的联合作用^[34], C 值在 $1/2$ 与 1 之间变化。

当发生大位移时, 前生长地层的褶皱几何形态接近传统的断层转折褶皱的几何形态, 后翼倾角接近断坡角。然而即便如此, 生长地层的翼旋转特点可以反映剪切断层转折褶皱活动的特点。据生长地层的形态, 也可以区分单剪型与纯剪型断层转折褶皱作用。例如单剪型的背斜后翼见地层超覆现象, 而纯剪型的背斜后翼见典型的向上变窄的生长地层。

11.2 断层传播褶皱

11.2.1 断层传播褶皱的几何学与运动学特征

断层传播褶皱是在断层端点处的褶皱, 褶皱作用吸收了滑动量。它的基本特点是: 形态不对称, 前翼陡、窄, 后翼宽、缓; 向斜/固定 O 在断层端点处; 随深度加大褶皱越来越紧闭; 背斜轴面的分叉点与断层端点在同一地层面上; 背斜轴面在断面上的终止点和断层转折点之间的距离即是断层的倾向滑动量; 断层滑动量向上减小。

目前, 对断层传播褶皱已经提出了大量的几何学与运动学模型。早期的模型如 Suppe 和 Medwedeff (1990) 的恒定厚度与固定轴面模型^[7]。恒定厚度模型中褶皱为平行褶皱, 即层厚守恒, 褶皱枢纽为棱角状; 固定轴面模型中前翼背斜轴面固定, 因此, 前翼可以发生加厚或减薄。随后, 提出并广泛应用了三角剪切模型^[17~20], 如 Erslev (1991), Hardy 和 Ford (1997), Allmendinger (1998) 的模型。自断层端点向外的三角形区发生了分布式剪切, 从而形成了三角剪切褶皱。在三角剪切区内, 在变形过程中面积守恒, 而层长、层厚不守恒, 前翼地层倾角向下增大。应用该模型, 可以对位移场及褶皱形态进行直接计算。这种计算是采取叠代方式完成的, 因此不能像 Suppe 和 Medwedeff (1990) 的方法那样进行图解或分析^[7]。

至于究竟是哪一种断层传播褶皱机制, 根据生长地层的形态可以进行判断^[32, 33]。在生长断层传播褶皱中, 前翼发育向上变窄的生长三角; 后翼由于轴面迁移, 发育两个相向的生长三角夹持着其间的平坦的顶角朝下的倒三角形。而在生长三角剪切褶皱中, 前翼生长地层呈扇状变化。

断层传播量(P)与滑动量(S)的比值对褶皱形态也有较大影响。当P/S较小时,往往产生陡的紧闭的前翼,还伴随前翼的加厚;当P/S较大时,在浅部产生前翼较缓的褶皱,且无明显加厚^[19,20]。

11.2.1.2 前陆基底卷入型断层传播褶皱

在前陆构造环境,也常发育基底卷入式变形(图2)。这是在盖层或盖层2基底分界面(包括少量基底岩石)附近由基底断层的位移向上传递而形成的构造,同时卷入了盖层和基底两套地层;褶皱形态主要在盖层中表现出来;导致构造发生的原因是基底断层(主断层)的活动^[56]。其主要特点是(图2):与一条错断基底并进入盖层的主断层有关,该断层可以消失于盖层中;在地表通常呈单斜构造;在横剖面上通常具有较大的构造起伏,而沉积盖层可能连续;当主断层的上盘被抬升时,覆盖在基底错断边缘之上的盖层形成褶皱的陡翼,陡翼地层可能倒转;盖层的变形集中在陡翼,陡翼可以缩短,也可以伸长;在主断层的上盘,盖层与基底在变形过程中可以固结在一起,也可分离;基底可呈刚性块体,也可被褶皱或剪切;变形主要存在于盖层内部向上变宽的三角带内。

导致前陆基底卷入型构造变形复杂的原因有:基底可以变形,也可不变形;盖层与基底可以分离,也可以不分离;基底断层的断面可以弯曲,也可以不弯曲。这样给几何学模型与运动学模型的建立带来了困难。主断层位移量向变形带传递的可能机制包括:盖层中三角变形带;基底中次级冲断层;基底中

三角变形带。

对于基底断层向上传播, Narr 和 Suppe 提出了断层2断层2褶皱(轴面)三联点向上传播的褶皱模型^[57],在断层下盘由于剪切的发生形成了单斜,断层上盘由于抬升形成褶皱,其前翼平行于下伏的上部基底断面。

Mitra 提出了基底卷入型构造的几何学与运动学端员模型^[56],包括刚性基底或部分刚性基底条件下基底卷入型断层传播褶皱模型、基底卷入型断层转折褶皱模型或混合模型,并将其应用于美国落基山以东前陆地区大型基底隆起带的构造解释。M2 Connell 则应用固定枢纽的断层传播褶皱模型来对这些构造进行解释^[58]。

11.3 滑脱褶皱

滑脱褶皱是在一个或多个滑脱层之上形成的收缩背斜(Dahlstrom, 1990)^[59]。它的形成是沿层平行断层的位移传递到上盘地层的褶皱之中,因此,它与冲断层断坡无直接关系,而与滑脱断层之上的分布式变形有关。它有4个基本特征:底部软弱层,在褶皱核部发生加厚;底部滑脱断层;褶皱发生前的能干性地层,在变形过程中厚度、长度不变;同生地层向褶皱顶部厚度减薄,褶皱翼呈扇状旋转。一般地,当底部软弱层厚度较大时,滑脱断层之上形成的对称或不对称褶皱称为滑脱褶皱;当底部软弱层厚度很薄时,滑脱断层之上形成的具陡翼的对称褶皱被称为突发或抬离褶皱^[13],这是在背斜核部滑脱层

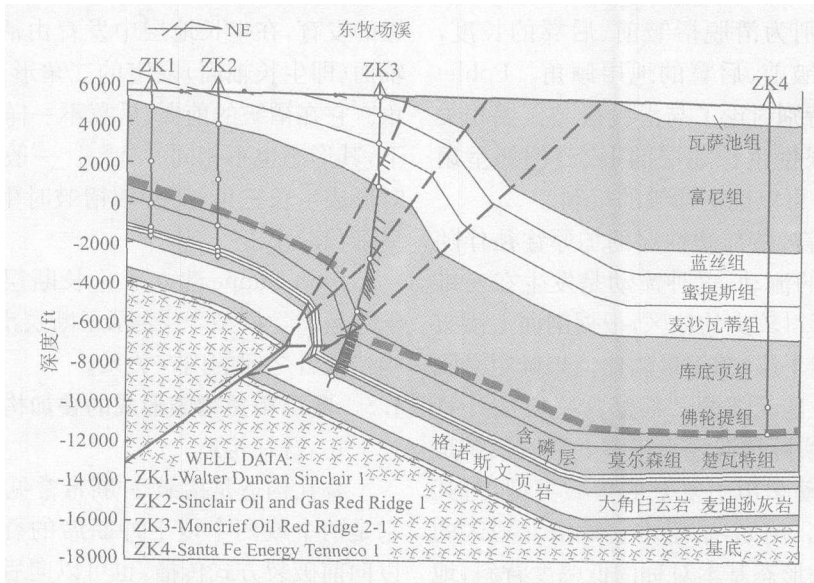


图2 大角盆地东牧场溪隆起相关构造变形几何形态解释图 (据 Mitra, 1998)

Fig. 2 Interpretation of the geometry of the structural deformation in East Grassland Creek uplift in Bighorn Basin (after Mitra, 1998)

发生等斜式褶皱而形成的, 当其具有平的脊部时也称为箱状褶皱。

滑脱褶皱是一种常见的褶皱类型。无论是在褶皱2冲断带, 例如在侏罗山、落基山、天山、龙门山等山前地区, 还是在墨西哥湾、巴西海外、西非海外的盐席前缘, 或是在进积型三角洲前缘(例如玛哈坎三角洲), 都广泛发育, 也是一种常见的聚油构造样式。滑脱褶皱主要通过翼旋转方式生长, 在生长地层中仅可见小的生长三角^[23]。也有通过膝折带迁移方式生长的滑脱褶皱, 这时可以见到明显的生长三角。在通常情况下, 滑脱褶皱是以翼旋转为主、膝折带迁移为辅的联合作用机制而形成的。由于滑脱褶皱核部发生了塑性加厚, 其层长或层厚发生了变化, 因此, 滑脱褶皱的形态与下伏断层的几何形态之间就有多种定量关系, 这就给建立滑脱褶皱的几何学与运动学模型增加了很大困难。早期的模型只考虑滑脱褶皱的最终形态, 而不考虑运动学过程, 如 Dahlstrom(1990) 的模型^[59] 和 Epard 和 Groshong(1993) 的模型^[24]。Homza 和 Wallace(1995) 的模型开始考虑尖棱状膝折褶皱的运动学特征^[25], 滑脱层的深度或固定或变化; Poblet 和 McClay(1996) 的模型适用于单个滑脱层之上的变形^[27]。在 Poblet 和 McClay 的模型中:

断层滑动量 $S = L_b(1 - \cos H) + L_r(1 - \cos H)$ (4)

褶皱幅度 $U = L_b \sin H = L_r \sin H$ (5)

其中, L_r , L_b 分别为滑脱褶皱前、后翼的长度, H , H 分别为滑脱褶皱前、后翼的地层倾角。Poblet 和 McClay 的模型特别讨论了与滑脱褶皱作用相关的生长地层^[26, 27], 根据生长地层的形态(例如呈扇状或发育生长三角)可以确定褶皱的机制。

对滑脱褶皱而言, 核部塑性层的加厚往往伴随向斜区塑性层物质的流动, 这种流动是发生在三维空间的。因此, 在资料较少的地区, 根据剖面上褶皱隆起区的面积及(能干层)缩短量的比值来确定滑脱深度的办法^[10] 经常是无效的。根据这一方法计算的滑脱深度往往较实际情况要大得多。滑脱褶皱是一种形态简单但运动学历史复杂的褶皱类型, 对其进行研究难度较大。例如, 塔里木盆地塔北地区的亚肯背斜, 地表为一形态基本对称的低幅度背斜, 地下构造据该背斜区的高分辨率二维地震剖面为一中新统吉迪克组盐层发生滑脱形成的滑脱褶皱。背斜顶部有探井钻及。但该滑脱褶皱的成因却难以探讨

清楚。John Suppe 教授用了近 5 年的时间琢磨其成因机制, 最近已基本清楚。由于在一个背斜范围内, 物源供给可以看作常量, 这样地层厚度的变化基本反映了构造的发育。因此, John Suppe 将深度域数据转换成厚度域数据, 然后将某一层(例如滑脱层)拉平, 看其他层相对于这一层的厚度、高度变化, 以及厚度起伏区的面积的变化。即把以前深度域的分析方法在厚度域里进行分析使用。研究结果表明, 在剖面上, 亚肯背斜底部有 0.8 km^2 的盐底辟; 在滑脱褶皱发生之前, 背斜区有 11.2 km 的挤压缩短; 生长地层记录着滑脱褶皱的发育过程, 亚肯背斜随着时间成正比例方式生长。这一研究实例提供了在资料非常好的地区, 滑脱褶皱何时、以何种方式、多大速率进行生长的研究范例。

11.4 生长断层相关褶皱

生长地层或同构造沉积是在变形过程中沉积发育的地层。因此, 它记录着构造变形的时间。对于逆断层而言, 断层上盘的同生长地层减薄^[32]; 对于正断层而言, 断层上盘的同生长地层加厚^[28, 60]。就挤压断层相关褶皱而言, 生长地层在褶皱翼部厚, 而向顶部减薄^[61]。这受控于褶皱机制, 也与沉积与隆升的相对速率有关; 反过来, 地震剖面或露头上生长地层的形态就反映出这两个因素的作用。它能确定构造活动的时间, 也给出了构造恢复的限定条件。

在沉积速率大于隆升速率时, 随着断层相关褶皱的发育, 在生长地层中发育由活动轴面与不活动轴面(即生长轴面)限定的三角形区, 也称为生长三角。它在褶皱的前翼、后翼不一样, 不同的褶皱机制下, 其形态也不相同^[28, 61, 62]。一般地, 发生膝折褶皱时形成生长三角, 翼旋转褶皱时生长地层倾角向上呈扇状减小。

John Suppe 建立了生长断层相关褶皱的几何学与运动学模型^[28], 表示了断层滑动、褶皱、沉积与构造隆升之间的内在关系。

11.5 断层相关褶皱形成的叠加构造

11.5.1 叠瓦构造

叠瓦构造是褶皱2冲断带常见的构造样式^[63, 64]。它是两个或两个以上冲断席的叠加^[63]。冲断席可以向前破裂方式传播, 也可以向后破裂方式传播, 也可以是深部的与浅部的断层同时活动。叠瓦式断层转折褶皱构造通常有两个以上断坡, 在经过这些断坡时地层的倾角将发生变化, 因此, 前翼和后翼将出

现多个倾向域(或称为等倾斜区)。Suppe(1983)给出了简单台阶状逆冲断层发生向前破裂时计算褶皱形态的图表^[4]。

在解释这类构造时, John Shaw 应用褶皱矢量的概念来确定具体断层的方位、断层转折角、断层切截(或层)角等^[62]。褶皱矢量或褶皱剪切应变是所测量的地层和断层在跨过一个褶皱翼或膝折带时方位变化的角度值。这一概念可用在很多构造的解释中,例如在叠瓦构造中在断层初始切截角发生变化,地层厚度变化,断层向下不归并到主滑脱面等情况下都可以应用。在向前破裂发生时,褶皱矢量上下一致,新断层发生时其上部的断层同时被褶皱;而向后破裂发生时,褶皱矢量上下不一致,新断层的发生不影响其下部的断层。因此,观察断层上、下褶皱矢量是否一致是确定冲断席向前破裂或向后破裂的一个重要依据。同样,生长地层也是判断冲断席传播方式的一个重要依据,愈晚活动的断层其影响的生长地层愈靠上。

11.5.1.2 构造楔

构造楔是由两个相连的断层段围限的三角形或楔形断块^[65]。这两个断层段可能是两个断坡段,也可能是一个是断坡,另一个是断坪,二者的交点即楔端点。沿两个断层段的滑动调节着楔端点传播引起的变形,形成褶皱^[66]。其基本特点是^[66,67]:存在同

时活动的前冲断层与后冲断层;褶皱沿固定在楔端点的活动轴面发生;后冲断层下盘的褶皱引起构造幅度加大。构造楔的大小变化很大,大的构造楔是山链前缘的常见构造样式,也就是 Gordy 或 Jones 所称的三角带^[68]。在一个大的构造楔内部,还可以包含若干小的构造楔。构造楔内沿下伏断层的滑动形成断层相关褶皱,当其内部发育多个断层时,常形成双重构造^[64]。

初始断层的形态、楔端点的传播方向与褶皱机制影响着构造楔的形态。据此,建立了构造楔的多种几何学与运动学模型^[65,67]。同样,借助于生长地层,可以区分构造楔或其他断层相关褶皱引起的变形。

11.5.1.3 干涉构造

干涉构造在两个或两个以上单斜式膝折带相交时产生^[55,69](图3)。在横剖面上,常在向斜之上形成典型的背斜构造,俗称兔子耳朵构造。多种断层相关褶皱都可能发生膝折带干涉(图3),从而形成各种不同形态的构造^[12,69]。例如,在同一断层两个转折点的上方、叠瓦断层上方、或相向倾斜的断层相关褶皱的前翼等部位,都可以见到干涉构造。膝折带的干涉可以出现顺时针或逆时针两种形式。Novoa 等提出了干涉构造的三维几何学模型^[69]。

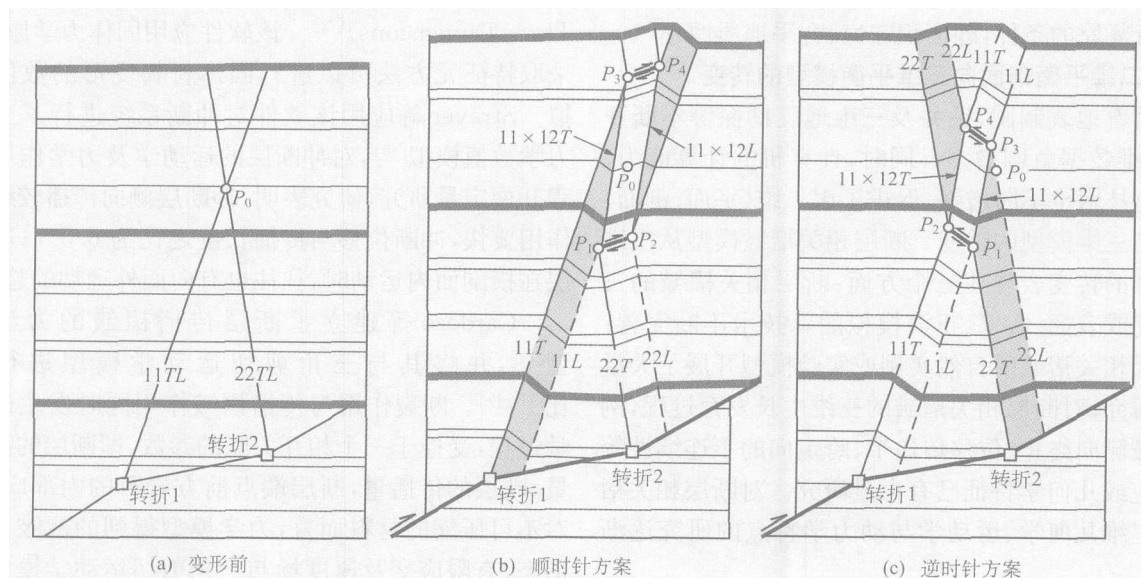


图3 两次转折的断裂系上膝折带干涉构造的初始状态与演化
(据 Medwedeff 等, 1997)

Fig. 3 Initiation and evolution of kink band interference structure above a two-bend fault system (after Medwedeff et al., 1997)

a) 断层滑动前轴面的初始状态; b) 顺时针干涉几何学; c) 逆时针干涉几何学

2 断层相关褶皱研究方法新进展

2.1 剖面复原的新技术

构造地质演化剖面广泛应用于构造剖面解释、检验与古构造分析中。例如, 要确定构造解释是否合理, 构造的形成时间, 构造发生改造的时间, 或确定构造形成时期与油气生运聚高峰期的匹配关系, 就需要对现今构造剖面进行恢复或复原。但传统的层拉平技术或根据厚度及孔隙度与深度关系的回剥技术往往产生很多假象, 或者是给出面积不平衡的恢复剖面。对这样的复原剖面, 可信度很低且往往产生误导。针对传统方法的缺陷, Nunns (1991)^[70], Shaw 等 (1996)^[37], Suppe 等 (1997)^[33], Novoa 等 (2000)^[71] 逐渐建立了倾斜剪切复原技术。这一技术不受褶皱机制 (例如膝折带迁移、翼旋转等) 或构造环境 (伸展体制或挤压体制) 的约束, 其复原剖面反而能为褶皱机制提供信息。这一技术遵循剖面面积守恒原理, 在复原的过程中采取平行褶皱轴面的倾斜恢复矢量向下移动进行逐层复原 (或称为拉平), 倾斜恢复矢量与褶皱矢量大小相等、方向相反, 反映原来褶皱应被恢复的方位与大小。在根据地震、井、地表露头建立的剖面上可以直接观察褶皱轴面, 从而确定其方位。褶皱轴面通常能满足剖面进行复原的条件, 即面积守恒、合乎地质原理^[33]。

2.2 二维平衡剖面向三维平衡模型的转变

随着地表制图、钻井及三维地震勘探等不断开展, 三维数据急剧增多。同时, 计算机的计算能力、可视化技术也不断增强, 促进了由二维 (平面、剖面) 模型向三维模型的转变。断层相关褶皱模型从二维向三维的转变表现在三个方面: 断层相关褶皱的三维描述或表征、恢复、正演模拟的新技术不断完善; 对断层相关褶皱的自然实例或实验模型开展了大量深入研究; 对断层相关褶皱的三维生长发育过程, 例如褶皱侧向终止、位移传递带、跨走向的不连续性等的效应或几何学特征已有大量研究。对断层相关褶皱的三维几何学、运动学与动力学特点的研究逐渐加深。

三维复原方法借助于平衡约束条件与变形机制假设来恢复未变形的几何学特点, 最近取得较大进展。在前人研究的成果基础上, Rouby 等建立了综合的去褶皱与去断层方法^[43], 应用弯滑、均一倾斜剪切及非均一倾斜剪切等多种去褶皱机制, 可以对

不同构造环境 (挤压或伸展) 的复杂的褶皱与断层面进行三维复原。先应用有限三角元最佳拟合法去褶皱, 再假设刚体断块运动在平面上通过多边形元对断层位移进行恢复从而去断层。Rouby 等的方法可以得到: 三维位移场 (为褶皱矢量与断层矢量之和), 反映变形的运动学; 断层滑动方向, 可用来分析三维位移总体格架中断块的活动特点; 应变特点, 对所恢复的面进行应变分析, 可以显示地下变形过程, 从而确定高应变区域, 对油气而言, 这些部位常是有利储集体发育区。

Rouby 等的方法是对某一个面单独进行复原的, 还不能同时对某一变形体同时进行复原。Griffiths 提出的三维弯滑复原新技术达到了这一点^[72]。该方法能达到三维体积、在给定的去褶皱方向上线长、层的垂直厚度等在去褶皱过程中守恒, Griffiths 认为该方法能对断层转折褶皱、断层传播褶皱和滑脱褶皱进行复原。在对德国西北盆地一个褶皱的实例研究中, 该方法取得了很好的效果。

2.3 几何学、运动学模型向力学模型的转变

运动学模型依赖于速度分布, 但不一定在力学机制上是完全可靠的。采取力学模拟的手段, 可以检验这些运动学模型。近年来, 随着计算机计算能力的不断增大, 已开发出三维力学模拟软件, 如 Itasca 公司的 PFC3D 软件 (Particle Flow Code in Three Dimensions)^[73]。该软件应用固体力学原理, 采取特征元方法可以进行固体材料变形的数值模拟。Strayer 等应用该软件对冲断系统进行了三维力学数值模拟^[45], 对冲断层的运动学及力学作用过程开展定量研究, 研究表明, 冲断层侧向传播较缩短作用要快, 冲断位移与传播长度之比为 61.5%; 冲断层在横剖面内运动时, 往往也有向面外运动的趋势。

Cardozo 等建立了断层传播褶皱的力学模型^[74], 并将其与三角剪切运动学模型进行对比^[17~19]。断裂作用与传播褶皱作用同时发生的力学过程, 受控于三个相互关联的参数, 即断层的滑动量, 断层的传播量, 断层端点前方岩石的内部应变。对不可压缩的材料而言, 力学模型得到的褶皱几何形态、有限应变及速度场与三角剪切运动学模型的结果完全一致。对可压缩的摩擦材料而言, 力学模型在断层端线前方形成一个三角形剪切带, 在褶皱后翼产生一个共轭剪切带, 两者都随断层端线的传播而迁移; 共轭剪切带与断层倾向相反, 形成一个缓倾的背斜形后翼, 但断层并没有发生转折^[74]。

地层的力学特征或其构造岩性单元是影响岩石变形的重要因素^[75]。断层相关褶皱的几何学、运动学特征及力学机制都受其控制。因此,对岩石地层力学特性的分析也非常重要。

3 断层相关褶皱理论应用研究新进展

3.1 在工程地质与地震灾害预报方面的应用

断裂在活动过程中,在其转折点的上方或传播端点的前方将形成褶皱。根据褶皱的几何学与运动学特点可以推测隐伏其下的盲冲断层的活动特点。因此,断层相关褶皱的原理与方法在工程地质、地震灾害预报方面获得了广泛应用并取得了极大成功^[38, 47, 50, 51, 76]。

太平洋两岸是地震强烈活动带。例如,台湾西部 1994 年的大地震^[76],美国加州的频繁地震活动等^[50, 51]。在断层滑动速率、地震震级、平均地震滑动力、破裂面积之间可以建立定量关系^[38],从而预测地震周期、发震时间等。例如, Dolan 等根据南加州地震活动特点^[38],得出地震震级 $M_w = 4.156 + 0.186 \lg A$, $M_w = 6.130 + 1.191 \lg D$, A 、 D 分别是破裂面积(km^2)及沿断面的平均滑动力(m)。

3.2 在油气勘探开发中的应用

断层相关褶皱的原理与方法在油气勘探与开发领域获得了极大的成功^[65]。表现在三个方面:(1)在资料较少或品质不好的地区,可以建立构造模型,根据构造模型预测地下构造的形态,为确定圈闭服务,这一点在造山带与盆地结合部位的前陆地区获得了广泛的应用,例如,在南美安第斯山前、落基山前、天山两侧等地区^[77];(2)在油田开发过程中,预测强应变带或裂缝发育区,例如,经过断层转折后地层将被褶皱,遭受一次变形,经过多次断层转折,将遭受多次变形,那么确定经历多次转折的变形区域就可以确定强应变区;断层传播褶皱的前翼、背斜轴面等部位常是裂缝发育区,有优质储集体分布;(3)对已勘探开发的老油区进行重新检验,随着探井、三维地震等资料的大量增多,有必要重新认识或修正原来的构造模型,改良开发方案,提高油田采收率,这已成为世界油气工业的一种趋势,并已获得良好的开端^[78~88]。

中国在天山两侧,西昆仑山前,祁连山前,龙门山前等前陆盆地的构造研究中,应用断层相关褶皱的原理与方法取得了明显效果^[77, 89~93]。例如通过

研究活动构造变形来剖析发震断层的运动学特点,如对 1906 年玛纳斯地震断层的研究^[89, 90]。通过结合地表地质与地下地震资料来解释山前带的构造特点,从而落实构造模型,在克拉 2 号气田,迪那 2 号气田,霍尔果斯油田,青西油田等的发现过程中发挥了重要作用^[91~93]。

References:

- [1] TWISS R J, MOORES E M. Structural Geology [M]. New York: W. H. Freeman and Company, 1992: 238261.
- [2] SUPPE J. Principles of Structural Geology [M]. Englewood Cliffs, N. J: Prentice Hall, Inc., 1985: 3412367.
- [3] RICH J L. Mechanics of low angle overthrust faulting as illustrated by Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky and Tennessee [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1934, 18: 15821596.
- [4] SUPPE J. Geometry and kinematics of fault bend folding [J]. Amer Jour Sci, 1983, 283: 682721.
- [5] SUPPE J, CHANG Y L. Kink method applied to structural interpretation of seismic sections, western Taiwan [J]. Petroleum Geology of Taiwan, 1983, 19: 22249.
- [6] SUPPE J. Seismic interpretation of compressively reactivated normal fault near Hsinchu, western Taiwan [J]. Petroleum Geology of Taiwan, 1984, 20: 85296.
- [7] SUPPE J, MEDWEDEFF D A. Geometry and kinematics of fault propagation folding [J]. Eclog Geol Helv, 1990, 83 (Laubscher vol.): 402454.
- [8] CHESTER J, CHESTER F. Fault propagation folds above thrusts with constant dip [J]. Journal of Structural Geology, 1990, 13: 9032910.
- [9] JAMISON W R. Geometric analysis of fold development in overthrust terranes [J]. Journal of Structural Geology, 1989, 9: 2072219.
- [10] CHAMBERLIN R T. The Appalachian folds of central Pennsylvania [J]. Journal of Geology, 1910, 18: 2282251.
- [11] DAHLSTROM C D A. The upper detachment in concentric folding [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1969, 17: 3362344.
- [12] MOUNT V S, SUPPE J, HOOK S C. A forward modeling strategy for balancing cross sections [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1990, 74: 522531.
- [13] MITRA S, NAMSON J S. Equal area balancing [J]. American Journal of Science, 1989, 289: 5632599.
- [14] MITRA S. Balanced structural interpretations in fold and thrust belts [A]. MITRA S, FISHER G W. Structural Geology of Fold and Thrust Belts [M]. Baltimore: John Hopkins University Press, 1992: 5277.
- [15] MITRA S. Fault propagation folds: Geometry, kinematic and

- volution, and hydrocarbon traps [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1990, 74: 9212945.
- [16] MOSAR J, SUPPE J. Role of shear in fault propagation folding [A]. McClay K R. Thrust Tectonics [M]. London: Chapman & Hall, 1991: 123132.
- [17] ERSLEV E A. Trishear fault propagation folding [J]. Geology, 1991, 19: 612620.
- [18] HARDY S, FORD M. Numerical modeling of trishear fault propagation folding [J]. Tectonics, 1997, 16(5): 842854.
- [19] ALLMENDINGER R. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault propagation folds [J]. Tectonics, 1998, 17(4): 642656.
- [20] ALLMENDINGER R, SHAW J H. Estimation of fault propagation distance from fold shape: Implications for earthquake hazards assessment [J]. Geology, 2000, 28(12): 109921102.
- [21] EPARD J L, GROSHONG R H. Excess area and depth to detachment [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1993, 77: 12921302.
- [22] GROSHONG R H, EPARD J L. The role of strain in area constant detachment folding [J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16: 612618.
- [23] HARDY S, POBLET J. Geometric and numerical model of progressive limb rotation in detachment folds [J]. Geology, 1994, 22: 372374.
- [24] EPARD J L, GROSHONG R H. Kinematic model of detachment folding including limb rotation, fixed hinges and layer parallel strain [J]. Tectonophysics, 1995, 247: 852103.
- [25] HOMZA T X, WALLACE W K. Geometric and kinematic models for detachment folds with fixed and variable detachment depths [J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17: 5752588.
- [26] POBLET J, HARDY S. Reverse modeling of detachment folds: Application to the Pico de Aguila anticline in the south Central Pyrenees (Spain) [J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17: 17021724.
- [27] POBLET J, McCLAY K. Geometry and kinematics of single layer detachment folds [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1996, 80(7): 10821109.
- [28] XIAO H B, SUPPE J. Origin of rollover [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1992, 76: 5092529.
- [29] ERICKSON S G, STRAYER L M, SUPPE J. Mechanics of extension and inversion in the hanging walls of listric normal faults [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(26): 65226, 670.
- [30] SHAW J H, BISCHKE R E, SUPPE J. Relations Between Folding and Faulting in the Loma Prieta Epicentral Zone: Strike Slip Fault Bend Folding, in the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989 [R]. SIMPSON R W. U. S. Geological Survey Professional Paper 1552F, 1994: 131.
- [31] SHAW J H. Active Blind Thrust Faulting and Strike Slip Fault Bend Folding in California [D]. Princeton, NJ: Princeton University, 1993: 216.
- [32] SUPPE J, CHOU G T, HOOK S P. Rates of folding and faulting determined from growth strata [A]. McClay K R. Thrust Tectonics [M]. London: Chapman & Hall, 1992: 1052121.
- [33] SUPPE J, SABAT F, MUNOS J A, et al. Bed by bed fold growth by kink band migration: Sant Llorenç de Morunys, eastern Pyrenees [J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19: 442461.
- [34] SUPPE J, CONNORS C D, ZHANG Y. Shear fault bend folding [A]. McClay K R. Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems [M]. AAPG Memoir 82, 2004: 302323.
- [35] SHAW J H, KOOK S C, SUPPE J. Structural trend analysis by axial surface mapping [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1994, 78(5): 702721.
- [36] SHAW J H, HOOK S C, SUPPE J. Structural trend analysis by axial surface mapping Reply [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1996, 80(5): 782787.
- [37] SHAW J H, SUPPE J. Earthquake hazards of active blind thrust faults under the central Los Angeles basin, California [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101/B4: 862328642.
- [38] CARENA S, SUPPE J. 3D imaging of active structures using earthquake aftershocks: The orthridge thrust [J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24: 882904.
- [39] HARDY S. A method for quantifying the kinematics of fault bend folding [J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17: 178521788.
- [40] HARDY S, POBLET J. The velocity description of deformation. Paper 2: Sediment geometries associated with fault bend and fault propagation folds [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 22: 162176.
- [41] ERICKSON G, SUPPE J, HARDY S. Sequential restoration and unstraining of structural cross sections: Applications to extensional [J]. Bulletin American Association of Petroleum Geologists, 2000, 84: 232249.
- [42] ERICKSON S G, STRAYER L M, SUPPE J. Initiation and reactivation of faults during movement over a thrust fault ramp: Numerical mechanical models [J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23: 1223.
- [43] ROUBY D, SUPPE J, XIAO H. Folding and faulting mechanism in 3D Restoration of folded and faulted surfaces [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2000, 84: 802829.
- [44] VERGES J, BURBANK D W, MEIGS A. Unfolding: An inverse approach to fold kinematics [J]. Geology, 1996, 24(2): 1752184.
- [45] STRAYER L M, SUPPE J. Out of plane motion of a thrust

- sheet during along-strike propagation of a thrust ramp: Displacement element method [J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24: 637-650.
- [46] DOLAN J F, SIEH K, ROCKWELL T K, et al. Prospects for large or more frequent earthquakes in the Los Angeles Metropolitan Region, California [J]. *Science*, 1995, 267: 1992-205.
- [47] DOLAN J S, CHRISTOFFERSON S, SHAW J H. Recognition of paleoearthquakes on the Puente Hills Blind Thrust Fault, California [J]. *Science*, 2003, 300(4): 1152-118.
- [48] SHAW J H, BISCHKE R E, SUPPE J. Evaluation of the Use of Compressive Growth Structure in Earthquake Hazard Assessment: Axial Surface Mapping [R]. USGS Open-File Report 1992: 92258.
- [49] SHAW J H, HOOK S C, SITO HANG E. Extensional fault-bend folding and synrift deposition: An example from the Central Sumatra Basin, Indonesia [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1997, 81(3): 367-379.
- [50] SHAW J H. Cracking Los Angeles [J]. *Nature*, 1998, 394: 320-321.
- [51] SHAW J H, SHEARER P. An elusive blind thrust fault beneath metropolitan Los Angeles [J]. *Science*, 1999, 283: 1516-1518.
- [52] CONNORS C, SUPPE J. Constraints on magnitudes of extension on Venus from slope measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 3237-3260.
- [53] SUPPE J, CONNORS C. Critical taper wedge mechanics of fold-and-thrust belts on Venus: Initial results from Magellan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 13545-13561.
- [54] FAILL R T. Kink band structures in the Valley and Ridge province, Pennsylvania [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1973, 84: 1289-1314.
- [55] MEDWEDEFF D A, SUPPE J. Multibend fault-bend folding [J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19: 279-292.
- [56] MITRA S, MOUNT S. Foreland basements involved structures [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(1): 702-109.
- [57] NARR W, SUPPE J. Kinematics of basement-involved compressive structures [J]. *American Journal of Science*, 1994, 294: 802-860.
- [58] McCONNELL D A. Fixed hinge basement-involved fault propagation folds, Wyoming [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1994, 106: 1583-1593.
- [59] DAHLSTROM C D A. Geometric constraints derived from the law of conservation volume and applied to evolutionary models for detachment folding [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74: 336-344.
- [60] SUPPE J, XIAO H B. Role of compaction in the listric shape of growth normal faults [J]. *American Assoc Petroleum Geol Bull*, 1989, 73: 777-786.
- [61] MEDWEDEFF D. Growth fault-bend folding at southeast Lost Hills, San Joaquin Valley, California [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1989, 73: 546-67.
- [62] SHAW J, SUPPE J. Active faulting and growth folding in the eastern Santa Barbara Channel, California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1994, 106(5): 607-626.
- [63] SHAW J H, BILOTTI F, BRENNAN P. Patterns of imbricate thrusting [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111(7): 1140-1154.
- [64] MITR S. Duplex structures and imbricate thrust systems: Geometry, structural position and hydrocarbon potential [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1986, 70: 1082-1112.
- [65] SHAW J H, CONNORS C, SUPPE J. Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds: An AAPG Seismic Atlas [M]. *American Association of Petroleum Geologists Special Publication*, 2004: 12270.
- [66] MEDWEDEFF D. Geometry and kinematics of an active, laterally propagating wedge thrust, Wheeler Ridge, California [A]. MITRA S, FISHER G W. *Structural Geology of Fold and Thrust Belts* [M]. Baltimore: John Hopkins University Press, 1992: 3228.
- [67] MUELLER K, SUPPE J. Growth of Wheeler Ridge anticline, California: Implications for short-term folding behavior during earthquakes [J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19: 383-396.
- [68] JONES P B. Triangle zone geometry, terminology and kinematics [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1996, 44(2): 132-152.
- [69] NOVOA E, MOUNT V, SUPPE J. Map-view interference of monoclinical folds [J]. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20: 339-353.
- [70] NUNNS A G. Structural restoration of seismic and geologic sections in extensional regimes [J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75: 278-297.
- [71] NOVOA E, SUPPE J, SHAW J H. Inclined-shear restoration of growth folds [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2000, 84(6): 782-804.
- [72] GRIFFITHS P, JONES S, SALTER N, et al. A new technique for 3D flexural-slip restoration [J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24: 773-782.
- [73] ITASCA. Particle Flow Code in 3 Dimensions) Users Manual [R]. Itasca Consulting Group, Minneapolis, MN, USA, 1999.
- [74] CARDOZO N, BHALLA K, ZEHNDER T, et al. Mechanical models of fault propagation folds and comparison to the tri-shear kinematic model [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25: 1218.
- [75] CHESTER J. Mechanical stratigraphy and fault-fold interaction, Absaroka thrust sheet, Salt River Range, Wyoming [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25: 1172-1192.
- [76] CARENA S, SUPPE J, KAO H. The active detachment of

- Taiwan illuminated by small earthquakes and its control on first-order topography [J]. *Geology*, 2002, 30: 932-938.
- [77] HE Dengfa, ZHOU Lu, LEI Zhenyu, et al. Application of fault-related folding theory in the establishing structural models in foreland thrust and fold belts [A]. Exploration and Production Company of PetroChina Company Limited. Proceedings of Petroleum Exploration in Foreland Thrust and Fold Belts in Central and Western China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 210-228.
- [78] BISCHKE R E, SUPPE J. Calculating sandstone/shale ratios from growth normal fault dips on seismic profiles [J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies*, 1990, 40: 32-50.
- [79] DAVID W, HARDY S. The velocity description of deformation, Paper 1: Theory [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 22: 153-163.
- [80] DAVIS D, SUPPE J, DAHLEN F A. Mechanics of fold and thrust belts and accretionary wedges [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 1152-1172.
- [81] FISCHER M P, WOODWARD N B, MITCHELL M M. The kinematics of break-thrust folds [J]. *Journal of Structural Geology*, 1992, 14: 45-460.
- [82] MITCHELL M M, WOODWARD N B. Kink detachment fold in the southwest Montana fold and thrust belt [J]. *Geology*, 1988, 16: 162-165.
- [83] NOVOA E. Two and Three Dimensional Analysis of Structural Trends in the Santa Barbara Channel, California, USA [D]. Princeton, NJ: Princeton University, 2000.
- [84] PRATT T L, SHAW J H, DOLAN J F, et al. Shallow seismic imaging of folds above the Puente Hills blind thrust fault, Los Angeles, California [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29: 1821.
- [85] SHAW J H, PLESCH A, DOLAN J F, et al. The Puente Hills blind-thrust system, Los Angeles, California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(8): 2946-2960.
- [86] SUPPE J. Reactivated normal faults in the western Taiwan fold and thrust belt [J]. *Geol Soc China Mem*, 1986(7): 187-200.
- [87] SUPPE J, DAHLEN F A. Mechanics, growth and erosion of mountain belts [J]. *Geological Society of America Special Paper* 218, 1988: 162-178.
- [88] WICKHAM J. Fault displacement gradient folds and the structure at Lost Hills California (U. S. A.) [J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17: 1293-1302.
- [89] DENG Qidong, FENG Xianye, ZHANG Peizhen, et al. Active Tectonics in Tianshan Mountains [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 2000: 123-99 (in Chinese).
- [90] DENG Qidong, FENG Xianye, ZHANG Peizhen, et al. Thrust fault and its formation mechanism in Brinqi depression along the northern margin of the Tianshan Mountains [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(4): 192-201 (in Chinese).
- [91] JIA Chengzao. Tectonic Characteristics and Petroleum Tarim Basin China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 12-438.
- [92] LU Huaifu, JIA Dong, CHEN Chuming, et al. Tectonic character and deformation time in Cenozoic Kuqa Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(4): 212-221 (in Chinese).
- [93] WANG Xin, JIA Chengzao, YANG Shufeng. Structural geometry and kinematics of fold belts in Kuqa area and South Tianshan Mountains [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(3): 372-384.

参考文献:

- [77] 何登发, 周路, 雷振宇, 等. 断层相关褶皱原理在前陆冲断带构造建模中的应用 [A]. 中国石油勘探与生产分公司. 中国中西部前陆盆地冲断带油气勘探文集 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 210-228.
- [89] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山活动构造 [M]. 北京: 地震出版社, 2000: 123-99.
- [90] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山北麓乌鲁木齐山前拗陷逆断裂褶皱带及其形成机制 [J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 191-201.
- [91] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 12-438.
- [92] 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等. 库车新生代构造性质和变形时间 [J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 212-221.
- [93] 汪新, 贾承造, 杨树锋. 南天山库车褶皱带构造几何学和运动学 [J]. *地质科学*, 2002, 37(3): 372-384.