

# 基于地层力学结构的三维构造恢复及其地质意义

管树巍<sup>1</sup>, Andreas Plesch<sup>2</sup>, 李本亮<sup>1</sup>, 陈竹新<sup>1</sup>, 何登发<sup>3</sup>

1. 中国石油勘探开发研究院 盆地构造与油气成藏重点实验室, 北京 100083

2. Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA

3. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083

Guan Shuwei<sup>1</sup>, Andreas Plesch<sup>2</sup>, Li Benliang<sup>1</sup>, Chen Zhuxin<sup>1</sup>, He Dengfa<sup>3</sup>

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

2. Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA

3. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

**Guan Shuwei, Plesch A, Li Benliang, et al. Volumetric structural restorations based on mechanical constraints and its geological significance. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 140-150**

**Abstract:** Three-dimensional (3-D) restoration may help to validate volumetric consistency of structural interpretations; moreover, it is increasingly used as a means to address effects of mechanical properties in structural growth, and to estimate strain distribution within structures. We have constructed the tsurfs model of the Paleocene-Eocene Ziniquanzi Formation and the solid model of Huoerguosi deep anticline in the Southern Junggar Basin based on the interpretation of depth converted, two- and three-dimensional seismic data, with stratigraphic horizons by well control and surface geology defined by remote sensing data. In order to truly represent mechanical properties of rock units, shear module, Lamé's constants and density were specified in the three-dimensional regions of the solid model. Then, we used a combination of horizon-based and volumetric restoration techniques, implemented in Gocad's structural restoration plug-in unit, to restore these two types of models. The axes of maximum principal strain, derived from the restoration of tsurfs model of Paleocene-Eocene Ziniquanzi formation in hanging wall of mountain front thrust faults, mostly extend north-west direction, which are obliquely intersecting with the Tianshan and the mountain front thrust belts. This characteristic may verify the oblique contraction in the Southern Junggar Basin since the Late Cenozoic. Moreover, in the three anticlinal belts extending east-west over 300 km<sup>2</sup> area, the axes of maximum principal strain change from south-north in Huoerguosi anticline to north-east eastward and north-west westward, which indicates the arc shaped thrusting, the typical thrusting style in foreland area and in deep structures. The strain distribution derived from the restoration of Huoerguosi deep anticline solid model do not have obviously corresponding relationship to the kinematic process, but are mainly controlled by contrasts in the mechanical strength of rock units, which caused the varieties of strain distributions in the same fault block. In the petroleum exploration and development, this volumetric restoration technique can be used as a means to estimate strain distributions within structural traps, which may help to predict patterns of natural fracture or other small scale structures.

**Key words:** volumetric structural restoration; tsurfs model; solid model; mechanical property; restoration strain; Gocad modeling system

收稿日期: 2010-01-17; 修回日期: 2010-03-01

基金项目: 国家科技重大专项课题(2008ZX05003-001); 国家重点基础研究发展计划“973”项目 01 课题(2006CB202301); 国家自然科学基金青年基金项目(40802047)

作者简介: 管树巍(1970—), 男, 高级工程师, 构造地质学专业, 主要从事复杂构造解析和建模研究。E-mail: guan@petrochina.com.cn

**摘要:**三维构造恢复不仅可以验证构造解释在三维空间的一致性,也可用于计算构造内部的应变状态,确定构造位移变化路径及地层力学结构对构造生长过程的影响。在 Gocad 三维平台上综合遥感、地震和钻井等资料,建立准噶尔盆地南缘主要勘探目的层古近系古新统一始新统紫泥泉子组( $E_{1-2}$  z)的面模型和霍尔果斯深层背斜的体模型,并在体模型的三维域中设置剪切模量、拉梅常数以及岩层密度,以求真实反映实际地层力学结构。在此基础上利用基于 Gocad 平台开发的三维构造恢复插件对两者开展恢复试验。面模型恢复结果表明,准噶尔盆地南缘山前逆冲断层上盘的恢复应变椭圆长轴多呈北西方向,与该位置天山山体 and 山前断裂带走向斜交,这一特征印证了晚新生代以来的斜向挤压作用。但在山前第二排背斜带东西 300 km 的范围内,恢复应变椭圆长轴由霍尔果斯背斜处的近南北逐渐向东西两侧的北北东向和北西向过渡,揭示出深部隐伏断裂可能具有前陆地区典型的弧形冲断特征。体模型恢复结果表明,霍尔果斯深层背斜内部的应变状态与其所经历的运动学过程并没有显著的对应关系,恢复应变分布主要受相邻地层之间力学结构的差异控制,这就导致同一断块不同地层内部的应变状态具有不同的分布特征。在石油勘探开发领域,针对圈闭范围小尺度构造的恢复应变计算可用于构造裂缝性质、方位和分布的预测。

**关键词:**三维构造恢复;面模型;体模型;力学模型;恢复应变;Gocad 平台

**中图分类号:**P552 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2010)04-0140-11

## 0 引言

断层和褶皱的恢复方法是构造地质学研究的一个重要课题。构造恢复的目的很多,如作为地震构造解释的辅助工具、检验构造解释成果、确定断层和褶皱的运动学过程和缩短量等。二维平衡剖面是目前构造恢复中应用最广泛也是最成熟的技术工具,它主要基于恢复前后的剖面保持岩层长度、厚度和面积不变的原则<sup>[1-6]</sup>。在自然界大多数构造环境中,尤其是针对大尺度、脆性、低温和非变质条件下的构造变形,这些限制因素是合理的,但也有其局限性,主要表现在二维平衡剖面恢复单纯以构造变形的几何学参数(面积、长度和厚度等)作为依据,而对于实际构造的承载者以及构造变形的主体——地层的力学结构,则无任何涉及。大量的研究实例表明,构造变形的样式可能更与卷入变形的地层力学结构有关,其发育过程和变形机制主要受卷入变形地层特别是相邻地层之间的强度对比(strength contrasts)控制,如盐构造和超负荷页岩构造等<sup>[7-21]</sup>。此外,二维平衡剖面恢复对于三维空间内的构造变形(如走滑构造和斜向挤压构造)也是无能为力的。因此,实现构造恢复从二维空间的几何学恢复到三维空间的实体(包含力学参数)恢复的转变一直是构造地质学研究的前沿。

近年来,三维构造恢复技术的发展主要表现在数值模拟手段上,对于面模型的恢复,Muron 等通过三维坐标系到二维坐标系的转换计算,用二维  $U$ - $V$  坐标系统参数化三维空间内的变形曲面,计算恢

复矢量(路径)<sup>[22]</sup>,Muron 等<sup>[22]</sup>和 M üler 等<sup>[23]</sup>提出的体模型恢复基于卷入变形地层的力学结构,恢复应变场的计算采用动态松弛(dynamic relaxation technique)和有限元手段,并遵循最小应变原则<sup>[24-25]</sup>。目前,针对面模型和体模型的恢复算法已在 Gocad 地质建模平台上被开发为插件模块<sup>[26-28]</sup>,我们在准噶尔盆地南缘的构造研究中尝试应用这两个插件,对本区主要勘探目的层古近系古新统一始新统紫泥泉子组( $E_{1-2}$  z)层面和霍尔果斯深层背斜开展构造恢复,以验证构造解释在三维空间的一致性,并计算构造内部的应变状态,确定冲断构造的位移变化路径以及地层力学结构对构造生长过程的影响等。具体流程是,首先在 Gocad 建模平台上综合地表地质、地震、遥感和钻井等数据建立面模型和体模型,在体模型的三维域中设置弹性参数,以求真实反映实际地层的力学结构,再分别利用面模型和体模型恢复插件对两者作构造恢复,计算恢复应变,最后从褶皱形态、断块运动方式和地层力学结构 3 个方面探讨它们与恢复应变的关系。这些工作构成了一个完整、可操作的流程,既可应用于中国中西部的复杂冲断地区构造变形机理研究,也适用于中国东部拉张环境下含油气圈闭的恢复应变计算和构造裂缝预测。

## 1 三维构造恢复方法

三维构造恢复可针对面模型和体模型操作,面模型恢复的思路是:三维空间任何一个变形了的曲面都可以展开为二维空间内的水平面(因此国外将

层面恢复归属于二维恢复)。恢复过程的实质就是建立这两种坐标状态下的转换关系,在数学方法上,则是寻找从三维坐标系到二维坐标系的转换计算方法。Muron 等<sup>[22]</sup>用二维  $U$ - $V$  坐标系统参数化三维空间内的变形曲面(可以包含褶皱和断层),计算出曲面内每个点的恢复矢量(路径),而对于面模型内的断层,在  $U$ - $V$  坐标系统内用断层矢量连接(Fault vector links)表示。面模型恢复除遵循与二维平衡剖面类似的一些关键限制条件(如面积守恒)外,它的另一个重要特点是,层面在恢复过程中遵循最小应变原则,这就在很大程度上保证了构造恢复的合理性。如对于恢复过程中产生的极端高应变区域,通过层面恢复和层面修正之间的反复迭代,达到优化初始层面形态之目的。

体模型的恢复基于卷入变形地层的力学结构<sup>[22-23]</sup>,通过确定钉线(pin line)和钉面(pine wall)等限制条件,沿水平基准面恢复体模型。恢复应变场的计算采用动态松弛(dynamic relaxation technique)和有限元手段,并遵循最小应变原则<sup>[24-25]</sup>。计算流程是:首先按本构关系和拉格朗日有限元方法计算边界限制条件下产生的内部和外部作用力,当两者在惯性力和阻尼力作用下达到平衡时,将驱使体模型内节点的运动,从而产生每个部分的变形,与此同时内部作用力和外部作用力通过本构关系获得更新,这一运算过程将反复下去直到实体变形达到稳定的状态<sup>[25]</sup>。

体模型的恢复计算可基于线性胡克定律或非线性胡克定律,实体内部地层的岩性和力学结构可通过在实体三维域内设置密度、拉梅系数和剪切模量等参数实现。三维域的数目可根据需要在建立实体时设定,目的是使设置了参数的体模型尽可能地接近真实的目标地质体。众多的恢复实验表明,这些参数控制了恢复过程中体积守恒和最小应变之间的均衡作用,不同三维域之间参数设置的变化往往产生不同的恢复计算结果,如在能干层和非能干层参与的褶皱变形中,能干层通常能够完全得到恢复,而非能干层在恢复过程中多伴有恢复应变(restoration strains)发生<sup>[16-17]</sup>。

## 2 三维构造模型

准噶尔盆地南缘是指北天山和准噶尔盆地之间长约 500 km、宽 30 ~ 50 km 的过渡区域,该区域

中—新生界内部的冲断构造发育,地表发育了 3 排近东西延伸的背斜带(图 1),属天山新生代构造变形的一部分<sup>[29-34]</sup>。我们所建立的准噶尔盆地南缘三维构造模型由地表构造和地下构造两部分组成,地表构造信息主要来源于遥感资料数字处理,提取数字高程数据输入 Gocad 建模系统,建立地表虚拟三维形态,如果精度足够高且地表基岩出露良好,可利用三点法<sup>[35]</sup>确定出岩层面,进而计算构造倾向、倾角和走向;地下构造信息主要来源于地震、钻井和测井等勘探资料,这部分资料需首先载入地震解释系统,经构造解释和时间-深度转换后,再输入 Gocad 系统,然后综合地表和地下构造数据建立面模型和体模型。

### 2.1 面模型

面模型用于确定褶皱和断层在三维空间的延伸状态及交切关系。Gocad 平台上面模型的建立主要有 3 种途径:第一种是在“构造建模流程”模块内进行,这是最常用的方式;第二种和第三种是利用“面模型向导”和“层面”主菜单。这 3 种建模途径都是基于离散平滑插值法<sup>[36]</sup>将层面解释数据三角网格化,操作流程相似,可归纳为:数据处理;建立 VOI(volume of interest)边界;建立断面模型和层面模型;建立断层-断层交切模型;建立断层-层位交切模型。按上述步骤完成的准噶尔盆地南缘区域勘探目的层古近系古新统一始新统紫泥泉子组( $E_{1-2}z$ )面模型如图 2a 所示。

### 2.2 体模型

体模型以面模型为基础建立。在建立过程中,首先要设定模型的边界,并建立边界与边界、边界与层面、边界与断层以及断层与层面之间的约束连接(constraints),以封闭模型内的所有区域(每个区域都可称为一个三维域),再根据层面的三角面网格(tsurfs)将所有封闭空间四面体化<sup>[37]</sup>,从而形成实体。具体可分 4 个步骤:建立模型边界(boundaries);建立约束连接(constraints);建立框架模型(frame Model);建立体模型(Solid Model)。按上述步骤完成的霍尔果斯背斜的体模型共包含 12 条断层和 9 个层位(上新统独山子组  $N_2d$ 、中新统塔西河组  $N_1t$ 、中新统沙湾组  $N_1s$ 、始新统一渐新统安集海河组  $E_{2-3}a$ 、古新统一始新统紫泥泉子组  $E_{1-2}z$ 、上白垩统东沟组  $K_2d$ 、下白垩统吐谷鲁群  $K_1tg$  和中上侏罗统西山窑组  $J_{2-3}x$ ),由 26 个三维域、71 个二维域和 240 个一维域构成(图 3)。

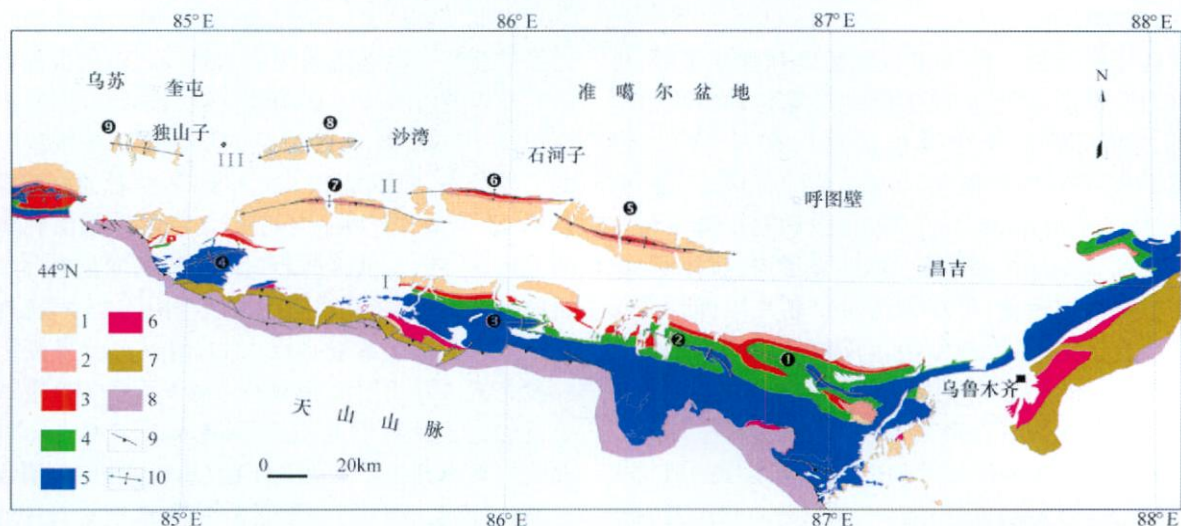


图1 准噶尔盆地南缘地质简图

Fig.1 Geology sketch of the Southern Junggar Basin

I—第一排背斜带; II—第二排背斜带; III—第三排背斜带; ①—喀拉扎—昌吉背斜; ②—齐古背斜; ③—清水河背斜; ④—南安集海背斜; ⑤—吐谷鲁背斜; ⑥—玛纳斯背斜; ⑦—霍尔果斯背斜; ⑧—安集海背斜; ⑨—独山子背斜; 1—上新统—下更新统; 2—中新统; 3—古近系; 4—白垩系; 5—侏罗系; 6—三叠系; 7—二叠系; 8—石炭系; 9—断层; 10—背斜。

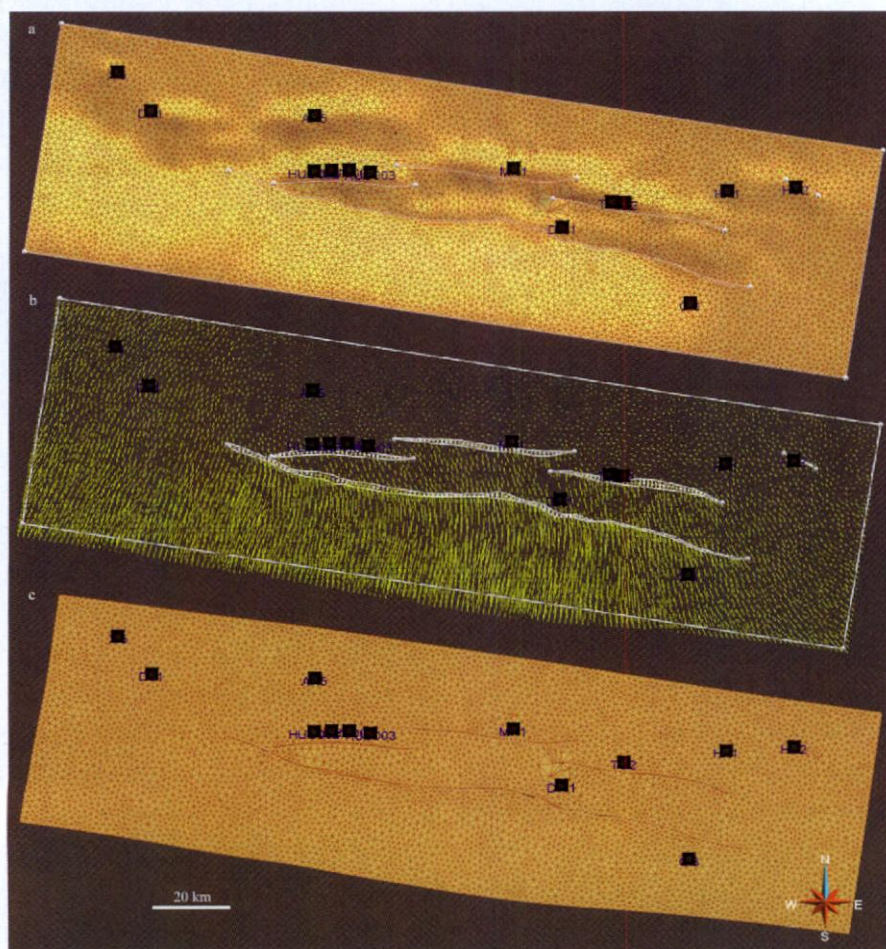


图2 准噶尔盆地南缘古近系古新统一始新统紫泥泉子组面模型

Fig.2 Tsufis model of Paleocene-Eocene Ziniquanzi Formation in the Southern Junggar Basin  
a—原始面模型; b—恢复矢量; c—恢复后的面模型。



2.3 力学模型

在体模型的三维域中设置密度和弹性参数,可建立力学模型,用于反映实际地层结构的各项力学指标。主要的弹性参数包括杨氏模量 (Young's Modulus,  $E$ )、剪切模量 (Shear Modulus,  $G$ )、压缩模量 (Bulk Modulus,  $K$ )、泊松比 (Poisson's ratio,  $\nu$ ) 和拉梅常数 (Lame constant,  $\lambda$ ) 等,其中弹性模量 (杨氏模量、剪切模量和压缩模量) 可视为衡量材料产生弹性变形难易程度的指标,拉梅常数是反映储层变化的最直接和最灵敏的标志。根据准噶尔盆地南缘地质露头 and 钻井所获取的岩性资料,我们采用加权平均的方法计算了霍尔果斯深层背斜内部各套地层的剪切模量、拉梅常数以及岩层密度 (本文只针对深层背斜作构造恢复,表 1),从而建立三维力学模型 (图 4)。注意表 1 中基底 (深层背斜最底部地层) 的弹性参数几乎是上覆地层的 10 倍 (按不可压缩刚性体的弹性参数设置),这样设置的目的是为了为了使基底在构造恢复过程中保持固定和不变形 (见后文论述)。

表 1 准噶尔盆地南缘部分地层的岩石力学参数和密度

Table 1 Density and rock mechanics parameters of some stratigraphic units in the Southern Junggar Basin

地层	剪切模量 $G$ / GPa	拉梅常数 $\lambda$ / GPa	密度 $\rho$ / (kg · m <sup>-3</sup> )
E <sub>1-2</sub> z	6.92	10.38	2 600
K <sub>2</sub> d	7.58	13.47	2 700
K <sub>1</sub> t g	8.85	13.27	2 700
J <sub>2-3</sub> x	9.77	12.43	2 650
基底	96.15	144.23	2 800

3 三维构造恢复

在 Gocad 平台上建立面模型和体模型 (含弹性参数等) 后,就可利用三维恢复插件 (面模型和体模型的恢复插件基于不同的 Gocad 版本)<sup>[26-28]</sup> 对两者开展构造恢复。

3.1 面模型恢复

启动面模型恢复插件,显示要恢复的面模型。根据断层位移的方向,在上盘和下盘截层线之间建立矢量连接 (图 2b),如果断层性质沿走向发生变化 (如由逆断层转换为正断层),可在截层线上加控制点,控制点之间可设置不同的位移方向。然后将大地坐标网格转换为  $U$ - $V$  坐标网格,参数化三维空间内的变形曲面 (包含褶皱和断层)。将钉线 (pine) 与参考方向 (reference direction) 都设置在面模型的北边界上,计算出曲面内每个节点的恢复矢量 (图

2b),由此实施恢复。结果表明,准噶尔盆地南缘古近系古新统一始新统紫泥泉子组 (E<sub>1-2</sub> z) 层面模型在恢复前后并没有太大的面积变化 (图 2c),恢复前的面积是 15 552 km<sup>2</sup>,恢复后的层面严格按恢复矢量的边界分布,面积是 15 603.9 km<sup>2</sup>,两者的变化率只有 0.33%,这个结果远小于由二维平衡剖面计算出的缩短率<sup>[33-34]</sup>。恢复前后层面面积的变化率与原始层面模型有关,在准噶尔盆地南缘山前地段,叠加断层所造成的地层重复是巨大的,但这部分重复距离并没有纳入原始层面模型中。由于面模型恢复的主要目的在于计算恢复应变 (restoration strains),因此我们对山前地带紫泥泉子组 (E<sub>1-2</sub> z) 的层面模型做了简化处理。事实上,无论是否精确考虑该套地层重复距离,恢复应变的计算结果只与面模型的形态有关,而与断层上下盘地层的重复距离是无关的。

3.2 体模型恢复

体模型的恢复基于实体内部各个三维域的力学结构和强度对比,在遵循最小应变原则的前提下达到恢复前后的体积守恒。由于体模型恢复计算量大、耗时长 (霍尔果斯深层背斜三维工区范围的构造恢复需要 7 h 以上),在实际应用中一般只针对局部构造或单个圈闭进行。霍尔果斯深层背斜三维实体模型共包含 5 个地层界面、6 条断层和 9 个三维域,内部断层之间相互连接,构成复杂的楔形构造,而基于 Gocad 平台开发的三维恢复插件模块对这类构造明显暴露出操作空间不足的缺点 (事实上,目前的二维平衡剖面恢复软件也存在这个缺陷),因此我们对霍尔果斯深层背斜的三维构造恢复在很大程度上处于试验或探索阶段。在试验过程中遵循由简单到复杂、由单条断层到多条断层的思路,依次确定各断块的运动学方式、各条断层之间的主动和从动关系及其内部位移量的传递方向。在逐步获得合适的恢复参数后,再针对整个实体模型开展构造恢复 (图 5)。

4 恢复应变

对面模型和体模型作三维构造恢复后,可在层面和实体内部显示恢复应变 (加“恢复”二字是为与“应变”概念区分) 的分布状态 (图 6,图 7)。恢复应变用以度量层面三角网络面积和形状在恢复过程中的变化,若变化值为正,则表示恢复过程中三角网络面积增大,即为拉张变形区;若变化值为负,则表示

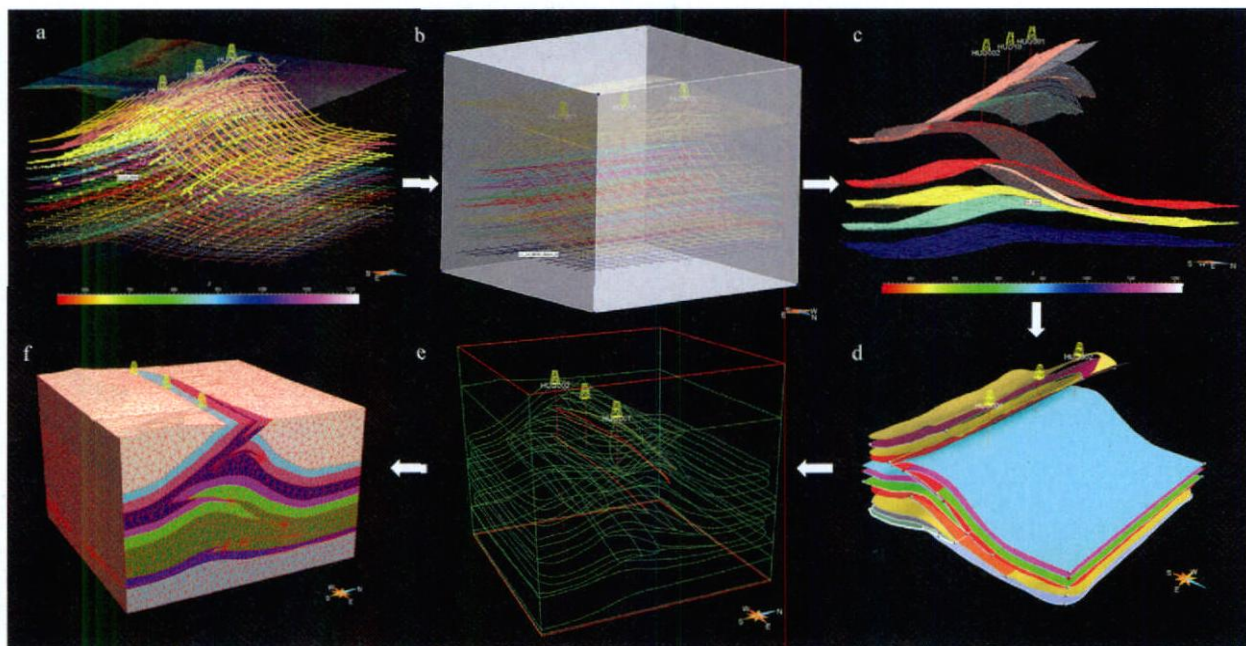


图3 准噶尔盆地南缘霍尔果斯背斜体模型的建立过程

Fig. 3 The building process of Huoerguosi Solid Model in the Southern Junggar Basin  
a—地震解释数据和数字高程; b—VOI边界; c—断面模型; d—面模型; e—框架模型; f—体模型。

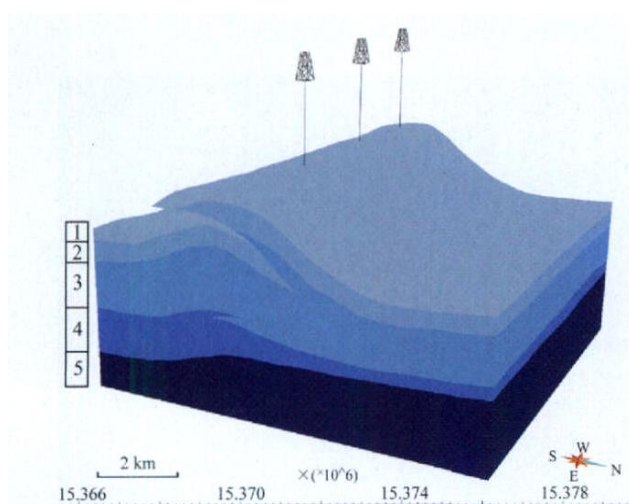


图4 霍尔果斯深层背斜力学结构

Fig. 4 Mechanical model of Huoerguosi deep anticline in the Southern Junggar Basin

背斜内部各套地层被赋予不同的剪切模量、拉梅常数以及岩层密度,并用不同颜色区分。1—古新统一始新统紫泥泉子组;2—上白垩统东沟组;3—下白垩统吐鲁鲁群;4—中上侏罗统西山窑组;5—基底。

恢复过程中三角网格面积减小,即为挤压变形区。对于构造变形微弱的地区,其恢复应变的绝对值也较小。显然,恢复应变的性质与应变的性质是相反的,恢复过程中的拉张变形区对应着构造变形过程中的挤压变形区,恢复过程中的挤压变形区对应着

构造变形过程中的拉张变形区。在应变椭球体中,恢复应变的最大拉伸轴和应变的最大挤压轴是对应的。恢复应变与应变一样,具有张量性质,由最大恢复主应变、最小恢复主应变和中间恢复主应变3个分量组成<sup>[25]</sup>。

## 5 讨论

三维构造恢复不仅用以验证构造解释在三维空间的一致性和合理性,其另一重要目的就是计算构造内部的应变状态。通过面模型恢复计算出的应变分布可用于确定构造应力场,在前陆冲断地区,冲断构造位移的方向一般与主压应力方向一致,根据恢复应变最大拉伸轴的方位也可以确定出构造位移的变化路径和缩短方向。而体模型恢复基于卷入变形地层的力学结构,由此计算出的三维空间内的恢复应变状态可用于研究地层力学结构对构造生长过程的影响。我们以准噶尔盆地南缘的中间恢复主应变计算结果为例详细探讨这几个问题。

### 5.1 区域恢复主应变

准噶尔盆地南缘古近系古新统一始新统紫泥泉子组( $E_{1-2}z$ )的中间恢复主应变椭球的分布如图6所示,色标按应变值-15%~15%的范围设置,红色为



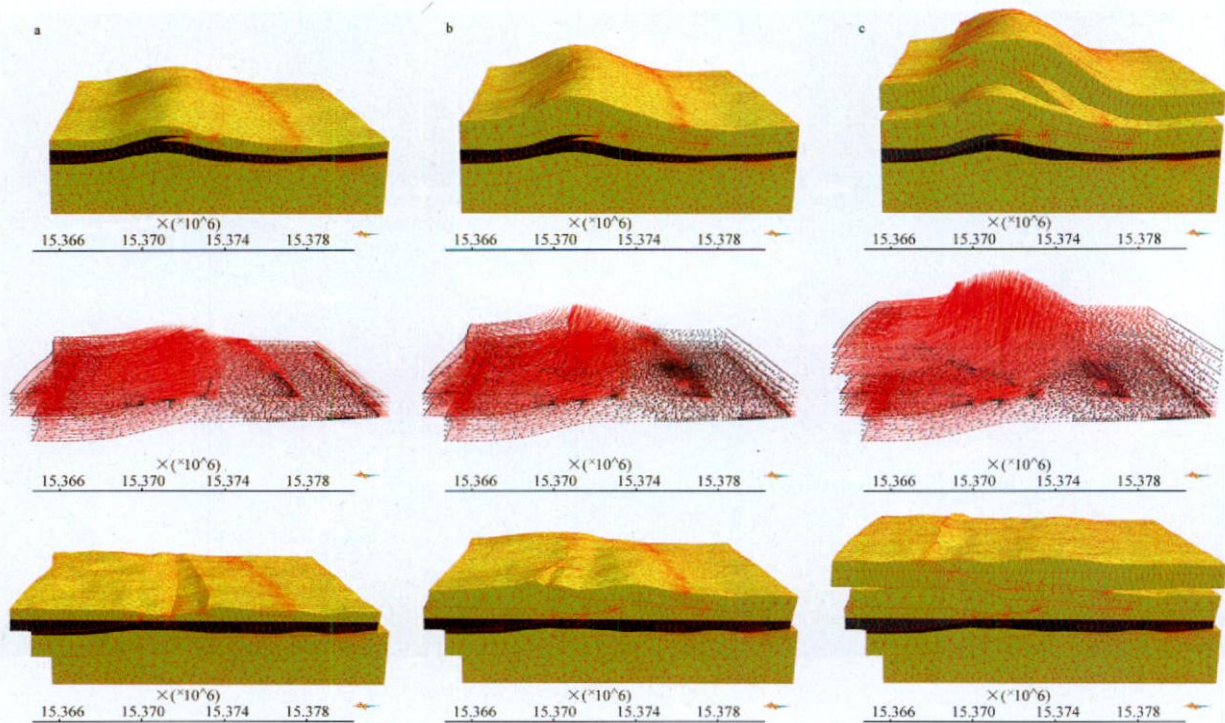


图 5 霍尔果斯深层背斜的恢复实验

Fig. 5 Test of volumetric restoration of the Huoerguosi deep anticline  
a—两条断层的恢复实验;b—4 条断层的恢复实验;c—6 条断层的恢复实验;红色箭头簇为恢复矢量。

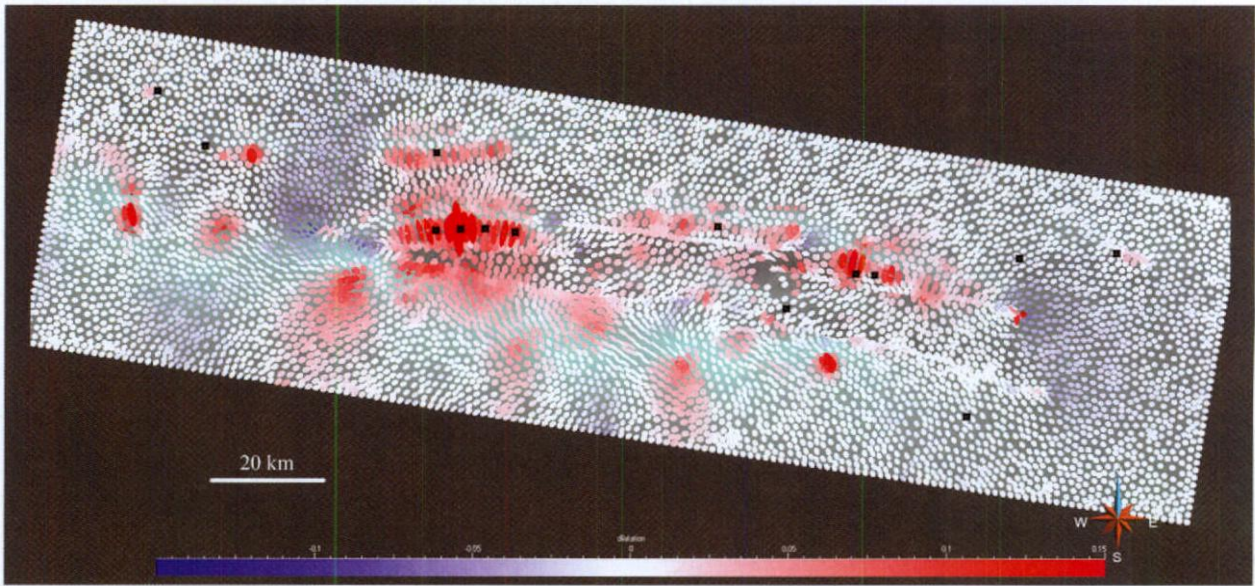


图 6 准噶尔盆地南缘古近系古新统一始新统紫泥泉子组中间恢复主应变的分布

Fig. 6 The distribution of restored principal strain of Paleocene-Eocene Ziniquanzi Formation in the Southern Junggar Basin

正值区,代表构造变形过程中的挤压应变区,蓝色为负值区,代表构造变形过程中的拉张应变区。

在准噶尔盆地南缘山前逆冲断层上盘,恢复应变椭球的最大拉伸轴多呈北西方向(图 8),说明古近纪这个地区的主压应力方位为北西向,与该位置

的天山山体 and 山前断裂带走向大体一致,但主压应力的走向更偏北,这一特征可能印证了准噶尔盆地南缘晚新生代以来的斜向挤压作用<sup>[33]</sup>。但在山前第二排和第三排背斜带,恢复应变的最大拉伸轴由霍尔果斯背斜的近北向逐渐向东西两侧过渡为吐



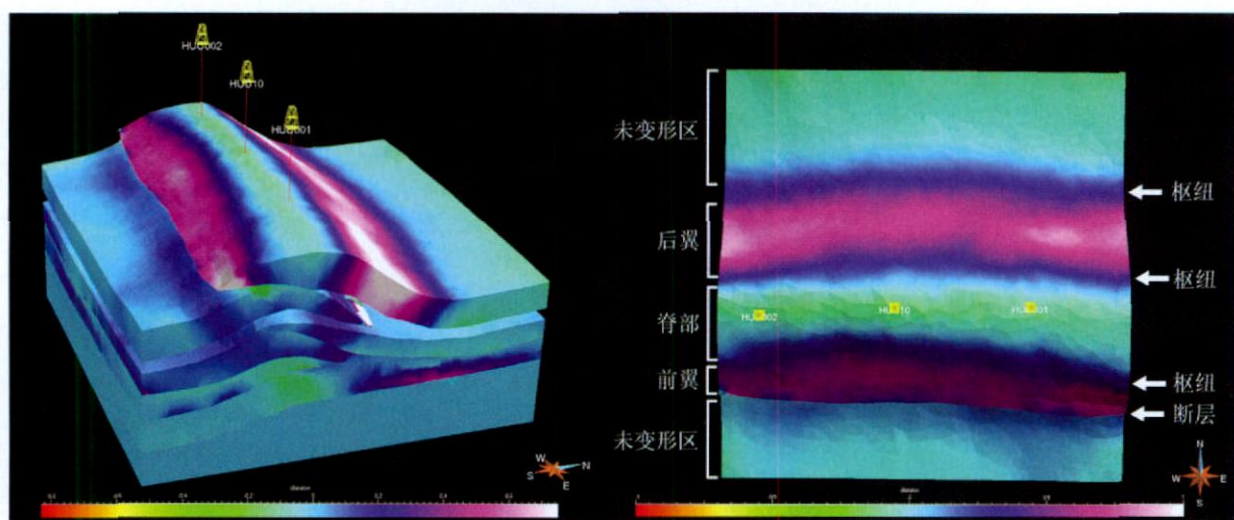


图7 霍尔果斯深层背斜中间恢复主应变分布

Fig. 7 The distribution of restored principal strain of the Huoerguosi deep anticline

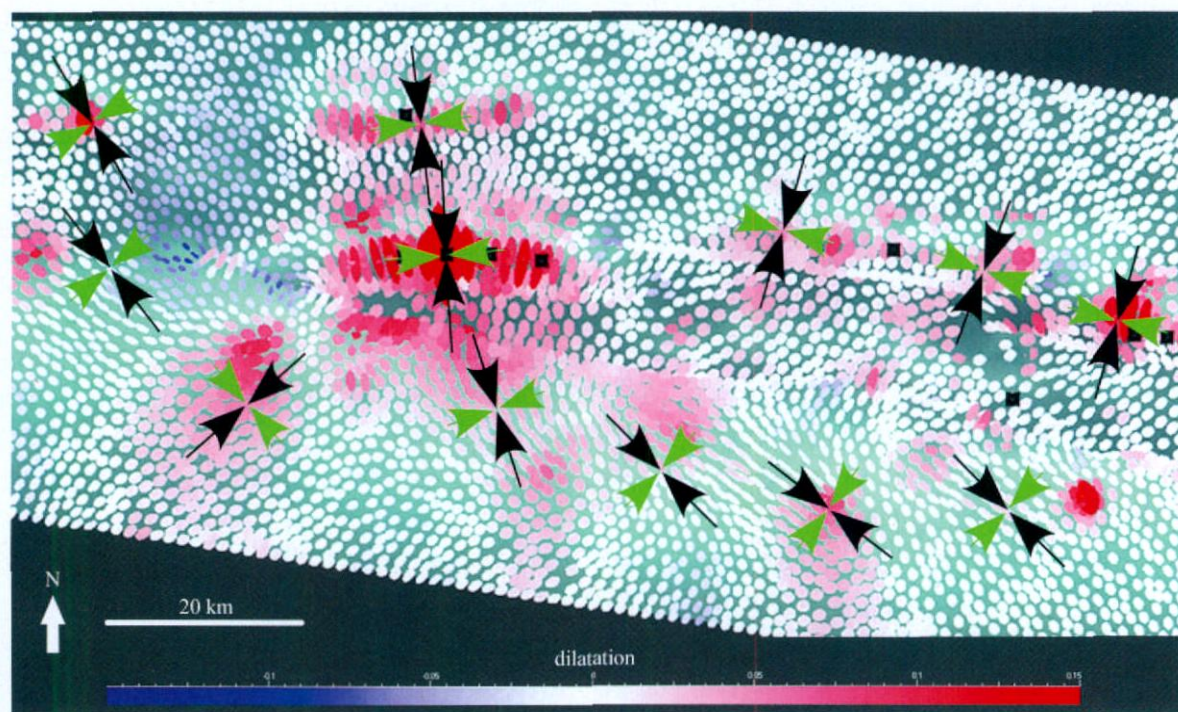


图8 准噶尔盆地南缘中段的恢复主应变分布

Fig. 8 The distribution of restored principal strain of the middle segment in the Southern Junggar Basin

图中黑色箭头代表最大主压应力, 绿色箭头代表最小主压应力。

谷鲁背斜的北北东向和独山子背斜的北西向, 其中以霍尔果斯背斜部位的恢复应变椭球最大拉伸轴最长, 其北侧安集海背斜、东侧玛纳斯背斜和西侧独山子背斜的恢复应变椭球最大拉伸轴长度则明显减小, 这种分布格局揭示出深部隐伏断裂可能具有前陆地区典型的弧形冲断特征, 沿霍尔果斯背斜至安集海背斜一线则位于这个弧形冲断体系的中心, 构造变形强度由南向北渐次变弱。此外, 准噶尔盆地

南缘三排线形背斜带在南北方向上成排展布的特征也揭示了挤压作用在构造变形中的主导地位, 地震构造解释成果表明, 控制准噶尔盆地南缘构造变形的逆冲断层表现为滑脱面由南向北逐级抬高的台阶状, 这些台阶状逆断层在扩展过程中将位移量持续不断地向北传递, 位移量在每个断坡位置引发上覆地层的褶皱变形, 从而形成南北方向上背斜带成排分布的构造格局<sup>[33-34]</sup>。



## 5.2 局部恢复主应变

霍尔果斯深层背斜内部中间恢复主应变的分布如图7所示, 以下从褶皱形态、断块运动学机制和地层力学结构几个方面探讨它们与恢复应变的关系。

(1) 恢复应变与褶皱形态。由于霍尔果斯深层背斜的实体形态完整, 因此恢复应变的分布基本与背斜各部位有着良好的对应关系(图7)。恢复应变的正值区呈带状分布在背斜的两翼, 其中以两翼中部的应变值最大, 达0.75(75%)以上(见色标), 向两侧枢纽位置逐渐减小, 负值区分布在背斜脊部, 应变值较小, 变化值在-0.2~0(-20%~0%), 枢纽带的应变值则介于背斜脊部和两翼的应变值之间。恢复应变的这种分布方式说明, 霍尔果斯深层背斜的脊部经历了微弱的拉张变形, 而翼部则是挤压应变的发生位置, 最大挤压应变强度发生在两翼的中部, 这个结论与褶皱枢纽通常是最大应变强度发生位置的传统观点是不一致的。我们认为, 褶皱不同部位应变强度的差异可能与褶皱的变形机制有关, 如在以翼部旋转<sup>[7,9,38]</sup>为机制的褶皱变形中, 褶皱枢纽是固定的, 褶皱两翼围绕着枢纽发生旋转, 随着倾角增大, 褶皱也相应抬升(图9a), 这种变形机制下的褶皱枢纽显然是最大应变的发生位置。而在由断层的冲断指向, 也具有较弱的应变发生(图7)。但在断层作用引发的褶皱变形中<sup>[3-4,39-43]</sup>, 活动轴面位置的褶皱枢纽固定于下伏台阶状断层的转折端处, 地层褶皱形态与断层形态大体一致, 当上盘地层连续通过断层的转折端(褶皱枢纽部位)时, 褶皱枢纽与其所在地质体之间也存在着相对运动(图9b)。自然界更多的褶皱变形可能同时包含上述两种变形机制(也可能是不同阶段分别表现为不同的变形机制)。霍尔果斯深层背斜内部楔形构造发育, 断层

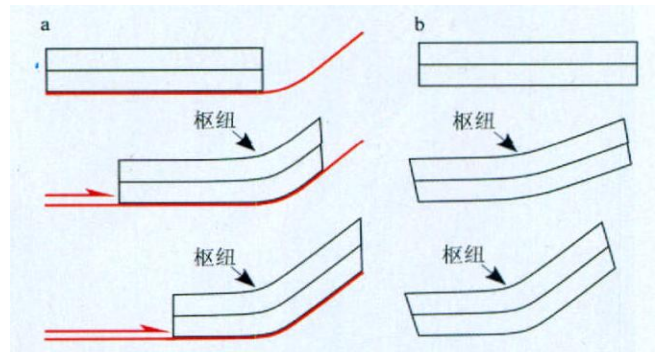


图9 两种褶皱变形机制下的枢纽位置

Fig. 9 Positions of the hinges by two folding mechanisms  
a—膝折带迁移; b—翼部旋转。

相互交接, 运动学过程复杂, 其生长方式可能更多地表现为这两种变形机制的混合, 但即使如此, 褶皱翼部是否就应处于比枢纽部位更强的应变状态, 仍有待于进一步的论证, 也尚需更有说服力的理论依据。

(2) 恢复应变与断块运动方式。霍尔果斯深层背斜内部的褶皱变形主要由断层作用引发<sup>[3-4,39-43]</sup>, 这种机制下形成的褶皱形态具有一翼陡一翼缓的不对称特征, 较陡的一翼(也称为前翼)代表了下伏断层的冲断指向, 也具有较弱的应变发生(图7)。但在深部前冲断层和后冲断层夹持的楔形体内部, 虽然相邻两套地层的褶皱形态一致, 褶皱变形机制也完全相同, 但这两套地层的恢复应变却表现出截然不同的分布, 如上部地层的褶皱脊部为拉张应变区, 两翼都为挤压应变区(图10a), 而下部地层的前翼为挤压应变区, 后翼主要表现为拉张应变(图10b)。由此看来, 即使是在同一断块内部, 虽然各地层经历了相同的运动学过程和变形机制, 但仍有可能存在

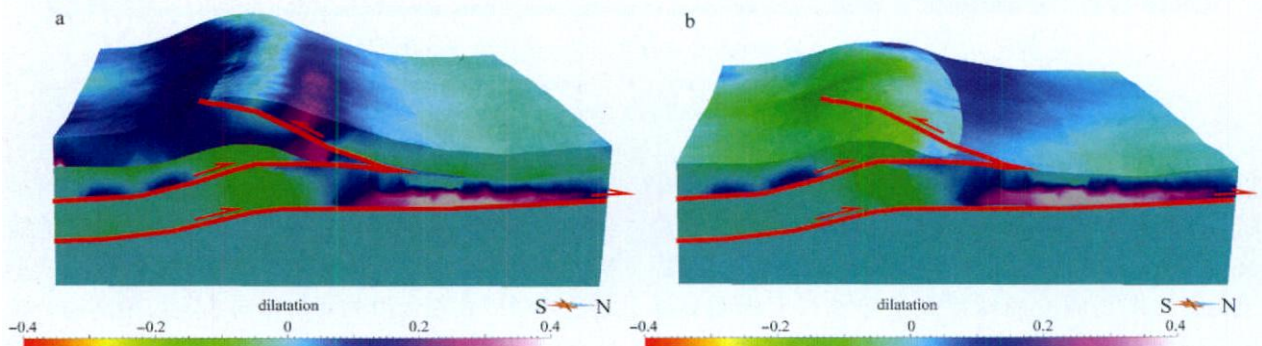


图10 霍尔果斯深层背斜构造楔形体内部相邻地层间恢复应变的分布差异

Fig. 10 Distribution difference of the restored strain between adjacent units in the same structural wedge of the Huoerguosi deep anticline

不同的应变分布,也就是说,恢复应变的分布与断块运动学方式之间可能没有唯一的对应关系。

(3) 恢复应变与地层力学结构。同一断块内的褶皱地层虽然经历了相同的运动学过程,但各地层的应变状态却具有不同的分布格局,造成这种分布格局不一致的主要原因可能在于各地层之间力学结构的差异。前文已经强调,在对霍尔果斯深层背斜实体模型的恢复过程中,为保持最底部地层的固定和不变形,我们将它的弹性参数设置达上覆地层的10倍(表1),恢复结果显示,最底部地层内没有任何应变发生(图10)。同样,同一断块内部各套地层恢复应变截然不同的分布,也主要是由这些地层弹性参数设置的差异造成的。因此,构造变形中的应变状态除与褶皱的不同部位相关外,主要与卷入变形地层的力学结构差异尤其是相邻地层强度对比有关,而与其所经历的运动学过程并没有显著的对应关系。

在石油勘探和开发领域,三维构造恢复应变对于预测构造裂缝的性质、方位、分布以及其他小尺度的构造变形具有重要的意义,如恢复应变的椭圆长轴一般对应压性裂缝,短轴则对应张性裂缝等。此外,根据恢复应变数值的分布格局也可以预测构造裂缝发育的密集区。由于我们对霍尔果斯深层背斜的构造恢复针对的是整个背斜,而且只涉及内部的数条主要断层,因此计算出的恢复应变呈有规律的分布。在以裂缝预测为目的的构造恢复中,我们可针对圈闭范围的小尺度地质体做三维恢复尝试,由此计算的恢复应变分布将更具实用价值,这也正是我们下一步工作所要做的。

## References

- [1] Dahlstrom C D A. Balanced cross sections [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6: 743-757.
- [2] Woodward N B, Boyer S E, Suppe J. An Outline of Balanced Cross-Sections[M]. 2nd ed. Knoxville: University of Tennessee, Department of Geological Sciences, 1985: 170.
- [3] Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding[J]. American Journal of Science, 1983, 283: 684-721.
- [4] Suppe J, Medwedeff D. Geometry and kinematics of fault-propagation folding[J]. Eclogae Geologicae Helvetiae, 1990, 83(3): 409-454.
- [5] Allmendinger R W. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds[J]. Tectonics, 1998, 17: 640-656.
- [6] Novoa E, Suppe J, Shaw J H. Inclined-shear restoration of growth folds[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2000, 84(6): 787-804.
- [7] Hardy S, Poblet J. Geometric and numerical model of progressive limb rotation in detachment folds [J]. Geology, 1994, 22: 371-374.
- [8] Hardy S, Poblet J, McClay K, et al. Mathematical modeling of growth strata associated with fault-related fold structures [C] Buchanan P G, Nieuwland D A. Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modeling. London: Geological Society of London Special Publication 99, 1996: 265-282.
- [9] Poblet J, McClay K R, Storti F, et al. Geometries of syntectonic sediments associated with single layer detachment folds [J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19: 369-381.
- [10] Epard J L, Groshong R H. Excess area and depth to detachment[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1993, 77: 1291-1302.
- [11] Epard J L, Groshong R H. Kinematic model of detachment folding including limb rotation, fixed hinges, and layer-parallel strain[J]. Tectonophysics, 1995, 247: 85-103.
- [12] Homza T X, Wallace W K. Detachment folds with fixed hinges and variable detachment depth, Northeastern Brooks Range, Alaska[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19: 337-354.
- [13] Cotton J T, Koyi H A. Modeling of thrust fronts above ductile and frictional detachments: Application to structures in Salt range and Potwar plateau[J]. Geological Society of America Bulletin, 2000, 112: 351-363.
- [14] Bilotti F, Shaw J H. Deep-water Niger Delta fold and thrust belt modeled as a critical-taper wedge: The influence of elevated basal fluid pressure on structural styles[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2005, 89: 1475-1491.
- [15] Spratt D A, Lawton D C. Variations in detachment levels, ramp angles and wedge geometries along the Alberta thrust front[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, 44: 313-323.
- [16] Plesch A, Shaw J H, Kronman D. Mechanics of low-relief detachment folding in the Bajiaochang Field, Sichuan Basin, China [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007, 91(11): 1559-1575.
- [17] Guzofski C A, Mueller J P, Shaw J H, et al. Insights into the mechanisms of fault-related folding provided by volumetric structural restorations using spatially varying mechanical constraints[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2009, 93(4): 479-502.
- [18] Erickson S G, Jamison W R. Viscous-plastic fine-element models of fault-bend folds[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17: 561-573.



- [19] Salvini F, Storti F, McClay K. Self-determining numerical modeling of compressional fault-bend folding [J]. *Geology*, 2001, 29: 839-842.
- [20] Cardozo N, Bhalla K, Zehnder A T, et al. Mechanical models of fault propagation folds and comparison to the trishear kinematic model [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25: 1-18.
- [21] Hardy S, Finch E. Discrete-element modeling of detachment folding [J]. *Basin Research*, 2005, 17: 507-520.
- [22] Muron P, Mallet J L, Medwedeff D A. 3D sequential structural restoration: Geometry and kinematics [J]. *AAPG Annual Meeting Program*, 2005, 14: A98.
- [23] Müller J P, Guzowski C, Rivero C, et al. New approaches to 3D structural restoration in fold-and-thrust belts using growth strata [J]. *AAPG Annual Meeting Program*, 2005, 14: A97.
- [24] de Santi M R, Campos J L E, Martha L F. 3D geological restoration using a finite element approach [C]. *Proceedings of the 23rd Gocad Meeting*. Nancy, France: Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications, 2003: 12.
- [25] Muron P. 3-D Numerical Methods for the Restoration of Faulted Geological Structures [D]. de Lorraine: Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2005: 141.
- [26] Muron P, Mallet J L. 3-D balanced unfolding: The tetrahedral approach [C]. *Proceedings of the 23rd Gocad Meeting*. Nancy, France: Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications, 2003: 17.
- [27] Muron P, Mallet J L. 3-D balanced unfolding and rock properties [C]. *Proceedings of the 24th Gocad Meeting*. Nancy, France: Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications, 2004: 16.
- [28] Muron P. Handling faults in 3D structural restoration [C]. *Proceedings of the 25th Gocad Meeting*. Nancy, France: Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications, 2005: 15.
- [29] Avouac J P, Tapponnier P, Bai M, et al. Active thrusting and folding along the Northern Tianshan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzhungaria and Kazakhstan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 6755-6840.
- [30] Burchfiel B C, Brown E T, Deng Q D, et al. Crustal shortening on the margins of the Tianshan, Xinjiang, China [J]. *International Geology Review*, 1999, 41: 665-700.
- [31] Charreau J, Chen Y, Gilder S, et al. Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Neogene Kuitun He section (Northwest China): Implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan Mountains [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 230: 177-192.
- [32] Deng Q D, Feng X Y, Zhang P Z, et al. Active Tectonics in Tianshan [M]. Beijing: Seismological Press, 2000: 399 (in Chinese).
- [33] Guan S W, Li B L, He D F, et al. Late Cenozoic active fold-and-thrust belts in the southern and northern flanks of Tianshan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81 (6): 725-744 (in Chinese).
- [34] Guan S W, Li B L, He D F, et al. Recognition and exploration of structural wedges: A case study of the southern margin of Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16 (3): 129-137 (in Chinese).
- [35] Bilotti F, Shaw J H, Brennan P A. Quantitative structural analysis with stereoscopic remote sensing imagery [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2000, 84: 727-740.
- [36] Mallet J L. Discrete smooth interpolation in geometric modeling [J]. *Computer Aided Design*, 1992, 24 (4): 178-191.
- [37] Lepage F. Three Dimensional Mesh Generation for the Simulation of Physical Phenomena in Geosciences [D]. de Lorraine: Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2003: 254.
- [38] Dahlstorm C D A. Geometric constraints derived from the law of conservation volume and applied to evolutionary models for detachment folding [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1990, 74: 336-344.
- [39] Suppe J, Chou G T, Hook S C. Rates of folding and faulting determined from growth strata [C]. *McKlay K R. Thrust Tectonics*. New York: Chapman Hall, 1992: 105-121.
- [40] Suppe J, Sàbat F, Muñoz 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: 443-461.
- [41] Shaw J H, Connors C, Suppe J. Seismic Interpretation of Contractual Fault-related Folds: An AAPG Seismic Atlas [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2005: 156.
- [42] 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: 8623-8642.
- [43] Medwedeff D A, Suppe J. Multibend fault-bend folding [J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19 (3/4): 279-292.

## 参考文献

- [32] 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: 399.
- [33] 管树巍, 李本亮, 何登发, 等. 晚新生代以来天山南、北麓冲断作用的定量分析 [J]. *地质学报*, 2007, 81 (6): 725-744.
- [34] 管树巍, 李本亮, 何登发, 等. 构造楔形体的识别与勘探: 以准噶尔盆地南缘为例 [J]. *地学前缘*, 2009, 16 (3): 129-137.