

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

前陆冲断带复杂构造解析与建模

——以准噶尔盆地南缘第一排背斜带为例

管树巍¹⁾, 张朝军¹⁾, 何登发¹⁾, 石昕¹⁾, JOHN Suppe²⁾, 汪新³⁾, 吴晓智^{1,4)}

1) 中国石油勘探开发研究院, 北京, 100083; 2) Department of Geosciences, Princeton University, Princeton, NJ, USA, 08544; 3) 浙江大学地球科学系, 杭州, 310027

4) 新疆油田公司勘探开发研究院, 克拉玛依, 830011

内容提要: 构造解析应从构造的变形机制、变形过程、变形量和变形时间四个方面入手, 合理的构造解释方案是构造解析的基础, 论文将等倾角区划分和轴面分析等几何学方法应用到地震解释中, 从以上4个方面对准噶尔盆地南缘第一排背斜带做了系统的构造解析。地层结构揭示第一排背斜带深部发育楔状构造, 楔状构造由5个古生界一中生界组成的断层转折褶皱叠加而成, 是潜在的勘探目标群。在构造楔沿侏罗系西山窑组煤层向北扩展过程中, 台阶状逆断层的大部分位移量沿构造楔顶部的反冲断层向南消减, 另一部分位移量则沿西山窑组煤层向北传递至第二排背斜带, 在总位移量保持稳定的前提下, 第一排背斜带和第二排背斜带在走向上的此消彼长, 反映位移量在南、北两个方向上的转换。

关键词: 前陆冲断带; 构造解析; 断层相关褶皱; 构造楔; 等倾角区划分; 轴面分析

前陆冲断地区的地层速度结构、地震波传播路径在横向和纵向上变化剧烈, 时间域的地震反射资料并没有直观地反映出深、浅层构造的真实形态, 构造解释的难点主要表现在: ①浅层构造在地震资料上往往呈空白或杂乱反射, 解释者无法通过确定浅层构造形态以约束深层构造的解释; ②地震波速度在横向上变化剧烈导致深层构造畸变严重, 解释者对于深层构造性质和类型的认识存在着较大的差异(管树巍等, 2003a, 2003b)。因此, 复杂构造地区的地震构造解释必须以模型为基础(何登发等, 2005), 通过断层相关褶皱分析确定褶皱形态和断层形态在几何学上的定量关系, 以达到预测资料较差地区构造形态的目的(Suppe, 1983; Suppe et al., 1990, 1992, 1997; Shaw et al., 1994, 1996, 1999, 2003; Poblet et al., 1996; Medwedeff et al., 1997)。

不可否认, 自然界的构造变形要比断层相关褶皱理论模型复杂得多, 但大量的野外观察和典型构造的地震资料表明(Shaw et al., 2004), 构造变形的复杂性主要表现在多期、多类型断层相关褶皱的叠加, 而通过测量构造叠加的倾角谱(Suppe, 1983), 仍

然可以精确地预测出叠加构造内部的断层和褶皱形态。本文将等倾角区划分(Suppe, 1983; Shaw et al., 1999)和轴面分析(Suppe, 1983; Shaw et al., 1994, 1999)等断层相关褶皱分析方法应用到构造解释中, 从变形机制、变形过程、变形量和变形时间4个方面对准噶尔盆地南缘第一排背斜带作了系统的构造解析, 旨在为中国中西部前陆冲断带的地震勘探和复杂构造研究提供一个可以参考的范例。

1 地震构造解释

准噶尔盆地南缘的第一排背斜带发育在北天山山前断裂带下盘的中—新生界内部, 为一系列向东或向西倾伏的鼻状构造, 在平面上大致与北天山山脉走向一致, 自东向西主要由喀拉杂—昌吉背斜、齐古背斜、清水河背斜、南安集海背斜、托斯台背斜和高泉背斜组成(图1), 其中以喀拉杂—昌吉背斜和齐古背斜规模最大。第一排背斜带与山前断裂下盘的单斜地层之间以狭窄的向斜过渡, 地表背斜的核部出露中生界, 出露面积由东向西逐渐减小, 两翼主要由新生界组成, 20世纪50~60年代在背斜带东

注: 本文为国家“十五”重点科技攻关项目“重点前陆盆地大中型气田形成主控因素与富集规律”(编号 2004BA601A-04)资助成果。

收稿日期: 2005-11-26; 改回日期: 2006-04-16; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 管树巍, 男, 1970年生, 2004年获浙江大学构造地质学专业博士学位。现为中国石油勘探开发研究院盆地构造重点实验室工程师。

通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路20号910信箱, 实验研究中心; Email: guan@petrochina.com.cn。

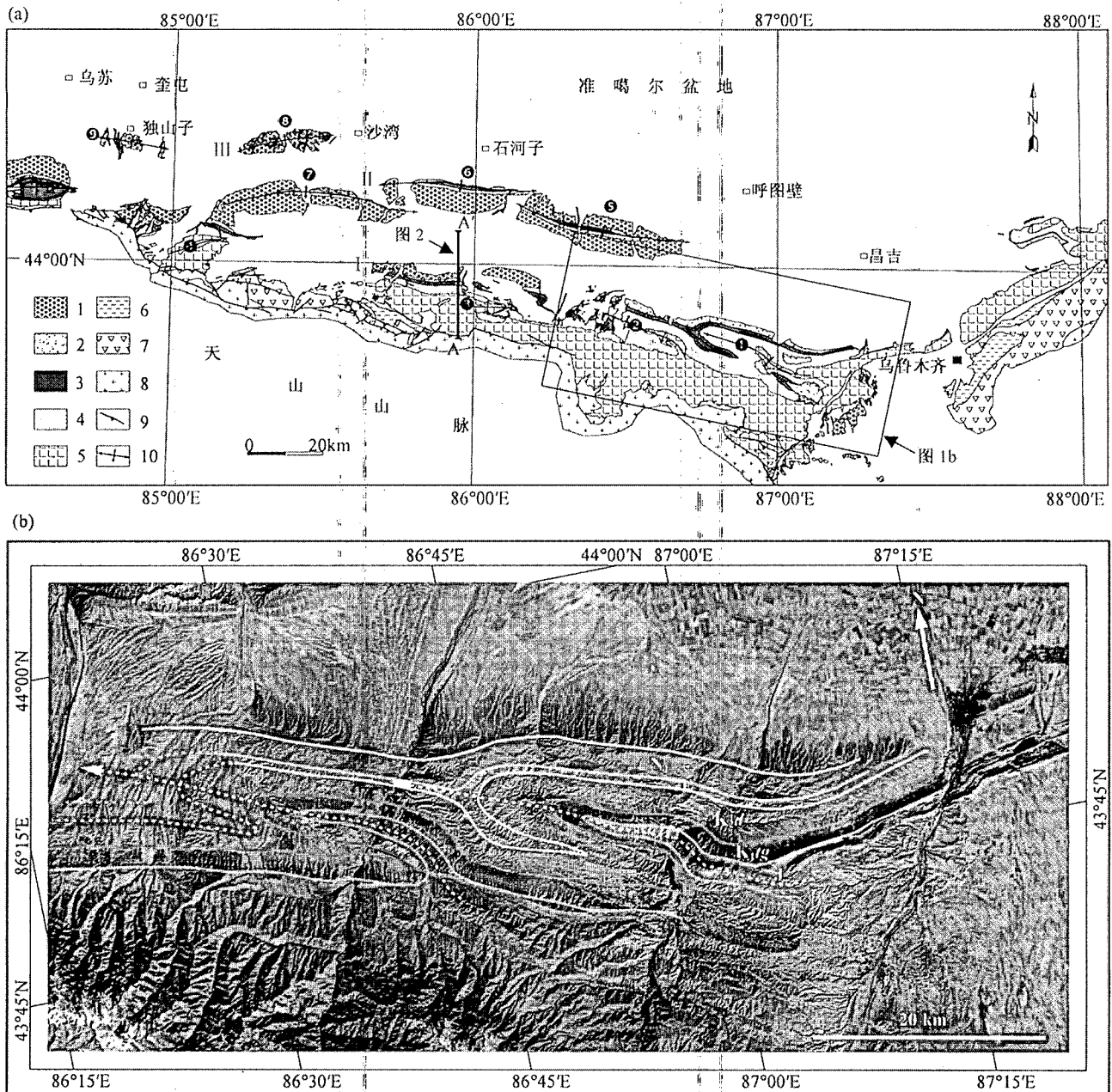


图 1 准噶尔盆地南缘地质简图(a)(文中的地震测线已标出)和第一排背斜带东段 ETM 遥感影像(b)

Fig. 1 Geology sketch of the Southern Junggar fold-and-thrust belt(a) (available seismic line is located) and Enhanced Thematic Mapper (ETM) imagery of the eastern part of the first row anticlinal belt(b)

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—吐鲁鲁背斜; 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; N₁—中新统; E—古近系; K_{2d}—白垩系; K_{1tg}—白垩系; J—侏罗系

I—The first row anticlinal belt; II—The second row anticlinal belt; III—The third row anticlinal belt; ①—Kalazha—Changji anticline; ②—Qigu anticline; ③—Qingshuihe anticline; ④—Southern Nnjjhai anticline; ⑤—Tugulu anticline; ⑥—Manasi anticline; ⑦—Huoerguosi anticline; ⑧—Anjjhai anticline; ⑨—Dushanzi anticline; 1—Pliocene—Lower Pleistocene; 2—Miocene; 3—Paleogene; 4—Cretaceous; 5—Jurassic; 6—Triassic; 7—Permian; 8—Carboniferous; 9—thrust fault; 10—anticline fold axis; N₁—Miocene; E—Paleogene; K_{2d}—Upper Cretaceous Donggou Formation; K_{1tg}—Lower Cretaceous Tugulu Group; J—Jurassic

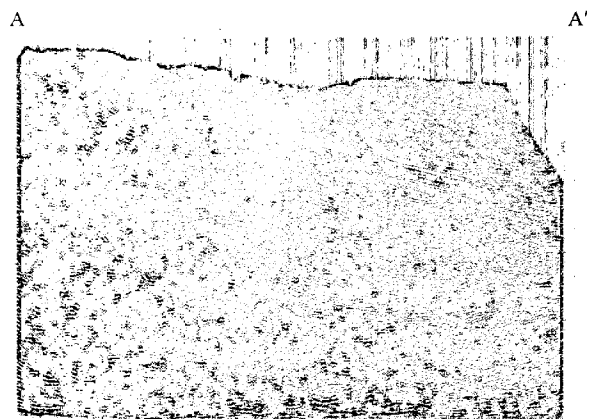


图2 准噶尔盆地南缘过清水河背斜地震反射剖面
(测线位置见图1)

Fig. 2 Uninterpreted seismic reflection profile across the Qingshuihe anticline in the south of Junggar Basin
(see Fig. 1 for location)

段钻探时见到了丰富的油气显示并发现了齐古油田。

地震反射剖面 A—A' 过第一排背斜带中段的清水河背斜(图2,测线位置见图1),剖面中,中、新生界的反射基本上能够连续追踪,其中中侏罗统西山窑组(J_{2-3x})煤层和始新统一渐新统安集海河组(E_{2-3a})泥岩层为一套强振幅、较连续的波组,是准噶尔盆地南缘的标志反射层,在20 km 的距离内,这一套中、新生界的反射由盆地向山前抬升的幅度超过6000 ms,形成一巨大的单斜构造,清水河背斜即发育在单斜构造之上。中侏罗统西山窑组煤层(J_{2-3x})以下为地震反射杂乱区,笔者根据中、新生界的变形特征推测杂乱反射区内部的断层和褶皱形态:

1.1 划分等倾角区

假设变形前的地层处于水平状态,地层具有一定的倾角,是褶皱变形的产物,发生变形的地层可由一组或数组倾角稳定的区域组成,不同区域之间的倾角则相差较大,构造几何学中将倾角相等或近似相等的一组区域称为等倾角区(Suppe, 1983; Shaw et al., 1999)。划分等倾角区的目的在于确定褶皱的几何形态,但自然界的褶皱变形并非表现为直线状的规整形态,各倾角区之间主要表现为弧形过渡(Suppe et al., 1997),这一过渡区域在几何学上可看作是由无数个等倾角区(切点)组成,显然,这一弧形过渡区域越狭窄,等倾角区的划分结果就越可靠,因此,等倾角区的划分取决于解释者对于褶皱变形的总体判断。

地层倾角数据主要来源于地表实测、倾角测井和地震反射资料,在冲断地区浅层地震资料上往往呈杂乱反射,野外沿着地震测线测量岩层倾角,并将倾角数据投影到地震剖面上用以弥补浅层反射资料的不足是常用的方法。在图3a中,我们将野外实测的地层倾角精确地投影到地震剖面上,再结合地震反射同相轴确定等倾角区,具体方法是:把透明纸覆盖在地震剖面上,使用两个直角三角板,将一个三角板沿着某同相轴固定,然后沿着这个三角板的一边滑动另一个三角板,这样可以画出若干组平行的直线,即等倾角区。由于速度变化或其它原因,平行岩层在地震反射资料上可能表现为并非完全平行(严格意义上说,应首先将时间域的地震剖面转换为深度域的地震剖面),而且自然界中地层之间也有可能不是严格平行,但是这种方法具有简明性,在许多实例研究中已被证明是行之有效的(Woodward et al., 1985)。

按照上述方法,我们在图3a中确定出该地震测线位置的中、新生界主要由七个等倾角区组成,分别用“0”、“I”、“II”...“VI”表示,其中0区为 $0\sim 3^\circ$,反映地层处于未变形状态,I区为 $21\sim 24^\circ$,II区为 $46\sim 50^\circ$,III区约为 $53\sim 54^\circ$,IV区约为 $21\sim 23^\circ$,V区约为 $53\sim 54^\circ$,VI区为 $12\sim 14^\circ$ 。以侏罗系西山窑组(J_{2-3x})煤层为界,这七个等倾角区分属于上、下两套不同的构造变形层,西山窑组(J_{2-3x})煤层以下的两个等倾角区I和II,反映了深部构造的几何形态,而西山窑组(J_{2-3x})煤层以上的三个等倾角区III、IV和V,反映了清水河背斜的几何形态,等倾角区VI则位于0区和I区之间,由下第三系安集海河组(E_{2-3a})内部泥岩向地层褶曲部位流动并充填而成。

1.2 轴面分析

相邻等倾角区之间的夹角称为翼间角(Suppe, 1983),划分出等倾角区后,用轴面平分翼间角,以确保轴面两侧的地层等厚,再分析轴面成因、轴面类型及其终止方式。轴面的终止方式可能有三种(Woodward et al., 1985):①终止于断层;②发生分叉或与其他轴面合并;③被晚期断层截切,轴面的终止方式是解释构造的重要依据,解释者应熟练掌握各种断层相关褶皱模型中轴面所代表的几何学和运动学意义,以便在实际构造变形分析中作出正确的分析和判断。

在图3a中,侏罗系西山窑组(J_{2-3x})煤层以下的两个等倾角区I和II由轴面a、b、c、d、e和f限定,

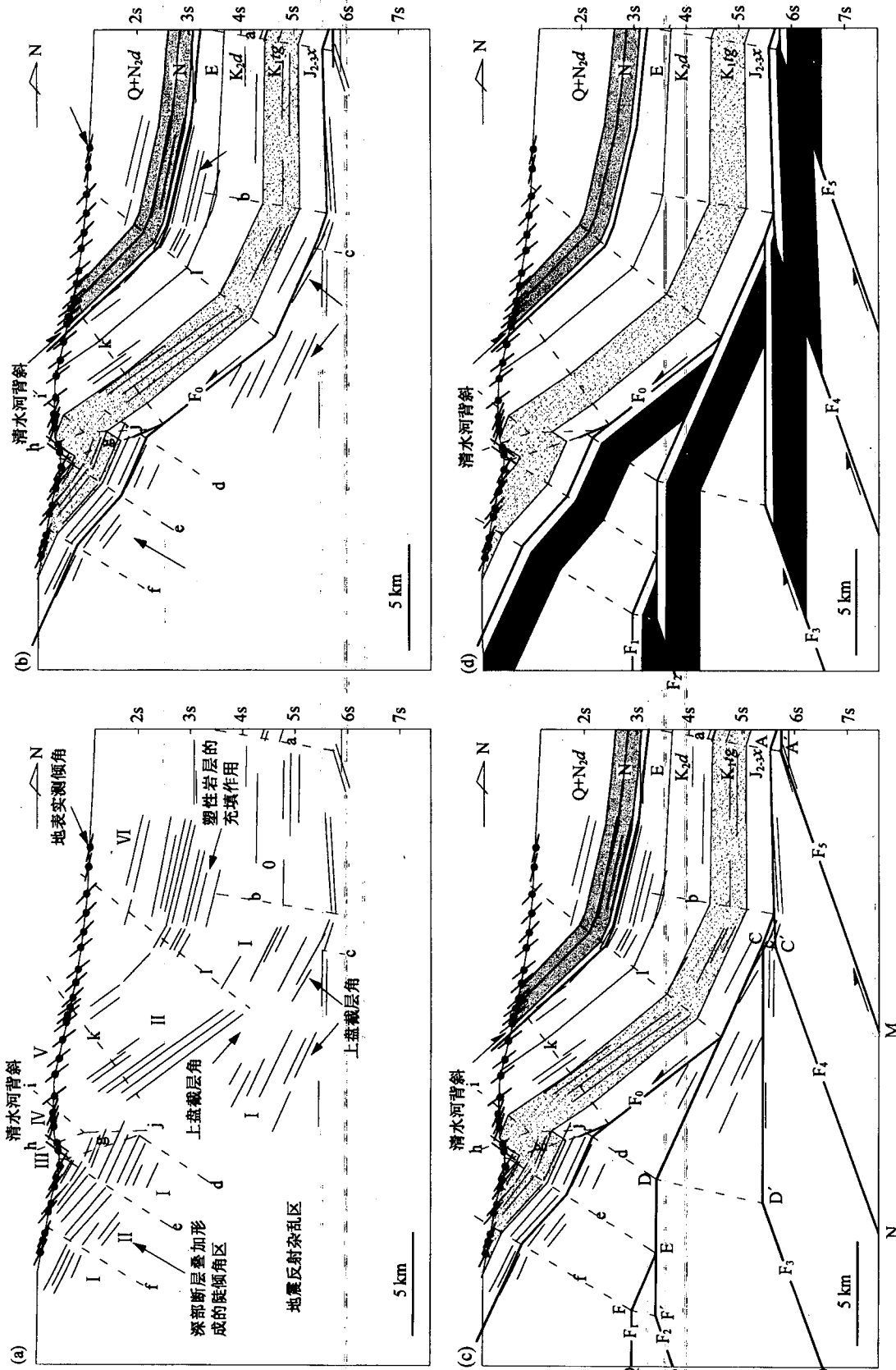


图 3 准噶尔盆地南缘第一排背斜带等倾角区划分、轴面分析及推测的构造解释剖面
Fig. 3 Dip domains, axial surfaces and interpreted structural profile of the seismic line in Fig. 2
Q—N_{2d}—第四系—上新统独山子组; N—新近系; E—古近系; K_{2d}—上白垩统东沟组; K_{1g}—下白垩统吐谷鲁群; J_{2-3x}—中上侏罗统西山窑组
Q—N_{2d}—Pliocene Dushanzi Formation—Pleistocene; N—Neogene; E—Paleogene; K_{2d}—Upper Cretaceous Donggou Formation;
K_{1g}—Lower Cretaceous Tugulu Group; J_{2-3x}—Middle Jurassic Xishanyao Formation

等倾角区 I 和 II 反映了深部台阶状断层叠加作用造成的构造形态,限定这两个等倾角区的轴面可能终止于深部的断层(见下文详述)。西山窑组(J_{2-3x})煤层以上的三个等倾角区 III、IV 和 V 分别为清水河背斜的南翼、核部和北翼,由轴面 g、h、i、j、k 和 l 限定,其中轴面 h 和 i 相交,由二者交点处作等倾角 III 和 V 的平分线可确定背斜核部轴面 j 的位置,此种轴面分布方式可用断层传播褶皱解释(Suppe et al., 1990)。

1.3 运用膝折法确定浅层构造形态

根据等倾角区划分和轴面分析结果运用膝折法(Kink Method, Tearpock et al., 1991)确定西山窑

组煤层(J_{2-3x})之上地层的构造形态,并做出西山窑组(J_{2-3x})煤层内部的滑脱断面 F_0 ,滑脱断面 F_0 是深部构造的包络面,断面形态与上覆地层形态是一致的(图 3b)。

1.4 通过倾角谱分析确定深层构造形态(图 3c)

西山窑组煤层(J_{2-3x})以下的等倾角区 I、II 分别为 $21\sim 24^\circ$ 和 $46\sim 50^\circ$,从倾角谱(Suppe, 1983)中查到下伏台阶状断层的倾角为 $19\sim 21^\circ$,按照以下步骤确定深层构造形态:

(1)轴面 a 与西山窑组(J_{2-3x})煤层内部的滑脱断面 F_0 相交于 A 和 A',由 A' 作南倾直线 A'M,倾角为 $19\sim 21^\circ$,线段 A'M 即为断层 F_5 。

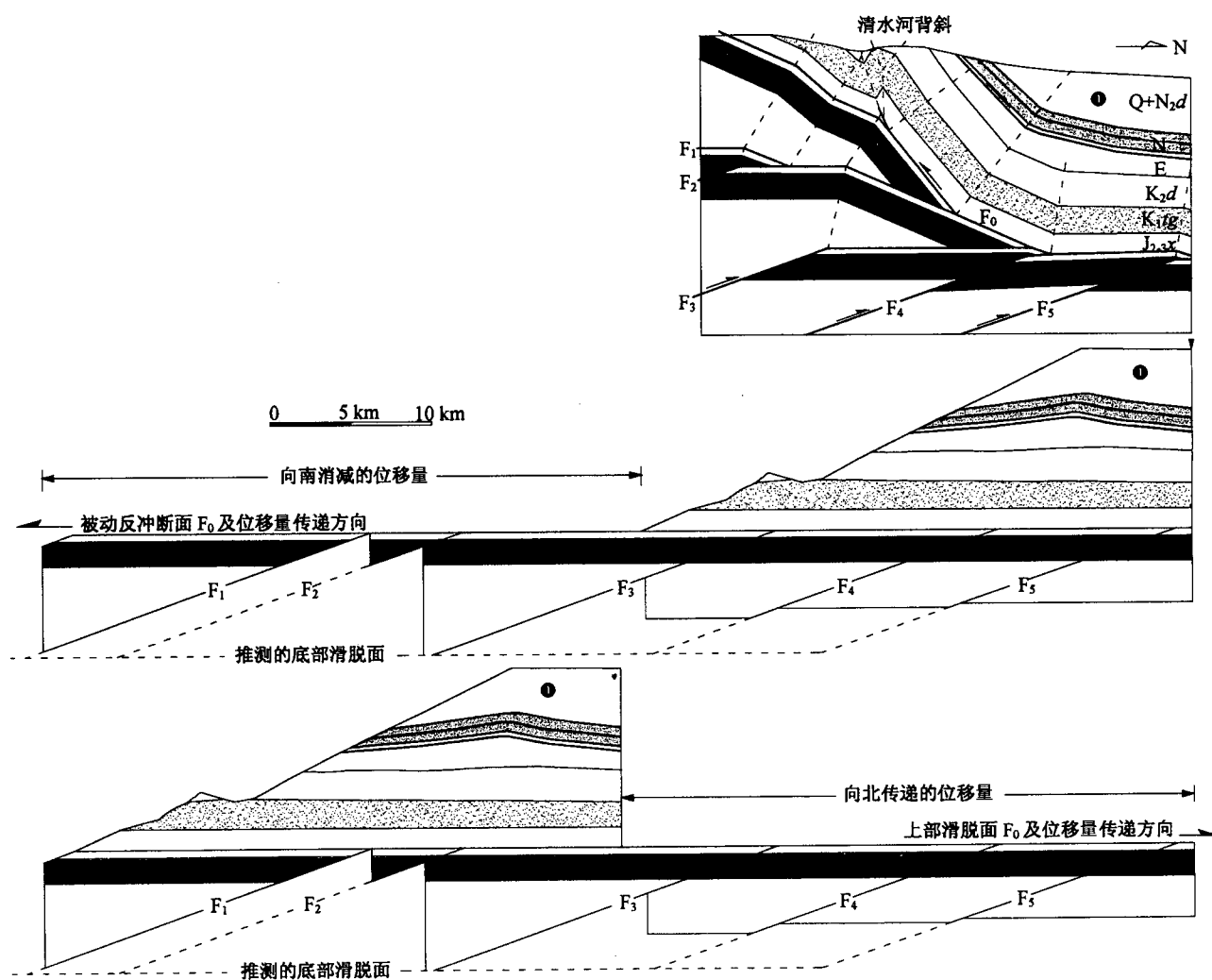


图 4 准噶尔盆地南缘第一排背斜带两种不同的复原方案

Fig. 4 The two different restored profiles of the first row anticlinal belt in the south of Junggar Basin
由于断层 F_1 没有下盘截层点,因此无法确定它复原后的位置,如果将断层 F_1 和断层 F_2 的上盘地层相接,可求出剖面的最小缩短量约为 41 km

The position of F_1 in restored section can't be determined due to absence of footwall cut offs. If joining the F_1 with the strata above the F_2 , the minimum shortening may be measured about 41 km

(2) 轴面 b 与滑脱断面 F_0 相交于 B, 延伸 AB, 与轴面 c 相交于 C', 由 C' 作南倾直线 C'N, 倾角为 $19\sim 21^\circ$, 线段 B-C'-N 即为断层 F_4 。

(3) 轴面 l 与滑脱断面 F_0 相交于 L, 延伸 BL, 与轴面 d 相交 D; 由 D 向南作水平直线, 与轴面 e 相交于 E, 由 E 作 $\angle BDE$ 的角度平分线; 由 C 向南作水平直线, 与 $\angle BDE$ 的平分线相交于 D', 再由点 D' 作南倾直线 D'O, 倾角为 $19\sim 21^\circ$, 线段 C-D'-O 即为断层 F_3 。

(4) 由 E 作倾角为 $21\sim 24^\circ$ (I 区的角度) 的北倾直线, 与轴面 f 相交于 F, 再由 F 向南作水平延伸线 FQ, 线段 E-F-Q 即为断层 F_1 。

(5) 延长 DE, 与 $\angle EFQ$ 的平分线相交于点 F', 再由点 F' 作南倾直线 F'P, 倾角为 $19\sim 21^\circ$, 线段 L-D-F'-P 即为断层 F_2 。

(6) 将地层充填入各个断块内, 即可确定出该剖面完整的构造解释方案 (图 3d)。

图 3d 中的断层形态并非单一平直, 而是表现为多个倾角区段的特殊形态, 这是由它们之间相互叠加造成的, 下文将恢复这些断层的原始形态。

2 变形机制和变形时间

对于按照上述几何学方法作出的构造剖面, 可

以精确地确定其复原方案 (图 4), 复原后的断层 F_1 、 F_2 ... F_5 呈台阶状, 彼此平行, 具有相同的上部滑脱面和底部滑脱面, 两个滑脱面之间为断坡, 断坡倾角大致相等。剖面的最小缩短量约为 41 km, 这个数值也等于断层 F_1 、 F_2 ... F_5 在底部滑脱面的位移量之和, 由于地层在褶皱过程中要吸收部分位移量 (Suppe, 1983), 上部滑脱面 (位于侏罗系西山窑组煤层内部的滑脱断面 F_0) 中的位移量要小于 41 km, 上部滑脱面和底部滑脱面中位移量的比值可利用以下公式 (Suppe, 1983) 求得:

$$R = \frac{\sin(\gamma - \theta)}{\sin \gamma}$$

式中 θ 为断坡倾角, γ 为轴角, 根据图 3 中的构造解释方案, 以断坡倾角 19° , 轴角 78° (图 3c 中 $\angle BDE$ 角度的一半) 计算, 可以求出 R 约为 0.88, 即褶皱作用吸收掉 12% 的位移量, 因此断层 F_1 、 F_2 ... F_5 在上部滑脱面中的位移量之和已递减为 36 km ($41 \text{ km} \times 0.88$), 那么这些位移量是否全部沿着上部滑脱面向北传递, 并在传递过程中造成准噶尔盆地南缘第二排和第三排背斜带的构造变形呢?

在图 4 中, 地质体 ① 处于滑脱断面 F_0 上的任何位置, 复原方案都是平衡的, 我们讨论以下两个端元方案:

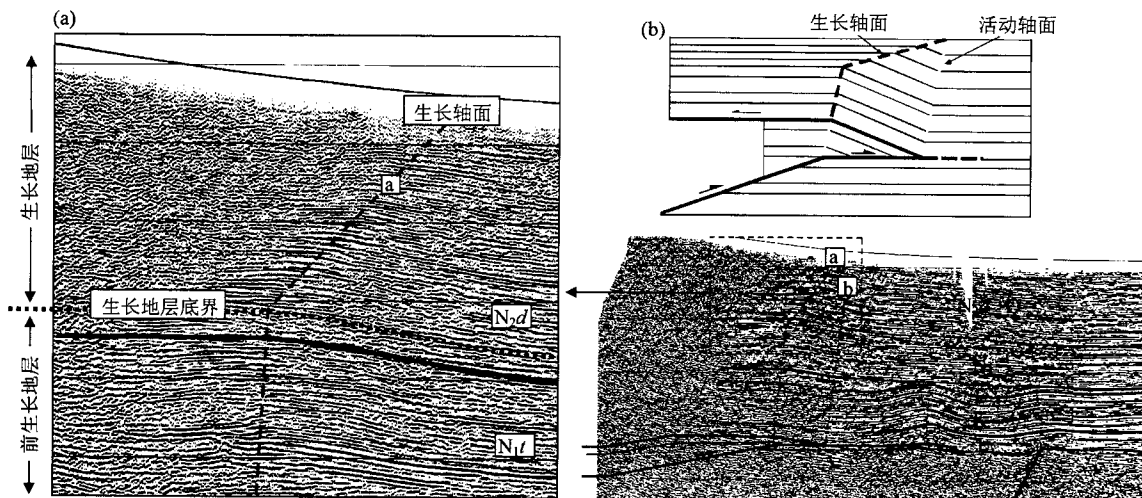


图 5 准噶尔盆地南缘西段深部楔状构造上覆生长地层结构(a)和生长楔状构造模型(b)(据 Shaw et al., 1996)

Fig. 5 The growth strata above the deep wedge in the South of the Junggar Basin(a) and the model of growth structural wedge(b)(after Shaw et al., 1996)

生长地层底界位于上新统独山子组 (N_2d) 上部, 说明深部构造的变形时间始于上新世早期; Q— N_2d —上新统一第四系; N—新近系; E—古近系; K—白垩系; J—侏罗系

The base of the growth strata is located on the base of Pliocene Dushanzi Formation, which suggests that the deformation of deep structure may have started since early Pliocene. Q— N_2d —Pliocene Dushanzi Formation—Pleistocene; N—Neogene Taxihe Formation; E—Paleogene;

K—Cretaceous; J—Jurassic

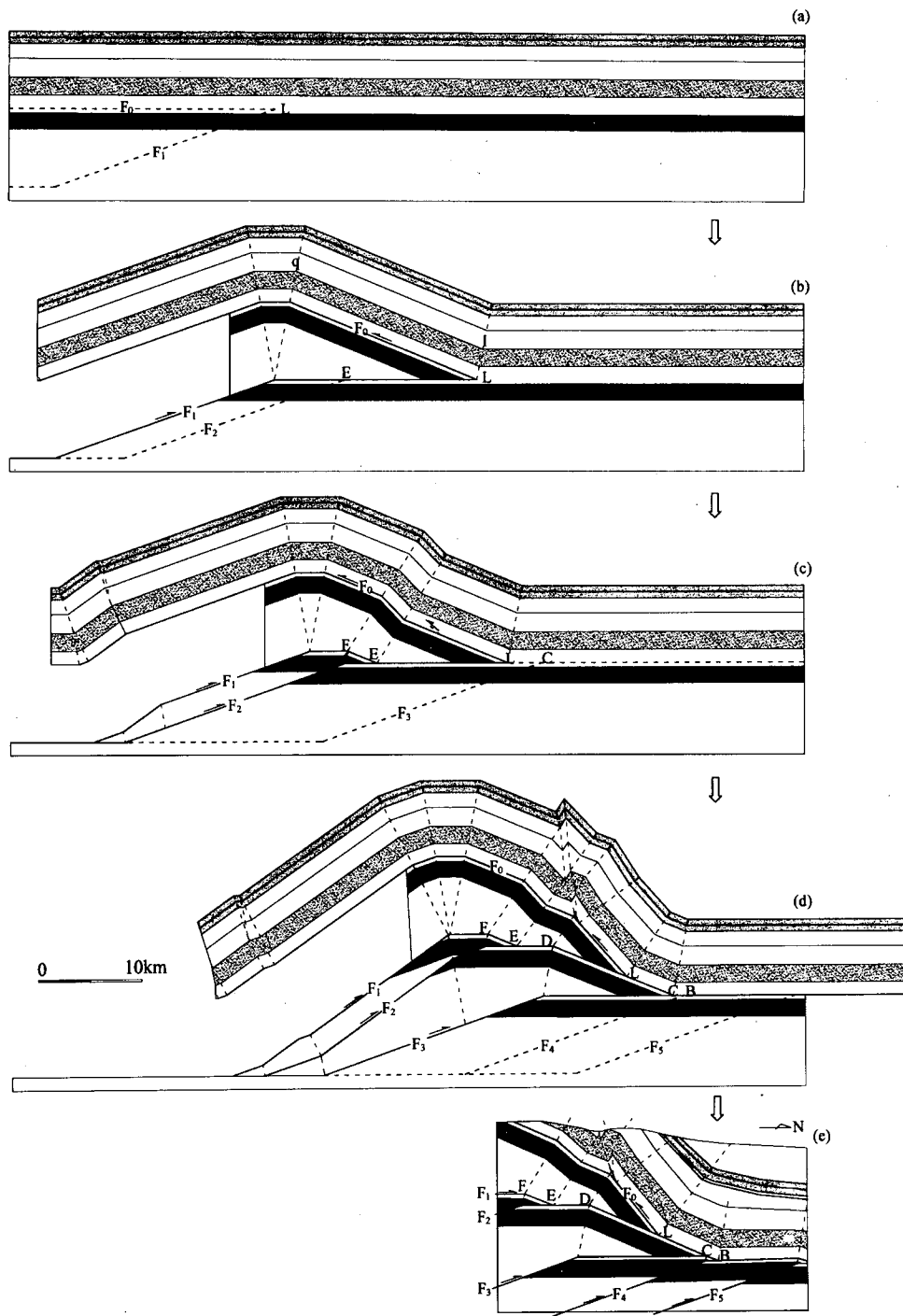


图 6 准噶尔盆地南缘第一排背斜带运动学模型

Fig. 6 Balanced sequential model of the development of the first row anticline in the south of Junggar Basin

如果地质体①位于滑脱断面 F_0 的最北端,即地质体①在构造变形过程中一直驻留在原地,那么深部构造变形将表现为典型的构造楔模式 (Medwedeff, 1992) (图6a、b、c),构造楔在向南扩展的过程中,滑脱断面 F_0 作为反冲断层向南消减了

F_1 、 F_2 ... F_5 的所有位移量,其中部分位移量切穿上覆地层形成清水河背斜(属第一排背斜带)。

如果地质体①位于滑脱断面 F_0 的最南端,即地质体①是在构造变形过程中逐渐向北运动至现今位置,那么深部构造变形将表现为典型的断层转折褶

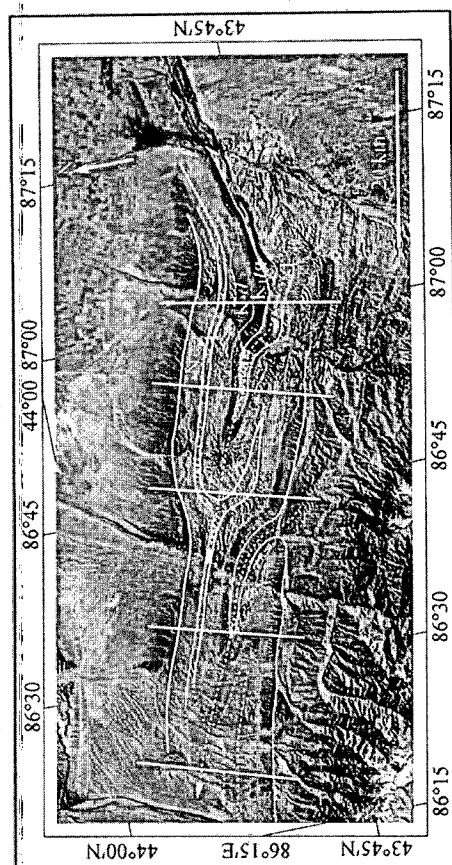
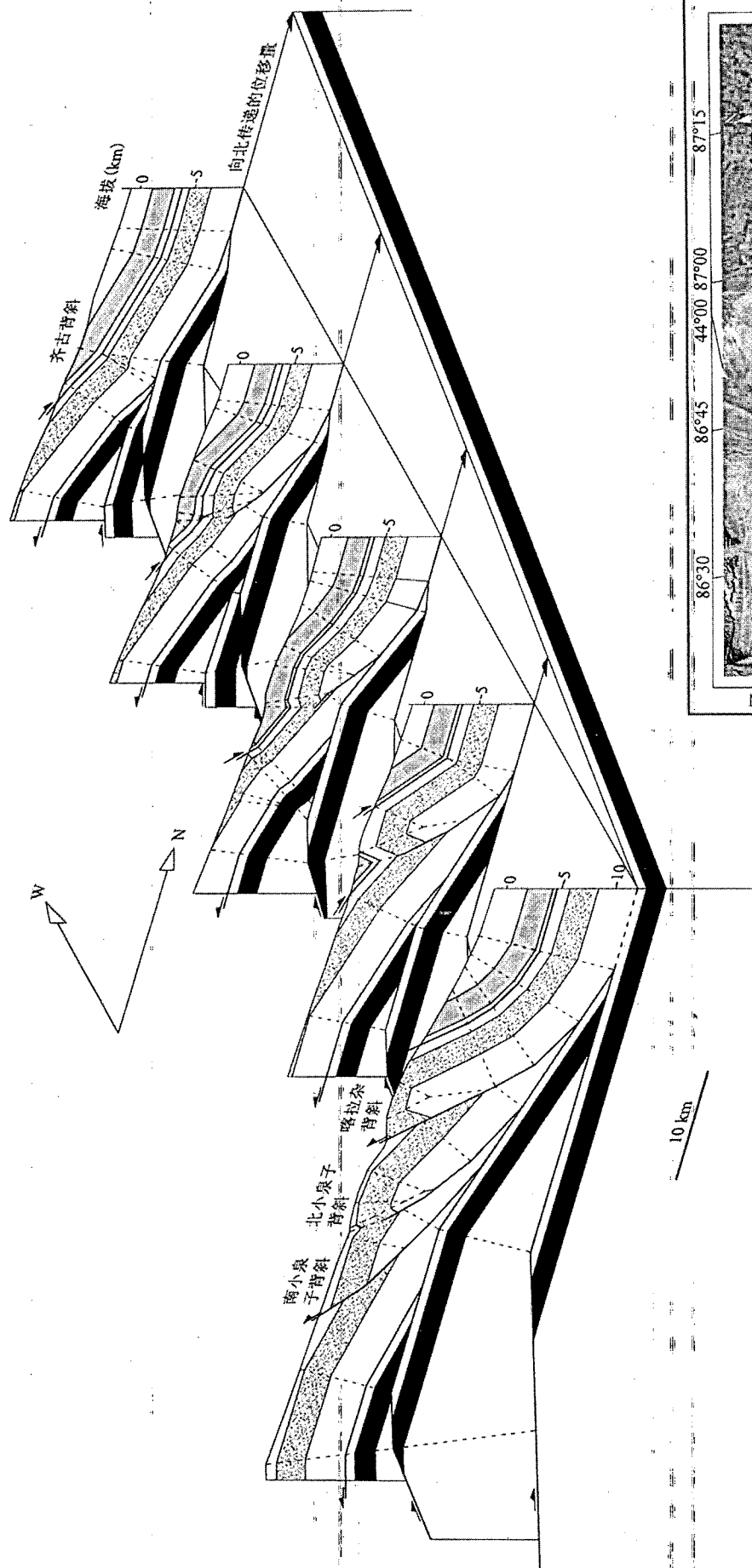


图 7 准噶尔盆地南缘喀拉杂—昌吉—齐古背斜三维构造(剖面位置见右下遥感图像)

Fig. 7 Model of the 3D structure of the Kalazha—Changji—Qigu anticlines in the south of Junggar Basin (available seismic lines are located in the remote sensing imagery)

- ①—喀拉杂—昌吉背斜; ②—齐古背斜; Q—N₂d—上新统—第四系; N—新近系; E—古近系; K₂d—上白垩统东沟组; K₁lg—下白垩统吐谷鲁群; J—侏罗系
- ①—Kalazha—Changji anticline; ②—Qigu anticline; Q—N₂d—Pliocene Dushanzi Formation—Quaternary; N—Neogene; E—Paleogene; K₂d—Upper Cretaceous Donggou Formation; K₁lg—Lower Cretaceous Tugulu Group; J—Jurassic Xishanyao Formation

皱模式(Suppe, 1983), 台阶状断层 $F_1, F_2 \dots F_5$ 的位移量沿着滑脱断面 F_0 向北传递, 并在传递过程中造成后续的构造变形, 形成玛纳斯背斜(属第二排背斜带)。

因此, 位移量在滑脱断面 F_0 中的传递方向揭示了两种不同的运动学模式, 而这两种运动学模式在准噶尔盆地南缘都是存在的。准噶尔盆地南缘深部的楔状构造也可以从上覆生长地层的结构得到验证, 生长地层在构造活动期间沉积于背斜顶部和侧翼, 记录了构造运动与地层沉积过程的相互影响, 其底界指示构造变形时间的下限, 通过识别生长地层可以判断构造的变形时间和变形机制(Suppe et al., 1992)。第一排背斜带西段高泉背斜北翼生长地层底界位于中新统塔西河组(N_1t)上部, 生长轴面 a 南倾(图5a), 生长地层厚度在构造楔顶的活动轴面 b 两侧保持不变, 而在越过生长轴面 a 进入背斜顶部后变薄, 这一特征与生长楔状构造模型(Shaw et al., 1996)是一致的(图5b), 由于生长地层底界位于上新统独山子组(N_2d)下部, 说明第一排背斜带的构造变形可能始于上新世早期。

3 变形过程和变形量

根据上述讨论结果, 我们对剖面的变形过程作出定量模拟(图6)。

(1) 图6a~b: 断层 F_0, F_1 的初始迹线相交于 L, 构成一楔状体, 断层 F_1 开始活动后, L 持续向北楔入, 轴面 q—l 之间的距离代表了断层 F_1 在上部滑脱面的位移量, 约为 19 km (由于图3中剖面的最南端没有暴露出断层 F_1 上覆褶皱平顶的位置, 因此 19 km 为断层 F_1 的最小位移量), 但这部分位移量并没有继续向北传递, 而是在 L 点沿着构造楔顶部的反冲断层 F_0 向南消减(图6b)。

(2) 图6c: 当断层 F_2 叠加在断层 F_1 的下盘, 断层 F_1 上覆褶皱前翼产生轴面 e—f 限定的陡倾角区(即图3a 中的等倾角区 II), 断层 F_2 在上部滑脱面的位移量等于轴面 e—f 之间的宽度, 约为 3 km, 这部分位移量同样在 L 点沿着构造楔顶部的反冲断层 F_0 向南消减。

(3) 图6d: 当断层 F_3 叠加在断层 F_2 的下盘, 轴面的数量显著增多, 反冲断层 F_0 的形态也变得非常复杂。断层 F_3 在上部滑脱面的位移量等于轴面 c—d' 之间的宽度, 约为 12 km, 由于反冲断层 F_0 的形态变得非常复杂, 这部分位移量并不能够顺畅地向南消减, 一部分位移量可能由 K 点向上切割上覆地

层, 形成清水河背斜, 另一部分位移量则沿着断面 C—A 向北传递。

(4) 图6e: 当断层 F_4 和 F_4 继续叠加时, 就形成了现今的构造形态, 断层 F_4 和 F_4 的位移量分别为 1.2 km 和 1.5 km, 这些位移量将同样沿着断面 C—A 向北传递至第二排背斜带。

4 结论

综上所述, 准噶尔盆地南缘的第一排和第二排背斜带都来源于深部台阶状逆断层位移量向南和向北的传递作用, 在总位移量保持稳定的情况下, 第一排和第二排背斜带在走向上的此消彼长反映了位移量在南、北两个方向上的转换, 如第一排背斜带东段抬升最高, 深部台阶状逆断层的位移量全部为构造楔顶部的反冲断层及喀拉杂—昌吉背斜所消减和吸收, 由于没有位移量向北传递, 因此喀拉杂—昌吉背斜以北缺失了第二排背斜带②, 而向西随着喀拉杂—昌吉—齐古背斜逐渐倾伏, 深部台阶状逆断层的位移量开始有一部分向北传递, 第二排背斜带在其北侧开始出现并抬升(图7)。

以上从变形机制、变形过程、变形量和变形时间四个方面对准噶尔盆地南缘第一排背斜带作了系统的构造解析, 这四个方面也构成了一个完整的构造模型。在复杂构造地震解释中, 通过投影真实的地震反射同相轴, 确定等倾角区, 可以剔除地震反射图像上的构造假象, 从而直观地反映出构造的变形特征, 有利于解释者对构造变形作出合理的判断和解释。在前陆冲断带油气勘探初期, 由于资料有限, 构造建模可以作为一种合理认识构造和解释构造的有效方法, 随着勘探程度的提高, 构造模型在不断得到修正和完善后, 可用以指导地震采集方案、处理流程的设计和构造解释成图, 从这个意义上说, 构造建模贯穿于前陆冲断带地震勘探的各个环节。

参 考 文 献

- 管树巍, 陈宁华, 徐峰, 雷刚林. 2003a. 库车地区秋里塔格褶皱带几何学和运动学特征与油气圈闭. 石油学报, 24(6): 30~34.
- 管树巍, 汪新, 杨树锋, 赵卫东, 徐峰, 雷刚林. 2003b. 南天山库车秋里塔格褶皱带三维构造分析. 地质论评, 49(5): 464~473.
- 何登发, 杨庚, 管树巍, 石昕, 张朝军, 王桂宏, 王晓波. 2005. 前陆盆地构造建模的原理与基本方法. 石油勘探与开发, 32(3): 7~14.
- Medwedeff D A. 1992. Geometry and kinematics of an active, laterally propagating wedge thrust, Wheeler Ridge, California. Structural Geology of Fold and Thrust Belts. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 3~28.

- Medwedeff D A, Suppe J. 1997. Multibend fault-bend folding. *Journal of Structural Geology*, 19(3~4): 279~292.
- Poblet J, McClay K R. 1996. Geometry and kinematics of single-layer detachment folds. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 80:1085~1109.
- Shaw J H, Hook S C, Suppe J. 1994. Structural trend analysis by axial surface mapping. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 78(5): 700~721.
- Shaw J H, Suppe J. 1996. Earthquake hazards of active blind-thrust faults under the central Los Angeles basin, California. *Journal of Geophysical Research*, 101:8623~8642.
- Shaw J H, Bilotte F, Brennan P A. 1999. Patterns of imbricate thrusting. *Geological Society of America Bulletin*, 111(7): 1140~1154.
- Shaw J H, Connors C, Suppe J. 2004. Seismic interpretation of contractional fault-related folds; an AAPG seismic atlas. *American Association of Petroleum Geologists Special Publication*, 1~270.
- Suppe J. 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 283: 684~721.
- Suppe J, Medwedeff D. 1990. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 83(3): 409~454.
- Suppe J, Chou G T, Hook S C. 1992. Rates of folding and faulting determined from growth strata. In: McClay K R, ed. *Thrust Tectonics*. New York: Chapman Hall, 105~121.
- Suppe J, Sàbat F, Munoz J A, Poblet J, Roca E, Verges J. 1997. Bed-by-bed fold growth by kink-band migration: Sant Llorenç de Morunys, eastern Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, 19: 443~461.
- Tearpock D, Bischke R E. 1991. Applied subsurface geological mapping. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 648.
- Woodward N B, Boyer S E, Suppe J. 1985. An outline of balanced cross-sections, 2nd ed., Knoxville: University of Tennessee, Department of Geological Sciences, Studies in Geology 11, 170.

Complex Structural Analysis and Modeling: the First Row of Anticlinal Belt on the Southern Margin of the Junggar Basin

GUAN Shuwei¹⁾, ZHANG Chaojun¹⁾, HE Dengfa¹⁾, SHI Xin¹⁾, JOHN Suppe²⁾,
WANG Xin³⁾, WU Xiaozhi^{1,4)}

1) *Research Institute of Exploration and Development, CNPC, Beijing, 100083, China*

2) *Department of Geosciences, Princeton University, Princeton, NJ, USA, 08544, USA*

3) *Department of Geosciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China*

4) *Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Kelamayi, Xinjiang, 830011, China*

Abstract

The aim of complex structural analysis on foreland thrust belts, which is based on a rational interpreted seismic profile, is to determine the mechanisms, process, rate and timing of deformation. Several geometric techniques, such as separating dip domains and analyzing axial surfaces, are used in seismic interpretation and structural analysis of the first row of anticlinal belt in the southern Junggar Foreland Basin. The patterns of growth strata indicate that the first row of anticlinal belt was developed above the passive back thrust on the top of the deep structural wedge, which is imbricated by five Paleozoic—Mesozoic fault-bend folds, and the upper two anticlines may be potential targets in exploration. The most displacement on the deep flat-ramp-flat thrusts transfer southward along the back thrust, located in the coal layers of middle Jurassic, and only a few displacement transfer northward to the second row of anticlinal belt. So, the elevating or plunging between these two anticlinal belts indicates the displacement transfer on the direction of the south and north.

Key words: foreland thrust belt; structural analysis; fault-related folds; structural wedge; dip domains; axial surface