

位移转换的两种概念模型与实例*

管树巍 汪 新 杨树锋 何登发 赵卫东

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 浙江大学地球科学系, 杭州 310027;
塔里木油田分公司, 库尔勒 841000)

摘要 运用断层转折褶皱理论建立位移转换的两种概念模型, 即反向对称模型和无穷等分模型. 构造几何学和运动学分析表明, 这两类位移转换都造成上覆褶皱向断层位移方向偏移, 偏移角度的正切值等于位移转换梯度. 利用位移转换机制可以合理地解释多层次滑脱构造地区地表(浅层次)褶皱的扭曲及分叉现象, 例如在秋里塔格褶皱带中段, 深部断层之间的位移转换造成库车塔吾深层背斜和南秋里塔格深层背斜在走向上呈左列叠置, 二者在交汇处叠加形成长约 18 km 的双重构造带, 地表(浅层次)背斜在这个区域向南迁移形成显著的“S”型扭曲.

关键词 位移转换 断层转折褶皱 反向对称模型 无穷等分模型 秋里塔格褶皱带

“位移转换”的概念始于Dahlstrom^[1]对加拿大落基山地区逆冲断层的描述, 当两条近于平行的断层发生交汇重叠时, 断层位移量沿侧向发生变化, 一条断层的位移量逐渐减少, 而另一条断层的位移量逐渐增大, 两条断层在交汇处发生位移量的传递. 位移转换是线形构造带常见的一种变形量侧向传递方式, 既可以出现在挤压环境^[2]也可以出现在拉张环境^[3], 在挤压环境中, 位移转换通常表现为两(多)条断层叠加形成双重构造, 并向两侧逐渐过渡为单条断层及其相关褶皱^[4,5].

位移转换的成因一般被认为是由于单条断层延伸长度的限制, 而在其侧向发育新的断层以保持位移量的连续^[1,6], 这类位移转换在阿巴拉契亚的

Pulaski-Saltvill和Rome-Coosa断层带及爱达荷犹他-俄明的Crawford-Darby断层带^[7,8]是非常普遍的, 然而作者在对南天山冲断褶皱带的研究中发现, 台阶状逆断层所能达到的最大位移量受其几何形态制约, 位移转换在成因上还可能与断层形态在走向上的变化有关, 当断层形态(如断坡高度)沿走向发生变化, 导致断层的位移量逐渐减少时, 其下盘将产生新的断层以维持位移量的稳定^[9], 这类位移转换在多层次滑脱构造^[10]地区通常造成地表(浅层次)褶皱出现扭曲、分叉等特征^[11]. 本文运用断层转折褶皱理论^[12]建立上述两类位移转换的几何学和运动学模型, 并以南天山秋里塔格褶皱带为例论述深部隐伏断层之间的位移转换作用, 解释秋里塔格地表背斜在走向上

2003-11-05 收稿, 2004-05-14 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49972077)

** E-mail: swguan@sohu.com

的扭曲和分叉现象。

1 位移转换的两种概念模型

1.1 反向对称模型

图 1 展示了两条平行的台阶状逆断层 F_1 和 F_2 的位移转换过程,断层 F_1 的位移量线性递减,断层 F_2 位移量则以相同的梯度递增,二者的总位移量保持不变,以下根据膝折带迁移原理^[12]描述位移转换过程中位移量及上覆褶皱形态的变化。

(1) 如图 1(a)和(b)所示,断层 F_2 从剖面a开始叠加在断层 F_1 下盘,随着断层 F_2 位移量的增加,背斜 2 逐渐抬升,轴面 H-F 和 E-G 限定的膝折带不断加宽,其中后翼膝折带 E-G 的宽度等于断层 F_2 的位移量^[12];在剖面 b,背斜 2 后翼膝折带 E-G 与背斜 1 前翼膝折带 C-D 叠加并形成水平区段 E'-G',随着膝折带 E-G 的不断生长,水平区段 E'-G' 相应加宽, Mitra^[13]将这种叠加形态称为倾向前陆的双重构造(foreland sloping duplexes)。

(2) 如图 1(c)~(e)所示,在剖面 c,水平区段 E'-G' 与背斜 2 平顶 F-G 重合,轴面 G' 与 D 会聚并消失,与此同时,轴面 G 开始分裂出轴面 I,背斜 2 的后翼在构造地貌上开始出现;在剖面 d,背斜 1 和背斜 2 已表现为两个完整、等高的背斜,此时断层 F_1 和 F_2 的位移量相等;随着断层 F_1 位移量的递减,背斜 1 前翼膝折带 E'-C 逐渐变窄;至剖面 e,轴面 E' 和 C 会聚,膝折带 E'-C 消失,背斜 2 后翼轴面 E 开始分裂出轴面 J。对比剖面 e 和剖面 c 可以发现,二者的构造地貌形态及位移量分布均是反向对称的。

(3) 如图 1(f)和(g)所示,在剖面 f,轴面 G 迁移到断层 F_2 的上转折点,背斜 2 抬升到最大高度,此时断层 F_2 位移量已远大于断层 F_1 位移量,背斜 1 失去完整的背斜形态, Mitra^[13]将这种叠加形态称为倾向后陆的双重构造(hinterland sloping duplexes)。对比剖面 f 和剖面 b 同样可以发现,二者的构造地貌形态及位移量分布也是反向对称的;至剖面 g,背斜 1 后翼轴面 A 和 B 会聚,断层 F_1 位移量递减至零,至此,断层 F_1 和 F_2 之间的位移转换过程完成。

需要说明的是,位移转换过程中上覆褶皱的(叠加)形态与断层 F_1 和 F_2 的初始距离有关。如果断层 F_2 的

初始轴面 E 位于背斜 1 前翼固定轴面 D 的外侧,那么背斜 1 和背斜 2 在位移转换过程中没有叠加;如果断层 F_2 的初始轴面 F 位于背斜 1 前翼固定轴面 D 的内侧,那么背斜 1 和背斜 2 在转换过程中将出现更为复杂的叠加形态(图 2), Mitra^[13]称之为完全叠加(complete overlapping), Boyer 等^[14]则称之为堆垛背斜(anticlinal stack)。图 1~2 表明,无论背斜之间属于哪一种叠加方式,位移转换过程中的位移量分布及上覆褶皱(叠加)形态都呈反向对称。

1.2 无穷等分模型

在反向对称模型中,台阶状断层 F_1 和断层 F_2 的形态(断坡高度和断坡倾角)在位移转换过程中保持不变,我们现在讨论当断层的形态沿走向发生变化时的情况。对于相同的地层结构(如图 1, 2),以库伦-摩尔破裂方式扩展的台阶状逆断层的断坡倾角应该是一致的^[15],因此我们仅分析当断坡高度沿走向发生变化时的位移转换过程。

图 3 中断层 F_1 的断坡高度由剖面 a 至剖面 e 逐渐递减至一半,由于断坡倾角不变,断层 F_1 的断坡长度也相应由剖面 a 至剖面 e 递减一半。根据断层转折褶皱理论^[12],当台阶状逆断层的位移量等于其断坡长度时,上覆褶皱将抬升到最大高度,因此,在剖面 b ~ e 中,断层 F_1 只需要越来越小的位移量就能达到上覆褶皱(背斜 1)的最大抬升高度,剩余的位移量则向下盘新产生的断层 F_2 传递。随着断层 F_2 位移量的增加,背斜 2 逐渐抬升,至剖面 e,断层 F_1 与 F_2 的位移量相等,背斜 2 也抬升至最大高度。如果断坡高度继续递减,断层 F_1 和 F_2 同样只需要越来越小的位移量就能使上覆背斜抬升到最大高度,剩余的位移量将传递给新的断层 F_3 ,直到三者的位移量相等,如此反复下去,剖面 a 的位移量将无穷尽地等分给后续产生的每一条断层。

台阶状逆断层断坡高度的递减主要由上、下滑脱面之间地层沉积厚度减薄造成^[9],这种现象在自然界是普遍存在的。然而,为什么上覆背斜在抬升到最大高度后,剩余的位移量是通过断层的叠加作用(位移转换作用)而不是通过增加上覆背斜平顶的宽度来吸收呢?我们将在后文讨论这个问题。

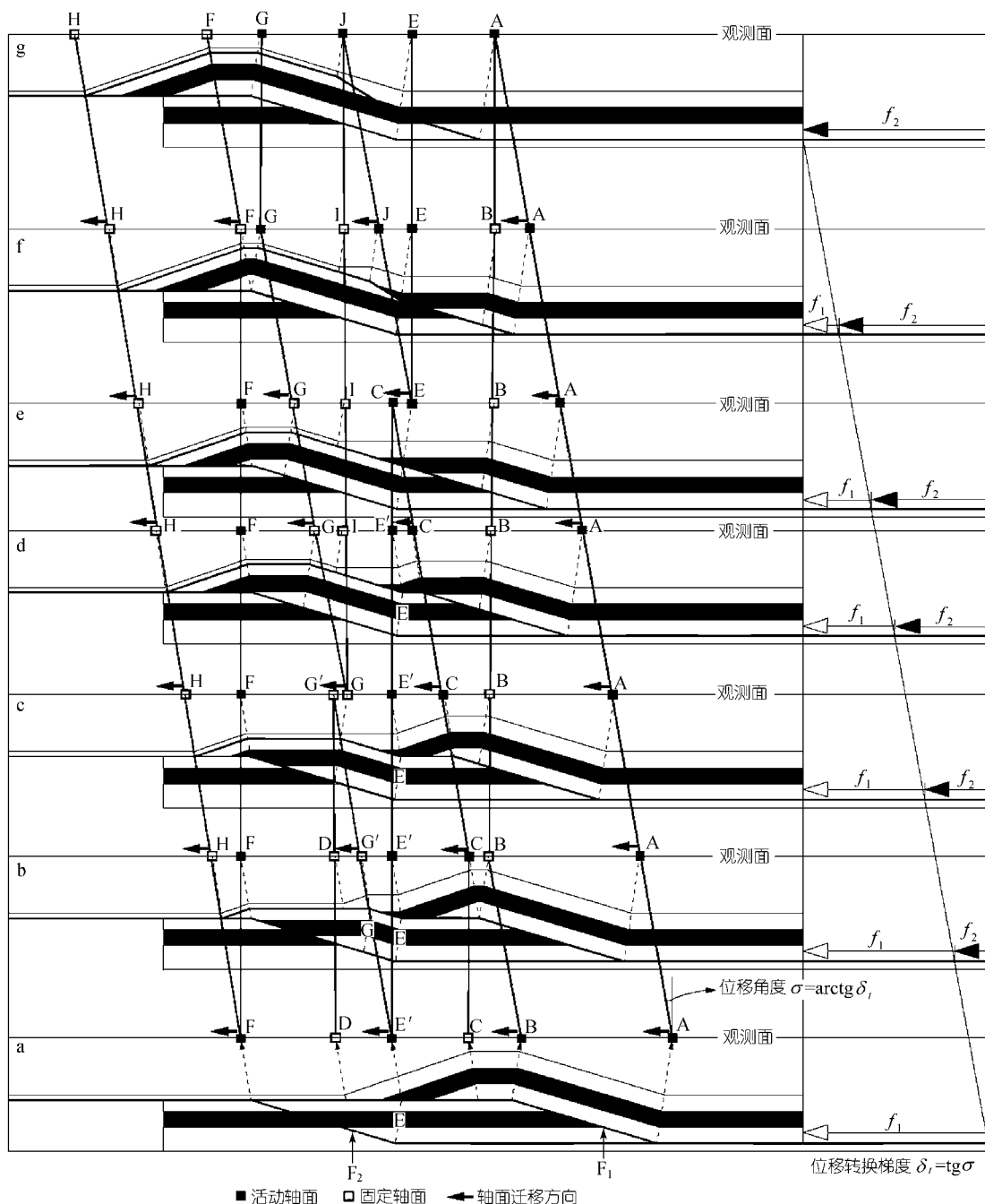


图1 两条台阶状逆断层位移转换的运动学过程——反向对称模型(部分叠加)

图1~3中剖面之间的连线是运用平行投影法(PPM)^[16]分布作出的轴面平面。在图1和图2中,由于断层的几何形态(断坡高度和断坡倾角)在位移转换过程中保持不变,位移转换所造成的轴面平面分布与上覆褶皱叠加形态是反向对称的

2 位移转换梯度

图1~3剖面之间的连线是运用平行投影法^[16]作出的轴面平面分布。轴面在平面上(即图1~3中的观测

面)的转折、会聚及分叉提供了位移转换过程中位移量与上覆褶皱形态变化的直接信息,根据轴面的平面分布可以精确建立位移转换的三维构造模型(图4,

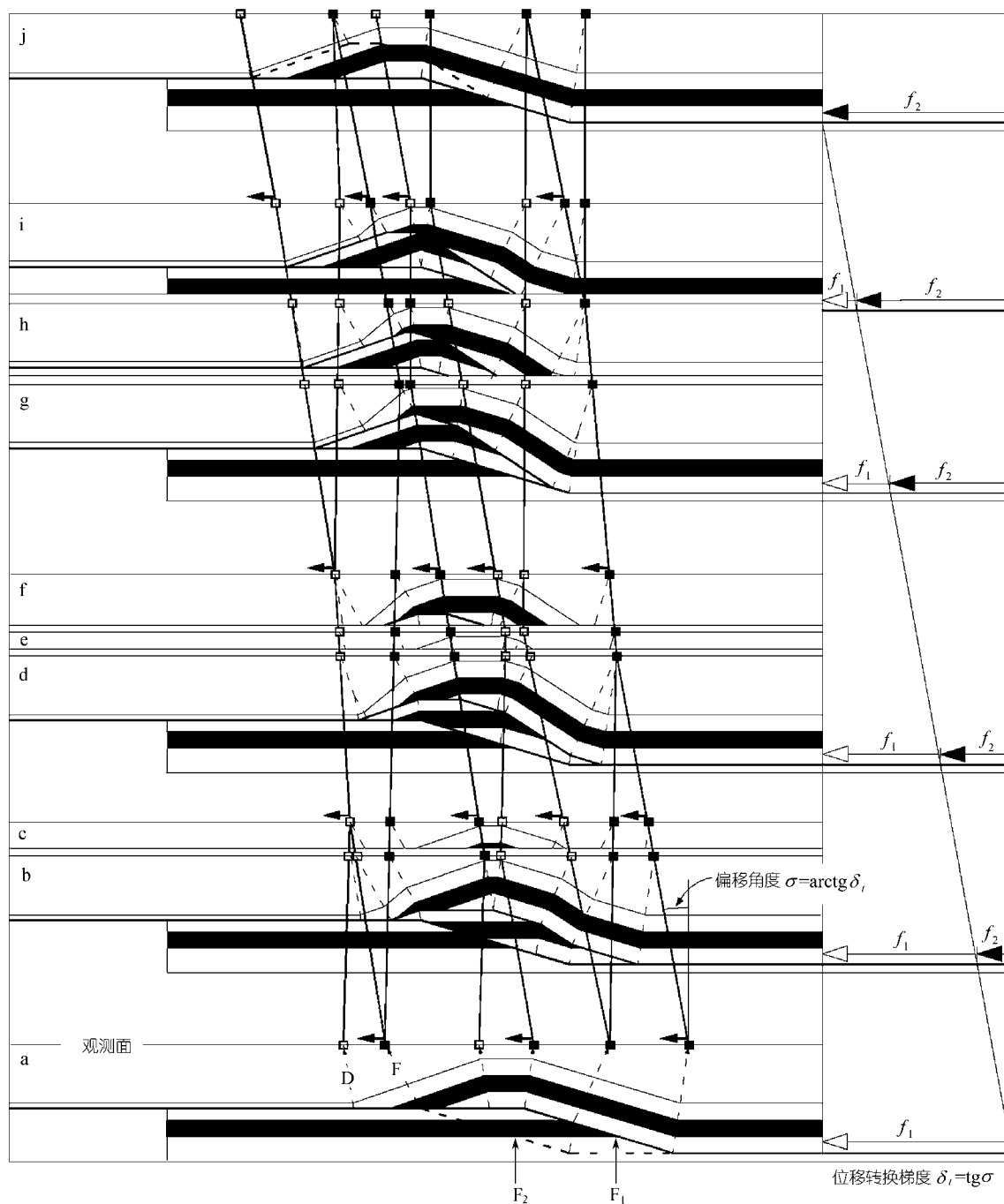


图2 两条台阶状逆断层位移转换的运动学过程——反向对称模型(完全叠加)

仅以反向对称模型为例). 轴面平面分布和三维构造模型反映出的一个重要现象是, 背斜 1 的后翼活动轴面 A 明显向断层位移方向偏移, 这是由位移转换过程中断层 F_2 的位移量逐渐增大并拖载断层 F_1 和背斜 1

向前运动造成的^[4,5]. Shaw 等^[5]依据这种现象去判别断层的“前列式”叠加作用.

如果将断层 F_1 位移量的递减速率(或者是断层 F_2 位移量的递增速率)定义为转换梯度 δ_t , 可以推导出

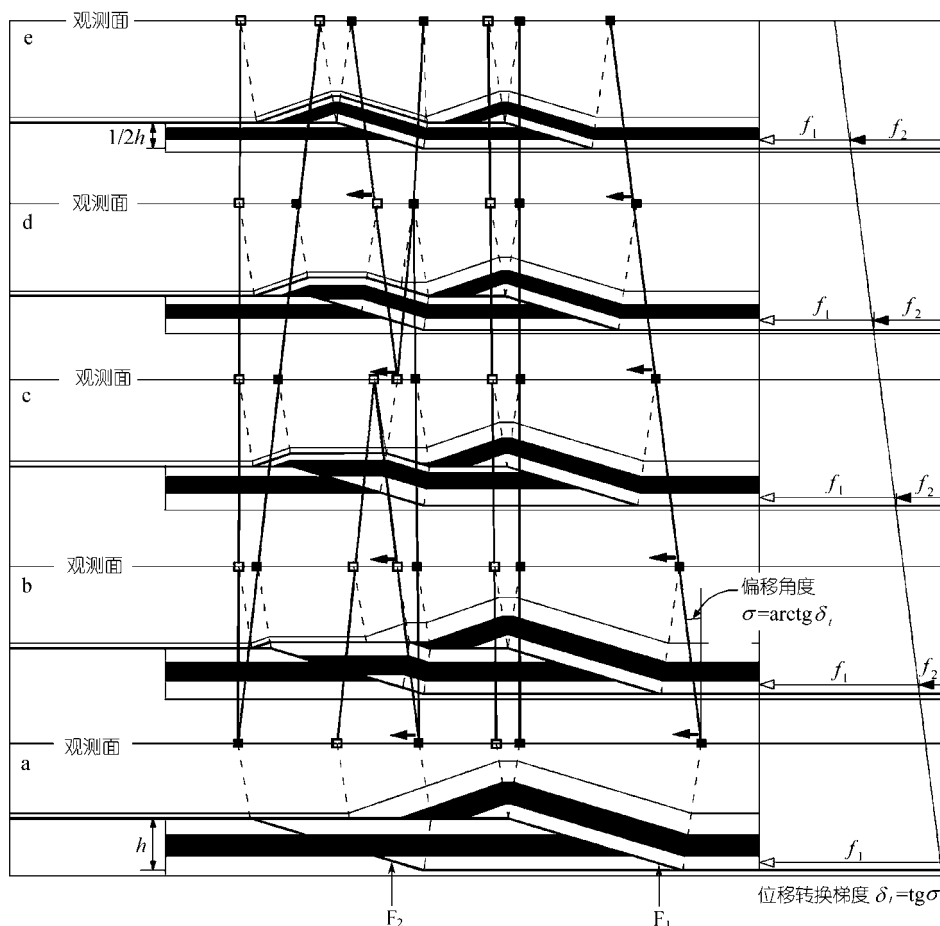


图3 两条台阶状逆断层位移转换的运动学过程——无穷等分模型

与图1和2不同的是, 台阶状逆断层的断坡高度由剖面a(断坡高度为 h)向剖面e(断坡高度为 $1/2h$)逐渐递减, 断层 F_1 只需要越来越小的位移量就能达到上覆褶皱的最大抬升高度, 剩余的位移量则逐渐向断层 F_2 传递, 构造变形相应由单阶断层转折褶皱向双重构造转化, 至剖面e, 断层 F_2 的位移量已经增大到与断层 F_1 相等。若断坡高度继续递减, 剖面a的位移量将无穷尽地等分给后续产生的每一条断层

偏移角度 σ 与转换梯度 δ_t 之间的函数关系。由于背斜1后翼轴面A的偏移量等于断层 F_2 的位移量, 而这个值又与断层 F_1 递减的位移量是相等的, 因此, 断层 F_1 位移量的递减速率可以用轴面A偏移角度的正切表示, 即转换梯度 δ_t 和偏移角度 σ 存在下述关系:

$$\delta_t = \operatorname{tg} \sigma. \quad (1)$$

显然, 断层位移量的递减(或递增)速率越大, 位移转换过程中上覆褶皱的偏移角度也就越大。

背斜形态向断层位移方向偏移是地表识别位移转换作用的重要标志, 南天山喀什冲断褶皱带阿图什-塔浪河背斜之间的并列扭曲现象可能就属于典型

的位移转换成因(图5)。此外, 公式 提供了一个判别位移转换作用的有效方法, 即可以通过测量地表背斜的偏移角度去计算下伏断层的位移转换梯度, 如果计算出的数值与实测的位移量变化速率接近, 我们就能证实深部隐伏断层之间可能存在位移转换作用, 下面以南天山库车冲断褶皱带秋里塔格背斜中段为例加以详细阐述(图6)。

3 研究实例

秋里塔格褶皱带是南天山库车冲断褶皱体系的前缘隆起^[17-21], 研究区位于其中段, 区内的地表构造

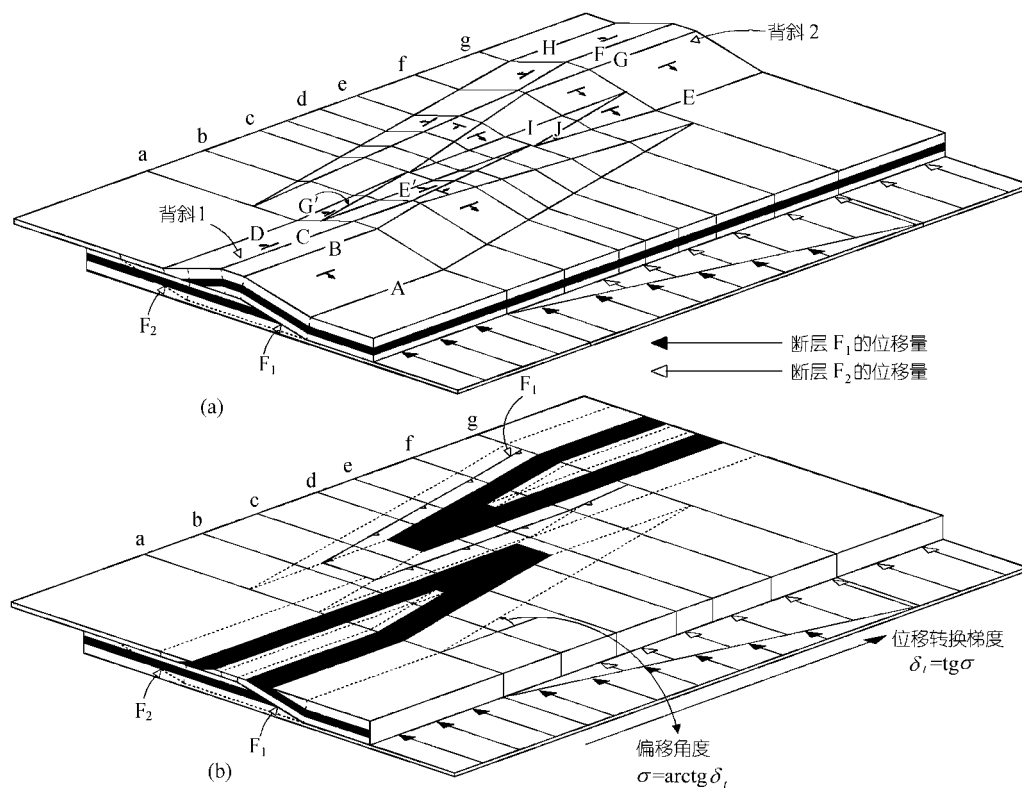


图 4 位移转换的三维构造模型

(a) 位移转换带构造地貌模型; (b) 位移转换带剥蚀平面图. 位移转换带在构造地貌及剥蚀平面上均呈反向对称, 且断层 F_1 及其上覆背斜向断层位移动方向偏移, 偏移角度 $\sigma = \arctg \delta_i$. 模型中剖面的编号 a ~ g 与图 1 中的编号对应

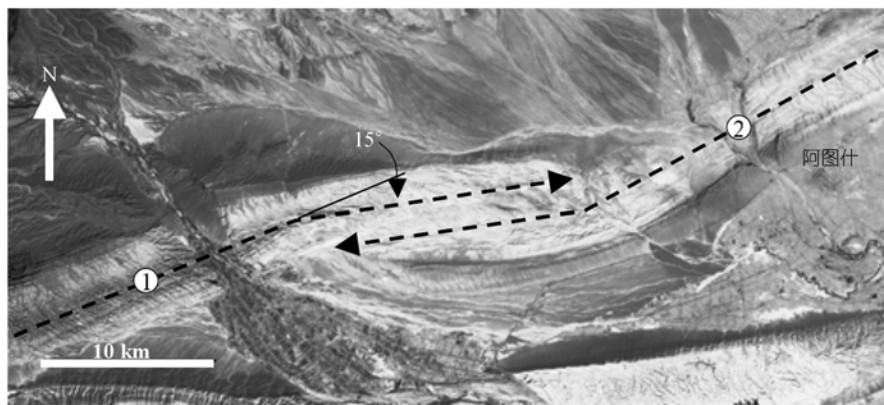


图 5 南天山冲断褶皱带西段阿图什背斜与塔浪河背斜卫星遥感图片

阿图什背斜; 塔浪河背斜. 阿图什背斜与塔浪河背斜呈右列叠置, 二者重叠距离约为 20 km, 阿图什背斜在向东倾伏过程中向南偏移约 15° , 根据公式(1)计算出下伏断层的位移转换梯度约为 0.27

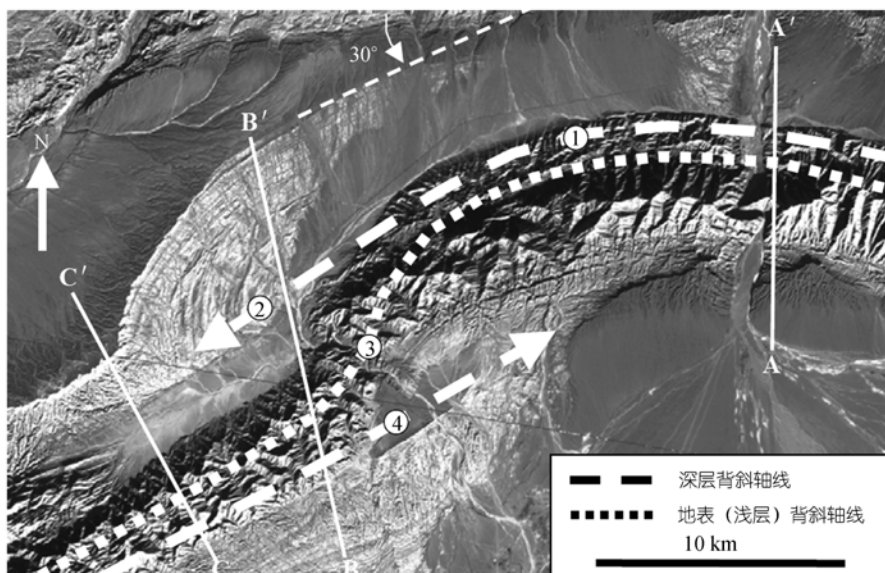


图6 南天山库车秋里塔格褶皱带中段卫星遥感图片(图7中的地震测线被标出)

库车塔吾背斜; 托克拉克坦背斜; 秋里塔格地表背斜; 南秋里塔格深层背斜. 托克拉克坦背斜在倾伏过程中向南偏移约 30° , 揭示了深部隐伏断层之间的位移转换作用. 由于地表(浅层)背斜向南迁移至南秋里塔格深层背斜之上, 库车塔吾背斜露出地表, 地质填图定名为托克拉克坦背斜, 因此, 托克拉克坦背斜与库车塔吾深层背斜为同一个背斜, 而不是由左行平移断层造成的拖曳褶皱

主要有库车塔吾背斜、南秋里塔格背斜及托克拉克坦背斜. 地表背斜核部出露上第三系中新统吉迪克组, 两翼为上新统-更新统康村组、库车组. 控制该区深、浅层构造变形的区域滑脱面主要发育于上三叠统~中、下侏罗统煤系地层及第三系膏泥岩层^[17-21]. 从卫星照片上可以观察到, 秋里塔格褶皱带中段的地表背斜在测线B-B'附近急剧向南迁移形成“S”型扭曲, 而扭曲部位北侧的托克拉克坦背斜在倾伏过程中也向南显著偏移(图6), 范湘涛等^[22]认为地表背斜的“S”型扭曲是由NEE向断层左行走滑所致, 托克拉克坦背斜则是左行走滑的拖曳产物, 但是这个观点与二维地震资料所揭示的深部构造特征并不相符.

3.1 构造剖面分析

为了精确测量深部隐伏断层和褶皱的构造要素, 笔者对研究区内的二维地震反射剖面做了时间-深度转换处理, 并运用遥感资料的倾角测量技术^[23,24]获得地表高陡地段的岩层产状(见图7地震剖面CMP线上的蝌蚪线), 以克服浅层地震反射资料品质差的不足, 进而建立了较为精确的二维构造深度剖面. 下面描述3条横切扭曲部位及其东、西两侧的构造剖面.

剖面A-A'位于扭曲部东侧, 切过库车塔吾背斜. 库车塔吾浅层背斜为箱状, 背斜核部紧闭, 两翼岩层近于直立, 浅层背斜受深层背斜前翼反冲断层 F_3 及后翼滑脱断层 F_4 的联合控制. 库车塔吾深层背斜为一典型的断层转折褶皱, 背斜前、后翼倾角约 $14^\circ \sim 15^\circ$, 下伏台阶状逆断层 F_1 的下滑脱面位于侏罗系底部煤系地层, 深度约10 km, 断坡切割侏罗系、白垩系、下第三系, 再转平至上滑脱面中新统吉迪克组膏泥岩层(深度约7 km)向南滑移, 断坡高度为3 km, 根据断坡长度推算^[13]断层 F_1 的位移量为10 km^[21].

剖面B-B'切过扭曲部位, 即库车塔吾背斜与南秋里塔格背斜的交汇处. 对比剖面A-A'可以发现, 断层 F_1 的下盘发育了新的断层 F_2 , 但二者的断坡高度明显减小, 约为1.5 km, 这两条平行的台阶状逆断层叠加构成双重构造, 其中断层 F_1 的上覆背斜为库车塔吾深层背斜, 断层 F_2 的上覆背斜为南秋里塔格深层背斜. 运用轴面分析方法^[12]可以计算出断层 F_1 的位移量为6.5 km, 断层 F_2 的位移量为4 km, 二者的总位移量10~11 km, 这个数值与剖面A-A'的位移量大致相同. 显然, 断层 F_1 在向西延伸过程中逐渐将其位移量传递给了下盘断层 F_2 .

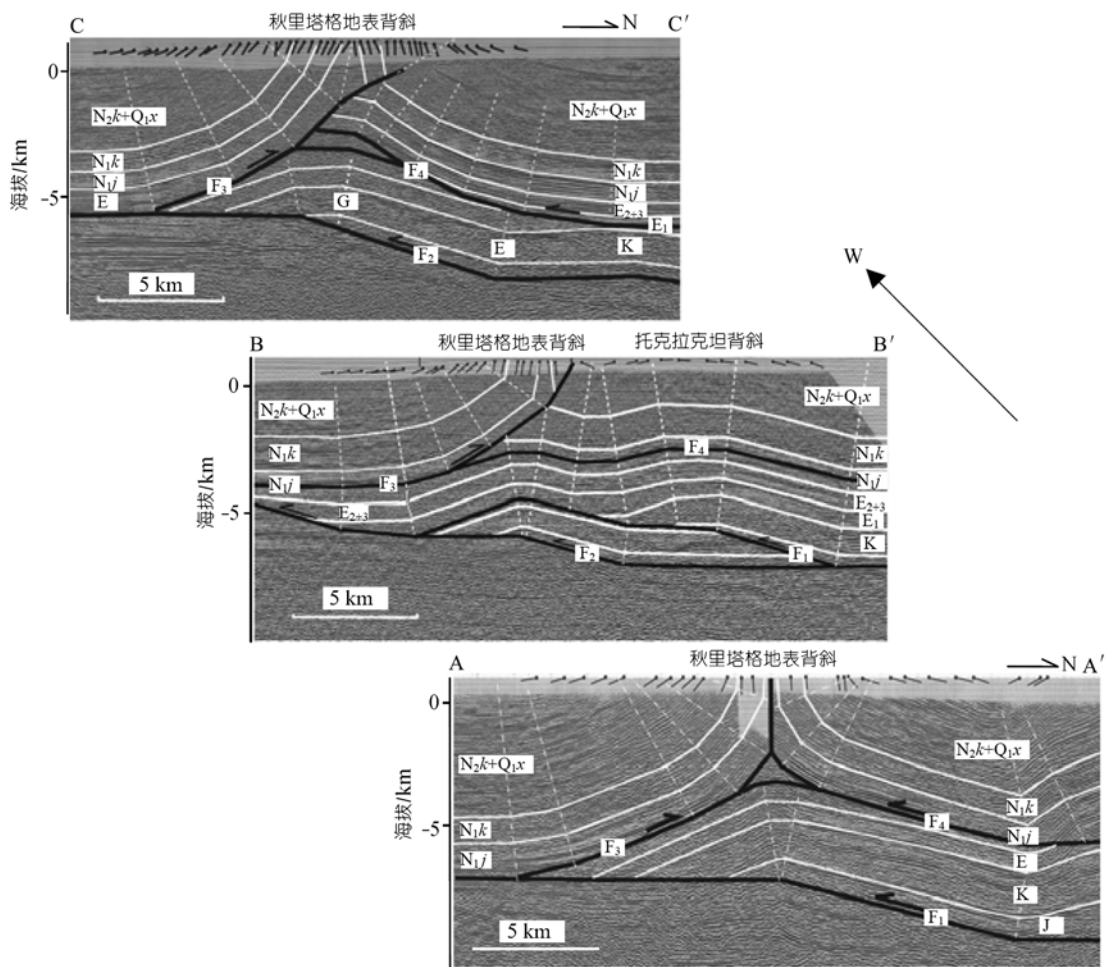


图 7 穿过秋里塔格褶皱带中段扭曲部位及其两侧的 3 条地震解释剖面(剖面位置见图 6)

所有剖面均作了时间-深度转换处理。Q₁x, 更新统西域组; N₂k, 上新统-更新统库车组; N₁k, 中新统康村组; N₁j, 中新统吉迪克组

此外, 浅层背斜在剖面 A-A' 位于库车塔吾深层背斜上方, 而在剖面 B-B' 中, 浅层背斜已向南迁移至南秋里塔格深层背斜上方, 浅层背斜向南迁移使得库车塔吾深层背斜形态显露在地表。因此, 地表的托克拉克坦背斜与库车塔吾深层背斜其实是同一个背斜, 而不是由左行走滑造成的拖曳褶皱。

剖面 C-C' 位于扭曲部位西侧, 切过南秋里塔格背斜。剖面 C-C' 的构造变形特征与剖面 A-A' 相似, 断层 F₁ 的位移量已经递减为零, 深部构造变形由双重构造又转化为单阶断层转折褶皱, 断层 F₂ 的断坡高度约为 2.5 km, 根据深层背斜后翼活动轴面 E 和固定轴面 G 之间的宽度推算, 断层 F₂ 的位移量约为 7 km, 这

个数值小于剖面 A-A' 和剖面 B-B' 的位移量(10~11 km)。

3.2 地表背斜扭曲的深部运动学机理

图 7 所示的 3 条构造剖面说明, 断层 F₁ 和 F₂ 之间的位移转换成库车塔吾深层背斜和南秋里塔格深层背斜在走向上呈左列叠置。根据地震资料的系统解释成果, 这两个背斜在交汇处叠加形成长约 18 km 的双重构造带^[11], 地表背斜轴线则在此区域向南迁移形成显著的“S”型扭曲。我们通过三维构造模型(图 8)解释了地表背斜扭曲的运动学机理。模块 a 和 b 反映库车塔吾背斜、南秋里塔格背斜及托克拉克坦背斜之间的相互关系, 模块 a 的深层背斜为一断层转折

褶皱,受台阶状逆断层 F_1 的控制,深层背斜前翼发育被动反冲断层 F_3 ;在模块b,断层 F_2 叠加在断层 F_1 下盘,由于断层 F_1 的位移量逐渐向断层 F_2 传递,断层 F_1 的上覆背斜逐渐倾伏并向断层位移方向偏移,这表现为后翼活动轴面A和固定轴面B之间的膝折带宽度(等于断层 F_1 的位移量)逐渐变窄至零^[16],而断层 F_2 的上覆背斜则逐渐抬升。由于浅层背斜受深层背斜前翼的被动反冲断层 F_3 控制,断层 F_2 的“前列式”叠加必然造成浅层背斜位置由北向南迁移,从而在模块a与模块b之间形成扭曲。

3.3 位移转换梯度

由于地表的托克拉克坦背斜即为库车塔吾深层背斜,因此可以根据托克拉克坦背斜的偏移角度去计算深部断层之间的位移转换梯度。卫星遥感图片显示托克拉克坦背在倾伏过程中向南偏移约 30° (图6),应用公式(1)计算出下伏断层的位移转换梯度为0.58。为验证这个结果,我们又利用地震资料测量了断层 F_1 位移量的衰减速率,断层 F_1 在剖面A-A'(位移转换前)的位移量为10 km,而位移转换带的宽度约为18 km,由此我们计算出断层 F_1 的位移量衰减速率为0.56。显然,这两种方法计算出的位移转换梯度值是接近的。

4 讨论

4.1 位移量

我们已经注意到,剖面A-A'中断层 F_1 的位移量为10 km,而剖面C-C'中断层 F_2 的位移量只有7 km,位移转换后断层 F_2 的位移量未能达到10 km,造成这

种结果可能有以下两方面的原因。

(1) 南秋里塔格深层背斜顶部和前翼堆积的下第三系膏泥岩吸收了部分位移量(图7C-C')。汤良杰等^[25,26]对库车冲断褶皱带盐相关构造变形作了系统的研究,秋里塔格褶皱带的膏(泥)岩主要分布于下第三系库姆格列木组及上第三系吉迪克组,是台阶状逆断层 F_1 和 F_2 的上滑脱面所在层位。钻井和地震资料揭示,第三系膏(泥)岩层自东向西有加厚的趋势,在秋里塔格褶皱带西段,米斯坎塔克背斜核部的膏(泥)岩厚度达2500~3000 m,巨厚的膏(泥)岩层吸收了大部分的构造缩短,从而造成深部台阶状逆断层及其相关褶皱在该地区消失。

(2) 断层的走滑活动吸收了部分位移量。秋里塔格褶皱带东段的构造走向近东西,而中段的构造走向则由近东西逐渐过渡为 $N60^\circ E$ 向西延伸,这个方位与南北向的构造挤压^[27]是斜交的。因此,秋里塔格褶皱带中段扭曲部位及西侧可能伴有断层的左行走滑活动,走滑活动吸收了部分位移量。范湘涛等^[22]曾运用剪切破裂原理^[28]论述了扭曲部位地面构造的组合关系,然而在地震反射剖面上我们并没有鉴别出大规模走滑断层的存在。笔者认为,秋里塔格褶皱带中、西段的断层活动可能伴有走滑分量,但走滑活动的规模并不足以产生库车塔吾背斜与南秋里塔格背斜交汇部位的“S”型扭曲,托克拉克坦背斜也不是左行走滑的拖曳产物。

4.2 位移转换的成因

秋里塔格褶皱带深部台阶状逆断层的断坡高度

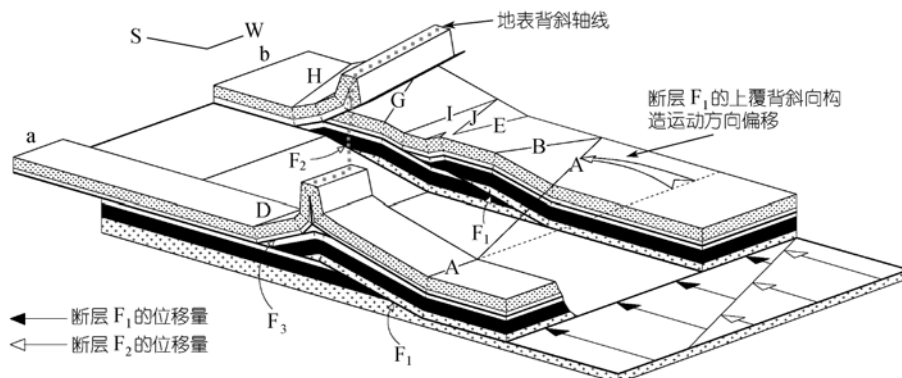


图8 造成地表背斜扭曲的深部运动学机理
模型中的轴面编号与图1中的编号对应

在剖面A-A'为 3 km, 向西至剖面B-B'则骤减为 1.5 km, 这说明位移转换在成因机制上可能类似于无穷等分模型(图 3). 我们在前文已经描述, 断坡高度的递减使得台阶状逆断层只需要越来越小的位移量就能达到上覆背斜的最大高度, 然而, 为什么背斜在抬升到最大高度后, 剩余的位移量是通过断层的叠加作用(位移转换作用)而不是通过增加上覆背斜平顶的宽度来吸收呢? 事实上, 我们并不理解这两种变形方式中哪一种在自然界更容易达到, 但无穷等分模型的合理性来源于一个合理的假设, 即对于相同的地层结构, 断层转折褶皱所能达到的最大宽度与最大高度之比是个常数^[9]. 在剖面a~e中(图 3), 由于断坡高度逐渐减小, 背斜 1 所能抬升到的最大高度是逐渐降低的, 背斜 1 所能延伸的最大宽度也将越来越窄, 而断坡高度递减所造成的剩余位移量却是越来越大的, 这就意味着, 仅仅增加背斜 1 平顶的宽度并不能维持位移量的稳定, 断层 F_1 丧失的位移量(即剩余的位移量)将传递给新产生的断层 F_2 , 从而在这两条断层之间发生位移量的转换, 构造变形样式也相应由单阶断层转折褶皱向双重叠加构造转换.

台阶状逆断层断坡高度的递减主要由沉积因素造成, 这种现象在自然界普遍存在, 秋里塔格褶皱带深部台阶状逆断层的上滑脱面位于下第三系底部的膏泥岩层, 下滑脱面则位于侏罗系阳霞组煤系地层. 在剖面 C-C'以西, 由于中生界沉积厚度逐渐减薄, 深部台阶状断层的断坡高度(即上、下滑脱面之间的距离)也逐渐降低; 至南、北秋里塔格地区, 断坡高度已降为 1 km 左右, 深部构造变形也相应由单阶断层转折褶皱转化为双重构造, 并造成地表构造产生分叉形成两排褶皱^[9,11].

此外, 秋里塔格褶皱带中段深部台阶状逆断层之间的位移转换也可能与断层 F_1 的发育规模有关, 断层 F_1 的最大位移量约为 10 km, 根据Elliott^[29]的“弓箭法则”(bow and arrow rule), 逆断层的最大位移量约等于其延伸长度的 7%~12%, 据此可计算出断层 F_1 的延伸长度应该在 80~150 km之间, 这与断层 F_1 的实测延伸长度 150 km¹⁾大体一致, 而秋里塔格褶皱带的

延伸长度达到了 300 km, 要控制这样的变形规模, 必然要在断层 F_1 的侧向发育新的断层 F_2 , 二者在交汇处叠加并发生位移量的传递.

5 结论

(1) 运用断层转折褶皱理论建立位移转换的两种概念模型. 如果断层在位移转换过程中的几何形态保持不变, 那么位移转换所造成的位移量分布及上覆褶皱(叠加)形态是反向对称的, 本文称之为反向对称模型; 而无穷等分模型则描述了一种成因机制, 即随着断层断坡高度的递减, 位移量将最终等分给后续产生的每一条断层.

(2) 几何学和运动学分析表明, 位移转换作用造成上覆褶皱形态向断层位移方向偏移, 偏移角度的正切等于位移转换梯度.

(3) 利用位移转换机制可以合理地解释地表(浅层次)构造的扭曲和分叉现象. 在秋里塔格褶皱带中段, 深部台阶状逆冲断层之间存在着位移转换, 造成库车塔吾深层背斜和南秋里塔格深层背斜在走向上呈左列叠置, 二者在交汇处叠加形成长约 18 km 的双重构造带, 地表背斜轴线在此区域向南迁移形成“S”形扭曲.

致谢 塔里木油田公司为本文提供了宝贵的地震反射资料, 在野外工作期间得到塔里木油田公司勘探开发研究院工作人员的大力帮助, 作者在此一并表达诚挚的谢意.

参 考 文 献

- 1 Dahlstrom C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bulletin of Canadian Petroleum Geologists*, 1970, 18: 332~406
- 2 Dahlstrom C D A. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1969, 6: 743~757
- 3 Gibbs A. Structural evolution of extensional basin margins. *Journal of the Geological Society of London*, 1984, 141: 609~620
- 4 Snedden W T, Spang J H. Geometric analysis of displacement transfer between thrust faults using fault-bend and fault-propagation fold models. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 1989, 21(6): A67
- 5 Shaw J H, Bilotte F, Brennan P A. Patterns of imbricate thrusting. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111: 1140~1154

[\[DOI\]](#)

1) 管树巍, 陈 松. 东秋里塔格构造带地震资料处理与区带评价. 塔里木石油股份公司研究报告, 2000

- 6 Tearpock D, Bischke R E. Applied subsurface geological mapping. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1991. 1~648
- 7 Rodgers J. The Tectonics of the Appalachians. New York: Interscience Publishers, 1970. 1~271
- 8 Kesler T L. Rome and Coosa faults in northwest Georgia. Geological Society of America Bulletin, 1975, 86: 625~631
- 9 管树巍, 徐 峰, 雷刚林. 库车秋里塔格褶皱带几何学、运动学与油气圈闭. 石油学报, 2003, 24(6): 30~34
- 10 汤良杰. 塔里木盆地多层次滑脱构造与含油气远景分析. 地质学报, 1992, 66(2): 97~107
- 11 管树巍, 汪 新, 杨树锋, 等. 南天山秋里塔格褶皱带三维构造分析. 地质论评, 2003, 49(5): 464~473
- 12 Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science, 1983, 283: 684~721
- 13 Mitra S. Duplex structures and imbricate thrust systems: geometry, structural position, and hydrocarbon potential. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1986, 70: 1087~1112
- 14 Boyer S E, Elliot D. Thrust systems. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1982, 66: 1196~1230
- 15 Robert D, Hatcher Jr. Structural Geology: Principles, Concepts, and Problems. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995. 48~64
- 16 Shaw J H, Hook S C, Suppe J. Structural trend analysis by axial surface mapping. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1994, 78: 700~721
- 17 陈楚铭, 卢华复, 贾 东, 等. 塔里木盆地北缘库车再生前陆褶皱逆冲带中秋丘里塔格前锋带的构造和油气. 地质论评, 1999, 45(4): 423~433
- 18 卢华复, 贾承造, 贾 东, 等. 库车再生前陆盆地冲断构造楔特征. 高校地质学报, 2001, 7(3): 257~271
- 19 卢华复, 贾 东, 陈楚铭, 等. 库车新生代构造性质和变形时间. 地学前缘, 1999, 6(4): 215~221
- 20 汪 新, 贾承造, 杨树锋, 等. 南天山库车冲断褶皱带构造变形时间——以库车河地区为例. 地质学报, 2002, 76(1): 55~63
- 21 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. 地质科学, 2002, 37(3): 372~384
- 22 范湘涛, 卢华复, 阎福礼, 等. 航天飞机成像雷达数据在库车冲断带前缘构造分析中的应用. 地质科学, 2002, 37(3): 257~263
- 23 Berger Z, Lee Williams T H, Anderson D W. Geologic stereo mapping of geologic structures with SPOT satellite data. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1992, 76: 101~120
- 24 Bilotti F, Shaw J H, Brennan P A. Quantitative structural analysis with stereoscopic remote sensing imagery. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2000, 84: 727~740
- 25 汤良杰, 贾承造, 皮学军, 等. 库车前陆褶皱-冲断带盐相关构造样式. 中国科学, 2003, 33(1): 38~46
- 26 汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等. 库车前陆褶皱-冲断带前缘大型盐推覆构造. 地质学报, 2004, 78(1): 17~25
- 27 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 1997. 1~438
- 28 Bartlett W L, Friedman M, Logan J M. Experimental folding and faulting of rocks under confining pressure. Tectonophysics, 1981, 79: 255~277 [\[DOI\]](#)
- 29 Elliott D. The energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets. Philosophical Transactions Royal Society of London, 1976, 283: 289~312