

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2015.03.003

褶皱陡坎中相关断层在缩短量计算中的作用

——以东秋里塔格背斜为例

张 玲 杨晓平* 黄伟亮 李胜强

(中国地震局地质研究所, 活动构造与活动火山重点实验室, 北京 100029)

摘 要 通过对东秋里塔格背斜地区内与褶皱陡坎伴生的次级断层进行的地质调查, 确定了该次级断层属于伸出向斜的逆冲断层, 也给出了次级断层的发生时间晚于褶皱作用起始时间的 1 个变形实例。褶皱陡坎中发育的次级断层使得陡坎上盘地层沿断层面整体向上迁移, 不仅次级断层使得阶地面发生掀斜并增大褶皱陡坎的坡度, 而且直接影响了区域缩短增量计算的真实性。计算结果显示, 当不考虑次级断层对褶皱陡坎高度的影响时, 计算所得缩短增量为 51.42m, 考虑次级断层对褶皱陡坎高度的影响时, 计算得到的地壳缩短量为 45.23m。二者相差 6.19m, 偏差占总缩短增量的 13.7%, 是一个不可忽视的量值。东秋里塔格背斜北翼和南翼的褶皱陡坎发育于相同岩性的基岩中而且具有相同的形成机制。但是背斜北翼在水平距离不足 300m 的范围内发育了 3 级褶皱陡坎, 这表明北翼相对于南翼, 其活动枢纽带更为紧闭。这是由于北翼存在更加强烈的挤压应力及更加快速的隆升作用。因此, 次级断层的研究对于正确认识区域构造演化、了解褶皱与断层相互作用关系具有重要意义。但是仍存在很多问题: 1) 受观察剖面范围有限、次级断层分布不连续和断距沿延伸方向不断增大等因素的制约, 次级断层对缩短增量造成的影响可能被低估, 计算结果应为缩短量的最小值。2) 次级断层增加的陡坎高度与断层的断距、倾角具有怎样的定量关系? 3) 若次级断层只发育于活动枢纽带内, 又会产生怎样的影响? 这些问题还需更多的研究实例来进行更加深入的研究。

关键词 褶皱相关断层 褶皱陡坎 地壳缩短 东秋里塔格背斜

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2015)03-0697-12

0 引言

活动逆断裂褶皱作用区最新地壳缩短量的研究对于正确认识该地区的构造活动性有着重要的意义, 同时, 累计位移量也是地震危险性评估的一个很重要的参数(邓起东, 2002; 邓起东等, 2004)。对于常见的断层相关褶皱——断弯褶皱、断展褶皱和滑脱褶皱, 前人已经建立了较为成熟的几何学与运动学模型(Suppe, 1983; Jamison, 1987; Suppe *et al.*, 1990)。而且针对不同类型的断层相关褶皱也提出了不同的计算地壳缩短增量的模型。由于和活动褶皱伴生的被动地貌记录了这些逆断裂褶皱演化过程中的变形量和变形方式(Suppe *et al.*, 1992; Lave *et al.*, 2000; 沈军等, 2001; 陈杰等, 2005), 因此, 常被作为活动构造研究的一个切入点而用于

[收稿日期] 2014-05-19 收稿, 2015-08-11 改回。

[基金项目] 特大地震危险区评估及灾情快速获取关键技术研发(2012BAK15B01)和全国重点监视防御区活动断层地震危险性评价(1521044025)共同资助。

* 通讯作者: 杨晓平, 研究员, E-mail: yangxiaoping-1@163.com。

限定活动褶皱变形速率和生长演化史,尤其适用于无法直接测量计算深部隐伏断层造成地壳缩短的区域。其中,近期被发现的褶皱陡坎是一种有别于断层陡坎且因构造作用形成的重要地貌类型(卢华复等,2002;Thompson *et al.*,2002;陈杰等,2005;Scharer *et al.*,2006;Chen *et al.*,2007;Hubert-Ferrari *et al.*,2007;李涛等,2014)。卢华复等(2002)和 Hubert-Ferrari 等(2007)对南天山库车地区秋里塔格背斜的研究之后,提出了褶皱陡坎的概念模型和缩短增量的计算公式,陈杰(2005)总结了6种褶皱生长与河流阶地相互关系的理想化运动学模型,并且强调了褶皱陡坎的重要性。这些为计算断层相关褶皱缩短量提供了理论和定量化依据。

与断层相关褶皱理论不断完善相比,褶皱相关断层构造的研究还存在许多不足。Mitra 等(1990,2002)在总结前人关于褶皱相关断层的研究时指出,虽然其中的次级断层相对于主构造带来说只是一种二级构造,但是却可以具有很大的滑脱距离,并对一级构造产生一定的影响,它们也是构造带内部应力分布的标志。因此,不能忽略次级断层在褶皱缩短过程中对缩短增量的贡献,以及它对褶皱作用变形方式的指示作用(邓洪菱等,2009)。近年来,在库车坳陷东部对东秋里塔格背斜区的野外地质调查中,发现在褶皱陡坎中存在断裂构造,并且这些断层是错断晚第四纪以来地层的活动断层。Mitra(2002)提出了伸出向斜的逆冲断层总切变的计算方法,却不适用于研究区内切顶次级断裂缩短量的计算。因此,在对研究区详细的地质地貌填图的基础上,本文针对褶皱陡坎中活动的褶皱相关断层在计算地壳缩短量中的贡献和对褶皱变形机制的指示作用进行了探讨。

1 构造背景

新生代以来,印度板块与欧亚板块的碰撞使得南天山库车盆地遭受了强烈的挤压缩短,新生代晚期以来的地壳缩短量达 23.1km(邓起东等,2000),这种褶皱缩短和隆升过程一直延续至今(Molnar *et al.*,1994;杨晓平等,2001;卢华复等,2002;吴传勇等,2006;Hubert-Ferrari *et al.*,2007),并且1949年2月24日在褶皱带中的康村附近还发生了7¼级强烈地震(中国地震局震害防御司,1999)。库车凹陷中自北向南发育了北部单斜带、喀桑托开逆断裂褶皱带、秋里塔格逆断裂褶皱带和亚肯背斜带(邓起东等,2000)。其中,北部单斜带基本不活动,其他3排褶皱带吸收了大部分的晚第四纪地壳缩短,并在地表留下了大量的断层陡坎(吴传勇等,2006)。本文中的东秋里塔格背斜是指盐水沟以东的秋里塔格背斜带东段,总体长度约90km,呈NEE走向,在地貌上显示为高耸的背斜山(图1)。背斜区出露古近纪与新近纪砂泥岩、下更新世砾岩和中更新世砾石层,在山前冲洪积物与河道两侧分布了松散的晚更新世—全新世砂砾石。由于秋里塔格背斜带是一个复杂的断弯褶皱(Hubert-Ferrari *et al.*,2007),深部滑脱断层未出露地表(汪新等,2002;管树巍等,2003),反冲断层的活动在地表造成了大量的断层陡坎(吴传勇等,2006)。

2 康村西褶皱陡坎与褶皱相关断层

在康村西5km处的东秋里塔格背斜北翼,厚20~25m的中更新世(Q_p^2)砾石层不整合覆盖于上新统库车组(N_2)砂泥岩之上。此处的褶皱变形以轴面迁移为特征,因此沿近EW走向的活动枢纽发育了褶皱陡坎。在褶皱陡坎上覆盖的现今洪积扇上还发现逆断层,其错断地表形成的断层陡坎高0.5~1.8m,断续延伸约1300m(图2)。

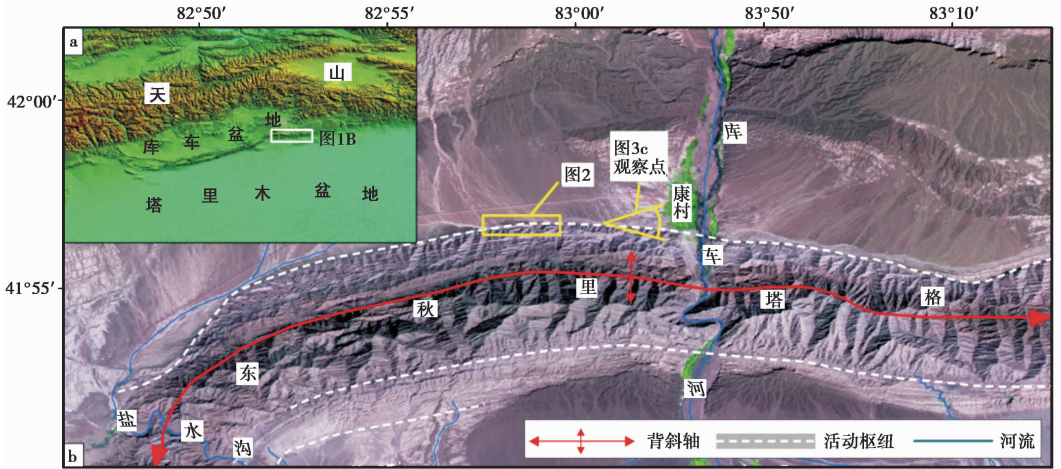


图 1 东秋里塔格背斜构造位置

Fig. 1 Tectonic setting of East Qiliutage anticline.

a 30m ASTER GDEM 地形显示研究区在南天山构造带中的位置；b ETM 影像显示观察点在东秋里塔格背斜带中分布的位置

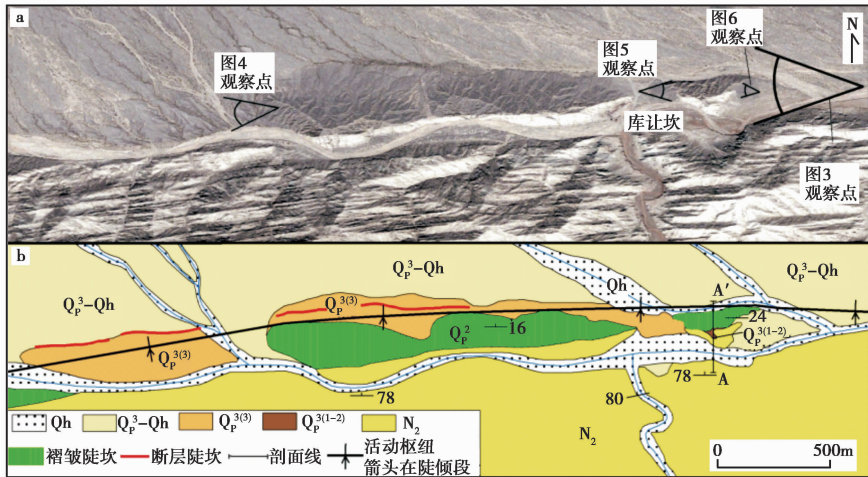


图 2 康村西褶皱陡坎与断层陡坎分布图

Fig. 2 A map showing the fold scarps and fault scarps west of Kangcun.

a Google Earth 卫星影像图，观察点在东秋里塔格背斜带中的位置参考图 1b；b 图 a 相同区域的地貌解译图

研究区内背斜北翼冲沟比较发育，褶皱陡坎遭受到不同程度的侵蚀，在库让坎一带褶皱陡坎保存比较完整，剖面中出露的地层、断层也十分清晰(图 3a, b)。图 3 显示，在背斜北翼残存的 T_2 阶地面上发育了褶皱陡坎， T_2 阶地顶部覆盖了原始沉积的晚更新世早中期 ($Q_p^{3(1-2)}$) 砾石层，中部出露中更新世 (Q_p^2) 和薄层的晚更新世晚期 ($Q_p^{3(3)}$) 沉积物。褶皱陡坎北部(底部)是宽缓平坦的向斜谷地，出露晚更新世 (Q_p^3)—全新世 (Q_h) 砾石堆积，比 T_2 阶地上沉积的晚更新世早中期砾石层新。相同的岩性出露和相似的地层产状变化也表现在库让坎东 2km 的观察点剖面中(图 3c)。用 TRUPULSE_{TM}200 激光测距仪实测出褶皱陡坎 (T_2) 的高度为 34m。实测地

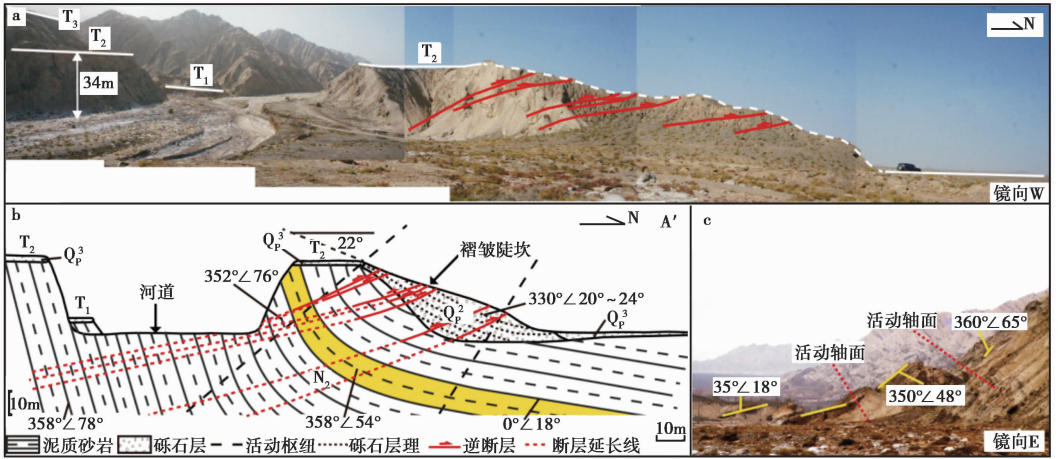


图3 库让坎附近的褶皱陡坎剖面

Fig. 3 Photographs and profiles of fold scarps near Kurangkan.

a 褶皱陡坎及次级断层野外照片; b 褶皱陡坎纵剖面; c 库让坎东2km野外照片

质剖面上,库车组砂泥岩倾向N,可分为3个等斜岩区,从南向北3个等斜岩区的地层倾角分别为 78° 、 54° 和 18° (图3b)。在库让坎剖面中还可可见大量的伴生次级逆断层,它们起始于库车组(N_2)砂泥岩,向下延伸可能切穿活动枢纽带,向上切穿中更新世(Q_p^2)地层到达地表(图3a, b),但它们的断距有限。

为了详细统计剖面中所有次级断层的相关参数,根据次级断层的分布规律,在图2所示的区域中,根据断层成组出现的特点,自下而上选取了3个高度不同的露头观察点。高度最低的1组断层出露于1个现代冲沟的边缘(图4)。5条断层均切穿中更新世(Q_p^2)地层,但未到达地表,推测断层发生断错的时间为晚更新世早中期—中更新世晚期。中更新世地层为略有胶结的粗砂夹细砂砾石层,粒径在0.5cm左右。 F_2 、 F_3 、 F_4 断层将其中的中-粗砂透镜体错断,标志层被错断的现象十分清晰,可从剖面中直接测量出断层的断距。由于 F_1 和 F_5 断距超过了剖面所能展示的长度,找不到记录断距的标志层,只能推测出其最小断距。5条断层的相关参数见表1。

更高1级断层剖面(图5)位于图3所示的褶皱陡坎西侧,剖面中发育4条断层,它们切割中更新世地层(Q_p^2),且逆冲至地表,在现代洪积扇上造成了约1.8m高的断层陡坎(图2)。剖面中,每一条断层的标志层清晰,相应的断层几何参数见表1。

最高1级的断层剖面(图6)位于图3剖面的顶部,2条断层起始发育于库车组(N_2)砂泥岩中,切穿中更新世地层(Q_p^2)至地表。细砂粉砂透镜体标志层被2条断层错断,并在被错断透镜体尾部出现牵引构造。断层的参数见表1。

以上11条断层都发育在褶皱枢纽一侧的陡倾斜岩层段,另一侧的缓倾斜岩区不发育断层。这些逆断层分布于东秋里塔格背斜北翼,走向总体上与褶皱枢纽走向平行,切穿组成褶皱陡坎的中更新世地层至地表。根据Wrede(2005)和邓洪菱(2009)提出的褶皱相关断层判别标志,这些断层应为地层在活动轴面处迁移过程中伴生的褶皱相关次级断层。

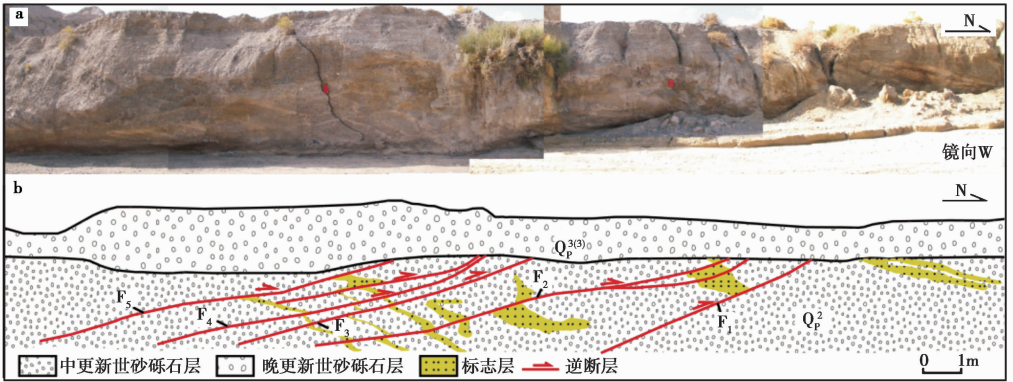


图 4 最低露头中的次级断层

Fig. 4 Photograph and interpretation of small secondary faults in the lowest outcrop.

a 次级断层的野外照片；b 地质剖面图

表 1 各断层相关参数

Table 1 Relevant parameters of secondary faults

断层	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁
倾角 $\theta_0 / (^\circ)$	19	5	18	18	10	15	15	15	15	6	10
断距 L / m	>3.95	0.3	0.33	0.16	>6.29	0.2	1	0.3	3	1.6	1.1
相应垂直增量 $\Delta h / m$	>1.29	0.03	0.1	0.05	>1.09	0.05	0.26	0.08	0.78	0.17	0.19

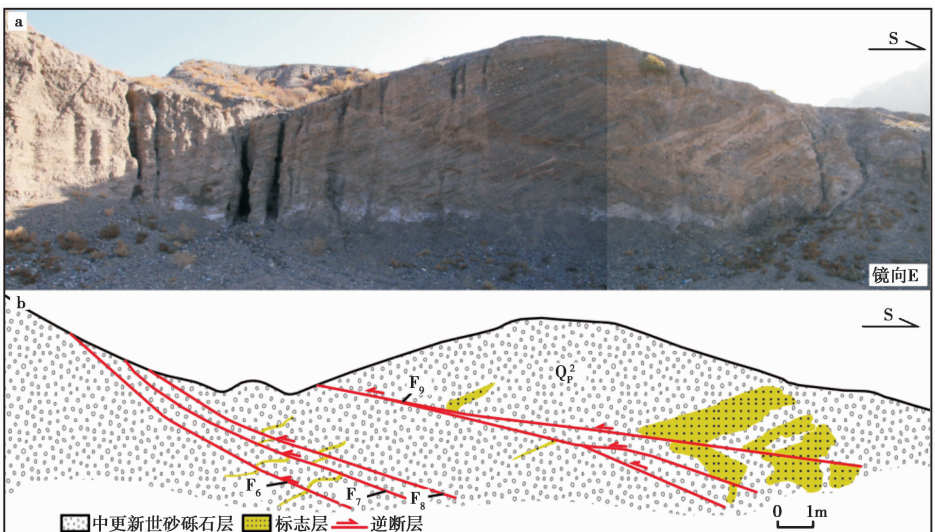


图 5 中部露头中的次级断层

Fig. 5 Photograph and interpretation of small faults in the middle outcrop.

a 次级断层的野外照片；b 地质剖面图

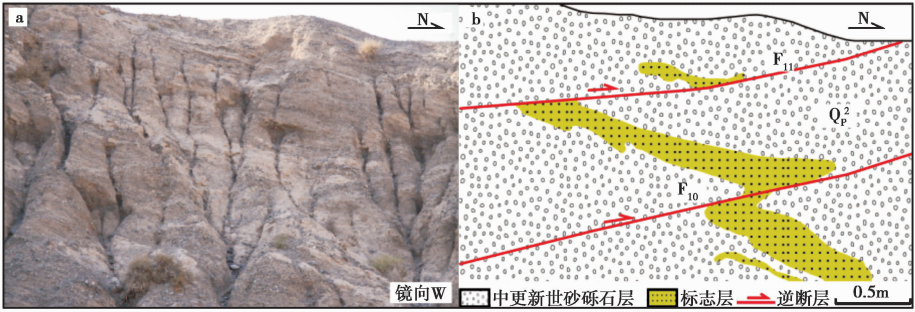


图 6 顶部露头中的次级断层

Fig. 6 Photograph and interpretation of small faults in the highest outcrop.

a 次级断层的野外照片; b 地质剖面图

3 利用褶皱陡坎计算地壳缩短量

3.1 计算方法

褶皱陡坎又称褶皱崖,是指初始水平或近水平的地层或未固结沉积物受到地下断层或盲断层的转折冲断作用,由于断层相关褶皱膝折带的迁移使得活动轴面与固定轴面分离,而在地表产生的单斜褶皱斜坡或陡坎,斜坡两侧的地层仍然水平或近水平(卢华复等, 2002; 陈杰, 2005)。Hubert-Ferrari 等(2007)提出用宽缓膝折带迁移模型来解释秋里塔格背斜南翼褶皱陡坎的形成(图 7),地层中的质点通过 1 个岩层倾角逐渐增大的向斜枢纽向上运动。上部发育的阶地面发生差异性抬升而暴露于地表,并在前缘产生褶皱陡坎。

利用褶皱陡坎的高度 h 、陡倾段岩层倾角 θ_1 和缓倾段岩层倾角 θ_2 可以计算缩短增量 s (图 8)(卢华复等, 2002; Chen *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2013), 它们之间的定量关系为

$$s = h / (\sin\theta_1 - \sin\theta_2) \quad (1)$$

陡坎高度随褶皱缩短量的不断增加而逐渐增大,陡坎坡度在缩短量达到一定值时将不再发生变化,即达到最大坡度,但陡坎高度仍继续增加(Chen *et al.*, 2007)。因此,陡坎坡度可以作为褶皱陡坎发展程度的 1 个标度。当活动枢纽两侧下伏基岩产状不同,并且枢纽两翼地层倾角受控并平行于断层面时,下伏隐伏断层倾角即是下伏基岩倾角。褶皱陡坎的最大坡度 ϕ_{\max} 只与下伏隐伏断层倾角有关(图 7), 计算公式(Chen *et al.*, 2007)为

$$\tan(\theta_1 - \phi_{\max}) = \frac{\sin\theta_2 \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) - \sin\theta_2 \sin\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right)} \quad (2)$$

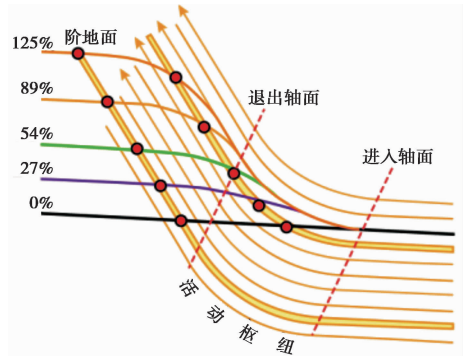


图 7 宽缓膝折带迁移模型

(改自 Hubert-Ferrari *et al.*, 2007)Fig. 7 Modeling of a dimensionless wide hinge zone model(modified from Hubert-Ferrari *et al.*, 2007).

3.2 东秋里塔格背斜的地壳缩短

在东秋里塔格背斜区,基岩中存在倾向不同的等斜岩区,并且其走向与活动枢纽带的走向一致。综合地震反射剖面分析结果(卢华复等, 2002; 汪新等, 2002; 管树巍等, 2003),可知沿褶皱活动枢纽带在阶地面上产生的逐级地形陡坎不是高角度逆断层所致,而是由于活动枢纽固定在深部断层转折处,岩层质点通过膝折带迁移形成的。而且同一期河流阶地上褶皱陡坎前缘不断随枢纽向前推进,后缘位置固定(Li *et al.*, 2013)。在康村西剖面中,褶皱陡坎实测高度为 34m,下伏基岩陡倾段倾角为 78° ,缓倾段倾角为 18° ,通过式(1)计算得到褶皱陡坎记录的地壳缩短量为 51.42m。

但在野外调查中,发现褶皱陡坎中伴生了大量局部挤压作用造成的次级断裂构造(图 3)。这些次级断裂构造拥有很多共同特征:它们都源于组成褶皱陡坎的库车组(N_2)基岩,但是向下延伸深度有限且没有与控制褶皱变形的正断层面相连;从向斜活动枢纽带向上切穿中更新世(Q_p^2)地层到达地表,有些在地表产生 0.5~1.8m 高的断层陡坎。这些都说明这些次级断层始于向斜枢纽核部并向着岩层曲率减小的方向延伸,形成时间晚于褶皱陡坎,活动性一直延续至今。因此,从几何形态和形成时间都可以判定,这些次级断层属于与褶皱陡坎伴生的伸出向斜的逆冲断层(Mitra, 2002; 邓洪菱等, 2009)。发生这种现象的原因是活动枢纽带向深部方向上地层曲率的增加,岩层质点在通过活动膝折带过程中不断变陡而发生旋转。为了调节这种岩层内部的应力差异,岩层发生了脆性剪切破裂。每一条断层的断距不大,但它们产生的综合断距和缩短量具有相当的规模,因此不能忽视次级断层对褶皱变形作用的影响。Mitra (2002)曾提出在挤压构造区可以利用向斜处两端的倾角($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_{12}$)和岩层厚度来计算总切变(Δs) (图 9)。它们之间的定量关系为

$$\Delta s = 2t[\tan(\varphi_1/2) + \tan(\varphi_2/2) + \tan(\varphi_{12}/2)] \quad (3)$$

在实际中往往由于受到剖面大小范围的限制,在计算中并不能确定受断层影响的岩层总体厚度(t)。因此,应用式(3)并不能计算得到总切变(Δs)。在康村西剖面中,只能通过利用褶皱陡坎的相关参数来计算得到缩短增量。但次级断层的综合作用却使得褶皱陡坎的高度增加,从而使得上述计算结果较实际值偏大。

伸出向斜的逆冲断层的断距具有沿延伸方向不断减小的性质(Mitra, 2002; 邓洪菱等, 2009),因此在地表露头处一般为断距、水平缩短量较大的位置。虽然不能计算出总断距,但通过对切顶端部最大断距的测量计算,能

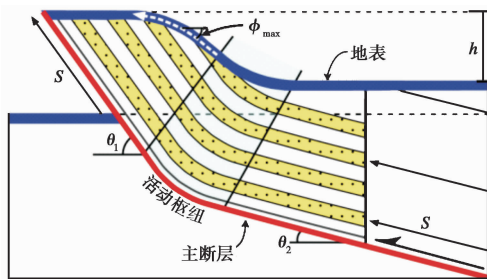


图 8 膝折带迁移的褶皱陡坎的简单运动学模型 (改自 Chen *et al.*, 2007; Hubert-Ferrari *et al.*, 2007; Li Tao *et al.*, 2013)

Fig. 8 Simple kinematic model of fold scarp by hinge migration (modified from Chen *et al.*, 2007; Hubert-Ferrari *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2013).

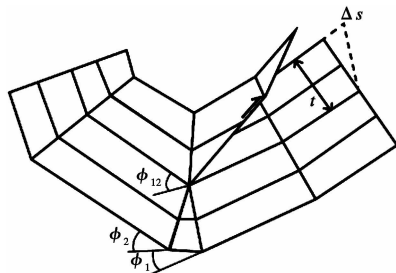


图 9 向斜核部伸出向斜的逆冲断层的形成机制 (改自 Mitra, 2002)

Fig. 9 Mechanism of out-of-syncline thrust in the fold core (modified from Mitra, 2002).

够得出 1 个断层对于褶皱作用在垂直方向上位移量贡献的最小值。其中, Δh 即是褶皱陡坎高度的增量, 也为各次级断层垂直位移的总和。次级断层倾角为 $\theta_{01}, \theta_{02}, \theta_{03}, \dots, \theta_{0n}$, 断距为 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$, 它们之间的定量关系为

$$\Delta h = L_1 \times \sin\theta_{01} + L_2 \times \sin\theta_{02} + L_3 \times \sin\theta_{03} + \dots + L_n \times \sin\theta_{0n} \quad (4)$$

次级断层使得上盘地层沿断层面整体向上迁移, 深部陡倾段与缓倾段地层产状在错断前后的变化量可忽略不计(图 10)。因此, 地层通过膝折带迁移产生的缩短量为

$$S' = (h - \Delta h) / (\sin\theta_1 - \sin\theta_2) \quad (5)$$

利用式(5)计算在次级断层影响下, 康村西褶皱陡坎地壳缩短增量为 45.23m。比较上述 2 种计算结果可知, 如果不考虑褶皱陡坎中次级逆断层的影响, 会导致利用褶皱陡坎相关参数计算得到的地壳缩短增量比实际值偏大 6.19m, 占总缩短增量的 13.7%。

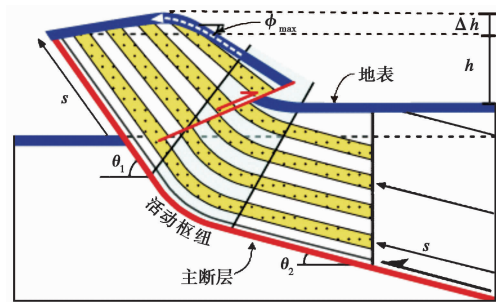


图 10 褶皱陡坎受到次级断层错断的运动学模型

Fig. 10 Schematic kinematic model of fold scarp under the action of secondary faults.

褶皱陡坎的最大坡度虽然只与下伏陡倾段和缓倾段地层倾角有关(式(2)), 但是由于次级断层的作用阶地面上部发生掀斜, 从而导致陡坎坡度增大。

4 讨论和结论

次级断层概念的产生由来已久, Mitra(2002)和邓洪菱等(2009)总结归纳了 4 个大类、8 种具体类型的次级断层, 同时指出褶皱相关断层的关键特征是单条断层位移量较小, 且往往消失于某些构造当中, 并不与主要滑脱带相连。前人的研究主要集中在褶皱相关断层的分类、判别标志上, 但是对于它在断层相关褶皱系统中所起的作用还没有相关的报道。康村西库让坎剖面中的褶皱相关断层属于伸出向斜的逆冲断层(Mitra, 2002), 它们均可追溯至陡倾的库车组(N_2)基岩中, 切穿组成褶皱陡坎的中更新世(Q_2^p)地层而出露地表, 并且断层面没有发生后期的被动弯曲。这些现象都说明次级断层是褶皱陡坎发育过程中的伴生构造。邓洪菱(2009)在讨论 Wrede(2005)提出的识别褶皱相关断层的 5 条标志时指出, 这些次级断层是在褶皱作用之前形成, 还是在褶皱变形发育到一定阶段产生的褶皱相关断裂构造存在着不确定性。秋里塔格背斜北翼地区出露的伸出向斜的次级逆冲断层给出了次级断层发生的起始时间晚于褶皱作用的实例。

在东秋里塔格背斜北翼发育的褶皱陡坎与 Hubert-Ferrari 等(2007)在背斜南翼发现的褶皱陡坎所处基岩均为库车组(N_2)泥岩, 而且褶皱陡坎具有相同的形成机制。但两者不同的是北

翼发育的褶皱陡坎中存在大量的次级断层,而且在库让坎不到 300m 长的地质剖面中出现了 3 级褶皱陡坎。同时,北翼陡倾段岩层倾角与缓倾段岩层倾角相差近 60° ,而南翼倾角大多相差 30° 左右(Hubert-Ferrari *et al.*, 2007)。这些都指示了在背斜北翼存在更加强烈的挤压应力和更加快速的隆升作用。形成伸出向斜的逆冲断层的一个最重要机制是地层的曲率向向斜核部的增加(Mitra, 2002)。原始水平的地层面随着褶皱陡坎的不断发育,向活动向斜枢纽深部地层曲率不断增加,陡倾段岩层变陡而发生旋转。因此,当挤压应力达到一定程度时,为了调节岩层内部的应力而产生了次级断层。

通过计算可知,在康村西库让坎一带发育的褶皱陡坎,若不考虑次级断层的影响,计算所得的缩短增量为 51.42m。若考虑褶皱陡坎中相关断层的影响,利用式(5)计算得到的缩短增量为 45.23m。因此,若不考虑褶皱陡坎中相关断层的作用,会导致利用褶皱陡坎相关参数计算得到的地壳缩短增量比实际值至少偏大 6.19m,占总缩短增量的 13.7%,是一个不可忽视量值。

本文在野外地质调查的基础上,结合前人研究总结了一些褶皱相关断层发育的特征并提出了它在褶皱缩短增量中的作用。但是仍存在很多问题:1)次级断层在垂直剖面和水平面展布上存在断续不连续的现象,受到观察剖面范围的限制,从而不能完全统计所有次级断层的活动参数。同时,伸出向斜的逆断层的断距具有向向斜核部不断减小的性质,在地层厚度(t)未知的情况下,无法计算总切变(Δs)。因此,在这 2 种因素的影响下会低估次级断层对缩短量造成的影响,只能求取其对缩短量贡献的最小值。2)在褶皱陡坎中出现的伸出向斜的逆冲断层能够使得阶地面上部前缘发生掀斜并增大褶皱陡坎的坡度。增大的陡坎坡度与次级断层的断距和倾角具有怎样的定量关系?3)若次级断层只发生于活动向斜枢纽带内,并不能对褶皱陡坎的高度产生影响,却能够增加陡坎坡度。在这种情况下,次级断层与褶皱构造又有怎样的定量关系?这些问题都还不够明确,从而需要更多的褶皱相关断裂实例来进行更加深入的研究。

参 考 文 献

- 陈杰, Scharer K M, Burbank D W, 等. 2005. 利用河流阶地限定活动褶皱的类型和生长机制: 运动学模型 [J]. 地震地质, 27(4): 513—529.
- CHEN Jie, Scharer K M, Burbank D W, *et al.* 2005. Kinematic models of fluvial terraces over active folds: Constraints on the growth mechanism and kinematics of the fault-related folds [J]. *Seismology and Geology*, 27(4): 513—529(in Chinese).
- 邓洪菱, 张长厚, 李海龙, 等. 2009. 褶皱相关断裂构造及其地质意义 [J]. 自然科学进展, 19(3): 285—296.
- DENG Hong-ling, ZHANG Chang-hou, LI Hai-long, *et al.* 2009. Fold-accommodation faults and their geological significance [J]. *Progress in Natural Science*, 19(3): 285—296(in Chinese).
- 邓起东. 2002. 中国活动构造研究的进展与展望 [J]. 地质评论, 48(2): 168—177.
- DENG Qi-dong. 2002. Advances and overview on researches of active tectonics in China [J]. *Geological Review*, 48(2): 168—177(in Chinese).
- 邓起东, 陈立春, 冉勇康. 2004. 活动构造定量研究与应用 [J]. 地学前缘, 11(14): 383—392.
- DENG Qi-dong, CHEN Li-chun, RAN Yong-kang. 2004. Quantitative studies and applications of active tectonics [J].

- Earth Science Frontiers, 11(4): 383—392(in Chinese).
- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 2000. 天山活动构造 [M]. 北京: 地震出版社.
- DENG Qi-dong, FENG Xian-yue, ZHANG Pei-zhen, *et al.* 2000. Active Tectonics in Tian Shan [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 管树巍, 陈宁华, 徐峰, 等. 2003. 库车凹陷秋里塔格褶皱带几何学和运动学特征与油气圈闭 [J]. 石油学报, 24(6): 30—34.
- GUAN Shu-wei, CHEN Ning-hua, XU Feng, *et al.* 2003. Properties of geometry and kinematics related to hydrocarbon traps in Qiulitag anticline zone of Kuqa Depression [J]. Acta Perolei Sinica, 24(6): 30—34(in Chinese).
- 李涛, 陈杰. 2014. 利用河流阶地限定活动逆断层相关褶皱晚第四纪变形机制和速率: 方法与认识 [J]. 地震地质, 36(2): 478—488. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.02.016.
- LI Tao, CHEN Jie. 2014. Using deformation fluvial terraces to constrain mechanism and rates of thrust related fold: methods and recognition [J]. Seismology and Geology, 36(2): 478—488(in Chinese).
- 卢华复, 王胜利, 贾东, 等. 2002. 天山中段南麓的第四纪褶皱作用 [J]. 科学通报, 47(21): 1675—1679.
- LU Hua-fu, WANG Sheng-li, JIA Dong, *et al.* 2002. Quaternary folding in the south piedmont of central segment of Tian Shan Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 47(21): 1675—1679(in Chinese).
- 沈军, 赵瑞斌, 李军, 等. 2001. 塔里木盆地西北缘河流阶地变形测量与地壳缩短速率 [J]. 科学通报, 46(4): 334—338.
- SHEN Jun, ZHAO Rui-bin, LI Jun, *et al.* 2001. Deformation observation of the stream terraces and shortening rate of crust in the northwestern margins of the Tarim Basin [J]. Chinese Science Bull, 46(4): 334—338(in Chinese).
- 汪新, 贾承造, 杨树锋, 等. 2002. 南天山库车冲断褶皱带构造变形时间: 以库车河为例 [J]. 地质学报, 76(1): 55—63.
- WANG Xin, JIA Cheng-zao, YANG Shu-feng, *et al.* 2002. The timing of deformation on the Kuche fold and thrust belt in the central part of the southern Tianshan; Based on the Kuche river area [J]. Acta Geologica Sinica, 76(1): 55—63(in Chinese).
- 吴传勇, 沈军, 陈建波, 等. 2006. 新疆南天山库车凹陷晚第四纪以来地壳缩短速率的初步研究 [J]. 地震地质, 28(2): 279—288.
- WU Chuan-yong, SHEN Jun, CHEN Jian-bo, *et al.* 2006. Preliminary study of late Quaternary crustal shortening rate along Kuqa depression in south Tianshan, Xinjiang [J]. Seismology and Geology, 28(2): 279—288(in Chinese).
- 杨晓平, 周本刚, 李军, 等. 2001. 新疆南天山亚肯背斜晚更新世以来的隆起和缩短 [J]. 地震地质, 23(4): 581—587.
- YANG Xiao-ping, ZHOU Ben-gang, LI Jun, *et al.* 2001. Shortening and uplift of the active Yaken anticline in southern Tianshan, China since late Pleistocene [J]. Seismology and Geology, 23(4): 581—587(in Chinese).
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录(公元 1912 年—1900 年($M_s \geq 4.7$)) [M]. 北京: 中国科学技术出版社.
- Earthquake Disaster Prevention Department of China Earthquake Administration. 1999. Catalogue of Chinese Earthquakes(1912—1990, $M_s \geq 4.7$) [M]. China Science and Technology Press, Beijing (in Chinese).
- Chen Y G, Lai K Y, Lee Y H, *et al.* 2007. Coseismic fold scarps and their kinematic behavior in the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth(1978—2012), 112(B3).
- Hubert-Ferrari A, Suppe J, Gonzalez-Mieres R, *et al.* 2007. Mechanisms of active folding of the landscape(southern Tian Shan, China) [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth(1978—2012), 112(B3).
- Jamison W R. 1987. Geomtric analysis of fold development in overthrust terranes [J]. Journal of Structural Geology, 9

(2): 207—219.

- Lave J, Avouac J P. 2000. Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hills, Himalayas of central Nepal [J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(3): 5735—5770.
- Li T, Chen J, Thompson J A, *et al.* 2013. Quantification of three-dimensional folding using fluvial terraces: A case study from the Mushi anticline, northern margin of the Chinese Pamir [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118: 4628—4647.
- Mitra S. 1990. Fault-propagation fold: Geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps(1) [J]. *AAPG Bulletin*, 74(6): 921—945.
- Mitra S. 2002. Fold-accommodation faults [J]. *AAPG Bulletin*, 86(4): 671—694.
- Molnar P, Brown E T, Burchfiel B C, *et al.* 1994. Quaternary climate change and the formation of river terraces across growing anticlines on the north flank of the Tien Shan, China [J]. *The Journal of Geology*, 102(5): 583—602.
- Scharer K M, Burbank D W, Chen J, *et al.* 2006. Kinematic models of fluvial terraces over active detachment fold: Constraints on the growth mechanism of the Kashi-Atushi fold system, Chinese Tien Shan [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 118: 1006—1021.
- Suppe J. 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding [J]. *American Journal of Science*, 283: 684—721.
- Suppe J, Chou G T, Hook S C. 1992. Rate of folding and faulting determined from growth strata [A]. In: *Thrust Tectonics*. Springer Netherlands. 105—112.
- Suppe J, Medwedeff D A. 1990. Geometry and kinematics of fault propagation folding [J]. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 83(3): 409—454.
- Thompson S C, Weldon R J, Rubin C M, *et al.* 2002. Late Quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth(1978—2012)*, 107(B9): ETG -7.
- Wrede V. 2005. Thrusting in a fold regime: Fold accommodation faults in the Ruhr Basin, Germany [J]. *Journal of Structural Geology*, 27(5): 789—803.

CONTRIBUTIONS OF FOLD-ACCOMMODATION FAULTS IN FOLD SCARPS TO THE CALCULATION OF SHORTENING INCREMENT: A CASE STUDY FROM QIULITAGE ANTICLINE (SOUTHERN TIAN SHAN, CHINA)

ZHANG Ling YANG Xiao-ping HUANG Wei-liang LI Sheng-qiang

(Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology,
China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract

Fold-accommodation faults, secondary faults subordinated to the principal fold, are of much significance to accommodate strain variation in different parts of the rock during the evolution of folding. They are generally found in groups. And each of them has limited displacement and does not connect with the main detachment. After the geological survey in the East Qiulitage anticline zone, we find that the secondary faults accompanying fold scarps in this area are out-of-syncline thrusts and also give an instance of secondary faults occurring later than the folding. The fact that the secondary faults in fold scarps force the hanging wall to move upward relative to the footwall not only makes the terrace tilting and increases the slope of fold scarps, but also affects the authenticity in calculating regional shortening increment. The theoretical results show that if we do not consider the increased fold scarps height influenced by the secondary faults, the shortening increment is 51.42m. Otherwise, the value will be 45.23m and the difference between them is 6.19m. Because the deviation is 13.7% of the total shortening increment, the contributions of fold-accommodation faults to the calculation should not be ignored. The fold scarps in the northern and southern flanks of the East Qiulitage anticline depend on same bedrock type and formation mechanism. But three levels of fold scarps were found in the cross section of less than 300 meters in horizontal distance. This fact indicates that the active kink band of northern part is more closed because of higher compressive stress and faster lifting, which produce a large number of secondary faults in the fold scarps only in the northern flank. Therefore, the study of secondary faults is of significance in understanding of regional tectonic evolution and interaction between folds and faults. But there still exist many problems: 1) Limited by the observing scope, discontinuous distribution of secondary faults and variations of displacement along fault, we may underestimate the influence of secondary faults and the theoretical result should be the minimum. 2) What is the quantitative relationship among the increased height of fold scarps, the transfer slip and the dip of secondary faults? 3) If secondary faults only grow in active kink band, how will they affect fold scarp? More examples of fold-accommodation faults are needed for further research.

Key words fold-accommodation fault, fold scarp, shortening, East Qiulitage anticline

[作者简介] 张玲,女,1986年生,2010年于合肥工业大学资源勘查工程系获得学士学位,现为中国地震局地质研究所在读博士生,主要从事活动构造学研究,E-mail: zhangling4255@126.com。