

天山北麓活动背斜带的变形特征*

吕红华^① 李有利^②

(^①同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092; ^②北京大学城市与环境学院地表过程与模拟教育部重点实验室,北京 100871)

摘要 天山中段北麓发育有3排受逆断裂控制的背斜带,对这些构造带的研究有助于认识天山及其前陆盆地晚新生代构造变形的机理。基于地层变形分析,并结合前人的研究成果,从整体上探讨了这3排构造带的变形时间与基本模式。分析表明,天山北麓第Ⅰ排构造带的托斯台背斜自中新世褶皱作用明显;第Ⅱ排构造带吐谷鲁背斜于约6.0Ma开始生长,伴随发育同构造沉积即生长地层;第Ⅲ排构造带独山子背斜发育时间应晚于约2.6Ma。这一变形时间序列揭示天山北麓3排逆断裂-褶皱带的构造变形具有向前陆盆地逐步扩展的特征,并伴随产生幅度不等的地壳缩短。天山北麓约8~15km的地壳缩短总量表明,晚新生代以来构造驱动沿约130km宽的山麓带是相对均一的。

主题词 活动褶皱 地壳缩短 构造迁移 晚新生代 天山北麓

中图分类号 P539.3, P546 **文献标识码** A

1 引言

发生于新生代早期的印度-欧亚板块碰撞是新生代地球演化过程中颇为壮观的一幕^[1,2]。板块汇聚所导致的挤压、隆升、逆冲以及走滑等地质作用造就了我国西部,甚至整个中亚地区的构造与地貌格局^[1]。伴随着新生代早期的印度-欧亚板块碰撞,天山成为了典型的大陆内部构造复活型造山带^[2,3]。在天山北麓,发育多列与天山主脉平行的受逆断裂控制的背斜带^[3],弄清这些构造带的变形特征对认识诸如天山的大陆内部造山带的构造变形机理^[1-5]具有重要意义。

自20世纪90年代以来,前人对天山北麓发育的活动背斜开展过大量研究^[6-25],尤其是通过分析河流阶地变形特征和构建平衡地质剖面,对这些活动构造的变形幅度与速率进行过许多有益探讨^[6-14,17,22]。但以前的研究多着眼于单个背斜的构造变形问题^[6-8,11-13,17,20-23,26,27],很少有研究^[9,14,24]将天山北麓的活动背斜带联系起来统一考虑,这也因此导致了对天山山麓带活动构造变形特征认识不足。笔者近年来对天山北麓的活动背斜与新生代地层开展过3次野外考察工作,目前已通过磁性地层研究为天山北麓吐谷鲁地区的晚新生代地层建立了

可靠的年代标尺^[25]。本文在我们已有工作的基础上,同时结合前人的研究成果,从整体上探讨天山北麓传统定义的3排逆断裂-褶皱带的变形特征。

2 地质背景

天山地区在中生代末期和新生代早期处于相对的构造平静状态^[28],伴随发育零星的浅海环境^[29]。古近纪时期的区域性侵蚀作用夷平了天山地区古生代与中生代地层^[30],导致中生代地层与新生代地层之间发育不整合^[9,28,29,31-33]。天山新生代构造复活是对印度-欧亚板块挤压碰撞作用的远程响应。作为天山地区南北向挤压缩短的直接结果,天山南北两麓发育多列与天山山体近似平行的逆断裂-背斜带^[3,5,14,34,35]。在天山中段北麓,3个传统定义的逆断裂-背斜带自山前向盆地依次为第Ⅰ排山麓背斜带、第Ⅱ排霍尔果斯-玛纳斯-吐谷鲁背斜带和第Ⅲ排独山子-哈拉安德-安集海背斜带(图1)。组成这些构造带的背斜均受逆断裂控制,多为断裂扩展褶皱作用的结果^[3]。除第Ⅰ排构造带背斜地层组成包括中生代、新生代地层外,其他构造带的背斜均仅卷入新生代地层(图1)。一系列南北流向的河流横切天山北麓这些构造带,为解析背斜构造及进行地层变形分析提供了露头条件良好的地层剖面。

第一作者简介:吕红华 男 32岁 博士后 新构造与构造地貌学专业 E-mail:lvhh2008@163.com

* 国家自然科学基金项目(批准号:40971001)和中国博士后科学基金项目(批准号:20090450727)资助

2009-12-10 收稿,2010-04-18 收修改稿

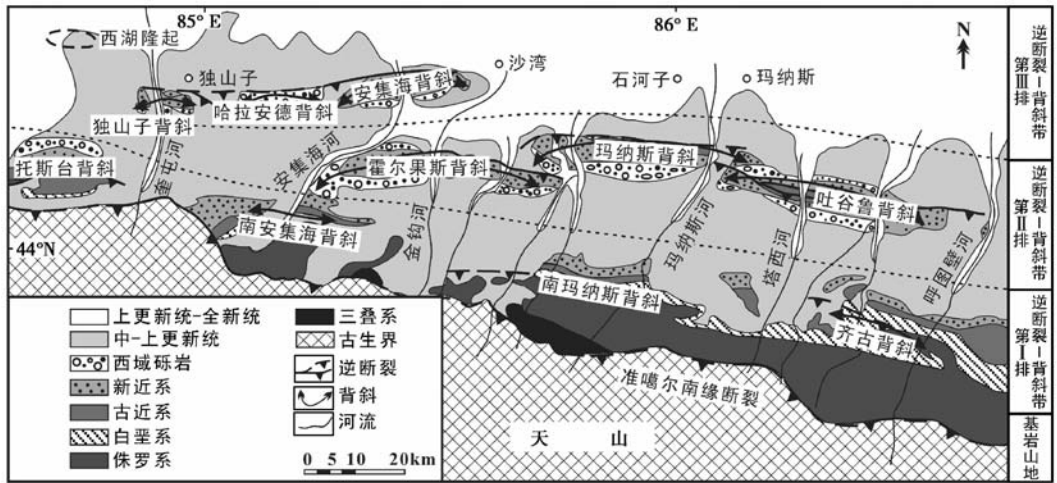


图1 天山北麓地质构造简图(据文献[6]改编)

Fig. 1 Simplified geological map of the north piedmont of the Central Tianshan Mountains(modified after reference [6])

3 生长地层及其识别标志

前陆盆地生长构造(如逆断裂相关褶皱)翼部或顶部常发育与构造活动同期的沉积地层,即生长地层^[36]。在构造横剖面上,背斜翼部发育的生长地层常具有楔状的几何形态,即从背斜脊至向斜轴,地层倾角逐渐变缓,地层厚度逐渐增厚^[36,37]。相对于生长地层,前生长地层则是指构造变形前的地层。与生长地层伴生并具有时代与构造含义的是生长不整合,作为一种同构造渐进不整合,其并不意味着沉积间断^[37]。在生长地层发育过程中,构造活动将使前生长地层发生同等程度的变形,同时在生长地层中形成不整合面,随着构造变形的持续进行,这种不整合面可能会形成多个并构成层次关系。如果考虑到构造变形的期次和强弱,那么,这种生长不整合可能在一定程度上指示一次增强的构造变形,如褶皱生长^[38]。分析地震剖面及实测地层产状能提供关于生长地层发育的直接证据。通常,生长地层的识别标准主要包括生长褶皱翼部地层倾角变化、翼部同构造沉积楔状体、枢纽变化等^[36,38]。

4 3排活动背斜带的变形时序

天山北麓3排近东西向、平行排列的活动背斜带(图1)中发育的生长地层、翼部旋转与角度不整合记录着构造变形向前陆盆地迁移的过程。

托斯台背斜位于第I排构造带的西端(图1)。借助于横穿托斯台背斜与西湖隆起的地震剖面^[39],分析了组成托斯台背斜的地层的产状变化特征。地震剖面显示^[39],托斯台背斜侏罗系至古近系地层产状一致,地层厚度变化不大;而在该背斜北翼,中新统-更新统地层随着远离背斜脊,地层增厚、倾角变缓,呈明显的楔状几何形态(图2)。图2所示托斯台背斜地层产状的变化特征与生长地层一致^[36,37],表明该背斜北翼可能发育生长地层,其沉积开始于中新世。前人^[3]通常认为天山北麓第I排构造带形成于中生代末期,但托斯台背斜北翼发育的生长地层表明该背斜在中新世发生过强烈活动。随着背斜的进一步生长,同构造沉积地层开始累积变形,早期的地层变得更陡,导致在剖面中地层成楔状几何形态(图2)。根据变形的西域砾岩判断(图2),托斯台背斜晚新生代的构造变形可能至少持续到了西

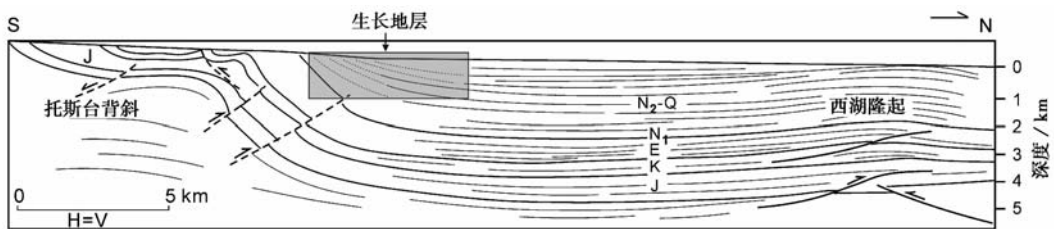


图2 横穿托斯台背斜与西湖隆起的地震剖面(据文献[39])

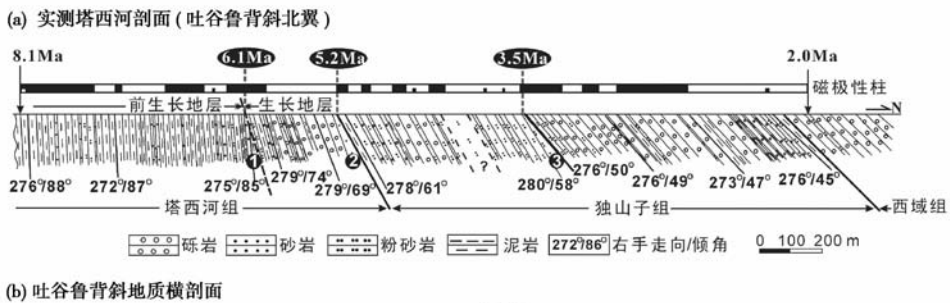
Fig. 2 Seismic profile through the Tuostai and Xihu anticlines(after reference [39])

域组沉积期(目前关于天山地区西域组沉积底界年龄的认识存在分歧^[21,34,35,40-43]。在托斯台背斜以北的独山子地区,基于磁性地层研究的西域组底界年龄约为 2.6Ma^[43,44]),但未变形的呼图壁河晚更新世阶地^[3]说明第 I 排构造带东端的齐古背斜自晚更新世以来构造上是不活动的。

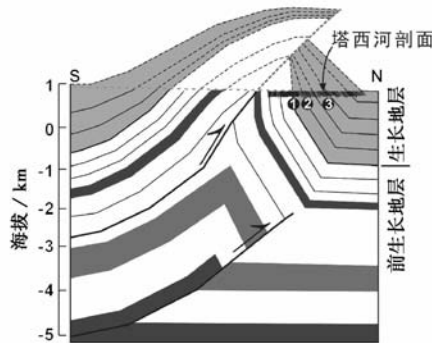
吐谷鲁背斜位于第 II 排构造带东端,该背斜中部为塔西河所切穿(图 1),产生了露头条件良好的地层剖面。笔者在 2006 年对位于吐谷鲁背斜北翼的塔西河剖面进行了系统的古地磁采样、测试与分析工作,确定了该剖面的磁性地层年代^[25],为吐谷鲁背斜的地层变形分析建立了可靠的时间标尺。实测塔西河剖面地层组成由老到新依次为塔西河组、独山子组和西域组(图 3a),各组厚度分别大致为 495m,520m 和 180m。根据野外观察和地层产状实测,塔西河剖面地层产状主要表现为以下 4 个方面的特征(图 3a): 1) 在接近背斜核部的层位,地层近于直立,而在远离背斜脊的层位即剖面顶部,地层倾角约为 40°(图 4); 2) 总体而言,剖面地层倾角向北逐渐变缓(图 4),至剖面顶部减小幅度约为 45°; 3) 剖面中地层倾角存在 3 次较大变化,第一次地层倾角减小 >10°,位于剖面深度约 840m 处; 另外两次地层倾角约 10°的减小分别位于剖面深度约

700m 和 400m 的层位; 4) 在横剖面上,实测地层成楔状几何形态(图 3)。考虑到吐谷鲁背斜为典型的断裂扩展褶皱^[3]以及生长地层的识别标志^[36,38],认为吐谷鲁背斜北翼发育同构造沉积即生长地层^[36,45](图 3b); 3 个地层倾角变化较大的层位被解释为生长不整合,其中第一个生长不整合指示生长地层沉积的开始(图 3)。磁性地层年代进一步限定生长地层开始沉积的时间约为 6.0Ma,此即吐谷鲁背斜开始生长的时间(图 3)。实测塔西河剖面上部的两个生长不整合可能指示褶皱生长的两次加速^[37],时间分别被确定约为 5.2Ma 和 3.5Ma(图 3a)。根据剖面地层倾角的变化特征(即塔西河剖面地层倾角自底部至顶部减小约 45°,见图 3a)推断,吐谷鲁背斜北翼一半的翼部旋转与地层缩短可能发生于约 2.0Ma 之后(图 3a),这说明吐谷鲁背斜的褶皱作用可能持续了至少约 4.0Ma。根据地层厚度判断,吐谷鲁背斜在 6.0Ma 开始生长之后,继续接受了大约 1km 的沉积(图 3a),这表明吐谷鲁地区在相当一段时间内,沉积速率可能大于背斜基岩的抬升速率。

独山子背斜位于第 III 排构造带西端,该背斜中部为塔西河所切穿(图 1)。为刻画独山子背斜地层产状的变化特征,笔者在 2007 年对位于独山子背



(a) 实测塔西河剖面(吐谷鲁背斜北翼)



(b) 吐谷鲁背斜地质横剖面

图 3 塔西河实测剖面和吐谷鲁背斜地质横剖面

(a) 实测塔西河剖面: “①”, “②”和“③”分别代表 3 个地层倾角变化较大的层位,被解释为生长不整合,其中第一个生长不整合代表生长地层沉积的开始,基于磁性地层研究,其时间被确定约为 6.0Ma

(b) 基于 Burchfiel 等^[14]的研究与实测塔西河剖面的吐谷鲁背斜地质横剖面

Fig. 3 Taxihe measured section(a) and geologic cross-section of the Tugulu anticline(b)

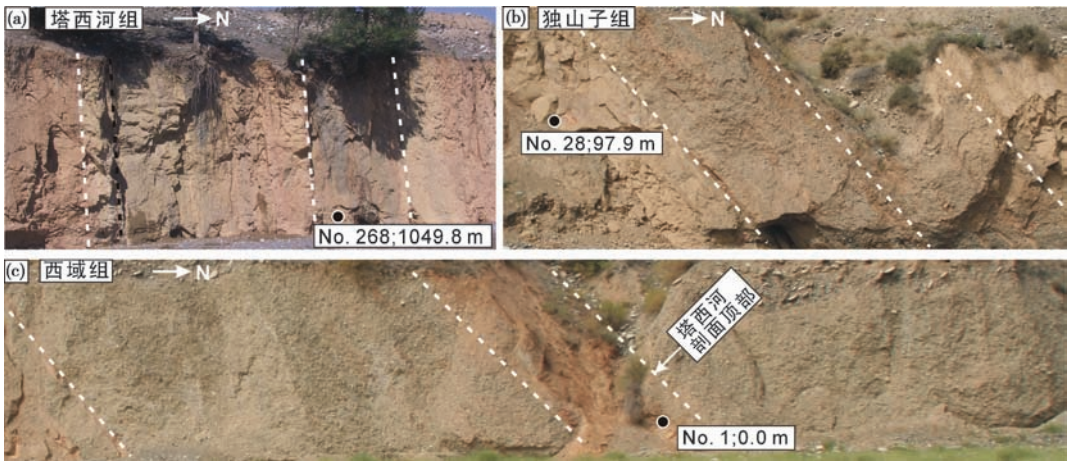


图4 塔西河剖面岩性

自剖面底部地层产状向北逐渐变缓; [No. 28; 97.9 m]代表古地磁样号及采样层的剖面深度

Fig. 4 Photos showing lithology in the Taxi He section

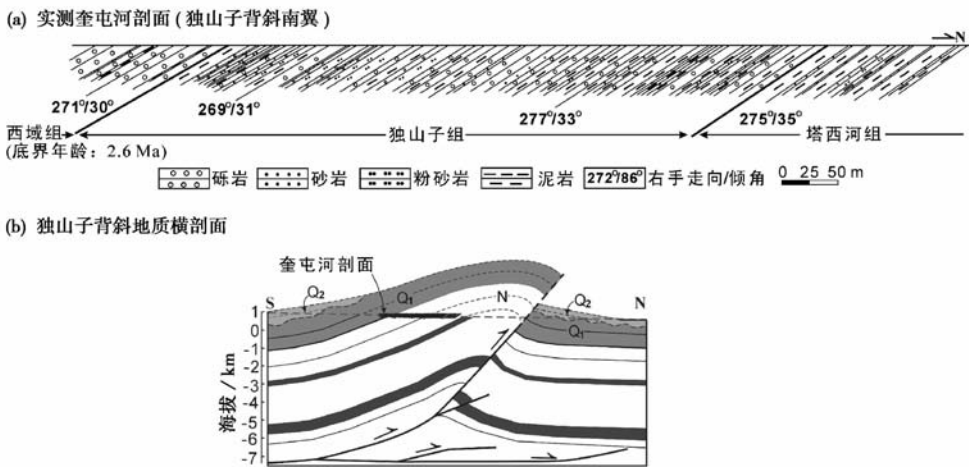


图5 奎屯河实测剖面和独山子背斜地质横剖面

(a) 实测奎屯河剖面, 剖面中西域砾岩的底界年龄约为 2.6 Ma^[44]

(b) 基于 Burchfiel 等^[14]的研究与实测奎屯河剖面的独山子背斜地质横剖面

Fig. 5 Kuitunhe section measured (a) and geologic cross-section of the Dushanzi anticline (b)

斜南翼的奎屯河剖面进行了实测(图 5a)。奎屯河剖面的地层组成主要包括新近系(N)与第四系(Q)地层(图 5a)。实测剖面显示,独山子背斜南翼新近系(N)-下更新统(Q₁)地层倾角约为 30°~35°(图 5a),地层产状未出现较大变化,地层接触关系为整合接触。但在下更新统(Q₁)与中更新统(Q₂)地层之间存在明显的角度不整合(图 5b),这说明独山子背斜在早更新世至中更新世的某个时期发生了强烈的褶皱变形^[3,24],或许这次褶皱作用直接导致了独山子背斜开始发育形成。根据 Sun 等^[43,44]在独山子地区开展的磁性地层研究,独山子地区西域砾岩的底界年龄约为 2.6 Ma(图 5a),这说明形成

独山子背斜的主要构造变形至少应该发生约在 2.6 Ma 之后。从地表起伏来看,相对第 II 排构造带,在时间上更晚发生的第 III 排构造带的构造活动也似乎导致了更小幅度的地壳缩短。

在传统定义的第 III 排构造带的北部,地震剖面^[39](图 2)和地表起伏揭示了一个新的、正在发育的背斜,即西湖隆起^[3]。西湖隆起约 10 m 级的地表起伏似乎说明该地区基底下沉和沉积作用超过了褶皱基岩的抬升过程。

5 活动背斜带构造变形的基本模式

天山中段北麓逆断裂-背斜带的变形时序说

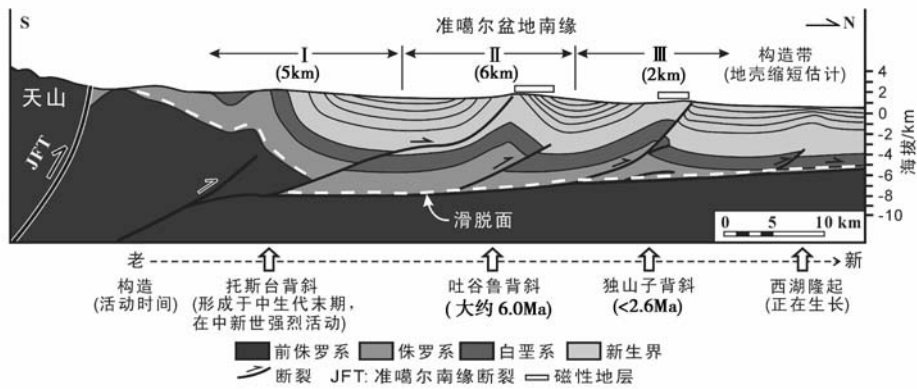


图6 天山北麓综合构造横剖面

中生代与新生代总的地层厚度大致为 7~12km (新生代地层厚度约 5km), 各构造带内断裂倾角约为 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ^[3]; 由下侏罗统页岩、泥岩和煤系地层组成的厚约 600m 的复合体构成了主要的滑脱面^[3]

Fig. 6 Generalized geological cross-section of the Northern Tianshan foreland, showing major thrust faults, detachments, and fault-and-fold zones

明,越靠近天山山体,构造变形的时间越老;向盆地方向,构造变形的起始时间越新(图2,图3和图5),这表明天山北麓活动背斜的构造变形呈阶段性迁移的趋势^[3,40](图6)。一些研究显示^[3,17,22,40],尽管晚新生代天山北麓活动构造带的变形呈向北迁移的特征,但沿构造带走向,各背斜的生长时间并不一致。对于第II排构造带,其东端的吐谷鲁背斜生长于约 6.0Ma^[40],但该构造带西端的霍尔果斯背斜开始生长变形的时间则要早约 2.0Ma^[17]。与之相似,第III排构造带西端的独山子背斜生长发育的时间可能晚于约 2.6Ma^[3,40],但其东端的安集海背斜的生长却要早大约 4.0Ma^[22]。出现这种现象的原因可能缘于不同背斜与盆山边界(准噶尔南缘断裂)的距离不同,或者存在于侏罗系底部的滑脱面^[3](图6)的活动存在走向(即东西向)上的变化。

随着构造变形向前陆盆地的迁移,天山北麓各构造带经历了幅度不等的地壳缩短^[3,10,12,14,22,23,46](表1)。对于第I排构造带的南玛纳斯背斜,由于未能获得地震剖面和实测地层产状等数据,故未能进行平衡地质剖面分析以估计该背斜的地壳缩短量。根据同处第I排构造带的托斯台背斜和齐古背斜等的地壳缩短量,尝试性地估计南玛纳斯背斜的地壳缩短量约为 5km。随着地质、地震数据的丰富,将来的研究应对这一估计予以修正。由于同一背斜的地壳缩短量沿其走向存在差异(通常是中间大、围斜小),因此,表1所示各背斜地壳缩短估计可能并不代表其最大的地壳缩短量,但这些地壳缩短估计(表1)能在一定程度上揭示天山北麓各构造带在

表1 天山北麓逆断裂-褶皱带地壳缩短估计

Table 1 Crustal shortening estimates of anticlines in the north piedmont of the Tianshan Mountains

逆断裂-背斜带	地壳缩短估计/km	参考文献
I	齐古背斜	6.2 [14]
	南玛纳斯背斜	5.5 [3]
	南安集海背斜	约 5 本研究
	托斯台背斜	>4.2 [3]
		约 4.6~5.0 [14]
II	吐谷鲁背斜	6.0 [12]
	玛纳斯背斜	5.5 [10,14]
	霍尔果斯背斜	约 6.5 [3]
		约 10 [23]
III	西湖隆起	约 0.5 [40]
	安集海背斜	1.5 [22,46]
	独山子背斜	2.9 [46]
	2.12~2.35 [10,14]	

空间上的构造变形特征与地壳缩短模式(图7)。

从各构造带来看,地壳缩短量沿构造带走向(即东西向)的分布差异明显。在第I排构造带,沿构造带走向各背斜地壳缩短量的分布似乎比较均匀,约为 4~6km。但在第II排与第III排构造带,地壳缩短沿构造带走向的分布则明显不同。在第II排逆断裂-褶皱带,相邻背斜的地壳缩短约为 6~10km,向西地壳缩短快速减小(图7)。在第III排构造带,西部的褶皱生长导致了约 1~3km 的地壳缩短量,但向东部,似乎没有褶皱等构造变形作用。从缩短估计来看,第III排构造带经历了最小幅度的构造变形。总体而言,天山北麓东西各段的地壳缩短总量为约 8~15km(图7)。这表明,自晚新生代以

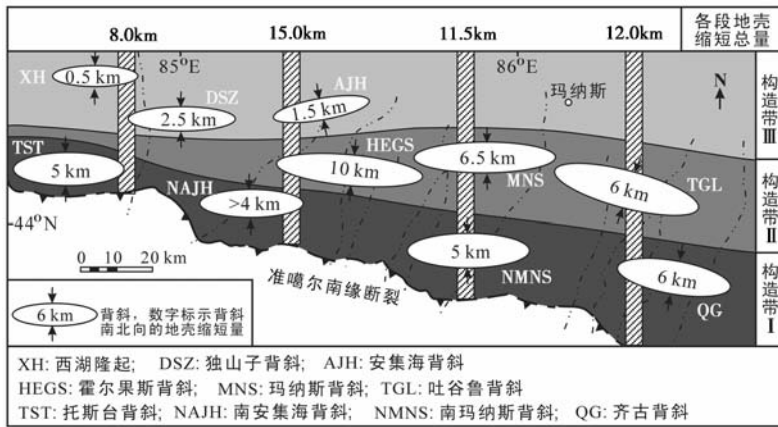


图7 天山北麓各背斜地壳缩短估计

数据来自表1

Fig. 7 Crustal shortening estimates of the Northern Tianshan foreland

来,构造驱动沿约130km宽的山麓带是相对均一的。地壳缩短变形主要发生在近源构造带(第I排逆断裂-褶皱带)还是发生在相对远源的构造带(第III排逆断裂-褶皱带),可能取决于存在于侏罗系底部的滑脱面^[3](图6)的活动沿走向(即东西向)如何变化,以及在二叠系和更老基岩中的先成构造是否在新近纪复活。

6 讨论与初步认识

以挤压缩短为主要特征的天山新生代构造变形^[1,9,14],使得天山中段北麓发育多列活动背斜(图1)。这些背斜构造带与天山山脉近似平行排列(图1),认识它们的变形规律(变形时间、幅度与模式),有助于理解天山造山带的构造变形机理。本文基于已有研究,对天山北麓活动构造带的变形时间与基本模式进行了较深入分析。尽管通常认为天山北麓第I排构造带的背斜如齐古背斜形成于中生代末期^[3],但对地震剖面^[39]的分析揭示同一构造带的托斯台背斜在中新世曾发生过较为强烈的构造活动,伴随发育同构造沉积即生长地层。实测塔西河剖面的地层产状变化特征表明,第II排构造带东端的吐谷鲁背斜北翼发育同构造沉积即生长地层,磁性地层年代限定生长地层开始沉积的时间约6.0Ma,这表明吐谷鲁背斜于此时开始生长。根据角度不整合^[3]和Sun等^[44]的磁性地层研究,认为第III排构造带独山子背斜的变形起始时间不早于约2.6Ma。这一构造变形的时间序列揭示出天山北麓晚新生代构造变形具有向前陆盆地呈阶段性迁移的特征,与之伴随的是各构造带幅度不等的地壳缩短。

天山中段北麓东西各段约8~15km的地壳缩短总量说明,沿约130km宽的山麓带的构造驱动是相对均一的。构造带间或构造带内各背斜地壳缩短量的差异可能取决于基底断裂活动沿走向(东西向)和纵向(南北向)如何变化,以及近源构造带内先成构造是否在新近纪复活。

目前,前人^[19-23,40]通过磁性地层研究,对天山北麓第II排、第III排活动褶皱带背斜变形起始时间等方面进行了较深入的分析,但对第I排褶皱带关注不够。基于地层接触关系(即角度不整合),前人^[3,14,24]对第I排构造带(见图1)背斜变形起始时间进行了初步探讨,由于未能进行年代学研究以控制构成背斜的地层的时代,相关结论就有待更加精确的地层年代数据予以修正。因此,尽管目前已经对天山北麓背斜的地壳缩短量进行了较好地估计(见表1和图7),但由于对背斜的生长时间控制不足,从而并不能进一步分析所有背斜的变形速率。对于第II排构造带的吐谷鲁背斜,根据约6.0Ma的背斜生长时间(见图3)及大致5.5~6.0km的地壳缩短量^[12,14],计算得到该背斜的长期平均缩短速率大致为0.9~1.0mm/a,这与王胜利等^[17]基于翼旋转方式生长理论分析得到的霍尔果斯背斜约0.92mm/a的地壳缩短速率一致,但比Daëron等^[22]报道的第III排构造带的安集海背斜<0.4mm/a的长期缩短速率要快得多。Burchfiel等^[14]基于假定:天山地区西域砾岩沉积基本同时,其底界年龄约2.6Ma;构造变形发生在西域砾岩沉积之后的某个时间,他们对比分析了天山南北两麓活动背斜的地壳缩短速率。然而,目前的磁性地层研

究^[19,21,23,34,35,41~44,47,48]表明,关于天山地区西域砾岩沉积底界年龄的认识还存在争议,而且不同构造带背斜生长的起始时间并不一致^[3,17,21~23,40]。因此,Burchfiel 等^[14]关于天山南北麓背斜构造地壳缩短速率的结论可能有待修正。更好地理解天山地区,特别是南北两麓地壳缩短变形规律(尤其是缩短速率),需要更多的年代学研究来限定活动构造变形的时间。

致谢 野外工作得到西南大学的刘运明博士,北京大学的司苏沛、赵洪壮、钱蟒等的协助,评审专家和编辑的建设性建议提升了论文的质量,在此一并表示感谢!

参考文献 (References)

- 张培震,邓起东,杨晓平等. 天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题. *中国地震*,1996,**12**(2):127~140
Zhang Peizhen, Deng Qidong, Yang Xiaoping *et al.* Late Cenozoic tectonic deformation and mechanism along the Tianshan Mountain, North Western China. *Earthquake Research in China*,1996,**12**(2):127~140
- 张培震. 天山及其前陆盆地的晚新生代构造变形. *科学通报*,2003,**48**(24):2499~2500
Zhang Peizhen. Late Cenozoic tectonic deformation in the Tianshan Mountain and its foreland basins. *Chinese Science Bulletin*,2004,**49**(4):311~313
- 邓起东,冯先岳,张培震等. 天山活动构造. 北京:地震出版社,2000. 339
Deng Qidong, Feng Xianyue, Zhang Peizhen *et al.* Active Tectonics of the Tian Shan Mountains. Beijing: Seismology Press,2000. 399
- 陈杰, Wyrwoll K H, 卢演涛等. 祁连山北缘玉门砾岩的磁性地层年代与褶皱过程. *第四纪研究*,2006,**26**(1):20~31
Chen Jie, Wyrwoll K H, Lu Yanchou *et al.* Magnetochronology of the Yumen conglomerates and multi-pulsed folding and thrusting in the northern Qilianshan. *Quaternary Sciences*,2006,**26**(1):20~31
- 陈杰,卢演涛,丁国瑜. 塔里木西缘晚新生代造山过程的记录-磨拉石建造及生长地层和生长不整合. *第四纪研究*,2001,**21**(6):528~539
Chen Jie, Lu Yanchou, Ding Guoyu. Records of Late Cenozoic mountain building in Western Tarim Basin: Molasses, growth strata and growth unconformity. *Quaternary Sciences*,2001,**21**(6):528~539
- 张培震,邓起东,徐锡伟等. 天山北麓玛纳斯活动逆断裂-褶皱带的变形特征与构造演化. 见:活动断裂研究编辑委员会编. *活动断裂研究*(3). 北京:地震出版社,1994. 18~32
Zhang Peizhen, Deng Qidong, Xu Xiwei *et al.* Tectonic deformation, crustal shortening, and slip rate estimation along the Manas reverse fault-fold zone in the north flank of the Tian Shan Mountains. In: Committee of the Research of Active Fault ed. *Research of Active Fault*(3). Beijing: Seismology Press,1994. 18~32
- 李军,冯先岳,陈杰等. 霍尔果斯活动逆断裂-褶皱构造研究. 见:活动断裂研究编辑委员会编. *活动断裂研究*(2). 北京:地震出版社,1992. 105~116
Li Jun, Feng Xianyue, Chen Jie *et al.* Thrusting and folding of Huoerguos anticline in Xinjiang. In: Committee of the Research of Active Fault ed. *Research of Active Fault*(2). Beijing: Seismology Press,1992. 105~116
- 徐锡伟,邓起东,张培震等. 新疆玛纳斯-霍尔果斯逆断裂-褶皱带河流阶地的变形及其构造含义. 见:活动断裂研究编辑委员会编. *活动断裂研究*(2). 北京:地震出版社,1992. 117~127
Xu Xiwei, Deng Qidong, Zhang Peizhen *et al.* Deformation of river terraces across the Manas-Huoerguos reverse fault and fold zone and its neotectonic implication in Xinjiang. In: Committee of the Research of Active Fault ed. *Research of Active Fault*(2). Beijing: Seismology Press,1992. 117~127
- Avouac J-P, Tapponnier P, Bai M *et al.* Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *Journal of Geophysical Research*,1993,**98**(B4):6755~6804
- Molnar P, Brown E T, Burchfiel B C *et al.* Quaternary climate change and the formation of river terraces across growing anticlines on the north flank of the Tien Shan, China. *The Journal of Geology*,1994,**102**:583~602
- 杨晓平,邓起东,张培震等. 利用阶地变形数据研究北天山吐鲁鲁逆断裂-背斜带晚更新世以来的褶皱变形特征. 见:活动断裂研究编辑委员会编. *活动断裂研究*(4). 北京:地震出版社,1995. 46~62
Yang Xiaoping, Deng Qidong, Zhang Peizhen *et al.* Fold deformation along the Tugulu reverse fault-fold zone since Late Pleistocene, North Tianshan. In: Committee of the Research of Active Fault ed. *Research of Active Fault*(4). Beijing: Seismology Press,1995. 46~62
- 杨晓平,邓起东,冯先岳. 北天山吐鲁鲁活动逆断裂-背斜几何学运动学特征研究. 见:活动断裂研究编辑委员会编. *活动断裂研究*(5). 北京:地震出版社,1996. 42~53
Yang Xiaoping, Deng Qidong, Feng Xianyue. Research on geometry, kinematics of Tugulu active reverse fault-fold in the north flank of the Tian Shan Mountains. In: Committee of the Research of Active Fault ed. *Research of Active Fault*(5). Beijing: Seismology Press,1996. 42~53
- 杨晓平,邓起东. 新疆独山子背斜的断裂扩展褶皱作用. 见:活动断裂研究编辑委员会编. *活动断裂研究*(3). 北京:地震出版社,1998. 66~73
Yang Xiaoping, Deng Qidong. The fault-propagation folding of the Dushanzi anticline, Northern Tianshan, Xinjiang. In: Committee of the Research of Active Fault ed. *Research of Active Fault*(3). Beijing: Seismology Press,1998. 66~73
- Burchfiel B, Brown E, Deng Qidong *et al.* Crustal shortening on the margins of the Tien Shan, Xinjiang, China. *International Geology Review*,1999,**41**(8):665~700
- 方世虎,贾承造,郭召杰等. 准噶尔盆地南缘前陆冲断带形成时

- 间的初步厘定. 地学前缘, 2005, **12**(3): 66
- Fang Shihu, Jia Chengzao, Guo Zhaojie *et al.* Ages of the foreland thrust-fault belts along southern edge of Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 2005, **12**(3): 66
- 16 郭召杰, 方世虎, 张 锐等. 生长地层及其在判断天山北缘前陆冲断褶皱带形成时间上的应用. 石油与天然气地质, 2006, **27**(4): 475 ~ 481
- Guo Zhaojie, Fang Shihu, Zhang Rui *et al.* Growth strata and their application in timing deformation of foreland thrust-fold belts in the north margin of Tianshan. *Oil & Gas Geology*, 2006, **27**(4): 475 ~ 481
- 17 王胜利, Chen Yan, 卢华复. 天山北麓霍尔果斯背斜晚中新世以来翼旋转方式的生长. 科学通报, 2008, **53**(12): 1414 ~ 1421
- Wang Shengli, Chen Yan, Lu Huaifu. Growth of the Huoerguosi anticline (North Tianshan Mountains) by limb rotation since Late Miocene. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(19): 3028 ~ 3036
- 18 Charreau J, Sun Jimin, Chen Yan *et al.* Addendum to "Late Cenozoic magnetochronology and paleoenvironmental changes in the northern foreland basin of the Tian Shan Mountains" by Jimin Sun, Qinghai Xu, and Baochun Huang. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: B06103, doi: 10.1029/2007JB005489
- 19 Charreau J, Chen Yan, Gilder S *et al.* Neogene uplift of the Tian Shan Mountains observed in the magnetic record of the Jingou River section (North West China). *Tectonics*, 2009, **28**(2): TC2008, doi: 10.1029/2007TC002137
- 20 Ji Junliang, Luo Pan, White P *et al.* Episodic uplift of the Tianshan Mountains since the Late Oligocene constrained by magnetostratigraphy of the Jingou River section, in the southern margin of the Junggar Basin, China. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(B5): B05102, doi: 10.1029/2007JB005064
- 21 Sun Jimin, Zhang Zhenqing. Syntectonic growth strata and implications for Late Cenozoic tectonic uplift in the Northern Tian Shan, China. *Tectonophysics*, 2009, **463**: 60 ~ 68
- 22 Daëron M, Avouac J-P, Charreau J. Modeling the shortening history of a fault tip fold using structural and geomorphic records of deformation. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: B03S13, doi: 10.1029/2006JB004460
- 23 Charreau J, Avouac J-P, Chen Yan *et al.* Miocene to present kinematics of fault-bend folding across the Huoerguosi anticline, Northern Tianshan (China), derived from structural, seismic, and magnetostratigraphic data. *Geology*, 2008, **36**(11): 871 ~ 874
- 24 Fu Bihong, Lin Aiming, Kano K-I *et al.* Quaternary folding of the eastern Tian Shan, North West China. *Tectonophysics*, 2003, **369**: 79 ~ 101
- 25 吕红华, 李有利, 刘运明等. 新疆塔西河地区 8Ma 以来沉积环境演化及其构造意义. 第四纪研究, 2008, **28**(2): 243 ~ 252
- Lü Honghua, Li Youli, Liu Yunming *et al.* Sedimentary environment evolution since 8MaB. P. in the Taxihe area, Xingjiang, North West China and its tectonic significance. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(2): 243 ~ 252
- 26 史兴民, 杨景春, 李有利等. 天山北麓玛纳斯河河流阶地变形与新构造运动. 北京大学学报(自然科学版), 2004, **40**(6): 971 ~ 978
- Shi Xingmin, Yang Jingchun, Li Youli *et al.* Deformation of Manas River terraces and Neotectonics in northern front of the Tianshan Mountains. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2004, **40**(6): 971 ~ 978
- 27 袁庆东, 郭召杰, 张志诚等. 天山北缘河流阶地形成及构造变形定量分析. 地质学报, 2006, **80**(2): 210 ~ 216
- Yuan Qingdong, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng *et al.* The Late Cenozoic deformation of terraces on the north flank of the Tianshan Mt. and the tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica*, 2006, **80**(2): 210 ~ 216
- 28 Bullen M E, Burbank D W, Garver J I *et al.* Late Cenozoic tectonic evolution of the north Western Tien Shan: New age estimates for the initiation of mountain building. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, **113**(12): 1544 ~ 1559
- 29 Allen M B, Windley B F, Chi Zheng *et al.* Basin evolution within and adjacent to the Tien Shan Range, NW China. *Journal of the Geological Society*, 1991, **148**: 369 ~ 378
- 30 Abdрахmatov K Y, Weldon R J, Thompson S C *et al.* Onset, style and current rate of shortening in the Central Tien Shan, Kyrgyz Republic. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, **42**: 1585 ~ 1609
- 31 Bullen M E, Burbank D W, Garver J. Building the northern Tien Shan: Integrated thermal, structural, and topographic constraints. *Journal of Geology*, 2003, **111**: 149 ~ 165
- 32 Sobel E R, Oskin M, Burbank D *et al.* Exhumation of basement-cored uplifts: Example of the Kyrgyz Range quantified with apatite fission track thermochronology. *Tectonics*, 2006, **25**: TC2008, doi: 10.1029/2005TC001809
- 33 Windley B F, Allen M B, Zhang C *et al.* Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, Central Asia. *Geology*, 1990, **18**: 128 ~ 131
- 34 Chen Jie, Burbank D W, Scharer K M *et al.* Magnetochronology of the Upper Cenozoic strata in the South Western Chinese Tian Shan: Rates of Pleistocene folding and thrusting. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **195**: 113 ~ 130
- 35 Chen Jie, Heermance R, Burbank D W *et al.* Quantification of growth and lateral propagation of the Kashi anticline, South West Chinese Tian Shan. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: B03S16, doi: 10.1029/2006JB004345
- 36 Suppe J, Chou G T, Hook S C. Rate of folding and faulting determined from growth strata. In: McClay K R ed. Thrust Tectonics. New York: Chapman & Hill, 1992. 105 ~ 122
- 37 Poblet J, McClay K, Storti F *et al.* Geometries of syntectonic sediments associated with single-layer detachment folds. *Journal of Structural Geology*, 1997, **19**(3 ~ 4): 369 ~ 381
- 38 张广良, 张培震, 闵 伟等. 逆冲-褶皱造山过程中生长地层的识别及应用. 地震地质, 2006, **28**(2): 299 ~ 311
- Zhang Guangliang, Zhang Peizhen, Min Wei *et al.* The identification and application of growth strata linked to the foreland fold-and-thrust belt during mountain building. *Seismology and Geology*, 2006, **28**(2): 299 ~ 311
- 39 许春明, 贺晓苏, 吴晓智等. 准噶尔盆地托斯台地区构造分析及

- 油气勘探前景. 新疆石油地质, 1992, **13**(3):197~205
- Xu Chunming, He Xiaosu, Wu Xiaozhi *et al.* Structure analysis and petroleum exploration prospect of Tostai area in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1992, **13**(3):197~205
- 40 Lu Honghua, Burbank D W, Li Youli *et al.* Late Cenozoic structural and stratigraphic evolution of the northern Chinese Tian Shan foreland. *Basin Research*, 2009, **22**(3):249~269, doi: 10.1111/j.1365~2117.2009.00412
- 41 Heermance R V, Chen Jie, Burbank D W *et al.* Chronology and tectonic controls of Late Tertiary deposition in the south Western Tian Shan foreland, NW China. *Basin Research*, 2007, **19**:599~632
- 42 陈杰, Heermance R V, Burbank D W *et al.* 中国西南天山西域砾岩的磁性地层年代与地质意义. 第四纪研究, 2007, **27**(4):576~578
- Chen Jie, Heermance R V, Burbank D W *et al.* Magnetostratigraphy and its implications of the Xiyu conglomerate in the south Western Chinese Tian Shan foreland. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(4):576~578
- 43 Sun J M, Zhu R X, Bowler J. Timing of the Tianshan Mountains uplift constrained by magnetostratigraphic analysis of molasses deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, **219**:239~253
- 44 Sun Jimin, Xu Qinghai, Huang Baochun. Late Cenozoic magnetostratigraphy and paleoenvironmental changes in the northern foreland basin of the Tian Shan Mountains. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: B04107.1~B04107.14, doi: 10.1029/2006JB004653
- 45 Rafini S, Mercier E. Forward modelling of foreland basins progressive unconformities. *Sedimentary Geology*, 2002, **146**(1~2):75~89
- 46 邓起东, 冯先岳, 尤惠川等. 新疆独山子-安集海活动逆断裂-褶皱带的变形特征及其形成机制. 见: 活活动断裂研究编辑委员会编. 活动断裂研究(1). 北京: 地震出版社, 1991. 17~36
- Deng Qidong, Feng Xianyue, You Huichuan *et al.* Characteristics and mechanism of deformation along the Dushanzi-Anjihai active reverse fault and fold zone, Xinjiang. In: Committee of the Research of Active Fault ed. *Research of Active Fault*(1). Beijing: Seismology Press, 1991. 17~36
- 47 Charreau J, Chen Yan, Gilder S *et al.* Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Neogene Kuitun He section (North West China): Implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan mountains. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **230**:177~192
- 48 孙继敏, 朱日祥. 天山北麓晚新生代沉积及其新构造与古环境指示意义. 第四纪研究, 2006, **26**(1):14~19
- Sun Jimin, Zhu Rixiang. Cenozoic deposits in the northern Tianshan Mountains and its implications for neotectonics and environmental changes. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(1):14~19

TECTONIC DEFORMATION OF ACTIVE FAULT-RELATED FOLD BELTS IN THE NORTH PIEDMONT OF THE CENTRAL TIANSHAN MOUNTAINS, NW CHINA

Lü Honghua^① Li Youli^②

(①State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092;

②Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

In the north piedmont of the Tianshan Mountains, there are three sub-parallel reverse fault-controlled fold belts. They are products of Late Cenozoic tectonic deformation. In fold belt I, the Tuositai anticline is a typical structure we studied. It has risen since the Miocene, although it sprouted in the Late Mesozoic. In fold belt II, we studied the Tugulu anticline. It began deforming in about 6.0Ma, accompanied with syntectonic deposition. and then experienced two times of obvious deformation, respectively in 5.2Ma and 3.5Ma. In fold belt III, the Dushanzi anticline was studied. It should began deforming after about 2.6Ma because Neogene-Pleistocene strata were folded. That the Middle Pleistocene strata unconformably overlie the Lower Pleistocene Xiyu conglomerate indicates that its significant deformation should be in Early to Middle Pleistocene. The deformation sequence of these Late Cenozoic anticlines shows that tectonic deformation has progressively migrated northward. At the same time, a significant crustal shortening occurred in the north piedmont of the Tianshan Mountains. It was estimated that the total magnitude of shortening there should range from 8km to 15km.

Key words active fold, crustal shortening, tectonic migration, Late Cenozoic, north piedmont of the Tianshan Mountains