

doi:10.3799/dqkx.2010.029

# 基于 CORONA 像对的活动构造变形参数定量提取

陈宁华<sup>1</sup>, 汪新<sup>1</sup>, 陈汉林<sup>1</sup>, 杨树锋<sup>1</sup>, 唐涛<sup>2</sup>

1. 浙江大学地球科学系, 浙江杭州 310027

2. 中国石油川庆物探公司, 四川成都 610225

**摘要:** 为了高效提取活动构造研究的定量参数, 利用美国解密的 2 m 分辨率 CORONA KH-4B 卫星立体像对, 实现了在 JX4C 数字摄影测量系统的立体测图, 并通过影像匹配的方法建立数字高程模型 (DEM) 和数字正射影像 (DOM)。通过以上方法, 以南天山库车冲断褶皱带为例, 利用覆盖该区的影像, 识别由活动断层和活动褶皱造成的第四纪沉积物的变形, 提取地表变形参数, 结合地震资料和野外测量, 分析地表变形特征的深部构造机理。结果表明, 经过处理的 CORONA KH-4B 像对可以在数字摄影测量系统下矢量测图, 相对定向精度在 0.01 mm 左右, 绝对定向精度在 10 m 左右。测量精度能够满足活动构造定量分析所需。该方法在地势复杂、人迹罕至区域研究中更具优势。

**关键词:** CORONA 影像; 库车冲断褶皱带; 活动构造; 摄影测量; 遥感地质。

中图分类号: P627; TE19

文章编号: 1000-2383(2010)02-0283-08

收稿日期: 2009-07-24

## Quantitative Extraction of Deformation Parameters of Active Tectonics Based on CORONA Stereo Pairs

CHEN Ning-hua<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, CHEN Han-lin<sup>1</sup>, YANG Shu-feng<sup>1</sup>, TANG Tao<sup>2</sup>

1. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Chuangqing Geophysical Company of CNPC Ltd., Chengdu 610225, China

**Abstract:** In order to efficiently extract quantitative parameters in active tectonics research, JX4C digital photogrammetric system has been used to found stereo model based on CORONA KH-4B stereo pairs with 2 m resolution, which were declassified in 1995 by USA for scientific purpose. Meanwhile, large scale digital elevation model (DEM) and digital orthophoto mapping (DOM) have been formed. These processing techniques are applied in a case study of the Kuqa fold-and-thrust belt in southern Tianshan, China, to quantitatively analyze the Kumugeliemu active fault and the Qiulitage active fault-related folds, considering the seismic reflection profiles therein and data from field measurements. Results show that the CORONA stereo pairs can be used in JX4C digital photogrammetric system, and root mean square error (RMS) of relative orientation is about 0.01 mm, while absolute orientation is about 10 m. Some parameters for deformation of river terrace and fault and fold scarps are identified and measured, which are helpful to reveal the characters of active tectonics. The processing techniques are feasible and effective particularly in remote settings with complex topology and the measurement precision can meet the requirement for analysis of active tectonics.

**Key words:** CORONA satellite imagery; Kuqa fold-and-thrust belt; active tectonics; photogrammetry; remote sensing geology.

活动构造是指晚更新世以来一直在活动的各种构造, 主要是活动断裂和活动褶皱 (邓起东等, 2004)。由于受地质外力改造较小, 活动构造的地貌特征有利于定量分析和研究。目前研究的主要手段是在野外调查中定点测量受断层控制的微地貌。然

而野外测量在地势复杂、人迹罕至的区域非常困难。近几年随着计算机技术、传感器技术和 GIS 技术的发展, 遥感影像、数字高程模型 (DEM) 逐渐应用于活动构造地貌的调查和分析中 (范湘涛等, 2000; Hooper *et al.*, 2003; 邓起东等, 2004; Jordan *et*

al., 2005; 陈立春等, 2006), 并且结合地震反射剖面, 分析活动构造的成因、性质及活动时间(卢华复等, 1999; 邓起东等, 2000; 汪新等, 2001, 2002; Walker, 2006). 通过色调、构造形态、断层三角面以及水系揭示断层活动的影像信息, 从宏观上展现活动构造等地貌特征(陈立春等, 2006). 范湘涛等(2000)利用 30 m 分辨率的 TM 影像通过多光谱合成, 确定活动构造主要解译标志, 从宏观上研究活动构造展布, 提取构造地貌的线性特征. 但是由活动构造引起的微地貌(比如断层陡坎、抬升的冲—洪积扇、错断的河流阶地)的定量研究, 通过 TM 和 ETM 影像就难以实现(郑文俊等, 2002).

利用高精度遥感影像是快速定量获取地表构造信息的有效手段. 近期美国解密了冷战时期由美国间谍卫星拍摄的名为 CORONA 计划的影像. 该影像具有高分辨率、覆盖范围广和价格便宜的优势, 而且采用前视/后视摄影机立体扫描, 使该影像应用于数字摄影测量系统成为可能. 然而 CORONA 影像较大的全景变形和坐标信息的缺失限制了影像的广泛应用(Altmaier and Kany, 2002; Sohn *et al.*, 2004; 陈宁华等, 2007).

本文以南天山库车前陆冲断带为例, 通过对覆盖该区的 CORONA KH-4B 影像的研究和处理, 在 JX4C 数字摄影测量系统下进行矢量测图和空间分析, 并采用影像匹配的方法建立高精度数字高程模型(DEM). 利用 CORONA KH-4B 立体像对提取的

地表变形参数, 结合地震资料和野外调查, 分析研究区活动断层和活动褶皱引起的地表变形特征及深部构造响应.

### 1 地质背景

晚新生代, 印度板块与欧亚板块在喜马拉雅山地区碰撞后继续向北推挤使早期天山造山带再次快速隆升, 并不断向南北两侧逆掩推覆, 在盆山结合部形成多排活动逆断裂—褶皱带组成的薄皮构造, 南天山库车冲断带就是其一(卢华复等, 1999).

库车冲断带自北向南由山麓褶皱带、喀桑托开褶皱带、秋里塔格褶皱带和亚肯褶皱带构成(图 1a). 第 1 排山麓褶皱带由三叠系和侏罗系等地层组成, 海拔高程 2 200~2 300 m; 第 2 排喀桑托开褶皱带由白垩系和下第三系砂岩、泥岩组成, 海拔高程在 2 000 m 左右; 第 3 排秋里塔格褶皱带由第三系砂岩、泥岩和下更新统砾岩组成, 呈向南突的弧形山地, 海拔高程在 1 800~2 000 m; 拜城盆地位于第 2、3 排背斜山岭之间, 呈东西向展布, 长约 100 km, 宽约 20 km, 新生代沉积厚度达 5 000 m. 第 4 排亚肯褶皱带位于最南面, 地貌为低山丘陵, 高出戈壁平原 200~300 m, 该褶皱带是一个正在形成的活动背斜带(卢华复等, 1999; Hubert-Ferrafi *et al.*, 2007). 库车冲断带是南天山山前构造运动最强烈的地区之一, 历史上发生多次强破坏性地震, 晚第四纪沉积物

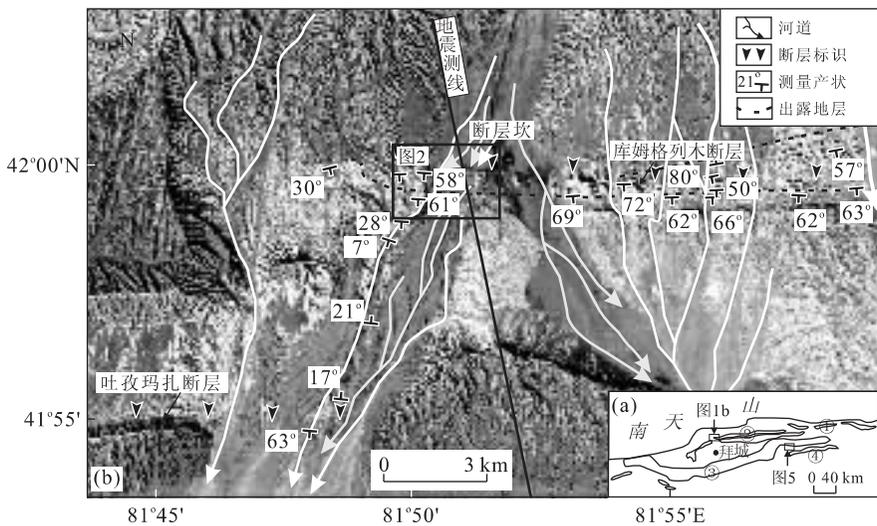


图 1 (a)南天山库车拗陷构造简图, 标识该区发育的 4 排冲断褶皱带; (b)CORONA 影像显示库姆格列木背斜西段河流冲—洪积扇和断层陡坎

Fig. 1 (a) Tectonics sketch of Kuqa area showing 4 fold-thrust belts; (b) CORONA imagery showing the alluvial fan and fault scarp in west of Kumugeliemu anticline

受到逆冲断裂作用和褶皱作用发生强烈变形,在地表留下了大量断层崖、褶皱崖等构造陡坎。柏美祥(1998)、邓起东等(2002)和吴传勇等(2006)利用年代学精确测量变形微地貌(河流阶地、冲—洪积扇等),对南天山不同地区活动构造的活动速率和地壳缩短速率进行了研究。

## 2 CORONA 影像的处理

本文利用的美国 CORONA KH-4B 影像,摄影焦距为 609.602 mm,最佳的地面分辨率为 1.83 m,立体角为 30°,采用全景摄影 217 km×16 km 条带状地面覆盖。研究使用覆盖库车冲断带的 14 幅 CORONA 影像共 7 对立体像对,影像获取时间是 1968 年 11 月 4 日及 1969 年 12 月 18 日,影像胶片的分辨率是 160 line/mm,扫描精度为 3 635 dpi。CORONA 系统由于采用全景摄影系统,因此会产生全景变形。经过扫描照片获得的影像需要通过数学算法来校正。然而由于当时没有 GPS 卫星定位系统,关于 CORONA 摄影系统的星历数据保密,目前现有的数字摄影测量系统都无法提供对该影像的支持,因此影像几何校正和立体模型的构建就显得非常困难。考虑到研究区条件和处理效率,在控制点(GCPs)缺少的区域,作者尝试采用经验的处理方法在 JX4C 数字摄影测量系统下测图并对结果进行了

精度评估。

当工作区处于星下点附近,影像变形最小,同时也是地面分辨率最佳的部位,可直接按照框幅式航片截取,进行立体观测。根据标志性地物选取的难易,裁剪尺寸一般控制在 20 mm×20 mm 至 55 mm×55 mm 之间为宜。将像主点设为零(即位于图像中心),基点为截取影像的四角点,截取像对位置和尺寸要一致,比例尺 1:247 500。由于卫星的飞行高度在 145 km,投影线很窄,像主点误差可以被忽略。JX4C 数字摄影测量包括内定向、相对定向、绝对定向等过程。由于 CORONA 影像不是标准的航空立体像对,因此采用自动相对定向的方法,匹配点较少,一般在 20 个左右,需要手动找更多的匹配点。相对定向的精度受匹配点的数量、分布及地形控制(图 2),通过调整残差较大的匹配点位置,增加匹配点数量,将中误差控制在较小范围,可获得更好的立体视觉效果。在绝对定向中,一般情况选取 3 个 GCPs,即可实现矢量测图。GCPs 的选取一般采用大比例的地形图和差分 GPS 实测,然而研究区偏远,标志明显的地物少,同名点的查找和选取非常困难,因此利用差分 GPS 难以取得比较好的效果。研究区可用的地形资料只有 20 世纪 60—70 年代航摄的 1:50 000 的地形图,由于 CORONA 影像摄于 1968 年和 1969 年,地形地貌改造较小,选择河流的分支端和山峰的高点等易识别点作为 GCPs,具较

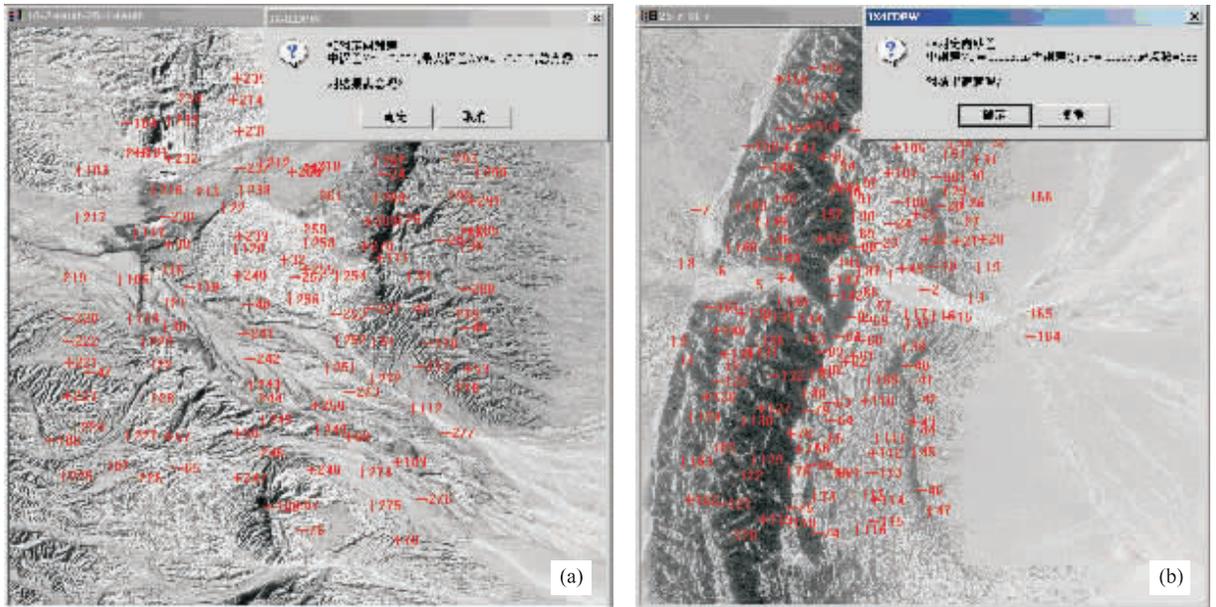


图 2 相对定向匹配点的分布及精度

Fig. 2 Accuracy and distribution of match points in relative orientation

a. 18~24 像对显示库姆格列木活动断层; b. 25~31 像对显示库车塔吾背斜南翼褶皱崖

表 1 相对定向和绝对定向精度

Table 1 Accuracy (RMS) of relative orientation and absolute orientation

像对 DS1105-1007	位置	相对定向				绝对定向			
		匹配 点数	中误差 (mm)	最大误差 (mm)	控制 点数	中误差(m)			
						$M_x$	$M_y$	$M_{xy}$	$M_z$
DF019-DA025	地势低缓区	122	0.006	0.013	3	0.606	1.004	1.173	0.030
DF025-A031	地势高陡区	155	0.003	0.007	4	10.162	8.245	13.086	3.444

注:  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ 、 $M_{xy}$  表示 JX4C 数字摄影测量系统根据样本在绝对定向中计算的不同方向的中误差值。

强可靠性。表 1 显示在地势较缓的库姆格列木活动断层区域和地势高陡的库车塔吾背斜活动褶皱区域, 相对定向精度可控制在 0.01 mm 左右, 且受地势影响较小; 绝对定向中选取 3 个 GCPs 可使中误差控制在 1 m 以内, 当超过 3 个 GCPs 中误差增至 10 m 左右, 这主要受 GCPs 精度影响。

在 JX4C 数字摄影测量系统下通过相对定向、核线重采样、绝对定向和矢量测图处理后, 根据需要可通过影像匹配方法生成 5~10 m 精度的 DEM, 精度取决于采样间隔和地形复杂程度。通过 DEM 生成不规则三角网 TIN, 从而进一步制作 2 m 分辨率的数字正射影像(DOM)。通过矢量测图可以测量断层陡坎等变形参数, 还可通过测量岩层面上 3 个点的空间坐标, 利用三点法计算岩层产状(陈宁华等, 2007)。

### 3 活动构造变形参数提取

南天山冲断带的活动断层和活动褶皱记录了由印度—欧亚板块碰撞导致天山造山带再次隆升的变形过程。下面通过喀桑托开褶皱带中的库姆格列木活动断裂和秋里塔格活动褶皱的研究, 说明利用 CORONA 立体像对获取活动构造变形参数的方法及其应用。

#### 3.1 断层崖(陡坎)的测量

断层崖(陡坎)的测量是活动构造定量研究中断层滑动速率计算的重要参数。滑动速率主要利用地貌面的总位移量除以累积时间来限定, 它反映一定时间内断层错动的平均速度及应变能的累积速率(Wallace, 1987; Schwartz, 1988; 柏美祥, 1998)。地貌面的位移量常常通过测量错断的河流阶地、抬升的冲—洪积扇来确定。利用大比例尺航片来测量断层的水平位错已得到广泛应用, 然而垂直位移量的获取通常需要野外构造测量, 或借助大比例尺地形图来获得。利用高分辨率的 CORONA 立体像对, 在立体镜下测图, 不但能从宏观上把握构造轮廓, 而

且可以直接测量断层的水平位移量和垂直位移量。

库姆格列木背斜位于喀桑托开褶皱带, 地表呈“梭状”, 东西长约 48 km, 南北宽约 5 km, 核部出露的最老地层为下白垩统舒善河组, 背斜两翼是下白垩统巴西盖组、巴什基奇克组和第三系库姆格列木组、苏维依组、吉迪克组、康村组、库车组。库姆格列木断裂带发育在库姆格列木背斜带上, 出露地表长约 50 km, 断层切背斜核部。图 1b CORONA 影像显示库姆格列木背斜西段背斜形态, 库姆格列木活动断层和吐孜玛扎活动断层在第四纪冲—洪积扇留下的线性痕迹在影像上清晰可见。在 JX4C 数字摄影测量系统下通过立体镜进行观察, 可直接解译和测量, 通过将 DOM 和 DEM 叠加, 还可以从不同视角进行构造地貌三维观察和分析。图 3a、图 3b 显示东西向延伸的库姆格列木活动断层横切第四纪冲积扇, 断层使冲积扇南侧明显抬升。在 DEM 上提取的地形剖面(图 3c)显示, 该断层陡坎最大高差 26 m, 陡坎向北倾斜, 坡角 32°。断层通过冲积扇形成的断层陡坎, 将原本连续的河道错断导致河道废弃。断层的水平位移不明显, 主要以垂向抬升为主。解译结果通过实地验证(图 3d), 测量垂直相对误差小于 1 m。

与地震反射资料(图 4)对比显示(位置见图 1), 该断层发育在深部库姆格列木背斜上, 盐层受挤压后, 盐体向上隆升, 地层发生焊接, 并形成相对错动, 南翼地层向北逆冲至地表。图 4 显示的冲至地表断层即为出露活动断层崖(陡坎)。发育在库姆格列木背斜北翼的生长地层揭示出: 古近纪盐活动时间较早, 盐上苏维依组沉积后不久便发育早期的盐底辟, 位置在库姆格列木背斜核部, 并一直活动, 形成了新近系康村、库车组地层相对较厚的翼部旋转生长地层模式。

#### 3.2 褶皱崖的测量

褶皱崖的测量是活动褶皱定量研究的重要参数之一。在活动褶皱生长发育过程中形成的河流阶地堆积、阶地面和褶皱崖记录了褶皱发育的详细过程(卢华复等, 2002; 陈杰等, 2005)。相对于活动断层,

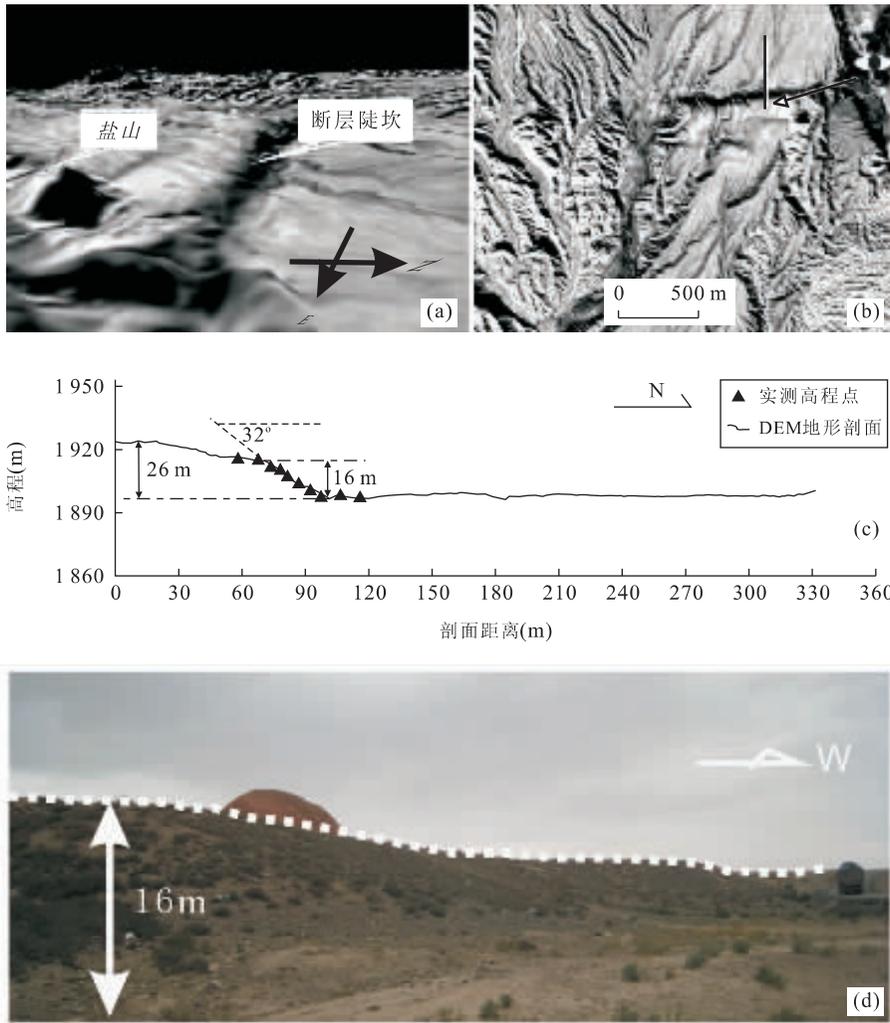


图 3 断层陡坎区的细节图(位置见图 1b 矩形区域)

Fig. 3 Detailed maps of the fault scarp which is indicated in Fig. 1b

a. CORONA 正射影像叠加到 DEM 生成的三维透视图显示断层崖和盐山的位置; b. CORONA 影像指示断层陡坎及图 a 的视点, 白线指示地形剖面图 c 的位置; c. DEM 提取的地形剖面以及与实际测量对比; d. 实地断层陡坎照片

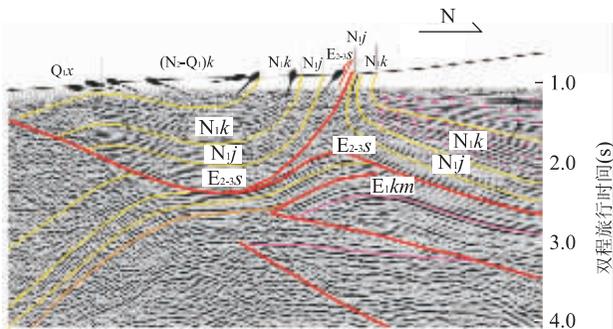


图 4 库姆格列木断裂带西段地震剖面

Fig. 4 Seismic reflection profile across the western segment of the Kumugeliemu fault belt

蝌蚪线表示地表地层倾角, 虚线表示背斜北翼生长地层, 箭头指示断层逆冲方向

活动褶皱在野外更难以识别和进行定量研究. 河流阶地和褶皱崖的细致测量, 可推断其下伏活动褶皱的生长变形机制; 同位素测年研究可以估算褶皱的隆升速率和控制褶皱生长的断层的滑动速率.

秋里塔格褶皱带位于南天山冲断带构造变形前缘, 长约 300 km, 宽约 20 km, 最大地形高差超过 1 km, 可分为东、西秋里塔格两个构造带. 东秋里塔格构造带由东秋里塔格背斜、库车塔吾背斜和托克拉克坦背斜组成; 西秋里塔格构造带由南秋里塔格背斜、北秋里塔格背斜、米斯坎塔克背斜、亚克里克背斜和东阿瓦特背斜组成. Suppe(1983)、Suppe *et al.* (1997)、卢华复等(2002)和陈杰(2005)等根据断层相关褶皱理论和与此相关的剥蚀、沉积和生长地层等概念, 合理解释了该区褶皱崖的成因和演化. Hu-

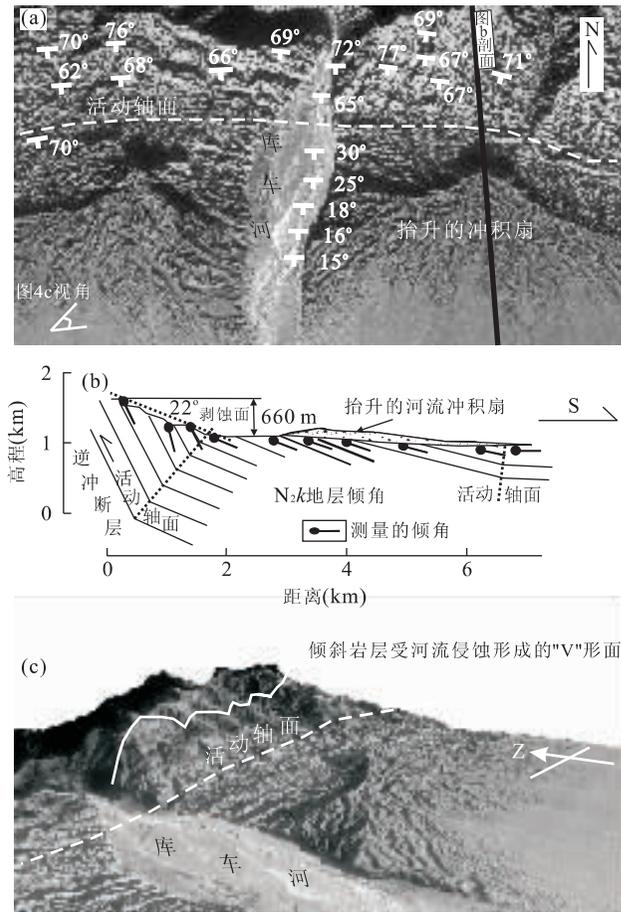


图 5 (a) CORONA 影像显示库车塔吾背斜南翼库车河处岩层出露特征; (b) 从 DEM 提取的地形剖面, 显示地表褶皱和深部构造的关系; (c) DOM 与 DEM 叠加生成的 3 维可视化, 显示抬升的河流冲积扇及出露的岩层三角面

Fig. 5 (a) CORONA imagery showing the character of beds in the south of Kuchetaw anticline; (b) topographic profile extracted in DEM showing the relation between surface fold and subsurface structure; (c) DOM draped over DEM showing uplifted alluvial fan and triangular facets

bert-Ferrafi *et al.* (2007) 通过南天山冲断带褶皱崖的研究得出了以下公式来反映剥蚀面的坡角与岩层倾角变化定量关系:

$$\cot(\delta_i - \delta_u) = [\sin^2 \gamma / \sin 2\gamma \sin^2(\gamma - \delta_o + \delta_u)] - \cot(\gamma - \delta_o + \delta_u), \quad \gamma = 90^\circ - (\delta - \delta_o) / 2,$$

式中:  $\delta_o$  为岩层初始倾角,  $\delta_u$  为不整合角度,  $\gamma$  为轴面倾角,  $\delta_i$  为剥蚀面角度,  $\delta$  为褶皱后的岩层倾角. 由于野外地质条件限制, 该公式中的某些定量参数往往不易获得. 例如, 在复杂地势和高陡岩层区域, 地震波的传播路径在横向和纵向变化剧烈, 地震剖面无法真实

反映岩层倾角的信息. 利用地表观测数据和相关地震解释模型, 用已知参数约束构造定量解释, 是了解地表活动构造特征与深部构造机理的有效方法. 基于 CORONA KH-4B 立体像对的数字摄影测量为这些参数的获取提供了简便易行的途径.

图 5a 显示秋里塔格褶皱带中段库车塔吾背斜南翼倾斜地层沿山脊走向东西向延伸, 受河流侵蚀, 出露的倾斜岩层呈“V”字形, 利用 CORONA 像对在数字摄影测量系统下确定“V”字形层面上 3 个点的空间坐标就可以计算出岩层的产状. 测量的产状弥补了地震剖面上高陡地层的反射“空白”, 帮助地震反射剖面的定量解释. 沿库车河(图 5a 显示位置)在 DEM 上提取地形剖面(图 5b). 剖面显示库车塔吾背斜南翼陡崖高差 660 m. 该陡崖东西向延伸, 构成了秋里塔格山脉的南缘. 山脉前缘的三角面陡崖通常被认为是正断层作用的结果, 然而地震资料和野外测量并未发现该处有断层通过迹象. 将测量的岩层产状投影到地形剖面发现, 在地形隆升处, 地层倾角由  $30^\circ$  突然增至  $65^\circ$ , 指示深部断层转折而引起断层滑移量的增大, 隆升速率的突变. 倾角变化位置指示了褶皱的活动轴面, 根据断层转折褶皱模型, 可确定深部断层的转折点.

在 CORONA 影像上可以清晰地观察到, 冲积扇上堆积的深灰色砾岩, 该砾岩上超于浅色的上新世库车组( $N_2k$ )地层上, 随深部断层滑动向北迁移, 在膝折带变形抬升, 倾角由水平增至  $10^\circ \sim 15^\circ$ , 反映该区地壳构造缩短延伸至第四纪晚期.

## 4 讨论

CORONA 影像是早期美国军事间谍卫星影像, 虽然具备了立体覆盖侦查的功能, 但是由于该影像的全景变形, 在数字摄影测量中很难达到航空立体像对的精度要求. 由于 CORONA 影像极高的性价比, 研究和评估该影像在地质定量调查的精度和适用条件具有现实意义.

校正 CORONA 影像的最好方法是建立严格的数学模型, 通过共线方程来进行. 但是由于缺乏星历参数, 模型的精度不仅受到 GCPs 精度的影响, 而且处理整幅影像又受到了计算机软件和硬件的限制, 因此从工作效率考虑, 没有在研究区域使用该方法. 有理函数模型(RFM)作为广义的传感器模型, 是解决星历参数未知条件下进行数字摄影测量的有效途

径(Tao and Hu, 2001; 陈宁华等, 2007),其校正精度要优于经验的方法。但该方法受 GCPs 数量和分布影响较大,而且具有不稳定性,在实际应用中有理函数的系数是通过 GCPs 经最小二乘法原理确定,导致有理函数的拟合曲面并不严格通过 GCPs,不真实代表地表的起伏。在人迹罕至、标志性地物缺少的地区,查找足够数量和精度保证的 GCPs 也极为困难。在数字摄影测量系统下观测经 RFM 方法校正的影像,整体构造地貌的视觉效果较好,但在细节上有时会出现河流逆流的错误地形特征,这在活动构造地貌分析中是不容忽视的。采用经验处理方法,整体地形有时会有倾斜,但这种错误是很容易被研究者根据经验判断,进行压平处理,不会出现微地貌的错误观测。虽然理论上通过增加 GCPs 数量可以提高绝对定向精度,但是由于获取足够数量精度保证的 GCPs 比较困难,在实际操作中,选取 3~4 个 GCPs 满足矢量测图精度需求即可。

在研究精度要求范围内,使用经验方法一方面满足了 JX4C 数字摄影测量系统对影像大小的限制,另一方面避免了受 GCPs 限制的大量繁杂的数据处理和计算。对于 CORONA KH-4B 影像资源丰富地区,选取处于影像中心的区域进行处理可减少影像变形的影响。野外验证显示,采用经验方法和较少的 GCPs,绝对定向精度虽然只能控制在 10 m 左右,但是相对误差很小,立体观测可以充分显示地表变形的细节特征,弥补地震反射资料的不足。

## 5 结论

(1)通过经验方法处理的 CORONA KH-4B 立体像对,可以在 JX4C 数字摄影测量系统进行立体建模且操作简便,相对定向精度在 0.01 mm 左右,绝对定向精度可控制在 10 m 左右。通过影像匹配的方法可制作大比例尺数字高程模型(DEM)和数字正射影像(DOM)。

(2)利用 CORONA KH-4B 高精度和立体覆盖的优势可以在南天山构造复杂区域开展快速有效的活动构造调查。通过立体镜下目视解译可以获取单一影像无法获取的三维信息,有利于微地貌的识别,并可通过矢量测图定量提取地表变形参数。利用 DEM 和 DOM 进行构造地貌和三维可视化分析,可弥补立体镜观测的局限性,有效地获取受活动断层或活动褶皱控制和改变的微地貌特征,其测量精度

能够满足活动构造研究所需。

(3)通过对地表留下的褶皱崖、断层崖等变形地貌的精细测量,结合高分辨率 CORONA 影像、地震资料和野外测量,可以帮助深入了解地表变形过程和深部构造的耦合。

## References

- Altmaier, A., Kany, C., 2002. Digital surface model generation from CORONA satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 56(4): 221—235. doi:10.1016/S0924-2716(02)00046-1
- Bai, M. X., 1998. Data of valley terraces in Xinjiang. *Inland Earthquake*, 12(1): 13—19 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Scharer, K. M., Burbank, D. W., et al., 2005. Kinematic models of fluvial terraces over active fault-related folds: constraints on the growth mechanism and kinematics. *Seismology and Geology*, 17(4): 513—529 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. C., Chen, G. H., Chen, L. Z., et al., 2006. ETM image characteristics and interpretation of active tectonics of the area around the Kalpingtag thrust system. *Seismology and Geology*, 28(2): 289—298 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. H., Wang, X., Yang, S. F., 2007. Quantitative extraction of shallow stratum information based on CORONA imagery. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 41(4): 662—667 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q. D., Chen, L. C., Ran, Y. K., 2004. Quantitative studies and applications of active tectonics. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 383—392 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q. D., Feng, X. Y., Zhang, P. Z., et al., 2000. Active tectonics in Tianshan. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Deng, Q. D., Zhang, P. Z., Ran, Y. K., et al., 2003. Basic characteristics of active tectonics of China. *Science in China (Series D)*, 46(4): 356—372.
- Fan, X. T., Lu, H. F., Guo, H. D., et al., 2000. Neotectonic analysis of the Kuqa foreland thrust belt by using remote sensing data. *Geological Review*, 46(5): 499—506 (in Chinese with English abstract).
- Hooper, D. M., Bursik, M. I., Webb, F. H., 2003. Application of high-resolution, interferometric DEMs to geomorphic studies of fault scarps, Fish Lake Valley, Nevada-California, USA. *Remote Sensing of Environment*,

- 84;255—267. doi:10.1016/S0034-4257(02)00110-4
- Hubert-Ferrafi, A., Suppe, J., Gonzalez-Mieres, R., et al., 2007. Mechanisms of active folding of the landscape (southern Tian Shan, China). *Journal of Geophysical Research*, 112 (B3), B03S09-1—B03S09-39. doi: 10.1029/2006JB004362
- Jordan, G., Meijninger, B. M. L., Hinsbergen, D. J. J., et al., 2005. Extraction of morphotectonic features from DEMs; development and applications for study areas in Hungary and NW Greece. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(3): 163—182. doi:10.1016/j.jag.2005.03.003
- Lu, H. F., Jia, D., Chen, C. M., et al., 1999. Nature and timing of the Kuqa Cenozoic structures. *Earth Science Frontiers*, 6 (4):215—221 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. F., Wang, S. L., Suppe, J., et al., 2002. Quaternary folding in the south piedmont of central segment of Tianshan mountains. *Chinese Science Bulletin*, 47(21): 1675—1679 (in Chinese).
- Schwartz, D. P., 1988. Geologic characterization of seismic sources; moving into the 1990s. *Geotechnical Special Publication*, 20; 1—42.
- Sohn, H. G., Kim, G. H., Yom, J. H., 2004. Mathematical modelling of historical reconnaissance CORONA KH-4B IMAGERY. *The Photogrammetric Record*, 19(105): 51—66. doi:10.1046/j.0031-868X.2003.00257.x
- Suppe, J., 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 283(7): 684—721.
- Suppe, J., Sabat, F., Munoz, J. A., et al., 1997. Bed-by-bed fold growth by kind-bend migration; sant Lorence de Morunys, eastern Paeness. *Journal of Structural Geology*, 19(3—4): 443—461. doi: 10.1016/S0191-8141(96)00103-4
- Tao, C. V., Hu, Y., 2001. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67 (12):1347—1357.
- Walker, R. T., 2006. A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman Province, S. E. Iran. *Journal of Structural Geology*, 28(4): 654—668. doi: 10.1016/j.jsg.2005.12.014
- Wallace, R. E., 1987. Grouping and migration of surface faulting and variations in slip rates on faults in the great basin province. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77(3): 868—876.
- Wang, X., Ferrafi, A. H., Suppe, J., 2001. Shortening rate since Late Pleistocene in Aksu area, southern flank of Tianshan, China. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 195—202 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Jia, C. Z., Yang, S. F., et al., 2002. The time of deformation on the Kuqa fold-and-thrust belt in the southern Tianshan—based on the Kuqa River area. *Acta Geologica Sinica*, 76(1): 55—63 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. Y., Shen, J., Chen, J. B., et al., 2006. Preliminary study of late Quaternary crustal shortening rate along Kuqa depression in South Tianshan, Xinjiang. *Seismology and Geology*, 28(2): 279—288 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, W. J., Guo, H., Yuan, D. Y., et al., 2002. Application of remote sensing image information in the research of active faults. *Earthquake Research in Plateau*, 14(2): 15—21 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 柏美祥, 1998. 新疆河谷阶地的年代. *内陆地震*, 12(1): 13—19.
- 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. *地震地质*, 17(4): 513—529.
- 陈立春, 陈桂华, 陈立泽, 等, 2006. 柯坪塔格推覆系活动构造的 ETM 影像特征与解译. *地震地质*, 28(2): 289—298.
- 陈宁华, 汪新, 杨树锋, 2007. 基于 CORONA 影像的浅层地层信息定量提取. *浙江大学学报(工学版)*, 41(4): 662—667.
- 邓起东, 陈立春, 冉勇康, 2004. 活动构造定量研究与应用. *地质前缘*, 11(4): 383—392.
- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等, 2000. *天山活动构造*, 北京: 地震出版社.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等, 2002. 中国活动构造基本特征. *中国科学(D 辑)*, 32(12): 1020—1030.
- 范湘涛, 卢华复, 郭华东, 等, 2000. 库车冲断带新构造遥感分析. *地质论评*, 46(5): 499—506.
- 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等, 1999. 库车新生代构造性质和变形时间. *地质前缘*, 6(4): 215—221.
- 卢华复, 王胜利, Suppe, J., 等, 2002. 天山中段南麓的第四纪褶皱作用. *科学通报*, 47(21): 1675—1679.
- 汪新, Ferrafi, A. H., Suppe, J., 2001. 晚更新世以来南天山阿克苏地区地壳缩短率. *地质科学*, 36(2): 195—202.
- 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——以库车河地区为例. *地质学报*, 76(1): 55—63.
- 吴传勇, 沈军, 陈建波, 等, 2006. 新疆南天山库车坳陷晚第四纪以来地壳缩短速率的初步研究. *地震地质*, 28(2): 279—288.
- 郑文俊, 郭华, 袁道阳, 等, 2002. 遥感影像信息在活动断裂研究中的应用. *高原地震*, 14(2): 15—21.