

# 数字航空摄影测量学方法在活动构造中的应用

陈桂华<sup>1</sup>, 徐锡伟<sup>1</sup>, 闻学泽<sup>2</sup>, 王亚丽<sup>3</sup>, 郑荣章<sup>1</sup>

1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

2. 四川省地震局, 四川成都 610041

3. 中国地震台网中心, 北京 100036

**摘要:** 为了高效率、高精度地获取活动构造研究中的定量参数, 引入数字航空摄影测量学方法十分必要. 在川西地势陡峻的鲜水河断裂带上进行了试验性研究, 探讨了测量精度和效率, 总结了工作流程与操作方法. 利用空间信息增强的正射纠正影像、大比例尺地形图和地形剖面图, 获得康定南团结乡附近鲜水河断裂带康定段断层迹线的空间分布, 量测得到该断裂在 T1 洪积扇形成以来左旋水平位移量为 43 m, 垂直位移量为 5.8 m. 结果表明, 利用数字航空摄影测量学方法进行活动构造地貌研究中水平累积位移量、垂直累积位移量、断层长度等定量参数的测量以及构造几何学精细解析与构造地貌成图完全能满足精度要求, 大大提高了野外工作效率, 是活动构造定量研究的一种有效的技术方法.

**关键词:** 数字航空摄影测量学; 活动构造; 构造地貌; 测绘.

中图分类号: P553

文章编号: 1000-2383(2006)03-0405-06

收稿日期: 2005-06-15

## Application of Digital Aerophotogrammetry in Active Tectonics

CHEN Gui-hua<sup>1</sup>, XU Xi-wei<sup>1</sup>, WEN Xue-ze<sup>2</sup>, WANG Ya-li<sup>3</sup>, ZHENG Rong-zhang<sup>1</sup>

1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2. Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

3. China Earthquake Net Center, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

**Abstract:** In order to efficiently obtain high-quality quantitative parameters in active tectonics research, it is necessary to introduce digital aerophotogrammetry as a surveying and mapping tool. Testing research was performed along the Xianshuihe fault zone, which is located in the mountain area of western Sichuan Province. Using spatially enhanced, orthorectified images, large scale topography and ground surface profiles, we obtained a series of data of the active Xianshuihe fault zone near Tuanjie in the south of Kangding county. Left lateral horizontal deformation of the fault is about 43 m and vertical deformation is about 5.8 m since the T1 proluvial fan was formed. Digital aerophotogrammetry provides high precision when measuring quantitative parameters in the study of active tectonics such as accumulative horizontal and vertical deformations and fault length, detailed geometric structure resolution and geomorphological mapping, thus greatly improving field work efficiency.

**Key words:** digital aerophotogrammetry; active tectonics; geomorphology; surveying and mapping.

地质研究已经逐步从描述性和定性研究向半定量、定量研究发展, 对于与现代技术发展紧密相关的地质分支, 更有利于向量化迈进. 活动构造研究已经进入定量研究阶段, 有一套相关的定量参数来表征活动构造的几何学、运动学等活动特征(邓起东等, 2004). 断裂长度、断裂活动段落长度、断裂累积

位移量、同震位移量、年代等是最重要的定量数据, 这些数据需要空间测量技术和测年技术来支撑. 测量和测年技术水平的提高能有效地改善整个活动构造研究的水平. 如何高精度、高效率地测量对于活动构造的野外工作十分重要. 摄影测量, 尤其是数字摄影测量, 作为一种测量技术, 已经广泛地应用到测绘

的各个领域(张书煌等,2000;宫鹏,2000),我们希望能将其引入到活动构造定量研究中。

构造地貌是活动构造定量数据的载体,又能通过数字航空摄影测量来有效表达,为两者搭起了一座桥梁。国外已有将数字地形数据(如 DEM、ETM 等)应用到构造几何学分析的例子(Lasserre *et al.*, 1999; Riquelme *et al.*, 2003; Ganas *et al.*, 2005),但是数据来源大多是 1:50 000 地形图等,数据精度不高,只能用于区域大尺度范围,不适合微地貌研究,更不适用于我国西部缺大比例尺地形图地区。数字航空摄影测量学方法则可能在保持高精度的前提下克服这些限制并提高工作效率。我们应用数字航空摄影测量方法在地势陡峭的川西山地试验,并总结了一套相应的工作方法。

## 1 数字航空摄影测量学基本原理、方法和工作流程

### 1.1 原理与方法简介

在 2 个摄站对同一地面摄取相互重叠的 2 张像片形成立体像对,从而构成立体模型,求解立体模型内地面点的空间位置。重建地面立体模型从而获取地面的三维信息是摄影测量的主要任务。

建立航空像对的立体成像模型首先利用航摄相机参数等恢复像片的内方位元素,确定航摄物镜与像片的相对位置。再根据光学成像理论解析出航空像对的相对定向元素,确定左右像片间的像对位置关系。然后通过像片的控制测量,确定像对立体模型的绝对定向元素,建立立体模型与大地坐标系下的地物的对应关系。从而可以在立体模型中获取真实空间的三维位置信息。

### 1.2 工作流程

常规的航空摄影测量和数字摄影测量生产具有一套相关的规范,结合实际操作,我们总结了如图 1 所示的工作流程。

测量素材包括摄影像片资料及航摄相机等相关参数。通常的航空像片,均须利用高精度的专用扫描仪将其数字化(陈晓宁和成燕辉,1998),然后对影像作必要的增强等前处理,设计像片控制点。控制点的野外测量可以和国家标准的三角点联测,也可以取独立的参照系统,通常可以使用全站仪、实时差分 GPS 等来实施。对于地势复杂山区等,作业条件差,

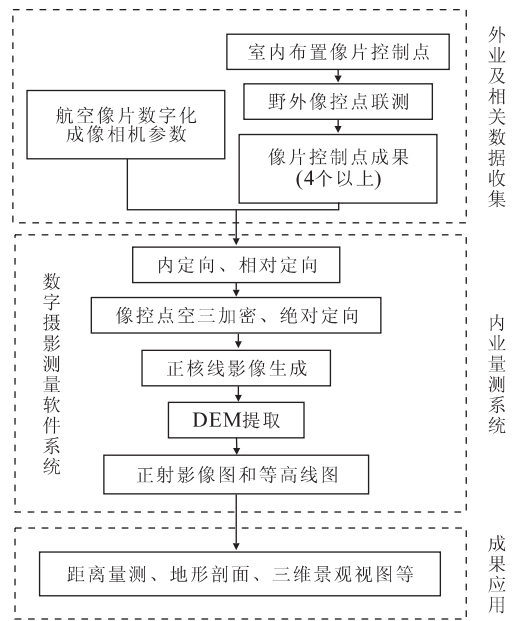


图 1 数字航空摄影测量工作流程

Fig. 1 Flow chart for digital aerial photogrammetry

我们建议采用实时差分 GPS 完成控制测量,一个像对的控制测量工作量比传统全站仪小块区域实测要少一半以上。

室内内业采用桌面型数字摄影测量软件系统,目前使用较多的是国内的 VirtuoZoNT、JX-4 和加拿大的 PCI OrthoEngine、美国的 Erdas OrthoBase (LPS) 等。测量成果包括数字高程模型 (DEM)、数字正射影像图 (DOM)、大比例尺地形图、地形剖面图、三维立体景观图以及坡度分析图等。

### 1.3 测量过程与成果的精度控制

摄影测量的误差来源主要包括受摄影机物镜畸变差、摄影处理、大气折光、底片压平以及地球弯曲等影响的摄影误差、影像数字化等带入的中间处理结果误差和像片控制点测量误差。

在应用航空摄影测量来进行活动构造研究时,一般利用已有的航空摄影成果,其摄影误差已经达到航空摄影测量应用标准,无须作额外的特殊检测。航空摄影成果需要经过影像数字化转入数字摄影测量系统,数字化的精度直接影响最终成果的精度。像片控制点的外业测量、控制点在影像上的识别和空中三角加密等内业处理需要保证相应的精度要求。以上误差和精度直接影响航空像对建立空间模型的精度,并且可以用其进行定量表示。

在建立像对的空间模型后,提取数字高程模型 (DEM) 的精度主要取决于采样间隔和地形的复杂

程度(张剑清等,2003),可以通过格网间距、高程内差算法等参数设置来控制。制作正射纠正影像、大比例尺地形图、三维立体景观图的精度则取决于 DEM 的精度。

DEM 是数字化测量的主要成果,需要对其进行相应的精度检测。检验 DEM 等成果精度的方法很多,也具有相应的规范(黄健,2002),可以用以下 2 种方法检验 DEM 成果的精度:一种是用生成的 DEM 来对航空影像进行正射纠正,然后将其叠加在 DEM 上生成三维立体图,通过比较航空影像的阴影等纹理特征与立体图反映的效果判断两者的差别,明显的地形突变或者纹理错位则可以反映 DEM 的精度问题;另一种方法是进行野外检查测量,统计检查点的误差从而评价成果精度。

## 2 在活动构造研究中的应用

### 2.1 航空摄影测量成果的应用形式

2.1.1 各种构造几何学要素的精细解析 摄影测量的重要成果就是获取研究区域的三维空间信息,以 DEM、等高线等形式表达。因此,我们可以对感兴趣的研究区域绘制大比例尺地形图、正射纠正影像图及其三维立体效果图等。这些空间信息叠加到原有的影像纹理信息上,增强了构造信息的可判读性,容易获取相关构造的精细空间几何学要素,绘制相应的构造地貌图。对于较大尺度范围的研究区域,通过坡度分析、高程分级等可以辅助地貌单元划分。

构造的几何学精细解析和构造地貌制图是活动构造研究的重要内容之一,例如准确标绘活断层地表迹线对于活断层地震危险性评价和重大工程的建议活断层避让参数的确定至关重要(徐锡伟等,2002)。目前制图一般首先依据卫星影像和航空影像在室内解译,然后进行野外核实。在大比例尺地形图、正射纠正影像图及其三维立体效果图等数字摄影测量成果中,空间信息被叠加到原有的航空影像纹理信息上,可以增强构造和地貌信息的可判读性,使构造几何学要素和地貌单元的解译更精细准确。

2.1.2 活动构造地貌相关定量数据的获取 在三维坐标系统的空间信息表达下,对与构造相关的定量数据可以进行比较精确的量测。在活动构造的定量地貌研究中,一般需要获取 2 个定量参数:水平形变量和垂直形变量。在正射纠正影像中,它们反映了各种地物正射投影到水平面上的位置关系,消除了

地面起伏的影响,在此基础上进行水平形变量的测量更准确。利用垂直构造线方向的地形剖面,通过判断构造变形对原有一致性地势的改造,可以测量垂直方向上的形变量。

### 2.2 活动构造研究的特点及数字航空摄影测量的可应用性

对于特定的活动构造研究点,一般需要应用航空摄影进行测量的区域较小,单个或者数个立体像对就能满足研究范围的测量工作,不需要区域性的航空摄影资料。这样一方面减少了成本,另一方面可以选择使用更有利于分析感兴趣目标的特定时段的航空摄影资料。

不同尺度的测量对精度要求不一样,在不同的测绘领域都有相应的操作规范和要求(王丹,1995),总体可以概括为:平面精度应该控制在图面 0.3~0.8 mm,高程精度控制在 0.5~1 倍基本等高距。从前述可知,航空摄影测量在定量活动构造研究中主要是获取与活动构造相关地貌的空间信息,所涉及的地貌单元可能具有不同的尺度,包括数百米范围的微观地貌、数公里范围的区域地貌,从地貌中获取的变形数据从几米到上千米不等。从前人进行的定量构造地貌研究来看,测量方法在不断改进,测量精度要求越来越高,目前测量相对误差控制在 5% 以下就能满足活动构造定量研究的需要。

在实际野外工作中,活动构造研究以构造的地质和地貌观察、制图及年代样品采集为工作重点,如何减少测量等工作量、提高野外效率十分重要。最初的构造位移丈量采用皮尺等,在实地判断位置,往往产生很大的误差,甚至由于观察角度的局限出现错误。近年来,为了精细地刻画断错构造地貌,引入了全站仪地形测量(徐锡伟等,2003),在局部范围能够很好地反映活动构造与微地貌的关系。但是,全站仪测量必须根据所反映的构造地貌特征来进行路线式的采集测量点,在一定数量实测点的基础上通过插值等算法绘出大比例尺地形图,并测量出所需要的定量构造参数;由于野外测量工作量大,测量只能局限在数百米半径范围内,并且要求野外作业条件好,能够通视等,从而使整个野外工作效率难以提高。利用航空摄影测量将野外工作量减少到几个像片控制点的测量,可以有效地克服上述野外作业条件限制。应用实时差分 GPS 使控制点测量变得简单易行,并且能使其精度控制在厘米级。

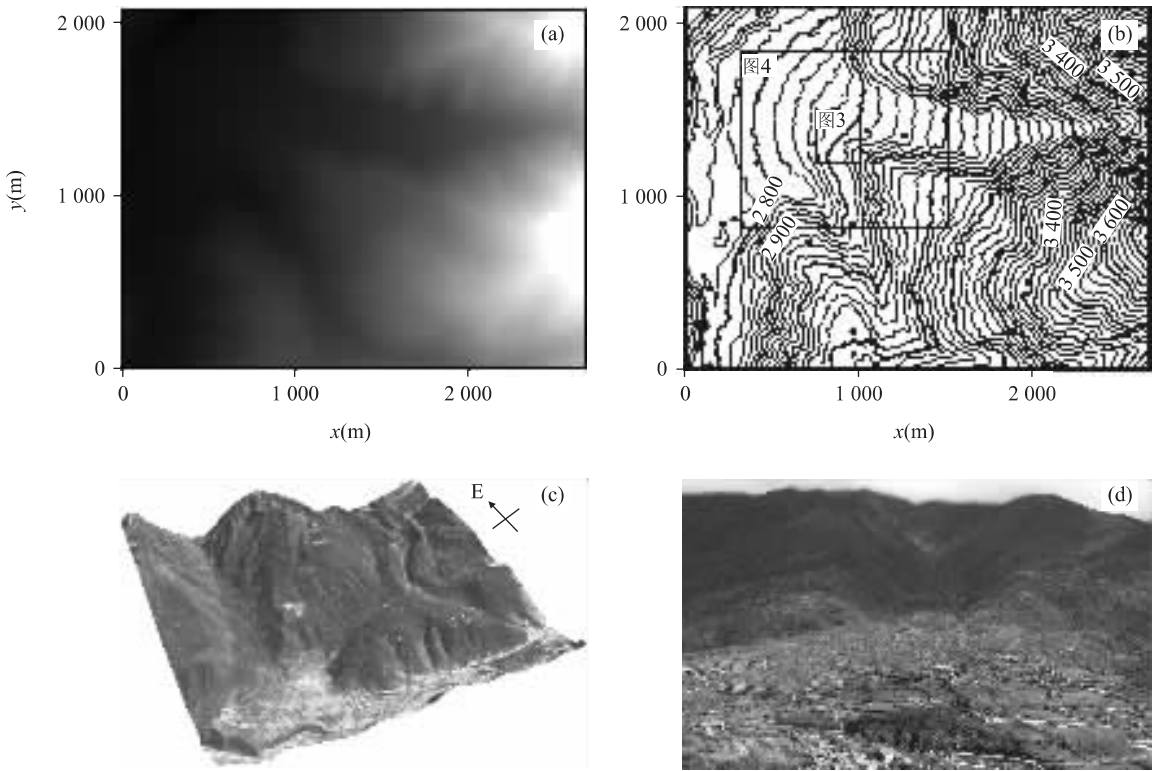


图 2 DEM 灰度图(a)、等高线图(b)、正射纠正影像三维立体图(c)和北部洪积扇的实地景观图(d)

Fig. 2 Gray scale DEM (a), contour map (b), orthorectified stereo image (c) and field sight scene of the proluvial fan in the northern part (d)

### 3 川西康定县团结乡构造地貌测量的应用实例分析

#### 3.1 概况

研究区属于青藏高原东缘地形高差显著的山区,海拔高度为 2 500~5 000 m。在 4 000 m 海拔以下植被比较发育,主要为灌木,高 1~2 m。从构造角度看,研究区属于鲜水河断裂的康定段,断裂活动较强,构造地貌和地貌变形十分明显,形成断层谷地、断塞塘、断层陡坎等,并在团结乡西侧错断了不同级别的冲洪积扇,这种断错地貌正是本次测量研究的主要对象。

#### 3.2 数字航空摄影测量成果与分析

测量所用的航空摄影像片摄影比例尺约 1:5 万,像幅为 23 cm×23 cm,成像焦距为 152.86 mm,像片扫描分辨率大约 15 μm,相当于 1 800 dpi。扫描后的数字影像每像素大小约 1 m×1 m。

我们利用实时差分 GPS 对研究区所选用的航空摄影像片进行了像片的控制测量,控制点在立体观测系统下通过影像识别输入到数字摄影测量系统中,得

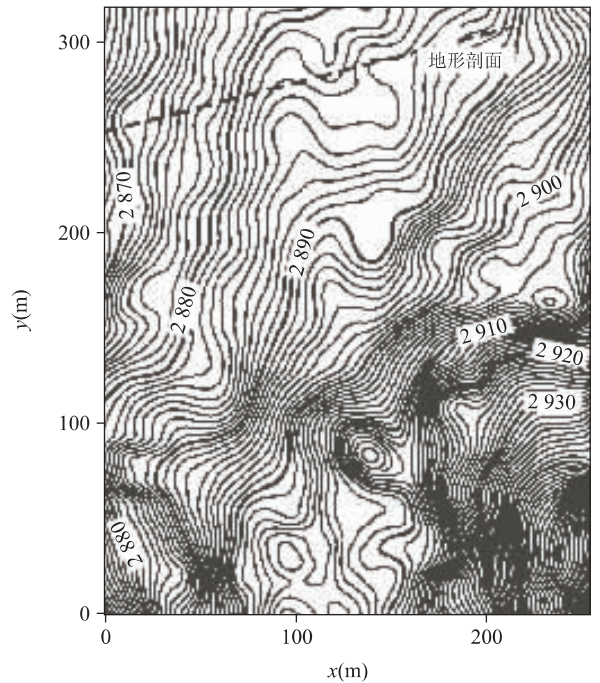


图 3 航测等高线

Fig. 3 Contour map from aerial photogrammetry

到控制点中误差  $RMSX = 1.23m$ 、 $RMSY = 1.39m$ 。

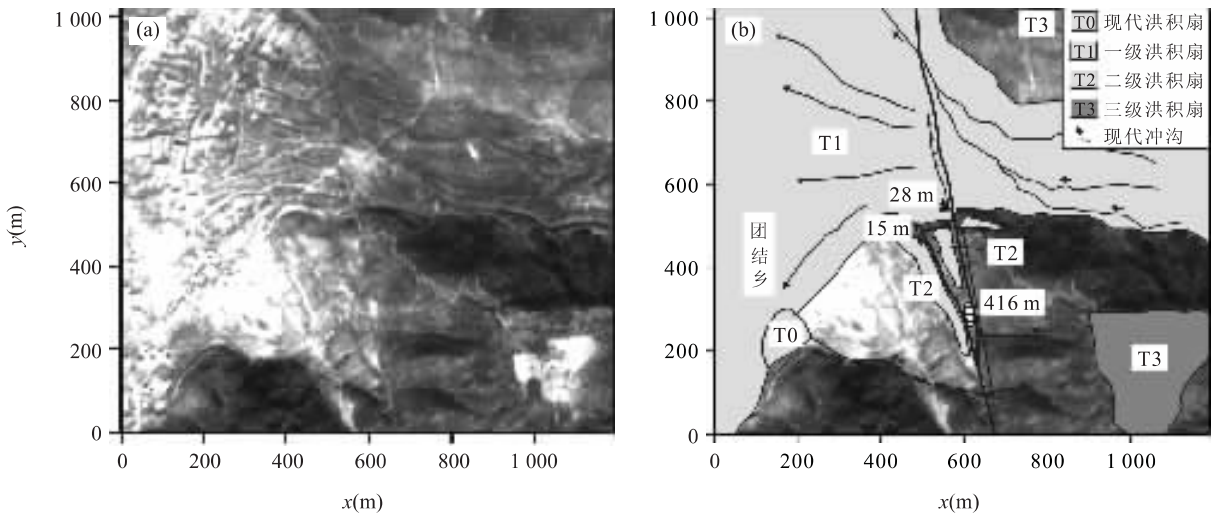


图 4 正射影像图(a)与构造地貌图(b)

Fig. 4 Orthorectified image (a) and morphotectonic map (b)

进一步对像片进行空三加密,加密点的平面中误差 RMS X=0.09 m、RMS Y=1.05 m. 控制点和加密点的中误差反映出模型的最大地面误差小于 2 m.

完成立体像对的外方位元素计算后,建立了立体像对的成像模型,可以求解像对内任意点的空间坐标.生成 DEM 的过程是通过像对影像的匹配计算大量空间点的坐标.在生成 DEM 时,通过参数设置可以控制 DEM 格网大小和左右影像匹配的精度.考虑到上述模型精度,设置 DEM 格网大小为 2 m×2 m,影像自动匹配精度要求最高值,得到 DEM 灰度图,其中研究重点区域团结乡—榆林乡附近如图 2a 所示.进一步可以得到等高线图、正射纠正影像的三维立体效果图等(图 2b,2c).

图 2d 是该区北部洪积扇的野外实地景观图,可以分析三维立体视图并与实地景观图比较,结果表明测量所得成果整体上令人满意.另外,图 3 是研究区团结乡西侧洪积扇构造微地貌,扇面上的断层反向陡坎、被断错的扇缘陡坎等都能很好地表现出来.

### 3.3 测量成果的应用

图 4 是团结乡东南一带的正射纠正影像以及在此基础上解译制作的构造地貌图.在建立的坐标系内精确地进行量测与计算断裂的几何学要素如走向、夹角、长度、距离等,从而用于后续的几何学和运动学关系计算.

对于该研究区,T1 洪积扇形成初期是对早期的 T2 洪积扇冲蚀形成沟谷,然后在沟谷的下游堆积成扇.在 T1 扇面停止活动后,沟壁(即 T1 与 T2 之间的陡坎)得以保存,因此沟壁的断错变形反映了 T1

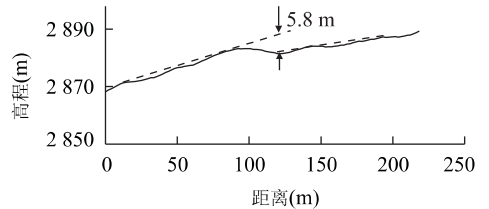


图 5 垂直断层陡坎的地形剖面图

Fig. 5 Topographic profile perpendicular to the fault scarp

扇面形成以来的断层位移量.从测量获得的这些具有坐标系统的数据中,我们可以在正射纠正影像图和等高线图上量取得到断裂 2 个分支水平断错 T1 与 T2 之间陡坎分别是 28 m 和 15 m,总计 43 m.

同样,在 T1 扇面停止活动后,断裂变形在 T1 扇内部才得以保存,断层的垂直位移在扇面上形成断层陡坎.通过垂直断裂走向的地形剖面能很好地反映出来,利用测量所得 DEM 数据可以很方便地获取各种地形剖面.图 5 是近垂直断层走向的地形剖面图,剖面位置如图 3 所示.地形剖面中,断层两侧的地形走势在变形前是一致的,断层的运动才使其发生垂向上位移.因此,通过地形剖面可以量测得到研究区 T1 扇面形成以来断层的垂向位移是 5.8 m.结合相应的地貌面测年数据,可以进一步计算得到断裂水平滑动速率和垂直滑动速率.

## 4 结论

(1)数字航空摄影测量方法对于活动构造研究

人员具有技术上的可操作性,能够应用到野外测量中.从野外的像片控制点测量到室内的航空影像收集处理,再到软件系统的应用——DEM提取、正射影像纠正、大比例尺地形图制作、地貌图制作等,不存在重大技术难点.(2)应用数字航空摄影测量方法对数百米到数公里尺度的活动构造地貌定量参数的测量和大比例尺制图,既能满足精度要求,又能提高野外工作效率,并且能克服野外艰苦的测量作业条件限制.(3)数字航空摄影测量方法得到的DEM作为原始测量成果,经过数字分析,可以得到一系列的相关成果用于构造测量与分析;可以用于增强航空影像的空间信息、制作三维立体景观用于构造与地貌判读;在一定尺度作坡度分析等来辅助地貌单元划分,比如阶地、夷平面分析等.

致谢:就航空摄影测量的有关技术与中国测绘科学研究院邱志成研究员进行了讨论,四川地震局测绘工程院陈勇、牟洪勇参加了部分野外测量工作,在此一并表示感谢!

## References

- Chen, X. N., Cheng, Y. H., 1998. Analysis of the photograph scanner for digital photogrammetry. *Scientific and Technical Communication of Surveying and Mapping*, 21(3): 34—37, 33 (in Chinese).
- 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).
- Ganas, A., Pavlides, S., Karastathis, V., 2005. DEM-based morphometry of range-front escarpments in Attica, central Greece, and its relation to fault slip rates. *Geomorphology*, 65(3—4): 301—319.
- Gong, P., 2000. Digital surface model and topographic change monitoring. *Quaternary Sciences*, 20(3): 247—251 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J., 2002. Checking on the quality of DEM. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (2): 55—56 (in Chinese with English abstract).
- Lasserre, C., Morel, P. H., Gaudemer, Y., et al., 1999. Post-glacial left slip rate and past occurrence of  $M \geq 8$  earthquakes on the western Haiyuan fault, Gansu, China. *J. Geophys. Res.*, 104: 17633—17651.
- Riquelme, R., Martinod, J., Hérail, G., et al., 2003. A morphological approach to determining the Neogene to recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). *Tectonophysics*, 361(3—4): 255—275.
- Wang, D., 1995. About the mapping precision of aerial photogrammetry. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (6): 42—46, 41 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Zheng, R. Z., et al., 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China (Series D)*, 46(Suppl. 1): 210—226.
- Xu, X. W., Yu, G. H., Ma, W. T., et al., 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault. *Seismology and Geology*, 22(4): 470—483 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Q., Pan, L., Wang, S. G., 2003. Photogrammetry. Wuhan University Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, S. H., Lü, L. S., Wang, S. J., 2000. Discussion on full digital photogrammetry and 4D product. *Remote Sensing Information*, (4): 68—73 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈晓宁,成燕辉,1998.用于数字摄影测量的影像扫描仪剖析.测绘科技通讯,21(3): 34—37, 33.
- 邓起东,陈立春,冉勇康,2004.活动构造定量研究与应用.地学前缘,11(4): 383—392.
- 宫鹏,2000.数字表面模型与地形变化测量.第四纪研究,20(3): 247—251.
- 黄健,2002.数字高程模型的质量检查.测绘通报,(2): 55—56.
- 王丹,1995.关于航空摄影测量制图的精度问题.工程勘察,(6): 42—46, 41.
- 徐锡伟,闻学泽,郑荣章,等,2003.川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源.中国科学(D辑),33(Suppl. 1): 151—162.
- 徐锡伟,于贵华,马文涛,等,2002.活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法.地震地质,22(4): 470—483.
- 张剑清,潘励,王树根,2003.摄影测量学.武汉:武汉大学出版社.
- 张书煌,吕良寿,王苏京,2000.全数字摄影测量与4D技术探讨.遥感信息,(4): 68—73.