

# 摄影测量技术在土壤侵蚀研究中的应用

胡文生, 蔡强国, 陈 浩

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 回顾和评价了国内外摄影测量技术在土壤侵蚀研究中的应用, 并探讨了摄影测量的主要产品数字高程模型的分辨率和精度及在土壤侵蚀的应用中要注意的问题, 认为摄影测量方法在土壤侵蚀研究中具有传统方法不可比拟的优势, 但成熟技术的引入和广泛应用仍需进一步的研究。

**关键词:** 摄影测量; 数字高程模型; 土壤侵蚀

中图分类号: S 157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)04-0150-04

## The Application of Photogrammetric Technique to Soil Erosion Studies

HU Wen-sheng, CAI Qiang-guo, CHEN Hao

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The authors review and assess the application of photogrammetric technique to soil erosion studies at home and abroad, discuss the resolution and precision of digital elevation model—the main production of photogrammetry and the problems of its application in soil erosion studies as well. In general, in contrast to the traditional methods photogrammetry technique has obvious advantages in soil erosion, whereas the importing of mature technique and wide application still need further research.

**Key words:** photogrammetric technique; digital elevation model; soil erosion

### 1 概 述

在土壤侵蚀的调查和研究中, 传统的方法是利用地形图在野外以目视判读来勾绘侵蚀图斑, 从而定性或半定量的评估侵蚀的情况。这种方法野外工作繁重, 而且无法快速、科学、准确的检测和评估土壤侵蚀的状况。此外, 这种方法只适合现状调查, 如果我们想了解过去一段时期, 例如不同植被覆盖或不同土地利用条件下土壤侵蚀状况的变化, 借助历史航空影像是最好的方法, 它具有相对廉价、快速、可重复量测的优点, 同时数字摄影测量技术和全球定位系统的快速发展保证了摄影测量方法的精度。

数字摄影测量又称软拷贝摄影测量, 是摄影测量发展的第三个阶段, 它与传统测量的最大区别是: 它处理的原始信息不仅可以是像片, 更主要的是数字影像或数字化影像; 它的发展起源于摄影测量自动化的实践, 最终是以计算机视觉代替人眼的立体观测。传统的摄影测量仪器精密、价格昂贵、作业环境要求高、不易组织, 通常由省级测绘局、国家部委专业测绘院来组织进行摄影测量的生产, 数字摄影测量技术的

发展打破这一格局; 数字摄影测量的主要特点之一是自动空中三角测量, 与解析空中三角测量相比, 自动空中三角测量具有量测精度高、生产效率高、易于重新观测等优点, 理论上证明, 一般的相关方法精度达到 0.29 个像素, 基于特征的最小二乘法的精度达 0.02 个像素<sup>[1]</sup>。航摄像片的定向是摄影测量的基本问题之一, 传统的外方位元素依靠空中三角测量和大量地面控制点来间接求解, 全球定位系统(GPS)的高动态精密三维定位, 可用于航空摄影的同时确定相片的外方位元素, 大大提高航测外控点的精度和可靠性<sup>[2]</sup>, 减少对地面控制的依赖, 随着差分 GPS(DGPS)技术的发展, 使得无地面控制的摄影测量、高精度定点摄影等成为可能, 从而极大拓宽摄影测量的应用领域, 降低生产成本, 使摄影测量的方法更加经济、高效。

### 2 摄影测量技术在土壤侵蚀研究中的应用

从 20 世纪 40 年代的早期新西兰开始对国内一些地区进行定期的(每 5~10 年一次)航空摄影, 影像的比例尺从 1:17 000 到 1:64 000 不等, 现在比例尺统一为 1:25 000

① 收稿日期: 2004-07-10

基金项目: 香港特区政府研究资助局支持项目(HKU 7017/01E); 中国科学院知识创新工程重要方向项目“水蚀预报模型研究”(KZCX3-SW-422); 国家自然科学基金资助项目(40271075)

作者简介: 胡文生(1973-), 女, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀和流水地研究。

和 1 50 000<sup>[6]</sup>。自上个世纪 60 年代就有学者利用航空像片对土壤侵蚀进行监测和定量研究<sup>[5-7,10]</sup>, 随后近年摄影测量技术和数字影像技术的结合使得数字高程模型(DEM)在现代地貌景观演化的研究中应用越来越广泛<sup>[11,12]</sup>。目前国外利用摄影测量方法进行土壤侵蚀研究主要是分为两类: 利用摄影测量的主要产品——数字高程模型来提取地貌特征值, 例如坡度、坡长、坡向、地表破碎度等, 从地貌发育的角度结合有关土壤侵蚀模型和水沙统计资料进行研究; 直接利用数字高程模型来进行土壤侵蚀量和沉积量的估算和量测。

## 2.1 数字高程模型在土壤侵蚀-地貌景观关系研究中的应用

土壤侵蚀引起了系统内地貌形态的演化, 而系统内的地貌特征又控制着土壤侵蚀的方式和强度。国外的土壤侵蚀研究专家早已开始土壤侵蚀-地貌景观关系的研究了, 他们认

表 1 一些地貌变量的定义及与景观地貌特征的关系

地貌变量(单位)	定义和公式	景观地貌特征
高程/m	地表某点高出海平面的垂直高度	山地植被和土壤垂直带; 岩石风化的指标
坡度/°	$G = \arctan \frac{q}{p^2 + q^2}$ (Sharry 1991)	流速, 径流和土壤流失 (Wischmeier and Smith, 1978), 土层厚度, 一些植被特征 (Zakharov, 1940)
坡向( degree)	$A = \arctan(\frac{q}{p})$ (Sharry 1991)	流向, 土层厚度, 降雨蒸发强度, 太阳辐射量 (Zakharov, 1940; Moore et al., 1991)
坡长/m	从径流开始那点随坡度下降到水流开始沉积或汇入另一沟道那点的距离 (Speight, 1968)	土壤流失量 (Wischmeier and Smith, 1978)
剖面曲率/ m <sup>-1</sup>	$K_v = -\frac{q^2 r - 2pqs + p^2}{(p^2 + q^2)(1 + p^2 + q^2)}$ (Sharry, 1991)	土壤湿度, 土层厚度, 有机质, pH 值 (Moore et al., 1991; Shary et al., 1991) 植被覆盖分布 (Florinsky and Kuryakova, 1996); 轮廓线 (Florinsky, 1992) 和断层指示 (Florinsky, 1996)
平面曲率/ m <sup>-1</sup>	$K_h = -\frac{q^2 r - 2pqs + p^2}{(p^2 + q^2)(1 + p^2 + q^2)}$ (Sharry, 1991)	汇流 (Kirkby and Chorley, 1967), 土壤湿度, 土层厚度, 有机质, pH (Moore et al., 1991; Shary et al., 1991) 植被覆盖分布 (Florinsky and Kuryakova, 1996); 轮廓线的 (Florinsky, 1992) 和断层指示 (Florinsky, 1996)
平均曲率/ m <sup>-1</sup>	$H = (K_h + K_v) / 2$ (Sharry, 1991)	汇流和足够重力下相对减速 (Sharry, 1995); 土壤湿度 (Sinai et al., 1981; Kuryakova et al., 1992) 植被覆盖分布 (Florinsky and Kuryakova, 1996)
地形起伏/m	$RFi = h_{\max} - h_i$ (Frank, 1988) $TI = \ln(CA/G)$	流域地貌特征 (Frank, 1988)
地貌参数	CA 为流域面积 G 为坡度 (Moore et al., 1991)	汇流, 土壤湿度, 饱和带分布, 地下水位深, 蒸发率 (Beven and Kirkby, 1979; Quinn and Beven, 1993)
水流能量参数	$TI = CA \cdot G$ (Moore et al., 1991)	坡面流潜在侵蚀力 (Moore et al., 1991), 土层厚度, 有机质, pH, 泥沙含量 (Moore et al., 1993), 植被分布 (Florinsky and Kuryakova, 1996)

## 2.2 利用数字高程模型估算土壤侵蚀量

虽然有大量的模型通过产生山脊和山谷等地貌特征来显示逼真的地貌景观, 但令人惊讶的是真实地貌的三维形态和塑造它们的过程并没有得到量化研究<sup>[5]</sup>。传统上用于土壤侵蚀量直接量测的方法主要有侵蚀钉、格洛克沉积槽以及格网和侵蚀线法、涂漆、荧光示踪物法等等, 上述无论哪种方法都需要大量的野外工作, 而且不一定能满足对于沟谷或沟

为地貌影响土壤中和地表物质的迁移、沉积以及植被覆盖, 此外, 地貌是地质构造的一个指标, 例如某些断层能控制矿物沉积、地震震距, 影响土壤和植物特征等<sup>[9]</sup>。在地貌景观研究中地貌特征不仅是以它们本来的形式出现而且被应用在自然过程混合模型的框架中, 例如 Kirkby 等在分布式水文模型 TOPM ODEL 中应用了一个地貌指数<sup>[22]</sup>。地貌因子还被调用来计算通用土壤流失方程 (USLE)<sup>[9]</sup> (表 1)。

此外, DEM 被用来提取水系网络<sup>[23]</sup>, 形象显示流域等, Moore et al., Shary et al.<sup>[17]</sup> 和 Franklin<sup>[16]</sup> 等对于数字地形模型应用于土壤、水文、地貌、植被和地质的研究有详细的论述。如何利用 DEM 来提取局部地貌变量, Evans、Zevenbergen and Thorne, Moore et al. 和 Shary 等都提出了各自的方法, 这些方法都是基于差分算子的近似数通过有穷差分来计算的, 其中以 Evans 的方法最为精确<sup>[14]</sup>。

道微小侵蚀变化研究精度的要求。Welth 和他的同事<sup>[16]</sup> 在 1984 年利用时间序列航空影像, 采用近景摄影测量的方法从沟谷和河道河床的变化来测量土壤侵蚀量, 他们主要侧重在较小的区域采用非量测用单反相机、标准平板数字化仪进行摄影测量的方法研究, 证明此方法平面中误差 (RMSE<sub>xy</sub>) 为 1/2 800H, 高程中误差 (RMSE<sub>z</sub>) 为 1/1 600H (H 为相机与地面的垂直距离), 认为这种方法相对于传统方法更精确、

快捷、廉价,而且可重复测量。Dymond 和 Hicks<sup>[3]</sup>根据历史航空影像,利用传统的立体测图仪计算了流域所有侵蚀和沉积区域的高程变化,从而估算了新西兰山地整个 Waipawa 流域 1950~1981 年间及期间平均每年土壤侵蚀量,认为这种方法适用于新西兰绝大部分地区,高程精度可控制在  $\pm 0.5\text{ m} \sim \pm 4\text{ m}$ 。Derose 等<sup>[3]</sup>根据三期历史航空像片制作了高分辨率的序列 DEM,对 Waipawa 流域上游的 11 条沟谷的侵蚀变化进行了定量研究,Harley<sup>[17]</sup>则根据历史航空像片对同一个流域上游 26 个沟谷的侵蚀变化做了定量估算,而且对沟谷面积和沟谷表面的剥蚀率之间相关关系进行了分析,从而为根据 DEM 来模拟沟谷发育以及整个流域的沟谷侵蚀的定量研究提供了新的思路。Derose 和 Harley 对于根据历史航片制作 DEM 的摄影测量的过程进行了详细的论述,充分讨论了这种方法的误差和达到的精度,并指出生成 DEM 时需要特别注意的地方。

上述研究仍然是侧重于摄影测量方法在土壤侵蚀定量研究方面应用的探讨,显然这种方法具有传统方法无可比拟的优势,但成熟的摄影测量技术的引入和在土壤侵蚀研究领域的广泛应用还需进一步探讨和研究。

国内利用摄影测量技术进行土壤侵蚀研究公开发表的文献不多,且研究对象主要是相对大尺度的、较宏观的区域或流域,利用摄影测量技术生成的正射影像图和 DEM 比例尺相对较小,对精度要求也较低。

### 3 DEM 的分辨率

使用 DEM 的核心问题是格网大小的选择,格网大小映射的是 DEM 的分辨率,它表示 DEM 描述的地面高程信息的细致程度。不同的 DEM 生成方法就有不同分辨率,但肯定不会大于生成 DEM 的原始资料的分辨率,所以原始资料很大程度上决定了 DEM 分辨率,因此如果用来生成 DEM 的地形图、航空像片、卫星像片等的分辨率比较低,那么即使 DEM 的格网做的很小,依然无法提高它的实际分辨率。Peuker 准则认为 DEM 格网大小至少是数字化地图等高线间距的 4.3 倍<sup>[16]</sup>。DEM 分辨率选择还与研究区域的地形地貌条件有关,Ivanov 等通过对 DEM 均方根误差的比较,分析了在不同地貌条件下所应选择 DEM 格网大小。

表面上通过内插可以提高 DEM 的分辨率,实际上这个过程并不能提高 DEM 的实际的分辨率。事实上所有的内插方法都存在着缺陷<sup>[9]</sup>,DEM 格网大小和离散化误差之间具有本质的联系,而且经验表明利用通过内插提高了分辨率的 DEM 来提取地貌变量常会导致假象<sup>[9]</sup>,当将 DEM 与影像结合起来进行分析时,这些假象会导致严重的误差。内插方法在不同的地貌地区和不同的采点方式下有不同的误差,所以在实际应用时应根据各种方法的特点,结合应用的区域条件,从内插精度、速度等方面选取合理的最优方法。

### 4 DEM 误差和精度分析

测量方法在土壤侵蚀研究中的精度,尤其是由摄影测量

方法获取的大比例尺 DEM 的精度是大家关心的核心问题,因为 DEM 的误差会明显影响到研究和模拟自然过程的准确性和真实性。

利用数字摄影测量系统生成 DEM 的方式主要有三种:全自动采集、自动采集与交互式编辑结合和人工采集,在实际应用中发现,生产大比例尺 DEM 采取自动采集与交互式编辑相结合是最佳作业方式<sup>[4]</sup>。数字摄影测量系统生成 DEM 通常的程序主要是:预处理、影像匹配、匹配结果编辑以及 DEM 生成等步骤,DEM 精度如何取决于 DEM 质量控制,DEM 的质量控制贯穿于应用数字摄影测量技术生成 DEM 的全过程。

通常摄影测量方法生成的 DEM 的精度是一些独立因素综合影响的结果,主要有原始数据质量、地形表面特征、DEM 建模方法等,具体来说有:(1) DEM 编辑过程中随机和系统的人为误差;(2) 仪器的系统和随机误差;(3) 航片等的空间分辨率,主要取决于相机、传感器等的情况;(4) 主要由航高等决定的影像垂直分辨率;(5) 雪、植被、云的影响;(6) 影像的精度取决于相机/传感器的畸变程度、大气折射、地球曲率、飞机/卫星状态、影像处理过程等。

在土壤侵蚀研究中,特别要考虑:(1) 比例尺的大小和影像扫描质量;利用摄影测量的方法提取地貌特征或从发育的角度进行土壤侵蚀研究,对于 DEM 的分辨率和精度有很高的要求,尤其在在我国水土流失极为严重的黄土高原地区,沟壑纵横、地面破碎,其侵蚀最为活跃的通常在沟谷的沟头部分,所以对于 DEM 的分辨率和精度有更高的要求。原始影像的地面分辨率对 DEM 的精度影响很大,而原始影像地面分辨率由比例尺和扫描分辨率决定,例如生成 5 m 格网的 DEM 对应原始影像的地面像元就不应大于 1 m,如果是航空影像其比例尺不应小于 1:10 000,扫描分辨率应为 50  $\mu\text{m}$  或者更高,而且应该选择摄影测量专用扫描仪,与普通的桌面扫描仪相比,它扫描的影像具有更高的几何精度、反映更多的影像细节信息。(2) 地表植被的影响;由于数字摄影测量的关键技术是搜索同名像元,如果一个区域影像色调、反差、纹理都很差,则目标的影像特征丧失,无法进行很好的影像匹配,也就不可能生成高精度的 DEM;另外在利用历史航空影像对土壤侵蚀动态进行研究时,植被覆盖的变化还会对野外定位、量测地面控制点带来很大困难。

### 5 国内外著名数字摄影测量系统简介

据 1998 年的统计国内外较著名的全数字摄影测量系统主要有:Laica/helava 公司的 DPW670、DPW770,Intergraph 公司的 Intermap 6887、ImageSt,Zeiss 公司的 pHODIS AT、ST, DAT/EM 公司的 Digitus,ERDAS 公司的 Othomax 等,我国的数字摄影测量系统主要是武汉适普工程系统公司推出的 VirtuoZo 系统和 中国测绘科学研究院推出的 JX-4A 系统,这两个系统在国内都有一定的用户,前者还有一批国外用户。

以武汉适普工程系统公司推出的基于微机的 Virtual ZoonT 系统为例,对数字摄影测量系统生成山区大比例尺的 DEM 的试验表明,DEM 点的精度(中误差)达到  $\pm 0.51 \text{ m}^{[2]}$ ,同时表明地形特征对于利用数字摄影测量生成的 DEM 的精度有较大影响,山高坡陡、地面粗糙、地形变化较

大的区域,特别是地表植被对于 DEM 精度影响很大。在实际工作中按照研究区域地形特点,结合加测地形线、平滑噪声等人工编辑,数字摄影测量方法在生成大比例尺 DEM 的精度可进一步提高。

#### 参考文献:

- [1] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000.
- [2] 谢元礼,欧建中. 自动空中三角测量初探[J]. 铁路航测, 1998, (2): 17- 21.
- [3] 丁军等. 应用数字摄影测量系统生成山区大比例尺 DEM 的精度分析[J]. 遥感信息, 2000, (4): 34- 36.
- [4] 王少娟. 应用数字摄影测量系统生成大比例尺 DEM 的质量分析和控制[J]. 北京测绘, 2001, (1): 28- 31.
- [5] Seginer L. Gully development and sediment yield[J]. Journal of Hydrology, 1966, 4: 236- 253.
- [6] Dymond J R, Hicks D L. Steepland erosion measured from historical aerial photographs[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, July-August: 252- 255.
- [7] Barker R, L Dixon, J Hooke. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22: 1217- 1227.
- [8] Williom E Dietrich, Cathy J Wilson, et al. Erosion thresholds and land surface morphology[J]. Geology, 1992, 20: 675- 679.
- [9] Florinsky Lgor V Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigation[J]. Progress in Physical Geography, 1998, 22(1): 33- 60.
- [10] Burkard M B, R A Kostaschuk. Patterns and controls of gully growth along the shoreline of lake Huron [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22: 901- 911.
- [11] Prosser L P, Aberneathy B. Predicting the topographic limits to a gully network using a digital terrain model and process thresholds[J]. Water Resources Research, 1998, 32(7): 2289- 2298.
- [12] Derose R C, Gomez B, Marden M, et al. Gully erosion in Mangatu Forest, New Zealand, estimated from digital elevation models[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 1045- 1053.
- [13] John R Jensen. Issues involving the creation of digital elevation models and terrain corrected orthoimagery using soft-copy photogrammetry[J]. Geocarto International, 1995, 10(1): 5- 21.
- [14] Florinsky I V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12: 47- 61.
- [15] Florinsky I V. Quantitative topographic method of fault morphology recognition[J]. Geomorphology, 1996, 16: 103- 119.
- [16] Florinsky I V, Kuryakova G A. Influence of topography on some vegetation cover properties[J]. Catena, 1996, 27: 123- 141.
- [17] Shary P A. The second derivative topographic method [A]. In Sepanov, I N, editor. The geometry of earth surface structures[M]. Pushchino: Pushchino Research Center Press, 1991. 30- 60.
- [18] Shary P A. Land surface in gravity points classification by complete system of curvatures[J]. Mathematical Geology, 1995, 27: 373- 390.
- [19] Welth R, Jordan T R, Thomas A. A photogrammetric technique for measuring soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1984, 39(3): 191- 194.
- [20] Derose R C, Basil Gomez, et al. Gully erosion in Mangta Forest, New Zealand, estimated from digital elevation models [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 1045- 1053.
- [21] Harley D Betts, Ronald C Derose. Digital elevation models as a tool for monitoring and measuring gully erosion[J]. Int J. Applied Earth Observation and Geoinformation, 1999, 191- 101.
- [22] Quimn P F, et al. The prediction of hillslope flowpaths for distributed modeling using digital terrain models[J]. Hydrological Processes, 1991, 5: 59- 80.
- [23] Skidmore A K. Terrain position as mapped from a gridded digital elevation model[J]. International Journal of Geographical Information System, 1990, 4: 33- 49.