

SfM 摄影测量法测定切沟的精度评价

史 扬 子¹, 黄 婷 婷¹, 罗 建 勇¹, 杨 扬¹, 刘 宝 元²

(1.北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:选取河北省滦平县两间房村的一条典型切沟,以实时动态差分(Real-time Kinematic,RTK)GPS 的测量结果为基础,评估了断面测量法与 SfM 方法对该切沟的测量精度,并在此基础上探讨不同地面控制点(Ground Control Point,GCP)布设方案对 SfM 测量精度的影响。结果表明:SfM 测量法可作为一种高精度的方法运用于切沟测量,与 RTK GPS 相比,断面测量法的体积测量误差高达 37.28%;而 SfM 方法的误差仅为 2.40%,且相对 RTK GPS 所测切沟 DEM 的差值主要集中于-0.2~0.2 m。此外,轻便、小巧的激光测距仪可有效替代 RTK GPS 用于 GCP 坐标的测量,在此基础上得到的切沟体积误差仅为 0.23%。将切沟沟缘与沟底共 18 个 GCP 抽稀至 4~16 个,并利用 SfM 方法重建该切沟的三维形态。各方案所得切沟 DEM 相比未抽稀结果的差值主要集中于-0.05~0.05 m,且体积差值百分比均低于 5%。研究结果证实,SfM 摄影测量法在切沟测量中具有较高的精度,可应用于野外切沟的快速、精确测量,对于切沟定量监测与切沟侵蚀规律研究具有重要的实践意义。

关键词:SfM 摄影测量法;切沟测量;实时动态差分 GPS;地面控制点;数字高程模型

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0039-08

Evaluation on the Accuracy of Structure From Motion (SfM) Photogrammetry on Gully Surveying

SHI Yangzi¹, HUANG Tingting¹, LUO Jianyong¹, YANG Yang¹, LIU Baoyuan²

(1.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A typical gully was selected and measured using the tape method and structure from motion (SfM) photogrammetry in the village of Liangjianfang, Luanping County, Hebei Province. The accuracies of both gully surveying methods were evaluated via comparing the results with those obtained by the real-time kinematic (RTK) GPS. In addition, different spatial distribution schemes of ground control points (GCPs) used in the SfM photogrammetry were designed and their impact on the gully measurement accuracy was assessed. The results show that SfM photogrammetry can serve as a highly accurate technique for gully surveying. Compared to RTK GPS, the tape method misestimates the gully volume by 37.28%, whereas the SfM photogrammetry overestimates the volume by only 2.40%, when the DEM obtained by RTK GPS is subtracted from the one by SfM photogrammetry, the resulting elevation difference falls between -0.2 m and 0.2 m for more than 70% of the pixels; moreover, the laser range finder (LRF) was demonstrated as an effective alternative for the determination of GCP coordinates; for each pair of GCPs, LRF generates statistically similar spatial distance and elevation difference with the classical RTK GPS; furthermore, the gully volume derived by SfM photogrammetry based on such GCP measurement is only misestimated by 0.23% compared to the volume obtained by RTK GPS. Reducing the number of GCPs on the gully edge and bottom from 18 to a range between 4 and 16, little difference is detected in the corresponding DEMs reconstructed by the SfM photogrammetry. Compared to the DEM

收稿日期:2019-03-29

修回日期:2019-04-19

资助项目:国家自然科学基金(41601277,41571130082);地表过程与资源生态国家重点实验室资助项目(2017-ZY-09)

第一作者:史扬子(1994—),女,河南焦作人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:454407449@qq.com

通信作者:杨扬(1987—),女,福建将乐人,博士,讲师,主要从事土壤侵蚀与非点源污染研究。E-mail:yang.yang@bnu.edu.cn

grounded on all the 18 GCPs, the elevation difference is within the range between -0.05 and 0.05 m for most pixels, disregarding the number and locations of the GCPs considered. The estimation errors for gully volume, accordingly, are all smaller than 5%. These findings demonstrate that SfM photogrammetry has high precision in terms of gully measurement, and is applicable for rapid and accurate gully survey in the field, which has great practical implications for gully monitoring and gully erosion research.

Keywords: structure from motion (SfM) photogrammetry; gully survey; real-time kinematic (RTK) GPS; ground control point; digital elevation model (DEM)

切沟是指普通农具无法横过耕作的侵蚀沟,宽度和深度一般均超过 50 cm ^[1-2]。切沟侵蚀是在切沟发生发展过程中造成的侵蚀,主要包括沟头溯源侵蚀、沟底下切侵蚀和沟岸侧向侵蚀 3 种方式^[2-3]。切沟侵蚀是全球河流泥沙的重要来源,其产沙量可占流域产沙总量的 $10\%\sim 94\%$ ^[4]。为了深入研究切沟侵蚀规律,指导流域及区域水土流失综合治理,亟需建立一套简便、快速且行之有效的切沟监测方法。

切沟测量方法可大致分为传统方法和现代方法两类。传统方法以断面测量法为代表,即沿切沟纵剖面将其划分成若干小段,利用卷尺分别测量各段的横断面面积及纵向长度,进而获得切沟总体积。断面测量法原理简单、成本低廉、操作便捷,是切沟监测的常用方法^[5-7],但在切沟分段与测量时受卷尺精度与人为因素的影响;且只能反映切沟的整体变化状况,无法获知切沟的空间发展方向^[5,8]。现代方法以三维激光扫描法、GPS(Global Positioning System)测量法和摄影测量法为典型代表。三维激光扫描法是指通过激光脉冲采集目标物体的点三维信息,经后期处理转换为三维模型的方法,因其具有高精度和高效率的优势,被广泛认为是目前最精确的切沟测量方法^[9-11]。但该方法对设备要求高,资金投入大,且测量人员需具有一定的专业测量知识^[9],往往难以大面积推广。GPS 测量法近年来发展迅速,其中,实时动态差分(Real-time Kinematic, RTK)GPS 作为 GPS 测量技术发展的一项全新突破,兼具定位精度高(cm 级)与作业速度快的优势,被成功应用于切沟监测^[12-14]。并且,鉴于其在精度方面固有的优越性,RTK GPS 的测量结果也可作为基准数据校验其他监测方法^[14]。然而,该方法的应用受卫星状况限制以及障碍物的影响,且具有成本高、对测量人员的仪器操作水平要求较高等不可避免的缺点^[13,15]。

摄影测量法可高效快速地获得地表形态变化,于 20 世纪 60 年代开始应用于土壤侵蚀监测^[16]。彼时的摄影测量方法具有较大的局限性,如需要成本高、笨重的量测相机拍摄照片,需要昂贵的软件重建三维

点云模型,后期处理数据所需时间长,受人为影响较多等^[10]。近年来,随着计算机视觉技术的高速发展,基于运动恢复结构(Structure from Motion, SfM)的摄影测量方法应运而生。该方法从运动摄像机拍摄的多幅二维图像中估计摄像机运动并重建所摄地物的三维场景结构^[17-19],然后借助地面控制点(Ground Control Point, GCP)的坐标信息获取被测地物的确切形态^[20]。因具有快速、简单、成本低等优势, SfM 摄影测量法自 20 世纪 80 年代发展以来便广泛应用于包括测绘、城市建设、考古研究与文物保护在内的各学科领域,但其在地学的应用起步较晚^[19]。近 10 a 来才开始逐渐应用于地貌与侵蚀测量^[9,21]。

目前, SfM 摄影测量法在国内切沟监测中应用较少,且多集中于较小尺度的室内模拟侵蚀沟测量^[22],缺乏野外切沟测量实践。鉴于三维激光扫描仪高昂的成本,本研究选取河北省滦平县两间房村的一条典型切沟,以 RTK GPS 的测量结果为基准,分析断面测量法与 SfM 摄影测量法对该切沟的测量精度,评价 SfM 摄影测量法在切沟测量中的适用性。并在此基础上,设计不同的 GCP 布设方案,探讨其对切沟测量精度的影响,为 SfM 摄影测量法的实施提供参考依据。

1 研究方法

1.1 测量切沟概况

目标切沟沟长约 15 m ,宽 $2\sim 4\text{ m}$,深 $0.5\sim 1.5\text{ m}$,横断面多呈 V 形,位于河北省东北部承德市滦平县两间房村(图 1),属中温带向暖温带过渡的半干旱半湿润大陆性季风气候,四季分明,冬长夏短。多年平均降雨量 545 mm ,多年平均气温 $7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2018 年 4 月,对该切沟开展测量。同时,在沟缘与沟底采集土壤表层样品,测得其平均容重为 1.42 g/cm^3 ,有机碳平均含量为 1.04% ,砂粒平均含量 70.54% ,粉粒 23.39% ,黏粒 6.07% ,质地属砂壤土^[23]。

1.2 RTK GPS 测量法

采用水平测量精度为 $2.5\text{ mm}\pm 2\text{ ppm}$,垂直测量精度为 $5\text{ mm}\pm 2\text{ ppm}$ 的中海达 iRTK2 经典版

RTK GPS,以大致 40 cm 的间距测量目标切沟沟缘、沟坡与沟底各点的地理坐标。同时,在地形变化剧烈处,适当增加测量点。目标切沟共测量点数 248 个,将其对应坐标导入 ArcGIS 10.2 中重建 DEM,并提取与计算切沟长度、平均宽度、平均深度、周长、面积和体积等参数。



图 1 目标切沟实地照片

1.3 断面测量法

根据切沟横断面形状(近似三角形或梯形)与面积将其划分为 7 段,使用卷尺测量每个横断面的各边边长,用以计算各横断面的面积;同时利用卷尺测量切沟各段的纵向长度,计算各段体积,加和得到切沟总体积^[5]:

$$V_i = \sum_{i=1}^n \frac{(S_i + S_{i+1}) H_i}{2} \quad (1)$$

式中: S_i 为第 i 个横截面的面积(m^2); H_i 为第 i 段切沟的纵向长度(m); n 为切沟分段总数,此处取值为 7; V 为切沟总体积(m^3)。

1.4 SfM 摄影测量法

1.4.1 切沟照片获取与处理 切沟照片利用 Canon EOS 70 D 相机获取。拍摄过程中,相机焦距设置为 18 mm,并保证相邻两张照片的重叠率为 60% 以上^[24]。共拍摄切沟照片 678 张,导入至 SfM 专业软件 Agisoft Photoscan 中。为防止如模糊等拍摄质量

差的照片参与后期三维重建而影响数据精度,通过该软件评估照片中最聚焦部分的清晰度级别,将该级别低于 0.5 的照片删除^[25]。最终,共有 635 张有效照片参与目标切沟的三维重建。

1.4.2 SfM 数据处理 将有效照片导入至 Agisoft Photoscan 进行目标切沟的三维重建时,先通过尺度不变特征转换算法(scale-invariant feature transform, SIFT)^[17]完成特征点的提取与描述,再使用随机采样一致性算法(random sample and consensus, RANSAC)^[26]过滤最近邻匹配(nearest neighbor, NN)^[17]产生的错误匹配点,接着采用光束法平差(bundle adjustment, BA)^[27]进行非线性优化,从而建立目标切沟的稀疏点云。在此基础上,利用面片的多视图立体视觉算法(patch-based multi-view stereo, PMVS)^[27]重建稠密点云,进而生成目标切沟的 DEM。最后将 DEM 导入 ArcGIS 10.2 中,提取与计算切沟相关参数。

1.4.3 GCP 布设与坐标计算 在切沟沟缘与沟底依据以下 3 条原则布设十字形 GCP:(1) GCP 平均间隔大致为 3 m,均匀分布;(2) 沟缘转折处优先或适当加密;(3) 选取局部地势平坦、易固定、没有植物遮挡的位置。目标切沟共布设 GCP 18 个,其中沟缘 14 个、沟底 4 个。

利用中海达 iRTK2 经典版 RTK GPS 测量各 GCP 的大地坐标。为了减轻 SfM 摄影测量法的成本与野外负担,本研究同时使用小巧轻便的 Leica D510 激光测距仪(Laser Range Finder, LRF)测量 GCP 两两之间的空间直线距离及两点所在直线与水平面间的夹角,并由此计算 GCP 之间的高程差及其空间直线距离在水平面的投影距离,进而推算各 GCP 的空间直角相对坐标。方法如下:将各 GCP 依次连线构成三角网,取水平面为水平方向,自定义坐标原点(0,0)与 x, y 轴方向;取垂直于水平面方向为 z 轴方向,高程增加方向为正,并自定义 z 轴 0 点,构建空间直角坐标系。在水平面上,根据三角网各边的投影距离计算各 GCP 的平面坐标(x, y);在 z 轴方向,根据 GCP 之间的高程差计算各 GCP 的坐标 z 值。

为了校验 LRF 对 GCP 的测量精度,将 RTK GPS 所测各 GCP 的大地坐标转换为空间直角坐标后求取 GCP 两两之间的空间直线距离与高程差,与 LRF 的结果进行对比。

1.4.4 GCP 布设方案比较 GCP 的布设、测量与坐标计算复杂繁冗。因此,在原有 18 个 GCP 的基础上,对沟缘和沟底的 GCP 数量进行不同程度的抽稀。

具体原则为沟缘 GCP 不抽稀、均匀抽取 1/2,均匀抽取 1/3;沟底不抽稀、均匀抽取 1/2,全部缺失,共 9 种组合(图 2)。将不同布设方案的控制点信息输入 SfM 专业软件 Agisoft Photoscan 中,重建目标切沟的三维形态,比较各方案的重建效果。

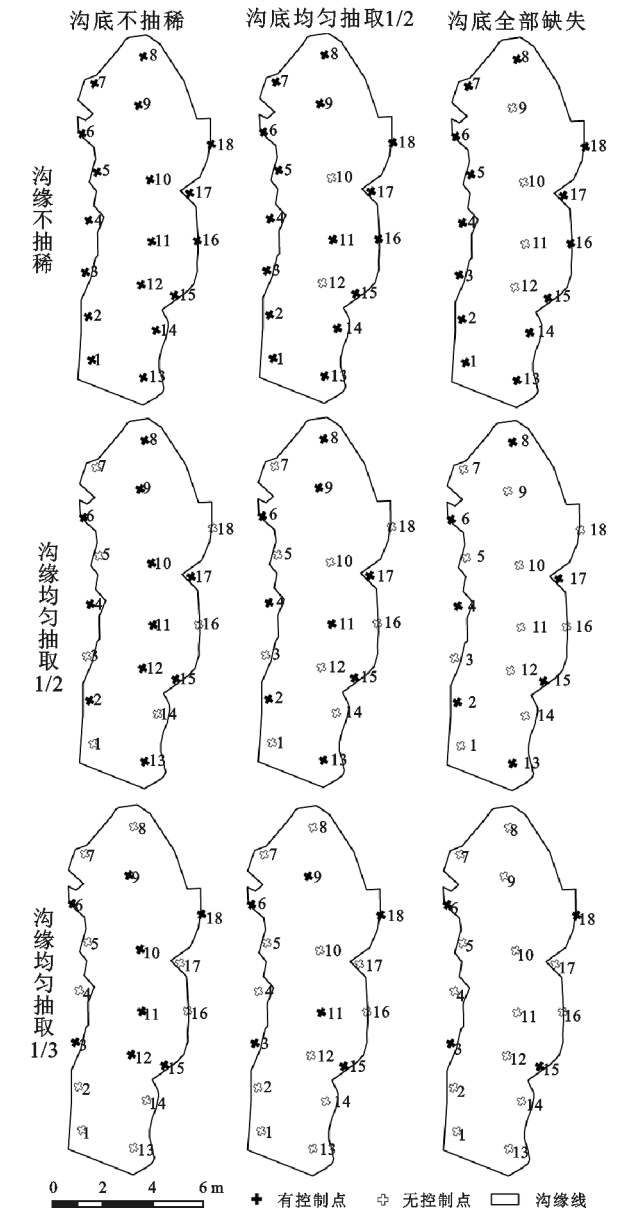


图 2 不同布设方案的 GCP 空间分布

2 结果与分析

2.1 LRF 的 GCP 测量精度

图 3 对比了 LRF 与 RTK GPS 所测 GCP 空间直线距离与高程差。结果表明,无论是空间直线距离还是高程差,LRF 的测量结果与 RTK GPS 十分接近,对应散点均靠近 1:1 线分布。此外,两种方法得到的空间直线距离相关系数为 0.993,高程差相关系数为 0.999,均在 0.01 的置信水平显著。可见,LRF 可有效测量 GCP 的空间分布与相对位置,为获取

GCP 坐标与重建切沟三维形态提供了另外一种可能方法。相比 RTK GPS,LRF 便宜、轻便,测量过程高效易行,可极大地减少 SfM 方法测量切沟时的设备费用,减轻野外作业负担。

2.2 SfM 摄影测量法的切沟测量精度

2.2.1 RTK GPS、断面测量法、SfM 摄影测量法所测切沟参数比较 表 1 为 RTK GPS、断面测量法与 SfM 摄影测量法测量得到的目标切沟主要形态参数。其中,RTK GPS 通过其所测各点的坐标信息重建 DEM(图 4A)后提取切沟长度、平均宽度、平均深度、体积、面积与周长;断面测量法主要测量切沟各段的横断面面积与其代表长度,用以估算切沟长度、平均宽度、平均深度与体积,并未测量切沟面积与周长;SfM 摄影测量法分别利用 RTK GPS 所测的大地坐标($SfM_{RTK\ GPS}$)与 LRF 所测的独立空间直角坐标(SfM_{LRF})重建 DEM(图 4B,C),提取得到对应的两组结果。

除平均宽度外,断面测量法相比 RTK GPS 测得的各参数误差均较大。长度、体积分别高估了 15.75%与 37.28%,平均深度低估了 17.12%。因为平均深度的影响,宽深比较 RTK GPS 高估了 29.91%。这主要是因为断面测量法概化了切沟形态,忽视了沟内细节,且切沟测量横断面的位置选取与卷尺读数受人为因素影响较大。相比于尹佳宜等^[5]在东北黑土区切沟体积测量中得到的~10%的误差,本研究的断面测量法误差较大,这可能与选取切沟的规模有关。前者测量了 3 条切沟,体积均超过 500 m³,在所用卷尺精度一致的情况下,总体积越大,误差百分比相应越小。

相比之下,SfM 方法对切沟的测量精度高得多。由于 $SfM_{RTK\ GPS}$ 与 SfM_{LRF} 均基于重建切沟 DEM 的坡度转折提取其沟缘线,所得沟缘线轮廓一致(图 4B,C),对应的长度、平均宽度、周长与面积也相等。其中,长度相比 RTK GPS 仅低估了 0.56%,平均宽度与面积分别高估了 8.26%与 1.72%。就体积而言, $SfM_{RTK\ GPS}$ 得到的结果为 26.85 m³,相对 RTK GPS 的误差为 2.40%; SfM_{LRF} 的结果为 26.28 m³,误差仅为 0.23%。无论基于何种 GCP 坐标,SfM 摄影测量法均表现出较高的切沟体积测量精度,极大地优于断面测量法(表 1)。然而,SfM 摄影测量法提取的切沟周长却远大于 RTK GPS 的结果,前者比后者长 8.10 m,增幅达 23.63%。这是由于 RTK GPS 得到的是密度较低的点数据,仅可体现沟缘的大致走向(图 4A);而 SfM 法基于重建的三维点云得到 DEM,由此提取的坡度信息可使沟缘走向变得清晰,细节得以充分体现,经矢量化的沟缘线更加细致,周长更长(图 4B,C)。

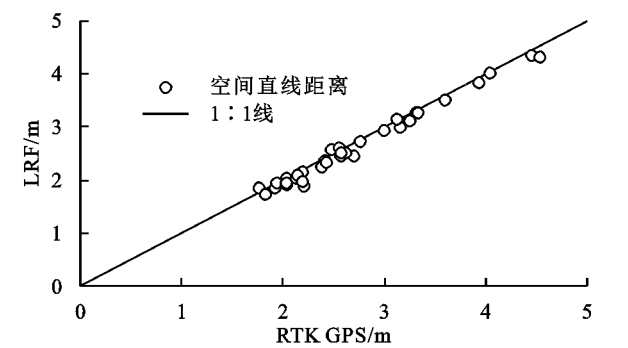


图 3 LRF 与 RTK GPS 所测 GCP 两两之间空间直线距离与高程差对比

表 1 RTK GPS、断面测量法与 SfM 摄影测量法测定的切沟参数对比				
切沟参数	RTK GPS	断面测量法	SfM _{RTK GPS}	SfM _{LRF}
长度/m	14.35	16.61	14.27	14.27
平均宽度/m	3.27	3.52	3.54	3.54
平均深度/m	1.46	1.21	1.38	1.36
宽深比	2.24	2.91	2.57	2.60
体积/m ³	26.22	36.02	26.85	26.28
面积/m ²	47.72	—	48.54	48.54
周长/m	34.28	—	42.38	42.38

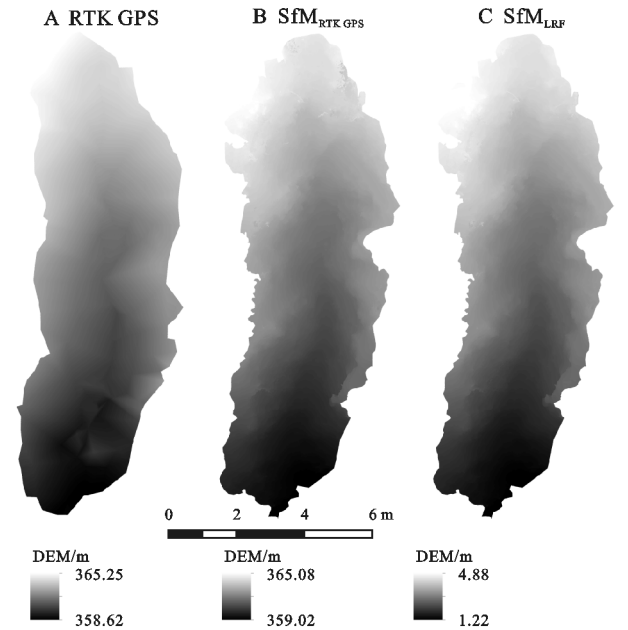
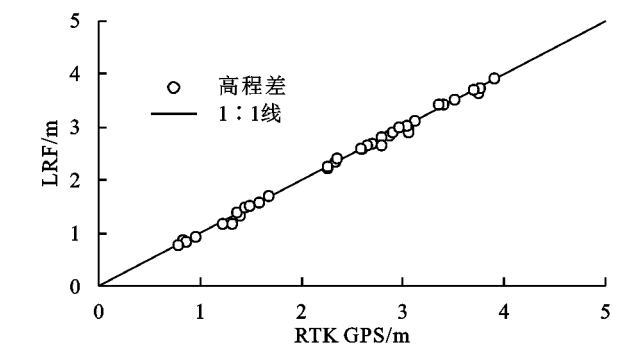


图 4 不同方法所测切沟 DEM

2.2.2 SfM 摄影测量法与 RTK GPS 所测切沟 DEM 对比 虽然 SfM_{RTK GPS} 与 RTK GPS 均基于大地坐标开展 DEM 的重建与计算,但 SfM_{LRF} 采用独立空间直角坐标系,无法与 RTK GPS 所测切沟 DEM 进行直接比较。因此,将所测切沟 DEM 与对应沟缘面 DEM 作相减运算,获得切沟相对 DEM 后进行 SfM 方法与 RTK GPS 的比较。

图 5 为 SfM_{RTK GPS},SfM_{LRF} 所得切沟相对 DEM 与 RTK GPS 所测结果的差值。显然,无论基于何种坐标系,SfM 方法得到的切沟相对 DEM 比之 RTK GPS 结果总体呈西北高、东南低的态势。这可能是由于试验当天



的切沟照片拍摄于上午,切沟西北岸光线充足,深处细节曝光充足,进行三维重建的三角测量计算时,相机与所摄地物的距离较实际距离偏小,高程偏大,与 GPS 结果相减呈正值。而切沟东南岸光线较暗,物体远近对比不明显,相机与地物的距离较实际距离偏大,后期计算的高程偏低,与 GPS 结果相减呈负值。可见,摄影测量法的使用一定程度上受限于天气条件,需确保所测地物所有部分的光线条件基本一致^[28]。

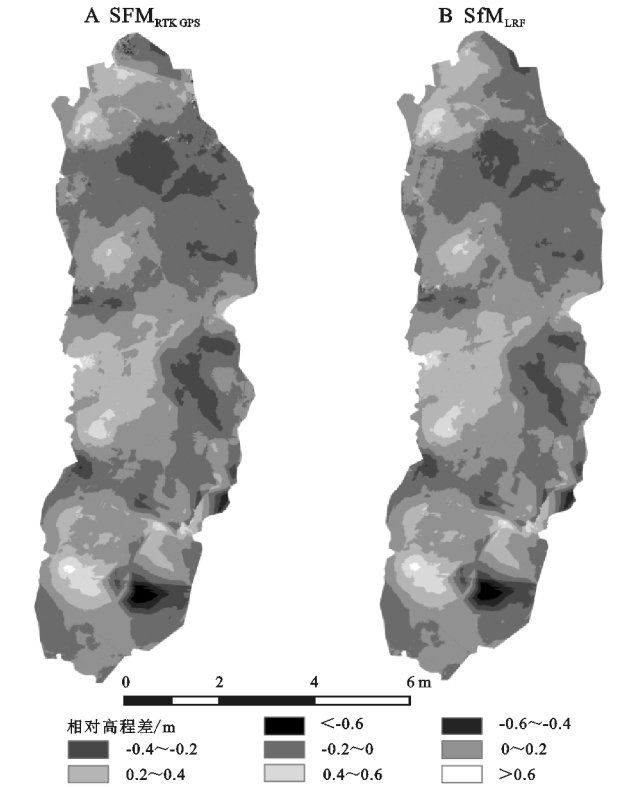


图 5 (A)SfM_{RTK GPS}、(B)SfM_{LRF} 与 RTK GPS 所测切沟相对 DEM 差值

此外,基于两种方法得到的目标切沟相对 DEM,对各栅格高程作配对 *t* 检验,结果显示,SfM_{RTK GPS},SfM_{LRF} 均与 RTK GPS 存在显著差异($p < 0.01$),但总体差异很小,前者与 RTK GPS 的平均高程差值仅为 -0.02 m ,后者与 RTK GPS 的平均高程差值略高,也仅为 -0.04 m 。进一步对比 DEM 各栅格的高程差值也发现,SfM_{RTK GPS} 与 RTK GPS 所测切沟相

对 DEM 高程差值均不超过 1.00 m,且主要集中于 $-0.2\sim0.2$ m 范围内,对应栅格数量占比 73.72%; SfM_{LRF} 与 RTK GPS 的 DEM 相对差值不超过 0.9 m,同样集中于 $-0.2\sim0.2$ m 范围内,对应占比 74.58%(图 6)。这一结果说明 SfM 摄影测量法与 RTK GPS 所测切沟 DEM 总体差别不大,是一种高精度的切沟测量方法。同时, LRF 也可有效替代 RTK GPS 应用于 GCP 的测量及后期切沟三维形态的重建。

2.3 不同 GCP 布设方案对 SfM 摄影测量法测量精度的影响

图 7 为不同沟缘与沟底 GCP 抽稀方案所得切沟 DEM 与基于所有 18 个 GCPs(未抽稀)所得 DEM 的差值。由于 LRF 所测 GCP 两两之间的空间距离与高程差与 RTK GPS 结果无显著差异,且由此获得的切沟 DEM 与 RTK GPS 结果差别也不大,此处各方案所取 GCP 坐标为 LRF 测得的独立空间直角坐标。总体而言,不同程度的沟缘与沟底 GCP 抽稀对生成的切沟 DEM 影响不大。尽管 GCP 沟底不抽稀、沟缘均匀抽取 1/2 大范围地低估了切沟高程(图 7D),GCP 沟底全部缺失、沟缘均匀抽取 1/3 大面积高估了切沟高程(图 7I),但其低估与高估程度均不超过 0.15 m。

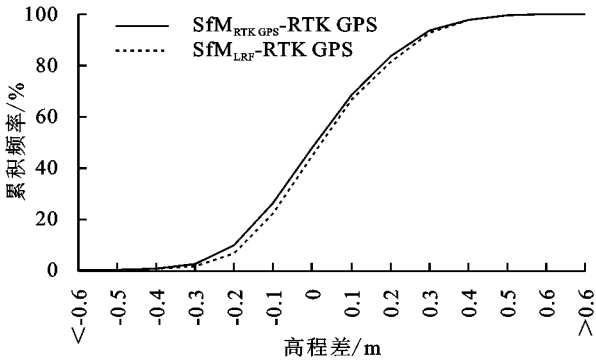


图 6 $SfM_{RTK\ GPS}$ 与 SfM_{LRF} 相对 RTK GPS 所测切沟相对 DEM 差值累积频率百分比

基于各抽稀方案与未抽稀方案得到的切沟 DEM,对各栅格高程作配对 t 检验,结果显示,不同方式的 GCP 抽稀均显著改变了各栅格高程($p<0.01$),但总体幅度不大。各抽稀方案与未抽稀情况的 DEM 栅格平均高程差值介于 $-0.03\sim0.01$ m 范围内。进一步统计 DEM 各栅格的高程差发现,各抽稀方案所得切沟 DEM 相比未抽稀结果的高程差值主要集中于 $-0.05\sim0.05$ m 范围内,对应栅格数量占比均超过 70%(图 8)。此外,各 GCP 抽稀方案得到的目标切沟体积介于 $26.43\sim27.10\ m^3$,相比未抽稀方案的误差介于 0.56%~3.13%(表 2)。这一结果说明 SfM 摄影测量法基于不同 GCP 布设方案得到的切沟 DEM 总体误差较小,均不超过 5%。因此,即使 GCP 数量低至

4 个,也可满足大多数情况下的切沟体积测量精度。

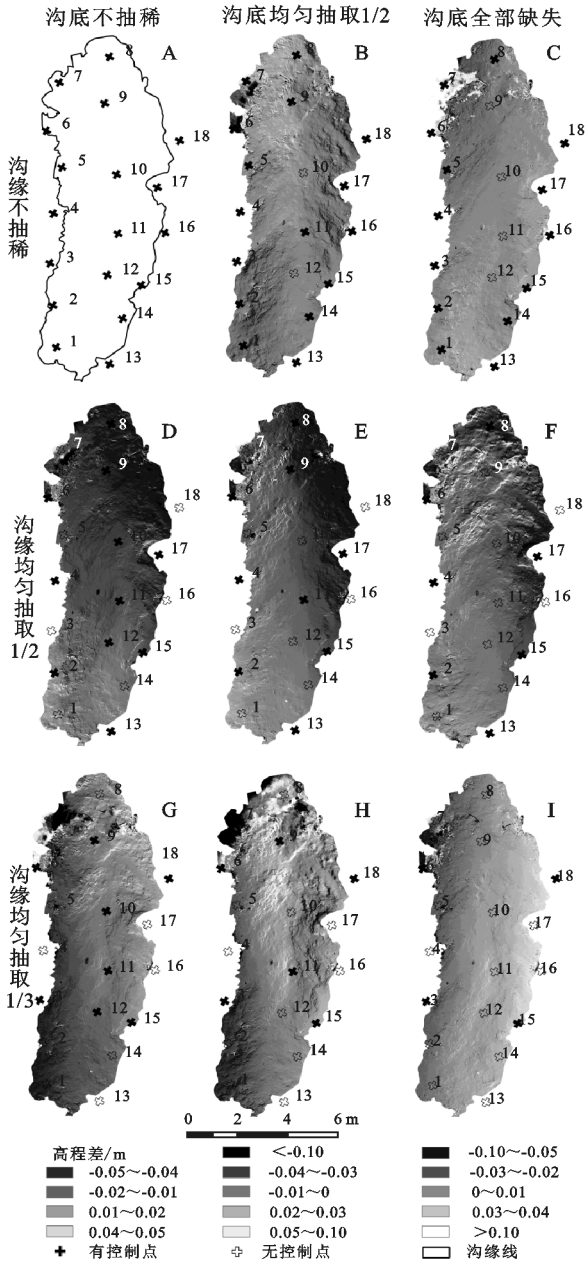


图 7 SfM_{LRF} 基于不同 GCP 布设方案所得切沟 DEM 差值

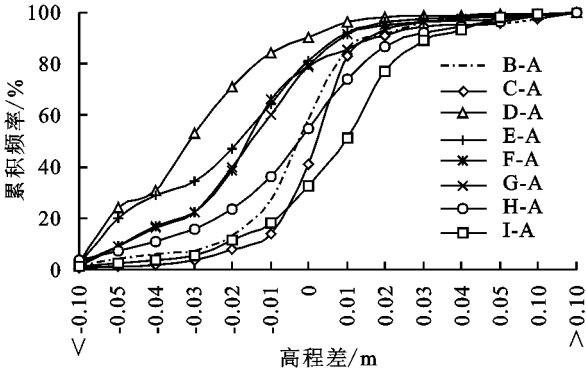


图 8 SfM_{LRF} 基于不同 GCP 布设方案所得切沟 DEM 差值的累积频率百分比

一般来说,GCP 数量越多,所摄地物的三维形态越精确^[20,29]。并且,GCP 是否均匀分布、是否在地势

剧烈处进行加密,也会影响 SfM 方法的测量精度^[30]。但本研究中切沟 DEM 或体积精度并未随 GCP 数量,特别是沟底 GCP 数量明显变化。这可能与目标切沟沟底较浅、规模较小有关。一方面,目标切沟沟宽约 3 m,长约 15 m,少量的 GCP 便可满足精度需求;另一方面,沟缘最高处与沟底最低处高程差不足 7 m(图 4),在沟缘拍摄照片时也可将沟底拍摄在内,沟底的尺度信息可在后期的三维重建过程中通过提取照片中的其他地物特征信息获得,沟底有无 GCP,GCP 数量多少对切沟 DEM 重建影响较小。但当研究对象为如黄土高原地区广泛分布的体积、高差较大的切沟时,还需进一步探究 GCP 布设方法对切沟测量的影响。

表 2 SfM _{LRF} 基于不同 GCP 布设方案所测切沟体积对比				
方案	参数	沟底不抽稀	沟底均匀抽取 1/2	沟底全部缺失
沟缘不抽稀	GCP 个数	18(A)	16(B)	14(C)
	体积/m ³	26.28	26.88	26.97
	体积误差/%	0	2.28	2.63
沟缘均匀抽取 1/2	GCP 个数	11(D)	9(E)	7(F)
	体积/m ³	26.66	26.80	26.43
	体积误差/%	1.45	1.99	0.56
沟缘均匀抽取 1/3	GCP 个数	8(G)	6(H)	4(I)
	体积/m ³	27.10	26.69	26.91
	体积误差/%	3.13	1.54	2.39

3 结论

(1) LRF 为获取 GCP 坐标提供了一种潜在可行的手段。LRF 测量并计算的 GCP 空间直线距离和高程差与 RTK GPS 的测量结果相近,且该方法在成本、携带与操作方面具有明显优势。

(2) SfM 摄影测量法可作为一种高精度的方法运用于切沟测量。以 RTK GPS 的测量结果为基准,断面测量法测量切沟体积的误差高达 37.28%;SfM 方法误差较小,仅为 2.40%,且与 RTK GPS 所得 DEM 的差值主要集中在-0.2~0.2 m。

(3) SfM 方法基于不同 GCP 布设方案得到的切沟测量结果差异不大。各 GCP 抽稀方案(4~16 个)与未抽稀(18 个)所得切沟 DEM 差值主要集中于-0.05~0.05 m,体积误差均低于 5%。但 GCP 布设方法对体积、高差较大的切沟测量精度的影响有待进一步研究。

参考文献:

[1] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956,4(2):99-115.
[2] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生

产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.
[3] 伍永秋,刘宝元.切沟、切沟侵蚀与预报[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(2):134-142.
[4] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change:importance and research needs [J]. Catena, 2003,50(2/4):91-133.
[5] 尹佳宜,伍永秋,汪言在.采用不同方法测量切沟的误差分析[J].水土保持研究,2008,15(1):12-16.
[6] Frankl A, Poesen J, Deckers J, et al. Gully head retreat rates in the semi-arid highlands of Northern Ethiopia [J]. Geomorphology, 2012,174:185-195.
[7] Ezekwe I C, Totti U A E, Wekpe V O. Gully morphometry and morphology in the Iyi-Ukwu basin, south-east, Nigeria [J]. Scientia Africana, 2014,13(2):251-265.
[8] Loughran R J. The measurement of soil erosion [J]. Progress in Physical Geography, 1989,13(2):216-233.
[9] Castillo C, Pérez R, James M R, et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012,76(4):1319-1332.
[10] Kaiser A, Neugirg F, Rock G, et al. Small-scale surface reconstruction and volume calculation of soil erosion in complex Moroccan gully morphology using structure from motion [J]. Remote Sensing, 2014,6(8):7050-7080.
[11] Nouwakpo S K, Weltz M A, McGwire K. Assessing the performance of structure-from-motion photogrammetry and terrestrial LiDAR for reconstructing soil surface microtopography of naturally vegetated plots [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016,41(3):308-322.
[12] 游智敏,伍永秋,刘宝元.利用 GPS 进行切沟侵蚀监测研究[J].水土保持学报,2004,18(5):91-94.
[13] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探:以东北漫川漫岗黑土区为例[J].水土保持学报,2004,18(4):16-19,41.
[14] Chang H, Ge L, Rizos C, et al. Validation of DEMs derived from radar interferometry, airborne laser scanning and photogrammetry by using GPS-RTK [C]// IGARSS 2004.2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE,2004,5:2815-2818.
[15] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59,116.
[16] Seginer I. Gully development and sediment yield [J]. Journal of Hydrology, 1966(4):236-253.
[17] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]// The Proceedings of the Seventh Ieee International Conference on Computer Vision (Iccv), 1999,99(2):1150-1157.

- [18] Ullman S. The interpretation of structure from motion [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 1979,203(1153):405-426.
- [19] Carrivick J L, Smith M W, Quincey D J. Structure from Motion in the Geosciences [M]. UK, West Sussex, Chichester:John Wiley & Sons, 2016.
- [20] Eltner A, Kaiser A, Castillo C, et al. Image-based surface reconstruction in geomorphometry-merits, limits and developments [J]. Earth Surface Dynamics, 2016, 4 (2):359-389.
- [21] Glendell M, McShane G, Farrow L, et al. Testing the utility of structure-from-motion photogrammetry reconstructions using small unmanned aerial vehicles and ground photography to estimate the extent of upland soil erosion [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017,42(12):1860-1871.
- [22] 李俊利,李斌兵,柳方明,等.利用照片重建技术生成坡面侵蚀沟三维模型[J].农业工程学报,2015,31(1):125-132.
- [23] USDA-NRCS. National soil survey handbook, title 430-VI [EB/OL]. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142_p2_054242,2019-3-11.
- [24] Linder W. Digital Photogrammetry: A Practical Course, third edition [M]. Germany, Berlin: Springer, 2006: 15-16.
- [25] Agisoft. Agisoft metashape user manual, standard edition, Version 1.5 [EB/OL]. https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_5_en.Pdf, 2019-2-28.
- [26] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the Acm, 1981,24(6):381-395.
- [27] Furukawa Y, Ponce J. Accurate camera calibration from multi-view stereo and bundle adjustment [J]. International Journal of Computer Vision, 2009,84(3):257-268.
- [28] Wenzel K, Rothermel M, Fritsch D, et al. Image acquisition and model selection for multi-view stereo [R]. Isprs-International Archives of the Photogrammetry, 2013.
- [29] James M R, Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application [J]. Journal of Geophysical Research, 2012,117, F03017.
- [30] Harwin S, Lucieer A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle(UAV) imagery [J]. Remote Sensing, 2012,4(6):1573-1599.

~~~~~

(上接第 38 页)

- [16] Man L, Cai Z, Chang S X. Effects of land use type and incubation temperature on greenhouse gas emissions from Chinese and Canadian soils[J]. Journal of Soils & Sediments, 2011,11(1):15-24.
- [17] Man L, Cai Z C, Mary B, et al. Land-use type and temperature affect gross nitrogen transformation rates in Chinese and Canadian soils[J]. Plant & Soil, 2010, 334(1/2):377-389.
- [18] Tonkaz T, Çetin M. Effects of urbanization and land-use type on monthly extreme temperatures in a developing semi-arid region, Turkey[J]. Journal of Arid Environments, 2007,68(1):143-158.
- [19] Hyvönen T, Glemnitz M, Radics L, et al. Impact of climate and land use type on the distribution of Finnish casual arable weeds in Europe [J]. Weed Research, 2011,51(2):201-208.
- [20] 陈翔,沈初见.土壤微生物分解作用的研究[J].生物学通报,2006,41(11):36-37.
- [21] 田兴军,立石贵浩.亚高山针叶林土壤动物和土壤微生物对针叶分解的作用[J].植物生态学报,2002,26(3):257-263.
- [22] 杨钙仁,童成立,张文菊,等.陆地碳循环中的微生物分解作用及其影响因素[J].土壤通报,2005,36(4):605-609.
- [23] 陈法霖,郑华,欧阳志云,等.土壤微生物群落结构对凋落物组成变化的响应[J].土壤学报,2011,48(3):603-611.
- [24] 林开敏,章志琴,邹双全,等.杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤性质的影响[J].土壤通报,2006,37(2):258-262.
- [25] PCR-DGGE 技术解析针叶和阔叶凋落物混合分解对土壤微生物群落结构的影响[J].应用与环境生物学报,2011,17(2):145-150.
- [26] 肖波,刘增文,孙强.不同林地凋落叶混合分解对土壤微生物量 C, N 的影响[J].西北林学院学报,2008,23 (4):28-31,34.