

无人机摄影测量提取黄土高原切沟参数精度分析*

宋晓鹏¹⁾ 张岩¹⁾ 王志强^{2)†} 邓家勇¹⁾ 王佳希¹⁾

(1)北京林业大学水土保持学院,水土保持与荒漠化防治国家林业局重点实验室,100083,北京;

2)北京师范大学地理科学学部,100875,北京)

摘要 选取陕北黄土丘陵沟壑区桥沟小流域为研究区,分别用同时相的地面三维激光扫描数据和固定翼无人机摄影测量数据提取切沟形态参数,分析无人机摄影测量提取切沟参数的误差及其原因.结果表明:1)无人机摄影测量与三维激光测量比较,提取切沟面积、周长和沟长二维形态参数的百分误差<10%;2)与三维激光扫描测得切沟横截面积、平均沟深和体积三维形态参数相比较,无人机摄影测量误差<20%,沟壁陡峭、植被覆盖度较高的大型切沟测量参数误差较大,而沟壁坡度相对较小、植被相对稀疏的小型切沟测量参数误差较小;3)固定翼无人机垂直摄影采集数据的方式会导致切沟沟壁细节数据缺失,从而降低切沟参数提取精度.基于无人机摄影测量生成的DSM无法有效过滤植被影响,在一定程度上影响切沟参数的提取精度.与三维激光测量相比,无人机摄影测量切沟地貌参数的精度略低,在切沟短期动态变化监测方面还存在一定的局限性.

关键词 三维激光扫描;无人机;切沟形态参数;黄土高原

中图分类号 P963

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020041

0 引言

黄土高原因其独特的地形地貌、气候、土壤等自然条件及人类活动的影响,水土流失问题严重.切沟是黄土高原地区常见的沟谷形态之一,切沟侵蚀则是主要的土壤侵蚀类型.受多种因子的影响,切沟发育过程和机制复杂,且具有阶段性,虽然已取得诸多研究成果,但由于缺少有效的监测手段,切沟侵蚀的研究仍难以深入.近年来,立体摄影测量、高分卫星遥感和三维激光扫描等测量技术被广泛应用于切沟侵蚀的研究中^[1-6].其中,三维激光扫描仪可快速获取大量点云数据并构建较高分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM)^[7],具有穿透性和非接触性的特点,是一种被验证过的高精度监测手段^[8],在黄土高原切沟研究中,诸多学者已将三维激光扫描技术视为切沟研究的必要工具,但受限于其观测范围小、耗费时间等缺陷,在实际应用中有一定的局限性.无人机(unmanned aerial vehicles, UAV)摄影测量作为一种新的技术,凭借其高灵敏性、高精度等特点,不仅能在复杂的地形条件下作业,还有较广的测量范围^[9-10],正被广泛应用于地球科学、农业、林业、军事等各个研究领域^[11-13];马得利等^[14]使用无人机遥感技术,实现

了对废弃采石场立地类型的高精度划分;陶江玥等^[15]借助无人机技术实现了对树种的有效识别.此外,土壤侵蚀监测也是无人机应用的重要领域,无人机在飞行测量后,获得的影像经过后期处理即可得到高精度数字地形数据,在切沟侵蚀研究中的应用越来越多.Liu等^[16]将无人机应用于黄土高原的切沟侵蚀研究,结果表明,尽管黄土高原区地形起伏很大,但无人机仍能够获得高分辨率的地形数据,弥合了以往不同测量方式之间的差距;曾健等^[17]使用无人机倾斜摄影测量技术,提取了林地的地形信息;冯林等^[18]利用无人机倾斜摄影测量技术,构建了高精度的侵蚀沟地形模型,因此,无人机可以被视为一种有效的沟蚀测量手段.但监测切沟发育的动态过程,需要高精度的测量方法,无人机摄影测量在提取切沟参数的精度方面还缺少深入分析,限制了该技术在沟蚀研究中的应用.本文以地面三维激光扫描数据为参照,分析基于无人机摄影测量数据,提取黄土高原丘陵沟壑区切沟地貌参数的精度,以及误差产生的原因,为无人机在黄土高原切沟动态监测的广泛应用提供参考依据.

1 研究区概况

选择陕北黄土高原丘陵沟壑区第一副区绥德县

* 国家自然科学基金资助项目(41671272);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501604-05)

† 通信作者:王志强(1970—)博士,副教授.研究方向:土壤侵蚀与水土保持研究. E-mail: wangzhiqiang@bnu.edu.cn

收稿日期:2020-06-20

桥沟小流域为研究区(图1)。桥沟小流域地理位置为 $110^{\circ}17'22''\sim 110^{\circ}17'49''E$, $37^{\circ}29'36''\sim 37^{\circ}30'15''N$, 面积为 0.45 km^2 , 海拔为 $810\sim 960\text{ m}$, 属于典型黄土崩梁状丘陵沟壑区, 以崩状为主。属于暖温带大陆性季

风气候, 区域内多年平均气温 $9.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年均降雨量为 446.1 mm , 雨季集中在7—9月份。主要土壤类型为黄绵土。自2001年实施退耕还林措施后, 植被得到有效恢复, 植被类型以低矮草本和灌木为主^[19]。

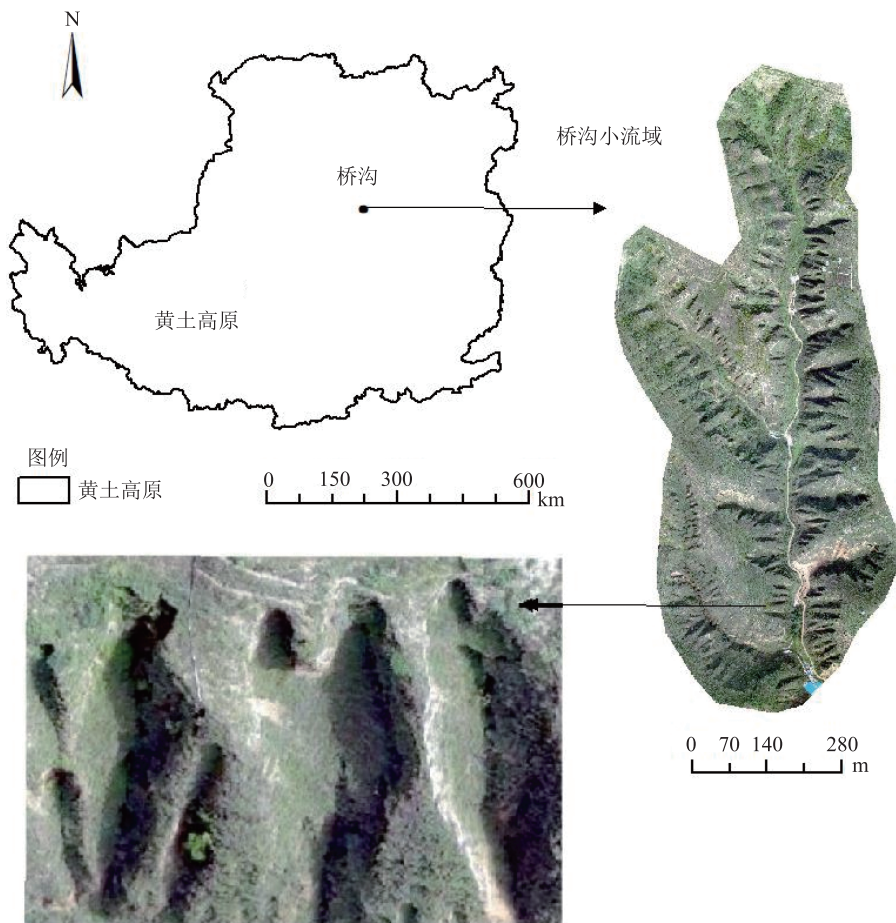


图1 桥沟小流域位置和无人机影像

2 研究方法

1) 三维激光扫描数据获取与处理. 利用三维激光扫描全站仪(拓普康 IS-IMAGING STATION 型), 于2017年9月26日在研究区内, 选择发育典型的15条切沟进行实地测量. 为保证三维激光扫描数据的精确性, 通过结合影像和GPS精确定点, 保证采样点的精度. 在进行数据采集时, 为降低植被因素的影响, 选择了植被稀疏且覆盖度较低的区域进行测量, 铲除个别较大的植株. 该生态环境下, 植被低矮且叶片细小, 间隙大, 仪器发射的激光可有效地穿过植株, 尽量多地打到地面, 从而降低了植被因素的干扰. 数据采集完成后, 将获取的采样距离为 $0.15\text{ m}\times 0.15\text{ m}$ 的点云数据, 使用Cyclone软件, 除去获取的切沟点云数据中无效或受植被影响较大的点数据^[8], 再通过Arc GIS 10.2, 基于不规则三角网模型(TIN)构建栅格大小为

0.15 m 的DEM数据后再进行数据检验, 为保证数据的准确性, 对不合格的数据剔除后进行补测, 然后, 据此提取切沟的地貌参数. 坐标系采用WGS_1984_UTM_Zone_49N, 高斯-克吕格投影.

2) 无人机高分辨率影像获取与处理. 2017年10月14日, 在绥德县桥沟小流域内, 使用Ebee plus RTK型固定翼无人机(翼展 110 cm , 可拆卸, 质量 1.1 kg , 续航 59 min , 内置RTK与PPK精准定位)进行飞行测量, Ebee plus RTK无人机地面采样距离 $\geq 1\text{ cm}$, 像素间距 $2.33\text{ }\mu\text{m}$, 绝对正射影像和数字地表模型精度可达 3 cm . 通过设置相关飞行参数(扫描区域、图像重叠、飞行高度、落点)预先确定飞行计划, 再由操控人员带至空旷区辅助抛飞, 地面控制站由一台配备相关控制软件的平板电脑组成, 它可以与无人机保持持续联系, 并对无人机进行实时监测和控制, 飞行高度范围为 $0\sim 800\text{ m}$, 当飞行高度为 122 m 时, 单次飞行可覆盖范围

为 $2.2 \times 10^6 \text{ m}^2$, 无人机本身携带消费级 senseFly SODA 相机(拍摄像素达 2000 万), 本研究中, 无人机在 122 m 标准飞行高度下, 设置纵向重叠度 80, 横向重叠度 70. 使用 Pix4Dmapper 无人机影像处理软件处理后, 获得空间分辨率为 0.07 m 的数字正射影像图和数字表面模型数据.

3) 切沟参数的提取. 使用 ArcGIS 10.2 软件中的 Georeferencing 模块, 以无人机摄影测量技术获取影像为基准^[20], 结合人工识别参考点对三维激光扫描数据进行配准, 为使得配准精度最大化, 参考点在合理范围内尽量多选, 从而保证影像的精确匹配; 再依据李镇等^[21]的研究方法, 通过目视解译分别在三维激光扫描数据和无人机摄影测量数据中, 勾勒出对应切沟的二维边界, 并据此计算统计得到切沟的二维形态参数. 利用勾绘的切沟边界裁剪三维激光扫描数据和 DEM, 再将切沟边界转为点图层并赋予高程值, 令其栅格大小同样为 0.15 m, 以保证数据的精确性, 最后沿切沟边界裁剪, 从而得到未发生侵蚀的原始坡面 (DEM_0), 再通过 ArcGIS 10.2 软件的 3D Analyst 中的 Surface Volume 工具求得体积 V_{DEM} 和 V_{DEM_0} , 最终确定切沟体积^[22]. 平均沟深与横截面积参数则是在 ArcScene 10.2 软件中, 通过构建切沟三维模型, 由软件中测量工具测得后统计得到.

4) 精度评价. 将获取的三维激光扫描数据和无人机摄影测量数据进行切沟参数的提取后, 对比分析基于无人机影像提取切沟参数的精度. 误差评价指标计算式为^[23]

$$E_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i),$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2},$$

$$\delta = |X_i - x_i| / X_i \times 100\%,$$

式中 E_{mean} 表示平均误差, E_{RMS} 表示均方根, δ 表示百分误差, X_i 表示无人机 DSM 中提取的第 i 条切沟的形态参数, x_i 表示三维扫描仪获取的 DEM 中的第 i 条切沟的形态参数, n 表示切沟条数.

3 结果与分析

3.1 基于无人机摄影测量提取切沟二维形态参数精度分析 与三维激光扫描测得切沟参数比较, 基于无人机摄影测量数据提取的切沟二维形态参数误差及 δ 分布见图 2. 研究区内同一切沟, 基于无人机摄影测量数据提取的形态参数与三维激光扫描测得的结果

均有一定误差, 不同参数间误差及频率分布也有所不同. 由表 1 知, 无人机立体摄影测得切沟面积的 E_{mean} 为 -6.99 m^2 、切沟周长的 E_{mean} 为 -2.33 m 、切沟沟长的 E_{mean} 为 -0.34 m . 从图 2 可以看出, 无人机测得切沟面积 δ 主要分布于 0~10%, 占比达 66.67%, 切沟周长的 δ 主要分布于 0~5%, 占比达 53.33%, 切沟沟长的 δ 主要分布于 0~10%, 占比达 73.33%.

相较于三维激光扫描测得的切沟面积, 无人机摄影测量提取的切沟面积误差最小的切沟如图 3-a 所示, 相差最大的切沟如图 3-b 所示. 无人机本身携带的消费级相机, 基于可见光影像生成数字地形数据, 目前还没有针对植被的有效滤波方法, 所以无人机摄影测量相对于三维激光扫描数据包含更多的植被信息, 是造成切沟二维形态参数差异的主要原因之一. 尤其对于沟边植被较为发育的切沟来说, 无人机摄影测量勾绘的切沟边界及提取的二维参数会受到影响, 从而在一定程度上降低了提取精度.

3.2 基于无人机摄影测量提取切沟三维形态参数精度分析 无人机摄影测量提取切沟横截面积的误差为 0~16 m^2 (图 4), 与三维激光扫描结果相比较, 有 46.67% 的 δ 分布于 0~20%. 横截面积的误差主要源自于无人机摄影测量提取的切沟沟底形态与三维激光

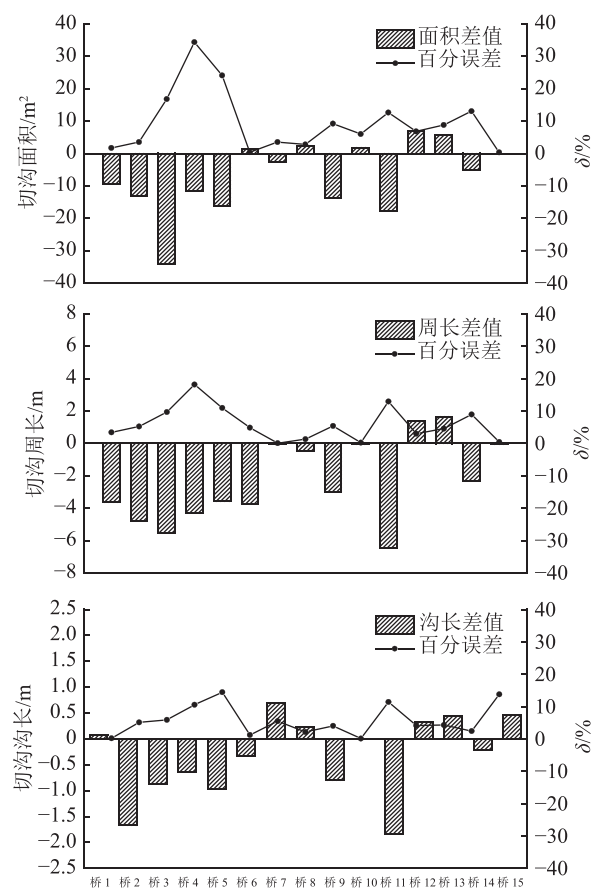
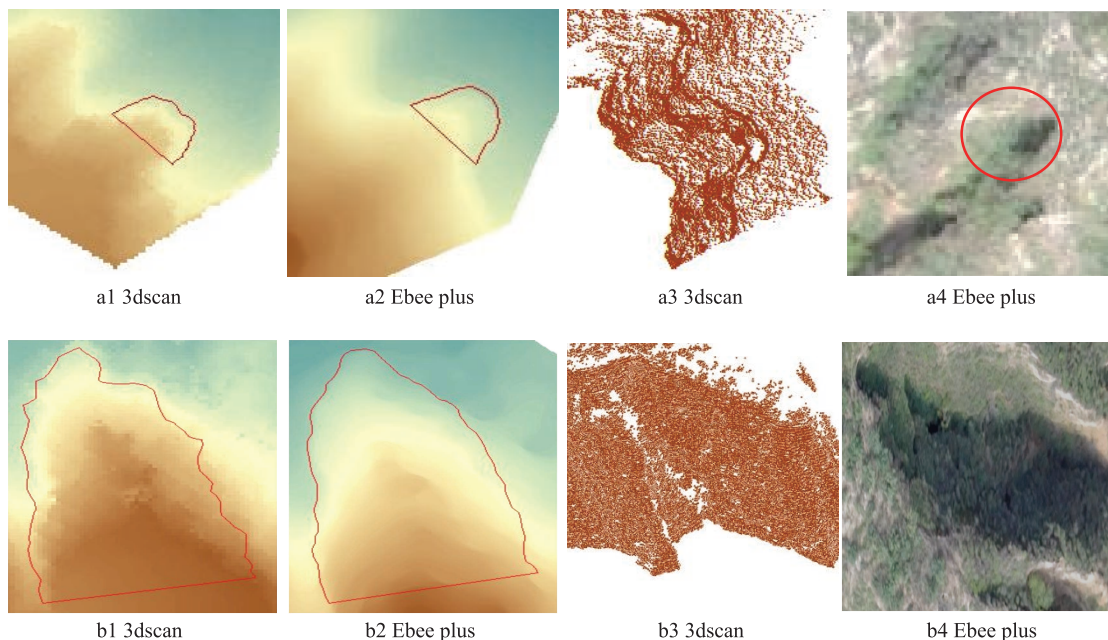


图 2 切沟二维参数误差统计

表 1 切沟形态参数统计结果及误差统计

参数	均值	中值	max	min	SD	E_{mean}	E_{RMS}	$\delta/\%$
面积/m ²	155.39	76.98	559.73	10.84	153.63	-6.99	12.77	9.63
周长/m	49.02	37.55	109.62	13.47	27.26	-2.33	3.39	5.96
沟长/m	14.95	10.15	37.45	2.89	10.23	-0.34	0.82	5.69
平均沟深/m	4.38	4.77	5.87	2.81	1.04	-0.66	1.00	25.70
横截面积/m ²	28.53	29.78	65.00	4.03	16.97	-4.28	8.29	35.05
切沟体积/m ³	387.77	219.17	1399.97	22.12	402.28	-1.66	105.76	34.75
比降	1.24	0.94	2.68	0.61	0.62	-0.19	0.45	23.30

注: δ 表示平均百分误差.



a1 3dscan、b1 3dscan 分别指三维激光扫描仪提取切沟的面积; a2 Ebee plus、b2 Ebee plus 分别指固定翼无人机影像提取切沟的面积; a3 3dscan、b3 3dscan 为点云数据; a4 Ebee plus、b4 Ebee plus 为 DOM 数据.

图 3 基于三维激光扫描与无人机影像提取的切沟面积比较

扫描测得切沟沟底形态的差异. 无人机测得切沟平均沟深误差范围为 0~2.5 m, δ 主要分布于 10%~30%, 占比 66.67%. 切沟体积是切沟测量的重要参数, 与三维激光扫描测得结果相比, 无人机摄影测量提取切沟体积的 δ 主要分布于 0~20%, 占比 60%.

三维形态参数测量结果的差异主要表现为: 切沟沟壁坡度相对较小、植被较为稀疏的小型切沟, 无人机摄影测量提取参数误差较小; 而沟壁坡度陡峭、沟底部分植被较为发育的大型切沟, 误差较大. 图 5 为体积误差最大的切沟, 可以看出无人机摄影测量提取的切沟与三维激光扫描测得切沟的沟底形态存在明显差异. 主要原因有: 本研究中无人机在飞行过程中, 采用了以垂直摄影的数据采集方式, 对于沟壁陡峭的切沟, 会损失部分细节导致误差.

4 结论与讨论

黄土丘陵区地形复杂多样, 支离破碎, 明确无人机摄影测量提取切沟地形参数的精度, 对于充分合理使用无人机进行切沟侵蚀测量和动态监测具有重要参考价值. 本文选择黄土高原丘一区典型小流域, 以三维激光扫描实测数据为参照, 探究无人机摄影测量提取切沟参数的精度, 分析了无人机摄影测量技术在切沟参数测量提取方面的适用性及其误差产生的原因. 得出以下主要结论:

1) 与地面三维激光扫描测量切沟参数结果相比较, 无人机摄影测量提取的切沟二维形态参数精度较高, $\delta < 10\%$. 无人机摄影测量技术获取影像数据与三维激光扫描数据相比, 切沟面积 E_{mean} 为 -6.99 m^2 , 沟长 E_{mean} 为 -2.33 m .

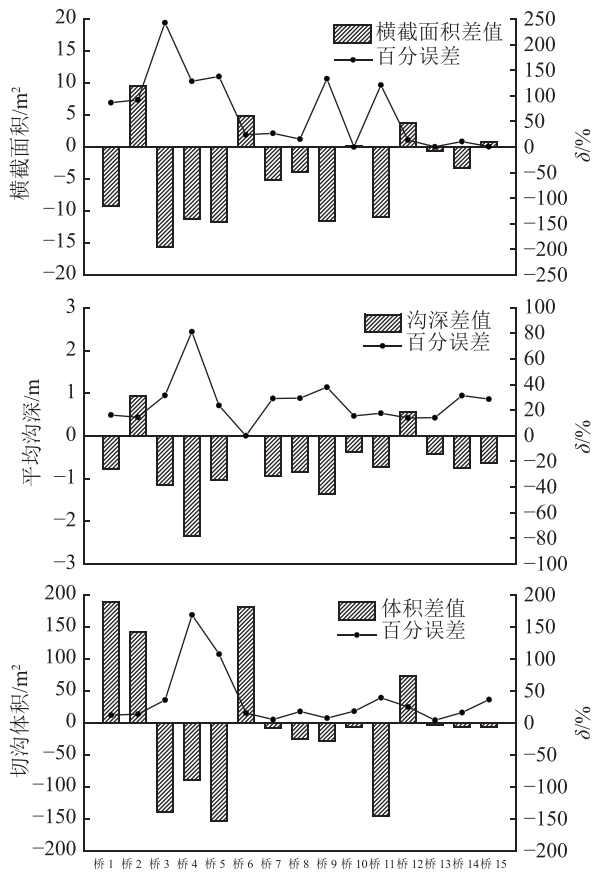
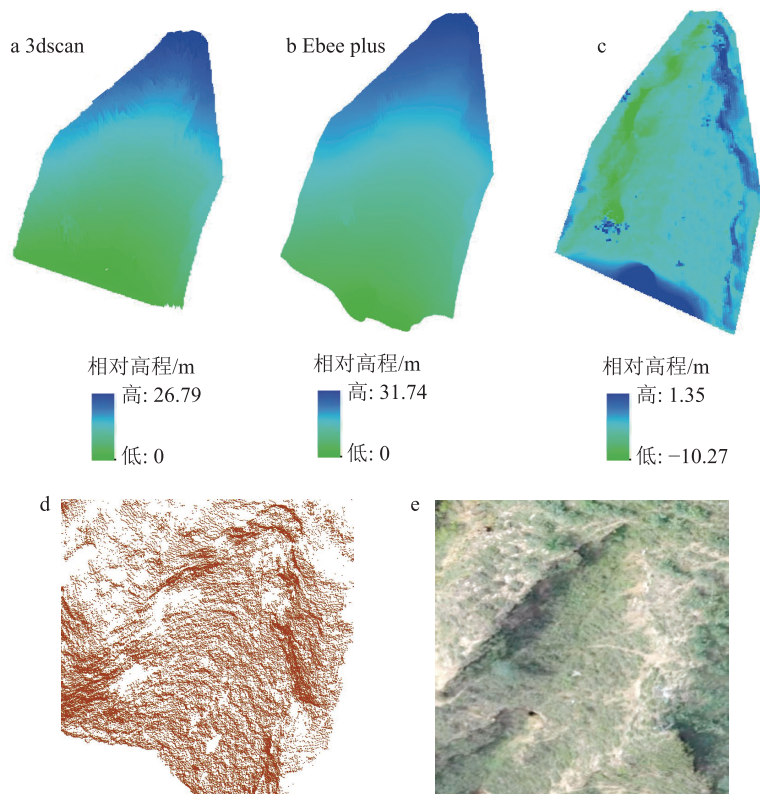


图 4 切沟三维参数误差统计

2)与三维激光扫描测得切沟横截面积、平均沟深和体积三维参数相比较,无人机摄影测量技术获取影像提取参数误差 $<20\%$ 。无人机影像数据测量的切沟体积 E_{mean} 为 -1.66 m^3 。沟壁陡峭、植被覆盖度高的大型切沟测量参数误差较大,而沟壁坡度相对较小、植被相对稀疏的小型切沟测量参数误差小。

3)无人机垂直摄影采集数据的方式和植被的影响是造成无人机摄影测量与三维激光测量切沟参数误差的主要原因。因机载消费级相机只能拍摄彩色照片,无法对植被的影响进行有效滤波,当分辨率相同时,无人机摄影测量数据相对包含一定的植被信息,使得植被因素影响了切沟形态参数提取的精度。

参照已有研究结果,假定三维激光扫描能够准确测量切沟参数^[23-26],以此来分析无人机摄影测量切沟地貌形态参数的精度。但是,地面激光扫描采用对坡测量的方式,测得的沟长和面积等二维参数可能偏大,必须进行几何校正。在无人机航拍和数据处理过程中,测量精度还会受到如航线规划、天气变化等因素的影响,其中,无人机倾斜摄影测量的方式相对于传统正射航测,精度有一定的提高^[18],与三维激光测量相比,无人机垂直摄影测量切沟形态参数的精度略低,在精度要求较高的切沟短期动态变化监测方面还



a 3dscan. 三维激光扫描仪提取切沟的三维模型图; b Ebee plus. 固定翼无人机影像提取切沟的三维模型图; c. 切沟三维激光扫描与无人机影像数据的高程差; d. 点云数据; e. DOM 数据。

图 5 三维激光扫描与无人机摄影测量提取的切沟体积比较

有一定的局限性. 若在正射航测的基础上, 辅以倾斜摄影测量, 将进一步提高切沟监测的精度. 相对于传统测量方法、卫星遥感等测量方式, 无人机摄影测量技术凭借其高灵敏性、高精度等特点, 在切沟地貌测量和侵蚀评估方面仍有广泛的应用价值.

5 参考文献

- [1] MARZOLFF I, POESEN J. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system[J]. *Geomorphology*, 2009, 111(1/2): 48
- [2] PETER K D, D'OLEIRE-OLTMANN S, RIES J B, et al. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data[J]. *CATENA*, 2014, 113: 24
- [3] STÖCKER C, ELTNER A, KARRASCH P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry: a case study from Andalusia, Spain[J]. *CATENA*, 2015, 132: 1
- [4] HÄNSEL P, SCHINDEWOLF M, ELTNER A, et al. Feasibility of high-resolution soil erosion measurements by means of rainfall simulations and SfM photogrammetry[J]. *Hydrology*, 2016, 3(4): 38
- [5] 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
- [6] 汤国安, 李发源, 熊礼阳. 黄土高原数字地形分析研究进展[J]. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(4): 1
- [7] CHEVALIER M L, PAN J W, LI H B, et al. First tectonic-geomorphology study along the Longmu-Gozha Co fault system, Western Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 411
- [8] 张鹏, 郑粉莉, 王彬, 等. 高精度GPS, 三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(5): 11
- [9] ELTNER A, BAUMGART P, MAAS H G, et al. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(6): 741
- [10] NEUGIRG F, KAISER A, SCHMIDT J, et al. Quantification, analysis and modelling of soil erosion on steep slopes using LiDAR and UAV photographs[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 367: 51
- [11] 晏磊, 廖小罕, 周成虎, 等. 中国无人机遥感技术突破与产业发展综述[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(4): 476
- [12] 李辉, 余忠迪, 蔡晓斌, 等. 基于无人机遥感的河流阶地提取[J]. *地球科学*, 2017, 42(5): 734
- [13] 张宝钢, 赵剑, 马驰, 等. 基于无人机遥感技术的南极冰川表面冰坑监测[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(1): 19
- [14] 马得利, 孙永康, 杨建英, 等. 基于无人机遥感技术的废弃采石场立地条件类型划分[J]. *北京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(9): 90
- [15] 陶江玥, 刘丽娟, 庞勇, 等. 基于机载激光雷达和高光谱数据的树种识别方法[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(2): 314
- [16] LIU K, DING H, TANG G A, et al. Detection of catchment-scale gully-affected areas using unmanned aerial vehicle (UAV) on the Chinese loess plateau[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(12): 238
- [17] 曾健, 张晓丽, 周雪梅, 等. 倾斜摄影测量技术提取落叶松人工林地地形信息[J]. *北京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(8): 1
- [18] 冯林, 李斌兵. 利用无人机倾斜影像与GCP构建高精度侵蚀沟地形模型[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3): 88
- [19] 朱岩, 张岩, 朱清科, 等. 半干旱黄土区沟间天然草地植被空间分异特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(6): 1063
- [20] 马怀武, 王俊强. RTK结合无人机低空摄影在高原地区测绘中的应用[J]. *测绘地理信息*, 2014, 39(3): 47
- [21] 李镇, 张岩, 姚文俊, 等. 基于QuickBird影像估算晋西黄土区切沟发育速率[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 141
- [22] 李镇, 张岩, 尚国珩, 等. 晋西黄土区切沟断面特征及体积估算模型[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 152
- [23] HABERLANDT U. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332(1/2): 144
- [24] Jackson T J, Ritchie J C, White J, et al. Airborne laser profile data for measuring ephemeral gully erosion[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54(8): 1181
- [25] ROMANESCU G, COTIUGA V, ASANDULESEI A, et al. Use of the 3-D scanner in mapping and monitoring the dynamic degradation of soils: case study of the Cucuteni-Baiceni Gully on the Moldavian Plateau (Romania) [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(3): 953
- [26] 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 204

Accuracy of gully morphological parameters extracted by UAV photogrammetry in the Loess Plateau

SONG Xiaopeng¹⁾ ZHANG Yan¹⁾ WANG Zhiqiang^{2)†} DENG Jiayong¹⁾ WANG Jiaxi¹⁾

(1)Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, School of Soil and Water Conservation,
Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China;

2)School of Geography, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Unmanned aerial vehicle (UAV) and ground Lidar scanning are 2 new methods used for soil erosion investigation in recent years. However, the accuracy of UAV-generated topography in areas with complex terrain is unclear. To explore applicability of UAV photogrammetry in gully erosion monitoring, gully morphological parameters extracted from UAV images by a fixed-wing drone at a flight height of 122 m were compared to ground Lidar scanning data in a small catchment on the hilly and gully Loess Plateau. Percentage errors in 2D gully parameters including area, perimeter and length extracted from UAV image data were found to be <10%. UAV image-extracted 3D gully parameters (cross sectional area, average gully depth and gully volume) showed errors of <20%, with lower errors for small gullies with a gentle gully sidewall and sparse vegetation, higher errors for larger gullies with steep gully sidewall and high vegetation coverage. Errors in gully parameters measured by UAV photogrammetry were mainly due to the fact that fixed-wing drones collect data vertically, leading to the loss of sidewall details thus reducing accuracy of parameter extraction. Vegetation showed certain influence on measurement accuracy, due to lack of effective vegetation filtering. Compared with ground Lidar scanning, accuracy of geomorphological parameters from UAV photogrammetry was found to be slightly lower, implying limitations in short-term monitoring of gully erosion.

Keywords 3D laser scanning; UAV; gully morphological parameters; Loess Plateau

【责任编辑:刘先勤】