基于无人机贴近摄影测量的坡面细沟侵蚀及形态演化研究

姚怡航[1,2]，张 展[3]，李永红[4]，孙贯芳[4]，娄永才[4]，苏冰妮[4]，张 洵[4]，高照良[2,4]

（1.中国科学院大学，北京 101408；2.中国科学院 水利部 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；
3.黄河水文水资源科学研究院，河南 郑州 45000；4.西北农林科技大学 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100）

摘　要：［目的］寻求效率和精度均高且适应性强的坡面细沟侵蚀测量技术手段，克服传统测量方法效率低、成本高、适用性差等问题，为坡面细沟侵蚀演变过程及定量化研究提供新的思路和技术手段。［方法］利用无人机通过贴近摄影测量获取连续 6 场人工模拟降雨下，坡面细沟发育的高分辨率影像及模型，经定位精度、模型精度和侵蚀模拟 3 个方面验证，定量揭示坡面细沟侵蚀及形态演化过程的可行性。［结果］①三维实景模型地理配准均方根误差 $RMSE_{3D}=1.5$ cm，像控点平面误差 $RMSE_H=0.42$ cm，高程误差 $RMSE_V=0.88$ cm，模型细节及纹理清晰，分辨率达到毫米级。②多期模型能够清晰刻画细沟发育经历的雨滴溅蚀—片蚀—小跌水—断续细沟—连续细沟 5 个阶段。坡面细沟平均沟宽、沟深、密度分别从最初的 1.25 cm，0.82 cm，0.05 发展到最终的 3.27 cm，4.75 cm，0.23，最大沟长 236 cm，最大沟深 14.23 cm。③细沟土壤侵蚀量模拟值随着降雨历时的增加不断接近真实值并趋于稳定，平均误差 10%以内。［结论］无人机贴近摄影测量技术能较好反映细沟发育演化过程，作业效率及便利性较传统测量方法具有显著优势。

关键词：无人机；贴近摄影测量；细沟侵蚀；细沟形态

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2023)06-0000-00　　**中图分类号：**S157.1，P237

文献参数：姚怡航，张展，李永红，等.基于无人机贴近摄影测量的坡面细沟侵蚀及形态演化研究[J].水土保持通报，2023，43(6)：-. Yao Yihang, Zhang Zhan, Li Yonghong, et al. Slope rill erosion and morphological evolution based on UAV nap-of-the-object photogrammetry [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): -.

Slope Rill Erosion and Morphological Evolution Based on UAV nap-of-the-object Photogrammetry

Yao Yihang[1,2], Zhang Zhan[3], Li Yonghong[4],
Sun Guanfang[4], Lou Yongcai[4], Su Bingni[4], Zhang Xun[4], Gao Zhaoliang[2,4]

(1.*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 101408, *China*; 2.*Institute of Soil and Water Conservation*, *CAS & MWR*, *Yangling*, *Shaanxi*, 712100, *China*; 3.*Yellow River Institute of Hydrology and Water Resources*, *Zhengzhou*, *He'nan* 45000, *China*; 4.*Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi*, 712100, *China*)

Abstract: [Objective] To find a high efficiency, high accuracy and strong adaptability of slope rill erosion measurement technology, to overcome the traditional measurement methods of low efficiency, high cost, poor applicability and other problems, to provide new ideas and technical means for the evolution of slope rill erosion and quantitative research. [Methods] UAV was used to acquire high-resolution images and models of slope rille development under 6 consecutive simulated rainfalls by close photometry. The feasibility of slope rille erosion and morphological evolution was quantitatively revealed through three aspects of positioning accuracy, model accuracy and erosion simulation. [Results] ① The root-mean-square error of geographic registration of 3D real scene model is 1.5cm, the plane error of image control point is 0.42 cm, and the elevation

收稿日期：2023-03-10　　**修回日期：**2023-04-01

资助项目：国家自然科学基金“工程堆积体陡坡坡面径流侵蚀输沙动力过程试验研究”（编号：41671283）；中央高校基本科研业务费专项资金（2452021081）

第一作者：姚怡航（1995—），男（汉族），陕西省商洛市人，硕士研究生，研究方向为水土保持工程。Email：yaoyihang20@mails.ucas.ac.cn。

通讯作者：高照良（1969—），男（汉族），河南省灵宝市人，博士，研究员，博士生导师，主要从事农业水土工程和荒漠化防治方面的研究。Email：gzl@ms.iswc.ac.cn。

error is 0.88 cm. The model details and texture are clear, and the resolution reaches millimeter level. ② The multi-phase model can clearly describe 5 stages of rill development: raindrop spatter erosion, slice erosion, small drop water, intermittent rill and continuous rill. The average width, depth and density of rill on slope surface developed from the initial 1.25 cm, 0.82 cm and 0.05 to the final 3.27 cm, 4.75 cm and 0.23 cm, respectively. The maximum trench length was 236 cm and the maximum trench depth was 14.23 cm. ③ With the increase of rainfall duration, the simulated value of soil erosion in rill is close to the real value and tends to be stable, and the average error is less than 10%. [Conclusion] UAV nap-of-the-object photogrammetry can better reflect the development and evolution of rills, and has significant advantages over traditional measurement methods in efficiency and convenience.

Keywords: UAV; nap-of-the-objectphotogrammetry; rill erosion; rill morphology

细沟侵蚀是坡面土壤侵蚀的主要方式之一,其形成过程复杂多样,对其进行准确测量和精确刻画极具挑战性[1]。如何方便、快捷、精准获取细沟形态与体积等指标参数,对开展土壤侵蚀研究及水土保持监测实践具有重要意义。传统的细沟侵蚀形态与体积测量方法有测尺法、测针板法、填充法和径流泥沙法等[2-3],大都需要人工操作且接触被测物体,极大受制于地形条件,费时耗力且容易产生误差。21 世纪后,GPS-RTK[3]、三维激光扫描[4]、近景摄影测量等[5]新一代技术方法被引入细沟侵蚀测量领域,并逐步成为主流,它们能通过定位、扫描或摄影所得的大量三维点坐标数据生成数字高程模型(DEM),从而提取细沟形态、细沟网分布和细沟侵蚀量等数据,使细沟侵蚀的定量化研究精度达到了亚 cm 级别。但是由于仪器设备自身和其使用过程中的局限性,这些技术都不同程度存在成本高、效率低、操作难度大、适应性不强等问题。2014 年左右,随着轻小型旋翼无人机的大规模生产,低空无人机开始广泛应用于土壤侵蚀领域,但无人机在土壤侵蚀研究方面大多还是采取仿地飞行、倾斜摄影测量等[6]方式获取测区影像和信息,比较适合地形平缓、视野开阔、精度要求不高的项目,对滑坡、大坝、高边坡等不易靠近的坡类地表则困难重重。针对日益推进的精细化测量需求,2018 年武汉大学张祖勋院士团队提出了贴近摄影测量(Nap-of-the-Object Photogrammetry)[7]。贴近摄影测量是面向对象的摄影测量,它以物体的“面”为摄影对象,通过贴近摄影获取超高分辨率影像,进行精细化地理信息提取。贴近摄影测量是一个渐进的过程,即首先使用无人机进行常规飞行,获取测区低分辨率影像,处理后生成研究区数字表面模型(DSM)并依此规划设计面向被测体的精细航线,实现智能贴近飞行,从而获取高精影像及模型[8]。2021 年,李治郡等将贴近摄影测量运用于崩岗侵蚀监测[9],所获模型平均重投影误差达到毫米级,较倾斜摄影测量误差降低 45.45%,高程精度总体提升 162.5%;王小刚等[10]在大坝安全鉴定、库区滑坡监测中优化贴近摄影航线,为水利工程安全提供保障,工作效率提高 3 倍以上。贴近摄影测量在城市建筑、地质灾害、文物保护等方面都显示出巨大潜力,对本研究具有一定参考价值,但其在细沟侵蚀中的应用研究鲜有报道。因此,本研究基于无人机贴近摄影测量技术,开展细沟形态刻画和测量工作,以期能为坡面细沟侵蚀演变过程及定量化研究提供新的思路和技术手段。

1 材料与方法

1.1 试验材料及装置

本试验于 2022 年 9 月 23 日至 10 月 18 日在陕西省杨凌马超岭高陡边坡水力侵蚀观测站(34°19′ 24″N, 107°59′ 36″E)进行。试验小区设置在工程开挖坡面上,结合已有研究和野外调查结果,设计试验小区规格为:5 m×1 m×0.5 m(长×宽×深),坡度为 28°,投影面积 4.2 m^2。试验小区内装填的土壤为壤质黏土(国际制),其颗粒组成为 28.73%的砂粒、40.12%的粉粒和 31.15%的黏粒。土壤容重为 1.28 g/m^3,土壤质量含水率为 15%。人工模拟降雨试验采用两组 BX-1 型侧喷式野外降雨设备,基于黄土高原侵蚀性降雨[12-13],设计雨强为 120 mm/h。试验前对雨强进行率定,当率定雨强与设计雨强的误差小于 5%,降雨均匀度大于 85%时方可进行试验。试验选用大疆 M300 RTK 无人机,搭载大疆禅思 Zenmuse P1 测绘相机,用于获得试验坡面侵蚀微地形。基本参数详见表 1。

1.2 试验布设

试验前,在试验小区内外均匀布置 10 个像控点,其中 6 个作为控制点,4 个作为检查点。首先,使用 RTK 测量仪采集每个点位的地理坐标,在每一点位每隔 3 秒取一次值,连续取值 20 次,求平均值作为该点的坐标值。其次,使用无人机对试验小区进行常规测绘飞行(飞行高度 80 m,航向重叠率 70%,旁向重

叠率 80%,镜头角度为 −90°垂直于地面),获取试验小区低分辨率影像及模型。最后,在此基础上,进行精细航线规划,结合试验小区的实际情况,设置无人机飞行高度 5 m,飞行速度 2 m/s,航向重叠率 80%,旁向重叠率 90%,设置镜头角度为 −60°(垂直于坡面),顺坡飞行。

表 1　飞行器及相机基本参数

Table 1　Aircraft and camera basic parameters

飞行器参数	数 值	相机参数	数 值
尺 寸	810×670×430 mm	有效像素	4 500 万
重 量	6.3 kg	像元大小	4.4 μm
最大飞行速度	15 m/s	传感器尺寸	35.9×24 mm (全画幅)
最大飞行时间	负载 45 min	光圈范围	f/2.8～f/16
最大俯仰角度	30°	ISO 范围	100～25 600
最大起飞重量	9 kg	最小拍照间隔	0.7 s

1.3　试验过程

试验共进行 6 次人工模拟降雨,当坡面发生明显变化时停止降雨并记录时间。为保证试验小区下垫面状况均一,试验前一天用 30 mm/h 雨强进行前期预降雨,至坡面产流为止,并用塑料薄膜覆盖静置 24 h。试验开始前基于预先设定好的精细航线,利用无人机进行贴近摄影测量获取坡面原始影像数据。试验开始后,前 6 min 每隔 2 min 接取一次径流泥沙样,后每隔 3 min 接取一次,秒表记录接样时间。每次降雨停止,待坡面水流完全下渗后,启动无人机重复上述操作。

1.4　数据处理

试验结束后将径流泥沙样品静置 24 h 后倒掉上层清液,将剩余样品转移到铝盒中,在 105 ℃烘箱内烘干 8 h 后称重,用于计算径流量和泥沙量。将无人机贴近摄影测量所获得的坡面影像及 POS 数据导入基于 SFM-MVS 技术的大疆智图软件中进行空三解算,生成稀疏点云模型后导入像控点并进行刺点。打开 POS 精度约束,优化空三结果,选择坐标系为 CGCS20003DegreeGKCM108E,二维重建生成 DOM,DEM,三维重建生成实景三维模型。将生成的 DEMs 数据导入 ArcGIS 10.2 中,对不同时段试验前后 DEM 进行相减,得到坡面高程变化值,将高程变化值导出到 Excel 表格,分别与对应像元尺寸相乘求出各单元格侵蚀体积,将所有单元格侵蚀体积求和即得总侵蚀体积,再乘以土壤容重便得到不同时段坡面的侵蚀量。利用 ArcGIS 水文分析工具进行沟网提取,使用剖面图工具截取细沟剖面,导出各细沟沟长、沟宽数据,提取细沟平面(以沟深≥1 cm 侵蚀深度作为确定侵蚀沟的标准)。为了量化坡面细沟形态特征,选取细沟侵蚀形态特征参数:平均细沟宽度($\overline{W}$)、平均细沟深度($\overline{H}$)和细沟平面密度(μ)等指标评估坡面细沟发育特征。细沟平均宽度 $\overline{W}$(cm)是坡面所有细沟侵蚀宽度的加权平均值。

$$\overline{W}=\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{1}$$

式中:w_i 是细沟侵蚀宽度(cm);A_i(i 为自然数)为坡面每条细沟的平面面积(m^2)。

细沟平均深度 $\overline{H}$(cm)[14] 是坡面所有细沟侵蚀深度的加权平均值。

$$\overline{H}=\frac{\sum_{i=1}^{n} h_i A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{2}$$

式中:h_i 为坡面每条细沟的沟深(cm)。

细沟平面密度 μ[14] 是坡面所有细沟平面面积之和与坡面总面积的比值。

$$\mu=\frac{\sum_{i=1}^{n} A_i}{A_0} \tag{3}$$

式中:A_0 为坡面总面积(m^2)。

目前,航空摄影测量领域广泛采用均方根误差(RMSE)作为精度指标对航测成果进行评定[15-16],通过模型点位与实测点位的对比进行评估。其定义公式为:

$$\mathrm{RMSE}_x=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_{i'})^2} \tag{4}$$

$$\mathrm{RMSE}_y=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-y_{i'})^2} \tag{5}$$

$$\mathrm{RMSE}_z=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(z_i-z_{i'})^2} \tag{6}$$

式中:x_i,y_i,z_i 为像控点的实测坐标;$x_{i'}$,$y_{i'}$,$z_{i'}$ 为像控点对应的图解坐标;RMSE_x,RMSE_y,RMSE_z 为像控点的均方根误差;i 表示点号,取值为 1,2,3…n。进而得到航测成果整体的平面均方根误差

($RMSE_H$)、高程均方根误差($RMSE_V$)和整体三维均方根误差($RMSE_{3D}$)：

$$RMSE_H = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_i - x_{i'})^2 + \sum_{i=1}^{n}(y_i - y_{i'})^2} \quad (7)$$

$$RMSE_V = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(z_i - z_{i'})^2} \quad (8)$$

$$RMSE_{3D} = \sqrt{RMSE_H^2 + RMSE_V^2} \quad (9)$$

2 结果与分析

2.1 贴近摄影测量精度验证与分析

2.1.1 定位精度验证 试验共设置 10 个像控点(Pt1－Pt6 为控制点，Pt7－Pt10 为检查点)，试验区内采用基于 GSCORS 的网络 RTK 方式测量像控点获取实际点位坐标，模型处理后，将模型中的点位坐标与实际点位进行对比分析，结果详见表 2。由表 2 可以看出，x 轴误差为－0.665 4～0.608 3 cm，y 轴误差为－0.690 0～0.807 0 cm，z 轴误差为－1.143 7～1.345 8 cm，整体均方根误差为 $RMSE_H$＝0.436 8 cm、$RMSE_V$＝0.882 3 cm。可发现 x 与 y 轴误差均服从正态分布，且误差范围基本一致，控制点的误差略大于检查点，但是 z 轴方向的误差范围明显大于水平方向。整体而言，定位精度达到毫米级，能够有效定位细沟点位，完成多期影像叠加分析。

表 2 像控点坐标与对应点图解坐标误差

Table 2 The coordinate of the image control point is wrong with the diagram coordinate of the corresponding point

名称	dx/cm	dy/cm	dz/cm
Pt1	0.248 1	0.165 0	－0.234 8
Pt2	0.296 4	－0.012 5	－0.322 3
Pt3	－0.665 4	0.394 3	－0.105 1
Pt4	－0.616 5	0.807 0	0.386 7
Pt5	－0.555 8	0.037 2	1.345 8
Pt6	－0.119 5	－0.575 1	0.815 0
Pt7	0.471 3	－0.425 3	－0.759 4
Pt8	0.608 3	－0.035 2	－1.143 7
Pt9	0.248 4	－0.690 0	0.271 7
Pt10	－0.245 4	0.250 9	－1.027 7

2.1.2 模型精度验证 利用大疆智图标注与测量工具，测得试验小区长、宽、高分别为 5.01，0.99 和 2.52 m，坡度 30°，投影面积 4.3 m^2，与实际值基本一致。细沟整体纹路清晰可见，无明显拉花、变形，但在少部分掏蚀和塌陷部位形成口窄肚宽的马蹄形断面，造成无人机拍摄阴影或视野盲区，致使模型点云密度减少或缺失，造成一定误差，这也是高程误差的主要来源。整体模型均方根误差 $RMSE_{3D}$＝1.5 cm，DEM 内插处理后精度优于 0.001 m×0.001 m，能够有效精准识别细沟形态并获取矢量数据。

2.1.3 侵蚀量模拟精度验证 将径流泥沙法获得的侵蚀量作为实测值，两期 DEM 差减结果作为模拟值，进行对比分析得到表 3。由表 3 可以看出，实测值与模拟值之间的相对误差在－18%～13%之间。第 1 场降雨试验，坡面主要发生溅蚀和面蚀，薄层水流带走地表浮土与细小颗粒，泥样含沙量较高。然而使用贴近摄影测量及三维重建技术获取的 DEM 是基于高程值而生成的，此阶段坡面变化微小，高程值变化不明显，故导致相对误差较大(－18%)。随着试验的进行，细沟逐渐发育，侵蚀量不断增加，实测值与模拟值偏差逐渐缩小并于第 3 次降雨后趋于稳定，误差均在 10%以内。

表 3 实测侵蚀量与计算侵蚀量的对比

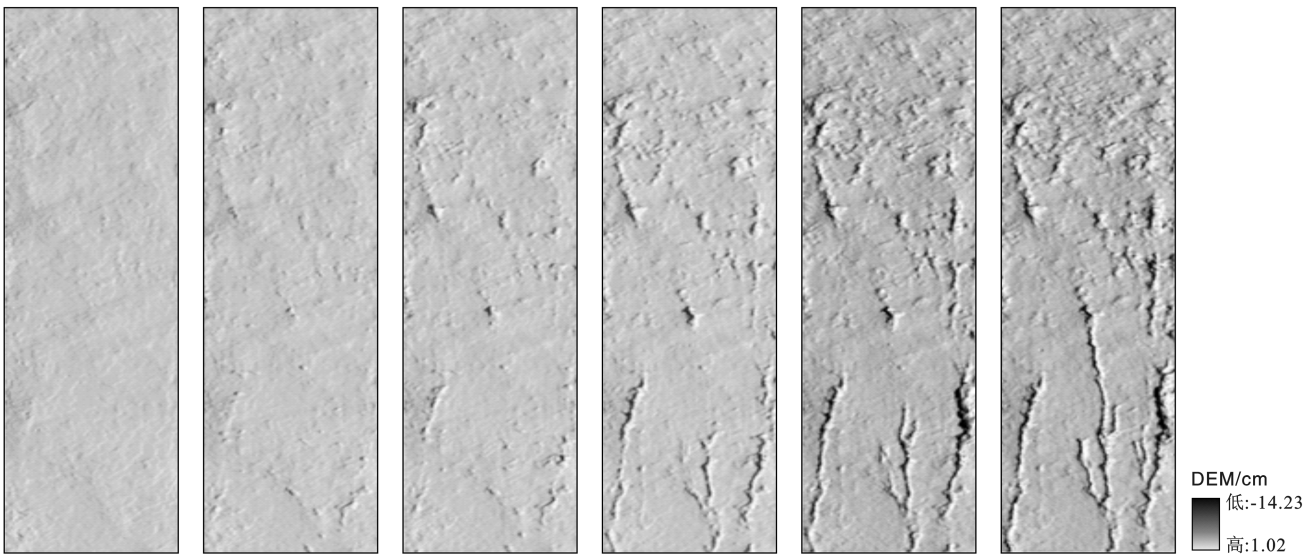
Table 3 Comparison between measured erosion and calculated erosion

场次	降雨历时/min	实测侵蚀量/kg	模拟侵蚀量/kg	误差/%
1	10	4 781.73	3 916.90	－18
2	20	11 459.87	10 251.68	－11
3	20	16 736.45	18 920.32	13
4	20	23 464.28	24 999.95	7
5	20	32 004.83	30 736.45	－4
6	30	42 087.21	44 036.33	5

2.2 坡面细沟侵蚀形态演变分析

汇总第 1～6 场降雨试验所得 DEMs(图 1)，以原始坡面为基准面，负值表示侵蚀，正直表示沉积)及相应时间数据，分析形态演化过程可知，随着降雨历时的推移，坡面侵蚀过程主要经历了雨滴溅蚀—片蚀—小跌水—断续细沟—连续细沟 5 个阶段，具体过程为：第 1 次降雨历时 10 min，坡面侵蚀主要为雨滴溅蚀。雨滴从空中落下，直接打击土壤表面或薄水层引起飞溅，使土壤颗粒发生分离、位移，破坏土壤结构，堵塞土壤孔隙，从而增强径流和侵蚀力，此阶段细沟尚未发育。第二次降雨历时 20 min，随着雨滴溅蚀的不断发生，坡面开始出现凹凸不平，使径流在坡面上呈不均匀分布，在薄弱部位带走更多土粒，留下细小纹沟及鳞片状凹地，坡面侵蚀方式以片蚀为主。第 2 次降雨后，原有小纹沟出现分叉、合并及相互连通的现象，坡面形成细沟雏形，中下部形成明显水流流路、小跌水，坡顶因为汇流面积较小，仍以片蚀为主。第 4 次降雨历时 20 min，随着片蚀的不断增加及径流的

不断汇集,部分位置径流侵蚀力大于土壤抗蚀能力,小跌水演变为下切沟头,并开始出现溯源侵蚀,标志细沟侵蚀的开始。第 5 次降雨,细沟不断发育,坡面下方形成 3 条明显主沟,坡面侵蚀以细沟侵蚀为主。第 6 次降雨历时 30 min,随着降雨历时的增加,沟底下切、沟壁侧蚀、溯源侵蚀作用不断增强,沟壁土体逐渐崩塌,细沟不断扩张、融合、贯通。坡面侵蚀逐渐由细沟侵蚀向浅沟侵蚀发展。



a 第1次试验　b 第2次试验　c 第3次试验　d 第4次试验　e 第5次试验　f 第6次试验

图 1　不同侵蚀阶段坡面 DEM

Fig.1　Slope DEM in different erosion stages

统计整个试验过程不同时期的细沟侵蚀形态参数,结果如表 5 所示。由表 5 可看出,在前 30 min 降雨过程中,坡面侵蚀以击溅侵蚀和片蚀为主,坡面出现少许跌坎,最大跌坎深度为 1.21 cm。降雨历时 30～50 min过程中,坡面出现明显径流流路,跌坎逐渐联通形成断连细沟,细沟平均宽度 1.25 cm,平均深度 0.82 cm,细沟横向发育快于纵向发育。降雨历时 50～70 min 过程中,断连细沟逐渐贯通形成连续的细沟,坡面细沟网形态基本形成,最大沟长为 96 cm,细沟平面密度增大至 0.12。降雨历时 70～90 min 过程中,坡面以溯源侵蚀和下切侵蚀为主,平均细沟宽度和深度分别为 2.44 和 3.21 cm,相比前一阶段分别增加了 42.69%和 141.35%。降雨历时 90～120 min,细沟网逐渐发育成熟,细沟平面密度增大至 0.23,最大沟长为 236 cm,最大沟深为 14.23 cm,此阶段坡面径流沿细沟不断下切沟底,细沟深增加幅度大于细沟宽,沟壁崩塌是细沟加宽的主要方式。整体上沟宽、沟深、沟长、细沟平面密度均随降雨历时的增加而增加,沟长发育最为明显,最终主沟沟长超过雏形期的 3 倍以上。降雨初期细沟沟宽发育速度快于沟深,但随着降雨历时的增加,细沟深的增加速率快于细沟宽度。

表 5　细沟形态参数

Table 5　Slope DEM in different erosion stages

降雨场次	降雨历时/min	平均细沟宽度($\overline{W}$)/cm	平均细沟深度($\overline{H}$)/cm	最大沟长(L_{max})/cm	最大沟深(H_{max})/cm	细沟平面密度(μ)
1	10	—	—	—	—	—
2	30	—	—	—	1.21	—
3	50	1.25	0.82	32	2.74	0.05
4	70	1.71	1.33	96	5.36	0.12
5	90	2.44	3.21	152	8.92	0.18
6	120	3.27	4.75	236	14.23	0.23

3　讨 论

坡面细沟侵蚀领域前人做出了大量且细致的研究,但基本以定性分析为主,随着时代和科技进步,数字化、图像化、定量化研究已成为必然趋势。传统人工接触式测量优点是简单易行,无需专业知识及培训即可操作,但耗时费力且精度无法保证,一般作业范围为小区或坡面尺度,难以大面积应用。三维激光扫描突破了传统的单点测量,能够精准获取细沟模型及参数,但其作业效率较低,一个面积仅为 40 m^2 左右的坡面就需耗时 3.5 h 个[17],受限于其设计及工作原理,无法获取被测物真实色彩影像,容易受到杂草杂

物影响，野外操作困难重重，而且其设备造价昂贵，高大笨重，难以推广应用。常规无人机摄影测量在土壤侵蚀研究领域快速发展，灵巧轻便、操作简单、自动化程度高，能够适用大部分平缓地形及精度要求不高的项目，但面对坡类地形的精细化测量，则需要调整其飞行及拍摄方式，以保证影像的重叠率及完整度。近景摄影测量与贴近摄影测量后处理方式方法基本一致，都是通过获取被测物体影像及 POS 信息，重建生成三维模型，但其前期设备调试安装工作量巨大、专业度高，人工操作无法保证拍摄点位均匀平滑、拍摄高度角度一致，灵活性差[18]。无人机贴近摄影测量创新航线与拍摄方式，能够有效适应坡类地形变化，从而保障重叠率、提高拍摄精度，满足细沟侵蚀研究与监测需求，但在面蚀方面仍无法精准测量。

无人机贴近摄影测量的误差主要来源于仪器误差、人为误差、外界因素三方面[19]。轻小型旋翼无人机受限于其体积、续航及最大载重能力，无法搭载航测仪等大型专业设备，主要使用经过改装的中小型数码相机，采用非传统正方形的矩形阵面 CCD，其基高比通常为 0.15 左右，远小于传统摄影的 0.50，在立体模型下，同名地物交会角较小，降低了立体观测效果，直接影响高程量测精度。人为误差主要来源于航线规划设计和像控点的布设、采集与刺点[20]，精细的贴近摄影测量航线需要根据试验需要灵活调整，无人机飞行高度越低，精度越高，数据处理量越大；相反飞行高度越高，精度越低，数据处理量越小。像控点布设的代表度、采集的精确度、刺点的准确度都会受到人为操作影响，从而造成数据结果的误差。最不易控制的是外界因素影响，如天气、光照、地形、信号等，因此，为保证成像精度及效果，实践过程中应尽量选择在无风无雨、光照充足的阴天、网络信号良好、无高大或突出障碍物等有利条件下展开飞行试验。

4 结 论

（1）三维实景模型定位精度与重建精度均达到毫米级，像控点平面误差 $RMSE_H = 0.43$ cm，高程误差 $RMSE_Z = 0.88$ cm，整体地理配准均方根误差 $RMSE_{3D} = 1.5$ cm；模型细节清晰，着色均匀，无明显拉花、畸变。

（2）多期模型能够刻画细沟发育经历的雨滴溅蚀—片蚀—小跌水—断续细沟—连续细沟 5 个阶段。坡面细沟平均沟宽、沟深、平面密度分别从最初的 1.25 cm，0.82 cm，0.05 发展为第 6 场降雨的 3.27 cm，4.75 cm，0.23；最终主沟最大沟长 236 cm，最大沟深 14.23 cm。土壤侵蚀量模拟精度随着降雨历时的不断增加而趋于稳定，平均误差 10%以内。

（3）利用无人机贴近摄影测量技术可以很好地对坡面细沟侵蚀过程进行动态监测，直观识别坡面各部位的微地形变化，与以往研究中使用的三维激光扫描仪、近景摄影测量等手段相比更加灵活高效，与无人机倾斜摄影测量相比更具针对性、适应性，可为土壤侵蚀研究、监测提供新的思路和方法。

[参 考 文 献]

[1] Piotr T K. Analysis of erosion rill development under rainfall events using structure-from-motion photogrammetry: A case study from Kielce (Holy Cross Mts., Poland) [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(5): 1231-1244.

[2] 覃超，何超，郑粉莉，等.黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J].农业工程学报，2018，34(6)：160-167.

[3] 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.

[4] 吴淑芳，刘勃洋，雷琪，等.基于三维重建技术的坡面细沟侵蚀演变过程研究[J].农业工程学报，2019，35(9)：114-120.

[5] Lou Yongcai, Gao Zhaoliang, Sun Guanfang, et al. Runoff scouring experimental study of rill erosion of spoil tips [J]. Catena, 2022, 214: 106249.

[6] 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)：88-95.

[7] 陶鹏杰，何佳男，席可，等.基于旋翼无人机的贴近摄影测量方法：中国 湖北：CN110006407A[P]，2019-07-12.

[8] 何佳男.贴近摄影测量及其关键技术研究[D].湖北 武汉：武汉大学，2019.

[9] 李治郡，钟琳婷，黄炎，等.基于贴近摄影测量的崩岗侵蚀监测技术[J].农业工程学报，2021，37(8)：151-159.

[10] 王小刚，赵薛强，王建成.贴近摄影测量在水利工程监测中的应用[J].人民长江，2021，52(S1)：130-133.

[11] 齐星圆，高照良，张翔，等.黄土堆积体变坡长坡面细沟动态发育过程[J].水土保持研究，2019，26(3)：42-48.

[12] 杨明义，田均良.坡面侵蚀过程定量研究进展[J].地球科学进展，2000，15(6)：649-653.

[13] 谢云，刘宝元，章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报，2000，14(4)：6-11.

[14] 吴普特，周佩华，武春龙，等.坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J].水土保持研究，1997，4(2)：47-56.

[15] PadróJoan C, Muoz F J, Planas J, et al. Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms [J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2018, 75: 654-676.

[16] 蔡嘉伦，贾洪果，刘国祥，等.对比传统低空航测的无人机

倾斜摄影测量精度评估[J].测绘通报,2022(2):31-36.

[17] 王一峰,牛俊,张长伟.基于三维激光扫描仪技术的坡面径流小区土壤侵蚀运用研究[J].中国农业信息,2013(23):151-152.

[18] 覃超,郑粉莉,徐锡蒙,等.基于立体摄影技术的细沟与细沟水流参数测量[J].农业机械学报,2016,47(11):150-156.

[19] Yang Ying, Lin Zongjian, Liu Fengzhu. Stable imaging and accuracy issues of low-altitude unmanned aerial vehicle photogrammetry systems [J]. Remote Sensing, 2016,8(4):132-140.

[20] Patricio M C, Francisco A V, Fernando C R, et al. Assessment of UAV photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018,72:1-10.