

基于 SfM-MVS 的作物覆盖坡面微地形特征提取与分析

姜静海¹, 郑子成¹, 何淑勤²

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 四川农业大学林学院, 成都 611130)

摘要: [目的] 为探究作物覆盖坡面地表微地形特征提取的可能性, 实现作物覆盖条件下微地形三维建模与动态监测。[方法] 采用 SfM-MVS (structure from motion with multi-view stereo) 方法, 以玉米覆盖坡面为研究对象, 裸坡作为对照, 开展以裸坡及模拟微地形的标志物为基准, 玉米覆盖条件下地表微地形构建提取和精度评估研究。[结果] 1) 玉米覆盖坡面控制点误差 < 0.002 m, 稀疏点云与密集点云数量分别为裸坡的 2.1、2.6 倍。2) 基于 C2C (Cloud to Cloud) 的结果表明, 玉米覆盖坡面与裸坡点云 85.12% 距离 < 0.001 m; DOD (DEM of Difference) 的结果表明, 玉米覆盖坡面与裸坡 DEM 有 96.07% 高差绝对值 < 0.003 m, 整体精度可达毫米级。3) 裸坡标志物微地形提取更接近实际值, 各方向标志物长、宽、深精度均在 98% 以上; 玉米覆盖坡面标志物虽因植被叠加导致横向标志物精度有所下降, 但精度仍在 97% 以上。[结论] 基于 SfM-MVS 的测量法, 可应用于玉米覆盖坡面微地形起伏特征的提取。

关键词: SfM-MVS 摄影测量法; 微地形; 玉米覆盖; 坡面尺度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0325-10

Extraction and Analysis of Microtopographic Features of Crop-Covered Slopes Based on SfM-MVS

JIANG Jinghai¹, ZHENG Zicheng¹, HE Shuqin²

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study was to explore the possibility of extracting surface microtopographic features on crop-covered slopes, and realize three-dimensional modeling and dynamic monitoring of microtopography under crop-covered conditions. [Methods] Using the SfM-MVS (Structure from motion with multi-view stereo) method, the maize-covered slope was used as the research object, and the bare slope was used as the control. Based on the markers of bare slope and simulated microtopography, the extraction and accuracy evaluation of surface microtopography under maize-covered conditions were carried out. [Results] 1) The errors of the control points on the maize-covered slope were less than 0.002 m, and the number of sparse point clouds and dense point clouds were 2.1 and 2.6 times that of the bare slope, respectively. 2) The results based on C2C (Cloud to Cloud) showed that 85.12% of the distances between maize-covered slope and bare slope point clouds were less than 0.001 m. The results of DOD (DEM of Difference) method showed that 96.07% of the height differences between maize-covered slope and bare slope DEM were less than 0.003 m, and the overall accuracy reached millimeter level. 3) The microtopographic extraction of bare slope markers were closer to the actual values, and the accuracy of length, width, and depth of markers in all directions was above 98%. Although the accuracy of the lateral markers on the maize-covered slope decreased due to the superposition of vegetation, the accuracy was still above 97%. [Conclusion] The measurement method based on SfM-MVS can be used as a high-accuracy

收稿日期: 2024-12-20

修回日期: 2025-02-09

录用日期: 2025-02-19

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-04-10

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1302903); 国家自然科学基金项目 (42177316); 四川省区域创新合作项目 (2024YFHZ0193)

第一作者: 姜静海 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 1094552597@qq.com

通信作者: 郑子成 (1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

measurement method to extract the microtopographic fluctuation characteristics of maize-covered slopes.

Keywords: SfM-MVS photogrammetry; microtopography; maize cover; slope scale

Received: 2024-12-20 **Revised:** 2025-02-09 **Accepted:** 2025-02-19 **Online**(www.cnki.net): 2025-04-10

微地形起伏是土壤侵蚀和人类活动共同作用的结果^[1]。土壤侵蚀过程中,地表微地形在径流或降雨的作用下以高程消长的方式影响坡面径流演化过程^[2-3],伴随着微地形重塑及发育^[4]。可见,侵蚀条件下地表微地形变化具有较强的随机性^[5-6],故厘清坡面微地形变化特征对于揭示坡面侵蚀机理具有重要的理论价值。

地表微地形的变化研究可分为接触式和非接触式三维重建^[7]。接触式三维重建在数据获取过程中与土壤表面直接接触造成扰动,从而导致测量结果具有一定误差^[8]。因此,研究主要采用近景摄影测量与三维激光扫描技术等方法无接触式获取地表信息。三维激光扫描技术通过主动发射激光的方式获取地表特征参数,用于微地形测定虽精度较高^[9],但由于空间植被覆盖的遮挡等影响,激光难以穿透植被,植被覆盖地表微地形特征的有效提取难以实现^[10]。传统修剪剔除植被的微地形提取方法^[11],易造成植被破坏,致使适用范围受限,而坡耕地水土流失过程势必受作物覆盖的影响^[12],如玉米生长过程中植株的动态变化改变冠层截留^[13]、穿透雨^[14]及茎秆流^[15]的比例,加剧微地形变化的随机性,亟待探索作物无损状态下的微地形提取新方法。随着计算机视觉技术的快速发展,尤其是尺度不变特征转换等图像特征检测和匹配技术的出现,基于运动恢复结构的摄影测量方法(SfM)应运而生^[16]。已有研究^[5,17]表明,基于SfM的近景摄影测量技术在坡面侵蚀产沙监测、细沟深度测量、根系形态对侵蚀影响及坡面微地形模拟方面较三维激光扫描具备更丰富的应用场景。相较于三维激光扫描技术,基于SfM的近景摄影测量技术对于植被覆盖条件下地表微地形的高效精确获取具有更大的可能性^[18]。

鉴于此,本文采用基于SfM-MVS的近景摄影测量方法,针对目前缺乏作物覆盖下地表微地形量化表征的现状,开展玉米覆盖条件下的地表微地形特征构建提取和精度评估研究,以期在水蚀过程中作物覆盖坡面微地形变化特征及其作用机理研究提供支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:石灰性紫色土,采集于四川省农业科学院中江仓山综合试验示范基地(30°05'27"N,

104°34'16"E),pH 7.96,土壤体积质量 1.30 g/cm³,土壤砂粒、粉粒、黏粒分别为 7.72%、49.01%、43.27%。

供试作物:为当地主栽玉米品种“成单 716”。

供试土槽:采用长 2.0 m、宽 1.0 m、深 0.5 m 的钢制土槽,坡度 15°。

1.2 微地形布设

为更好地反映地表微地形随机性变化特征,采用木制长方体(长、宽、高分别为 10.0、3.0、1.9 cm)嵌入坡面,分别于裸坡及玉米覆盖坡面从纵向、横向、斜向 3 个方向构建同一尺寸标志物,用以模拟不同方向微地形变化^[4]。裸坡每坡面纵向、横向、斜向标志物各 22 条,共计 66 条标志物。



图 1 标志物及地表微地形布设

Fig. 1 Layout of landmarks and surface microtopography

为明晰各地物所处空间位置及其相关关系,以土槽左侧底角土壤表面为坐标原点(0,0,0),将控制点围绕土槽边壁摆布。同时,利用Metashape软件识别控制点中心,分别测量各标靶中心距离原点的X、Y、Z值,共计8个控制点。具体坐标见表1。

表 1 坡面控制点编号及具体坐标

Table 1 Codes and specific coordinates of control points on the slopes

控制点编号	X	Y	Z
1	-0.015	0	0.10
2	-0.015	0.40	0.10
3	-0.015	0.80	0.10
4	-0.015	1.20	0.10
5	1.015	1.20	0.10
6	1.015	0.80	0.10
7	1.015	0.40	0.10
8	1.015	0	0.10

为获取地表微地形特征,需要为各点云的空间信息提供坐标参考。由表 2 可知,裸坡与玉米覆盖坡面控制点误差均<0.002 m,且在各方向误差均没有疑似异常值,控制点整体误差总体均控制于毫米级,玉米覆盖对于控制点精度的影响较小。

表 2 坡面控制点误差
Table 2 Errors of the control points on the slopes

坡面控制点	编号	平面误差	X 误差	Y 误差	Z 误差
裸坡控制点	1	0.001 637	−0.001 333	−0.000 409	−0.000 859
	2	0.001 088	0.000 492	−0.000 959	−0.000 150
	3	0.001 261	−0.001 181	−0.000 433	−0.000 099
	4	0.001 626	0.001 000	−0.000 647	0.001 108
	5	0.001 859	0.001 743	−0.000 065	−0.000 641
	6	0.001 029	−0.000 162	0.000 140	−0.001 016
	7	0.001 615	0.000 266	0.001 257	0.000 979
	8	0.001 638	−0.000 825	0.001 242	0.000 677
玉米覆盖坡面控制点	1	0.001 775	−0.000 629	0.000 320	−0.001 629
	2	0.000 850	0.000 298	−0.000 795	−0.000 035
	3	0.001 955	−0.001 455	−0.001 062	0.000 758
	4	0.001 281	0.000 853	0.000 308	0.000 905
	5	0.001 603	0.000 912	−0.000 318	−0.001 279
	6	0.000 693	0.000 010	0.000 110	−0.000 684
	7	0.001 146	0.004 620	0.000 288	0.001 009
	8	0.001 561	−0.000 452	0.001 149	0.000 955

1.3 微地形构建

1) 稀疏点云构建

围绕各坡面顺时针进行影像采集。由于玉米植株在空间上的遮挡,在拍摄过程中 2 次完整地环绕采集后,再采用加密拍摄的方法,通过不断转换相机位姿,在移动过程中以各角度着重获取玉米植株附近地表影像,使影像成为首尾衔接的运动过程,相片内容重叠度在 80% 以上,并保证裸坡与玉米覆盖坡面影像数量相同。

稀疏点云的构建基于运动结构恢复方法 (SfM)^[19],经 SIFT 运算后最终得到相机位姿图(图 2)。由图 2 可知,裸坡与玉米覆盖坡面均以不同俯角进行 2 次环形采样,与实际采样情况相符,基于 SIFT 算法的相机位姿状态在叠加玉米覆盖条件下的估计结果较为准确,可作为微地形特征构建的参考,但仅具有大致轮廓信息,无法满足细致纹理和几何特征的应用,需构建密集点云。

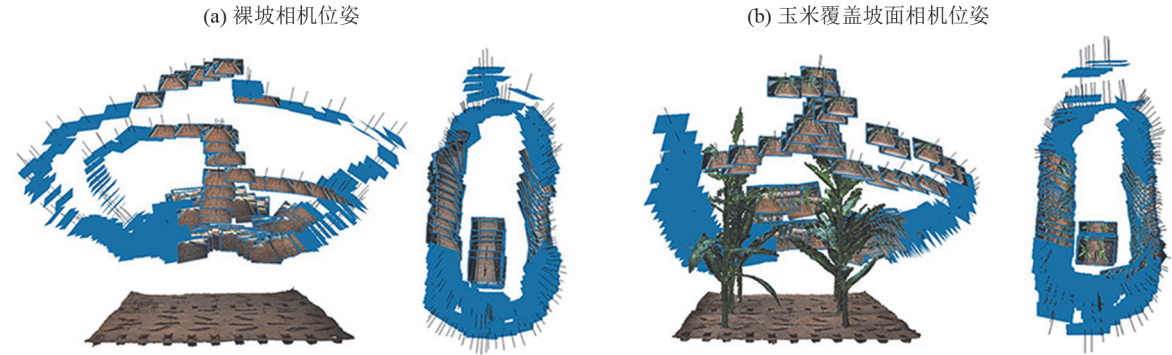


图 2 基于 SIFT 算法估算的相机位姿分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of camera poses estimated based on the SIFT algorithm

2) 密集点云构建

密集点云的建立是利用多视图立体视觉算法 (MVS)。MVS 通过整合多张重叠度较高的图像,利用视差信息和立体匹配算法生成更丰富、距离更近的密集点云。MVS 算法填补 SfM 重建结果中的空洞,采用多次过滤与扩散相结合的措施,精确获得稠密且精确的密集点云模型^[20](图 3a),为编辑密集点

云实现玉米覆盖条件下微地形提取提供基础。

3) 微地形提取

根据坡面与玉米 RGB 值的差异通过 Metashape 中的选取工具对点云进行筛选,旋转选取并将玉米植株分配类别为“植被”(图 3b),剩余选区为“地面”(图 3c)。通过该技术手段实现玉米植株的剔除,聚焦于坡面微地形特征的提取。

1.4 精度验证

采用 Cloud Compare V2 软件对玉米覆盖点云进行整体精度验证^[21]。首先,使用迭代最近点(ICP)方法进行精细配准操作,以裸坡点云作为参考基准,通

过比较裸坡点云中每个点与玉米覆盖坡面点云中最近点的距离,有效评估二者的相似程度。点云间距越小,则说明密集点云越相似,玉米覆盖条件下坡面密集点云受玉米植被的影响越小,精度越高。

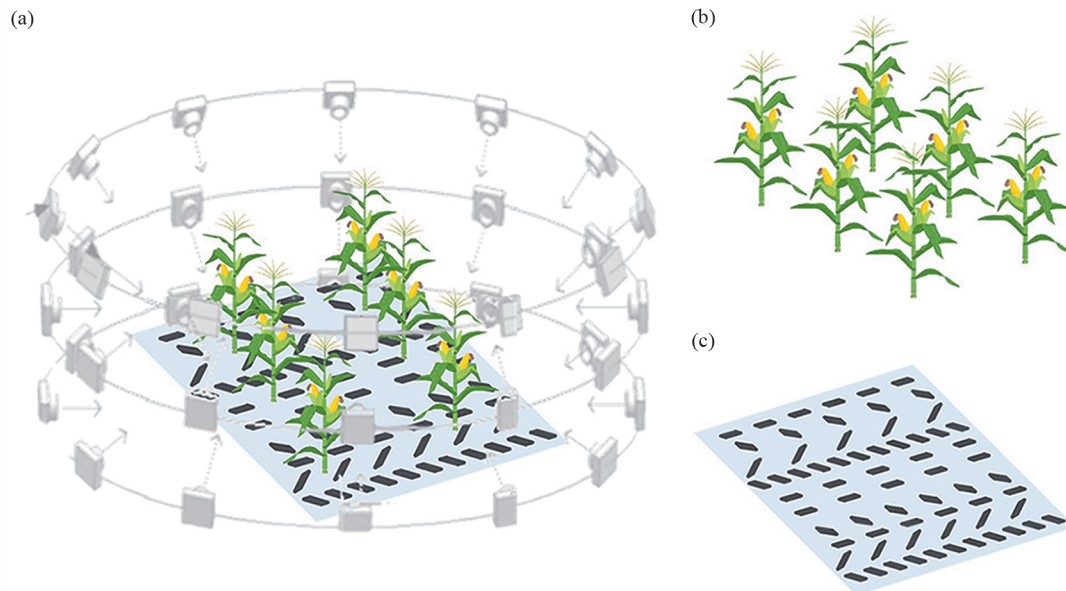


图3 基于 SfM-MVS 的玉米覆盖坡面微地形特征提取流程示意

Fig. 3 Schematic diagram of microtopographic feature extraction process for maize-covered slope based on SfM-MVS

采用 ArcGIS 10.2 软件进行裸坡 DEM 与玉米覆盖坡面 DEM 的整体精度验证^[22]。以裸坡 DEM 作为参考基准,将玉米覆盖坡面的 DEM 减去裸坡 DEM,获取二者之间的高程差值。此差值越小,意味着在玉米覆盖条件下,DEM 重建特征受玉米植被的影响程度越低,其精度越高。

分别对标志物长、宽、深进行测量,将重建的模型与实际模型的尺寸进行对比,从而验证微地形局部提取结果与实际情况的差异^[23]。采用相关指标进行评估验证。

均方根误差(root mean square error, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

估算精度(estimation accuracy, EA):

$$EA = \left(1 - \frac{RMSE}{\text{mean}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

总预测偏差的相对误差(relative error, RE):

$$RE = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y) \right|}{\sum_{i=1}^n y} \times 100\% \quad (3)$$

式中: y 、 $\hat{y}_i$ 分别为测量值与实际值; n 为样本数;mean 为检验样本数据的平均值。

2 结果与分析

2.1 基于 SfM-MVS 的玉米覆盖坡面微地形特征构建

由图 4 可知,稀疏点云空白处与标志物存在位置相对应,裸坡稀疏点云数 36 597,玉米覆盖坡面稀疏点云数为 76 602,且点云数为裸坡的 2.1 倍。由于 SfM 主要通过匹配图像序列中的特征点来重建三维空间结构,所获点云的点与点之间距离较大,在坡面出现较多空洞区域,仅能表征场景的大致轮廓信息,无法明晰玉米和坡面界限。因此,需要结合 MVS 等技术对稀疏点云进行补充和优化,形成基于 MVS 的坡面密集点云。裸坡密集点云数 2 110 534,玉米覆盖坡面密集点云数 5 398 751,且点云数为裸坡点云的 2.6 倍。由于玉米植被的剔除会在原位留下与玉米植株粗细一致的空洞,裸坡点云的 6 个空洞点分别对应玉米所在位置,由此保证坡面点云空洞所处位置的一致性。而在进行密集点云生产后,标志物形态精度提高,不再以较大空洞形式呈现。

构建密集点云并分配类型后可将 3 120 890 个坡面点云与 2 277 861 个玉米点云分离(图 5)。由图 5 可知,就提取效果而言,轮廓清晰,在保证不破坏玉米与地表形态的基础上无接触式提取出坡面的密集点云以表征微地形具体形态,从而实现剔除玉米影

响达到直接研究坡面形态特征的目的,同时为保证结果可信度还需进行精度验证。

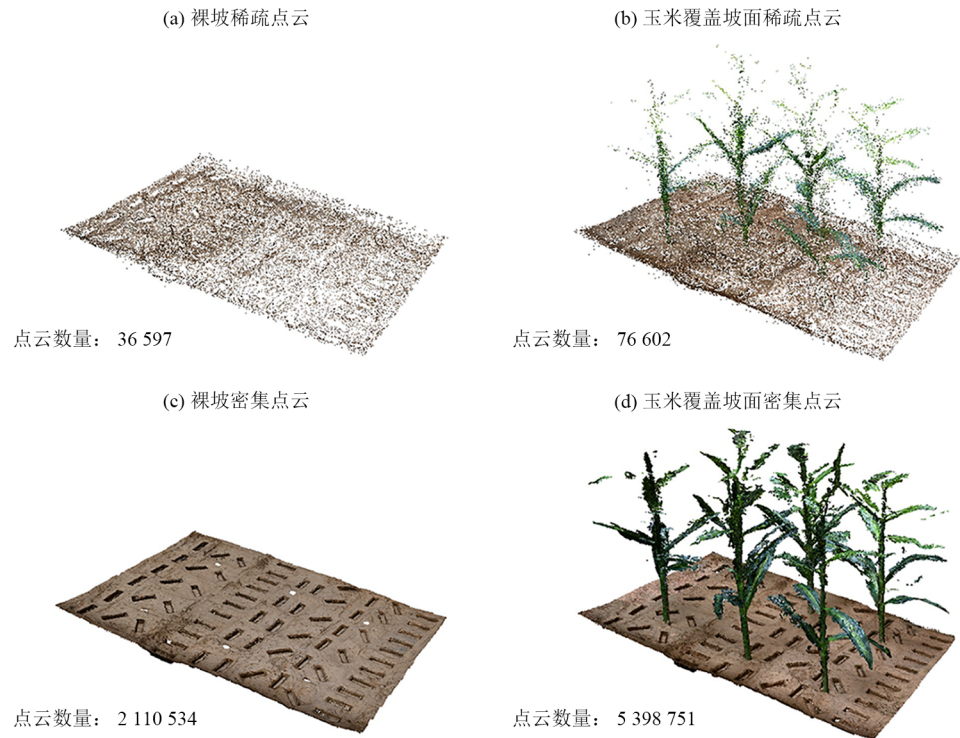


图 4 基于 SfM-MVS 的坡面点云特征

Fig. 4 Features of point clouds on the slopes based on SfM-MVS

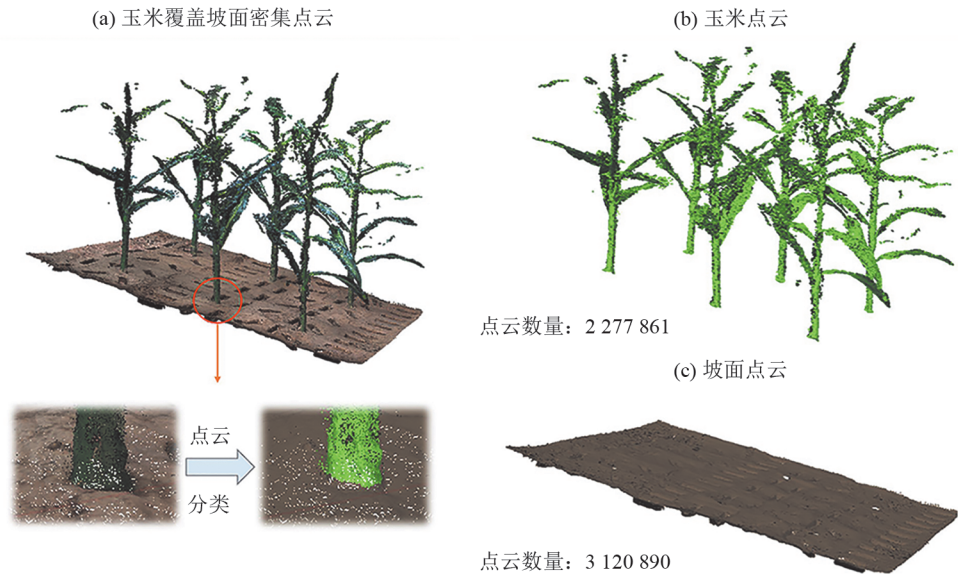


图 5 玉米覆盖坡面点云分类及地表微地形特征构建

Fig. 5 Classification of the point clouds on the maize-covered slope and construction of microtopographic features

2.2 基于 SfM-MVS 的玉米覆盖坡面微地形特征整体精度验证

2.2.1 基于 C2C 的玉米覆盖坡面点云 通过 C2C 的检测方法可表明点云间距离差值。由图 6 可知,图中蓝色区域表明点云差异较小,绿色及红色区域点云差异较大,差异较大值集中于标志物区域,部分标志物点云存在漂移、形态错估及形态不一致等现象。点云差异以蓝色区域为主,2 936 354 点云中有 2 500 169

(85.12%)点云距离 $<0.001\ 0\ \text{m}$,点平均距离 $0.000\ 7\ \text{m}$,标准差 $0.000\ 5$ 。表明基于 SfM-MVS 的玉米覆盖微地形的点云结果差异较小。

2.2.2 基于 DOD 的玉米覆盖坡面 DEM 分析 由图 7 可知,通过 DOD 的检测方法表明,绝大部分区域 DEM 高差绝对值位于 $0.003\ \text{m}$ 范围内,图中绿色及黄色区域 DEM 差值较大,集中于标志物边壁及部分标志物底部。其中 96.07% 差值低于 $0.003\ \text{m}$,表明基于

SfM-MVS 的玉米覆盖微地形的 DEM 结果整体上存 在细微差异,且差异较大区域集中在标志物边缘。

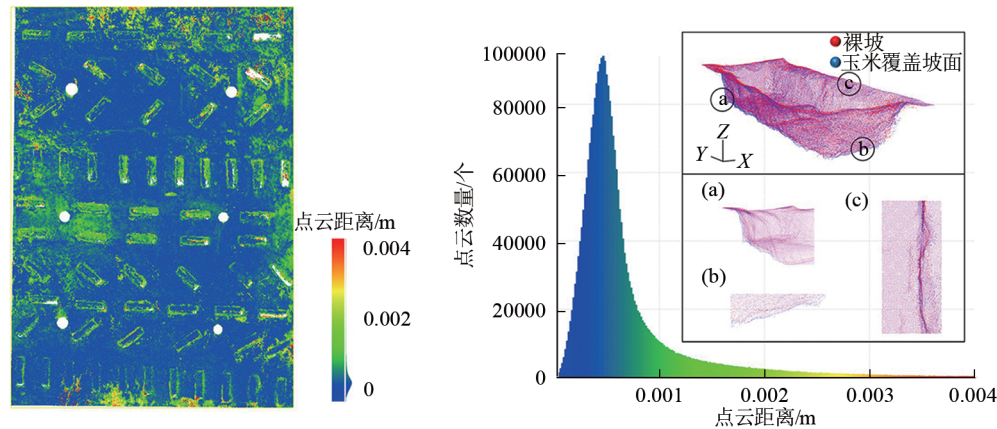


图 6 裸坡与玉米覆盖坡面点云差异分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of the differences in point clouds between the bare slope and maize-covered slope

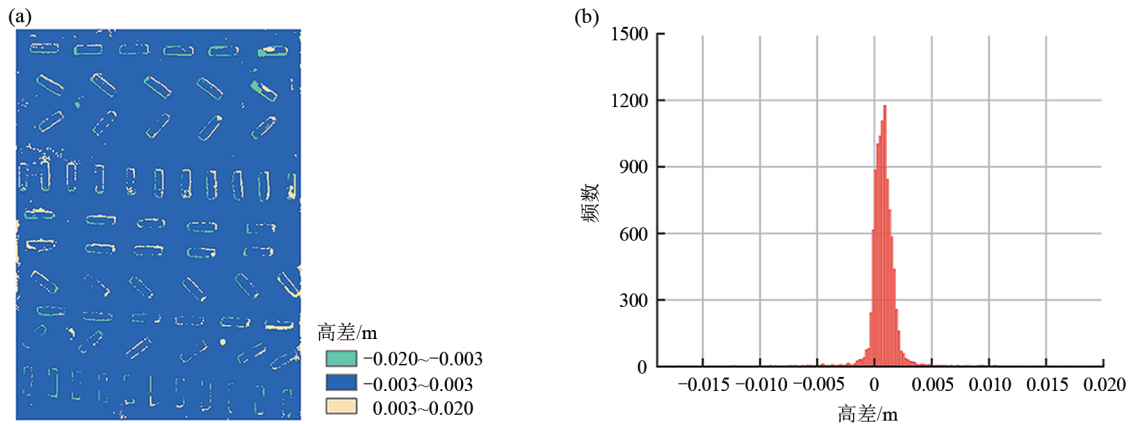


图 7 裸坡与玉米覆盖坡面 DEM 差异分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of DEM differences between the bare slope and maize-covered slope

2.3 基于 SfM-MVS 的玉米覆盖坡面微地形特征局部精度验证

2.3.1 纵向标志物提取 由图 8 可知,纵向标志物裸坡与玉米覆盖坡面累计差值均为长度>深度>宽度,且深度和宽度的测量值主要以大于标志物实际值为主。

表 3 为纵向标志物精度评估表,经计算,22 条构

建纵向沟长、宽、深以裸坡更为贴近实际值,长宽深方向上的均方根误差分别为 0.03、0.02、0.02,其精度分别在长宽深方向均达 99%,总预测偏差的相对误差(RE)均<0.1%。而玉米覆盖的纵向标志物长宽深方向上的均方根误差分别为 0.11、0.06、0.08,精度达到 96%。总预测偏差的相对误差(RE)分别为 0.24%、0.77%、1.21%。

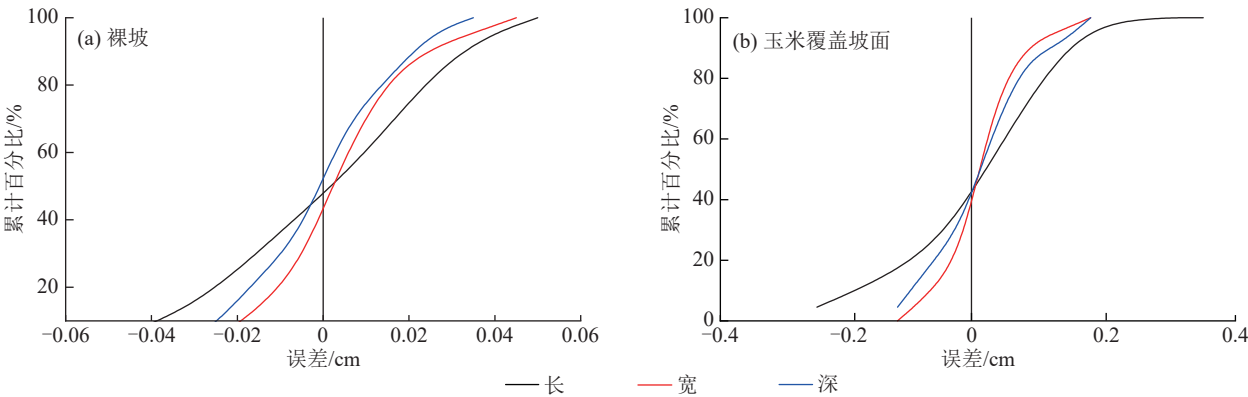


图 8 纵向标志物形态测量值与实际值差值累计频率分布

Fig. 8 Cumulative frequency distribution of the differences between the measured and actual values of longitudinal marker morphology

表 3 纵向标志物精度评估分析

Table 3 Accuracy evaluation and analysis of longitudinal markers

坡面类型	方向	平均值/cm	RMSE	EA/%	RE/%
裸坡	长	10.00	0.03	99.74	0.02
	宽	3.00	0.02	99.46	0.09
	深	1.90	0.02	99.15	-0.07
玉米覆盖坡面	长	10.02	0.11	98.86	0.24
	宽	3.02	0.06	98.02	0.77
	深	1.92	0.08	96.10	1.21

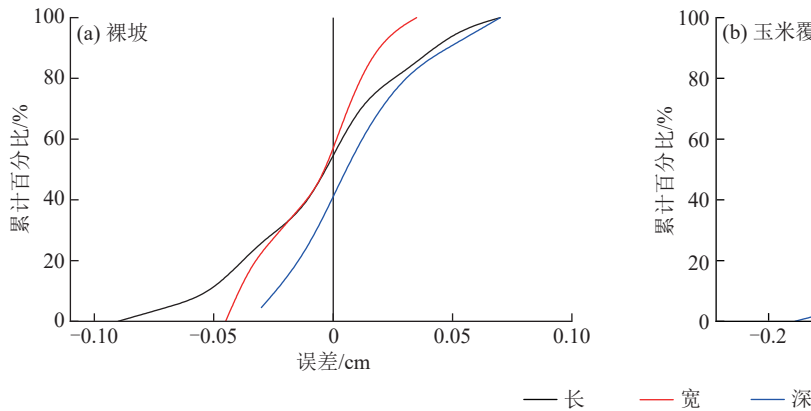


图 9 横向标志物形态测量值与实际值差值累计频率分布

Fig. 9 Cumulative frequency distribution diagram of the differences between the measured and actual values of horizontal markers

表 4 横向标志物精度评估分析

Table 4 Accuracy evaluation and analysis of horizontal markers

坡面类型	方向	平均值/cm	RMSE	EA/%	RE/%
裸坡	长	10.00	0.03	99.67	-0.01
	宽	2.99	0.02	99.24	-0.26
	深	1.91	0.03	98.53	0.67
玉米覆盖坡面	长	10.09	0.14	98.66	0.87
	宽	3.04	0.08	97.51	1.36
	深	1.91	0.07	96.43	0.55

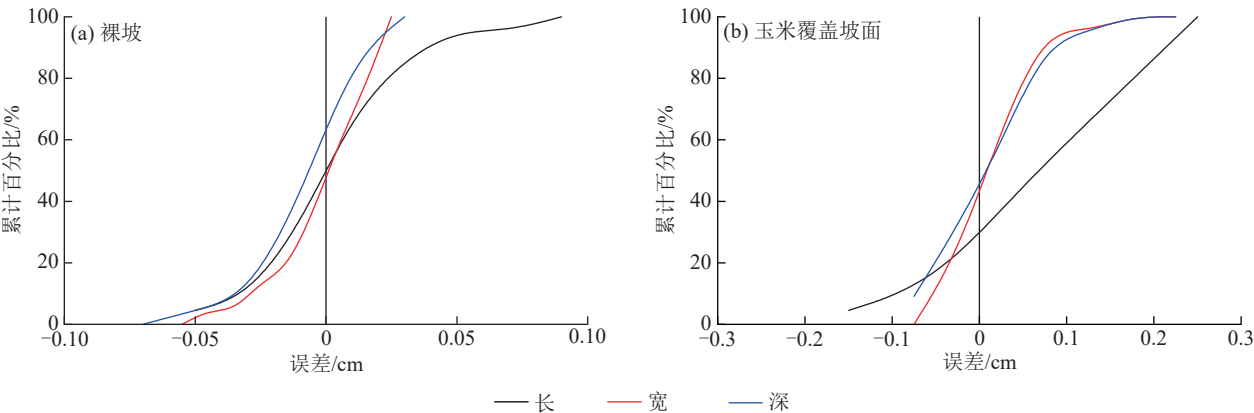


图 10 斜向标志物形态测量值与实际值差值累计频率分布

Fig. 10 Cumulative frequency distribution of the differences between the measured and actual values of diagonal markers

2.3.2 横向标志物提取 由图 9 可知,横向标志物裸坡与玉米覆盖坡面累计差值均为长度>深度>宽度,标志物长度和宽度的测量值主要以大于标志物实际值为主。由横向标志物精度评估表(表 4)可知,22 条构建横向沟长、宽、深以裸坡更为贴近实际值,长、宽、深方向的均方根误差分别为 0.03、0.02、0.03,其精度分别在长、宽、深方向达 98% 以上,总预测偏差的相对误差均<1.0%。而玉米覆盖的横向标志物长、宽、深方向的均方根误差分别为 0.14、0.08、0.07,精度达 96%。总预测偏差的相对误差分别为 0.87%、1.36%、0.55%。

2.3.3 斜向标志物提取 由图 10 可知,斜向标志物裸坡与玉米覆盖坡面累计差值均为长度>深度>宽度,玉米覆盖坡面斜向标志物长宽深的测量值均以大于标志物实际值为主。由斜向标志物精度评估表(表 5)可知,22 条构建斜向沟长、宽、深以裸坡更为贴近实际值,长、宽、深方向的均方根误差分别为 0.03、0.02、0.02,其精度分别在长、宽、深方向达 98% 以上,总预测偏差的相对误差均<0.2%。而玉米覆盖的斜向标志物长、宽、深方向的均方根误差分别为 0.15、0.06、0.07,精度达 96% 以上。总预测偏差的相对误差分别为 1.01%、0.95%、1.44%。

表 5 斜向标志物精度评估分析
Table 5 Accuracy evaluation analysis of oblique markers

坡面类型	方向	平均值/cm	RMSE	EA/%	RE/%
裸坡	长	10.01	0.03	99.71	0.07
	宽	3.00	0.02	99.38	-0.05
	深	1.90	0.02	98.98	-0.19
玉米覆盖坡面	长	10.10	0.15	98.55	1.01
	宽	3.03	0.06	98.08	0.95
	深	1.93	0.07	96.39	1.44

2.3.4 标志物提取精度 由图 11 可知,基于 SfM-MVS 的摄影测量方法在裸坡的运用效果较优,玉米覆盖将导致影像质量降低,表现为裸坡提取标志物形态更为贴近实际值,各方向标志物长、宽、深平均精度均在 99% 以上。而玉米覆盖坡面标志物则由于植被叠加,对坡面信息的获取存在叶片遮挡,空间关系更为复杂,因此提取的标志物精度有所下降,但精度仍在 97% 以上。

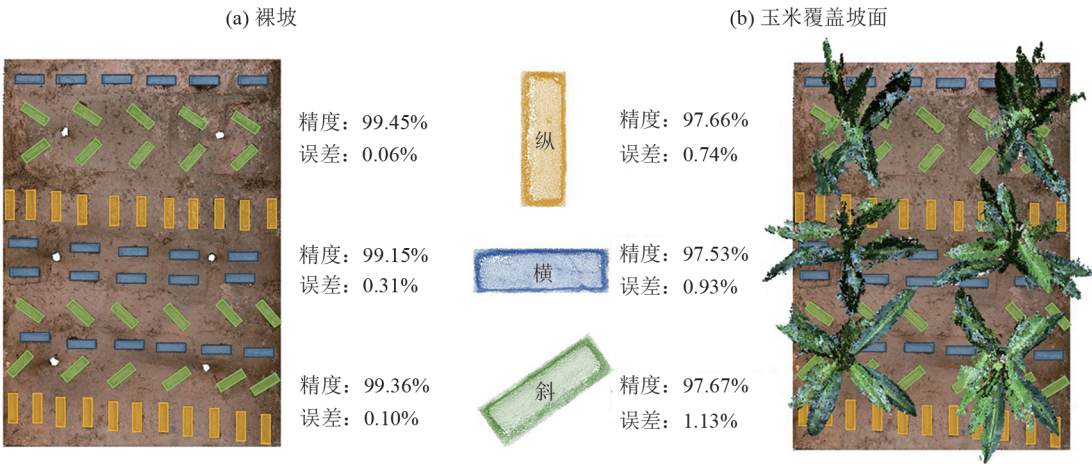


图 11 各方向标志物形态精度与误差特征

Fig. 11 Shape accuracy and error characteristics of markers in various directions

综上所述,基于 C2C 和 DOD 2 种方法分别对点云以及 DEM 成果进行精度验证表明,玉米覆盖重建坡面微地形在整体上误差为毫米级。通过还原各方向结构体从局部上表明,玉米覆盖导致精度略微下降,但精度仍在 97% 以上。

3 讨论

玉米叶片对坡面影像的直接获取存在遮挡,基于 SfM-MVS 的摄影测量法可通过转换角度或其余倾斜影像信息补充从而达到还原坡面特征的目的。玉米覆盖坡面采集的点云数量高于裸坡点云数量,一方面是由于玉米植株本身作为点云构成体,相较于裸坡较为单一的地形表面,增加地物数量与类型;另一方面,则是玉米植株在拍摄过程中存在遮挡,影像对坡面信息的获取存在阻碍,空间关系的复杂度提升,从而导致噪点数量增加,表现为玉米覆盖坡面的稀疏点云数量为裸坡的 2.1 倍,密集点云数量为裸坡的 2.6 倍。

玉米叶片的遮挡致使不同方向标志物存在重建精度与光照的差异。孙欢等^[24]针对不同光照条件对侵蚀沟三维重建精度影响的研究表明,阴天条件下高程精度模型优于晴天。主要是由于光线强烈照射的区域产生硬阴影,具有较为清晰的阴影界限导致错误的边缘检测^[25],而软阴影常在光源强度

较低时产生,阴影界限模糊,对软件边缘检测影响较小。在影像获取过程中,横向标志物与叶片方向呈平行状态,且始终处于叶片下方,使得横向标志物的构建需借助其余倾斜影像,导致其精度一定程度下降。垂直且狭窄的边壁增加重建工作的难度,使误差多集中于标志物边壁。因此,在玉米覆盖条件下通过调整角度获取尽可能多光线均匀的正射影像,以保证提供最多匹配特征点将提升重建精度^[26]。

相较于 NOUWAKPO 等^[27]研究而言,本研究更好地还原坡面所具有的微地形特征,极大地减小植被对于坡面微地形特征提取的影响,显著减少坡面存在的空洞效应^[18, 27]。HE 等^[28]通过算法设定高程阈值对玉米秸秆进行滤波处理,从而识别秸秆与裸地差异,使用的算法具有高自动化批量生产特征,但提取效果受阈值限制^[29-30]。本文以颜色为依据采用人工选取方式对点云进行处理,逐帧核对控制点匹配效果,确保标靶质心的正确评估,降低效率,提高精度,减少控制点测量与影像匹配误差,最终表现为仅有玉米根茎所在位置的 6 个直径约 3 cm 的小型空洞,最大限度地保证地表微地形的还原。

4 结 论

1) 基于 SfM-MVS 的摄影测量方法不仅具备高精度、低成本的特点,还能有效克服玉米覆盖对坡面微地形测量的干扰。采用 Metashape 软件可实现剔除玉米植株聚焦于坡面微地形特征研究目的,玉米覆盖条件下的控制点误差 <0.002 m,玉米覆盖坡面的稀疏点云数量为裸坡的2.1倍,密集点云数量为裸坡的2.6倍。

2) C2C 和 DOD 验证方法均表明,基于 SfM-MVS 的玉米覆盖坡面微地形特征整体误差较小,精度为毫米级。其中玉米覆盖坡面与裸坡点云存在85.12%点云距离 <0.001 m,玉米覆盖坡面与裸坡DEM有96.07%高差绝对值 <0.003 m。

3) 本研究实现裸坡与玉米覆盖坡面密集点云各方向标志物的无接触式提取。裸坡标志物形态与实际值更为贴近,各方向标志物长、宽、深平均精度在98%以上;玉米覆盖坡面标志物地形特征的提取整体精度保持在97%以上。

参考文献:

- [1] GENG Y F, ZHONG Y M, HUANG X, et al. The influence of microtopography to road inundation caused by extreme flood[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 927: e172004.
- [2] 李龙, 秦富仓, 钱秋颖, 等. 砒砂岩区水力侵蚀下坡面微地貌变化特征及过程研究[J]. *土壤*, 2022, 54(1): 198-205.
LI L, QIN F C, QIAN Q Y, et al. Micro-geomorphic change characteristics and process of slope under water erosion in pisha sandstone area[J]. *Soils*, 2022, 54(1): 198-205.
- [3] 麻力文, 陈晓燕, 陶婷婷, 等. 不同降雨强度及坡度条件下饱和紫色土坡面细沟形态特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 77-83.
MA L W, CHEN X Y, TAO T T, et al. Morphological characteristics of rills on the slope surface of saturated purple soil under different rainfall intensities and slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 77-83.
- [4] 周苍宁, 王清震, 唐恺, 等. 紫色土坡耕地不同微地形地表汇流网络特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 146-152.
ZHOU C N, WANG Q Z, TANG K, et al. Characteristics of surface confluence network in different microtopography types of purple soil slope farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 146-152.
- [5] 罗斌, 张勇, 张志伟, 等. 激光扫描和摄影测量在坡面侵蚀演变过程的适用性[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(17): 101-109.
LUO B, ZHANG Y, ZHANG Z W, et al. Application of laser scanning and photogrammetry in the evolution process of slope erosion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(17): 101-109.
- [6] YANG F X, WANG N N, ZHENG Z C, et al. Effects of microtopography change driven by seepage and slope gradients on hillslope erosion of purple soil[J]. *Catena*, 2023, 231: e107353.
- [7] 朱良君, 张光辉. 地表微地形测量及量化方法研究综述[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(5): 114-122.
ZHU L J, ZHANG G H. Review of measurement and quantification of surface microtopography[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(5): 114-122.
- [8] 王洪晓, 张光辉, 朱平宗, 等. 3种地表随机糙率测量方法比较[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 72-77.
WANG H X, ZHANG G H, ZHU P Z, et al. Comparison of three methods to measure surface random roughness[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(4): 72-77.
- [9] STOVALL A E L, DIAMOND J S, SLESAK R A, et al. Quantifying wetland microtopography with terrestrial laser scanning[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: e111271.
- [10] MUHOJOKI J, HAKALA T, KUKKO A, et al. Comparing positioning accuracy of mobile laser scanning systems under a forest canopy[J]. *Science of Remote Sensing*, 2024, 9: e100121.
- [11] 崔晓芳, 刘佳悦, 尹钊, 等. 坡度及植被盖度对潮土坡面土壤侵蚀特征的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2025, 53(4): 117-125.
CUI X F, LIU J Y, YIN Z, et al. The impact of slope and vegetation coverage on soil erosion characteristics of tidal soil slopes[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, 53(4): 117-125.
- [12] JIANG J, LIU D D, FEI Y H, et al. Combined effects of moss colonization and rock fragment coverage on sediment losses, flow hydraulics and surface microtopography of carbonate-derived laterite from karst mountainous lands[J]. *Catena*, 2023, 229: e107202.
- [13] ZORE A, BEZAK N, MOJCA Š. The influence of rainfall interception on the erosive power of raindrops under the birch tree[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: e128478.
- [14] ZHAO L S, FANG Q, YANG Y, et al. Stemflow contributions to soil erosion around the stem base under simulated maize-planted and rainfall conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 281: e107814.
- [15] ZHENG J, FAN J L, ZHANG F C, et al. Throughfall and stemflow heterogeneity under the maize canopy and its effect on soil water distribution at the row scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1367-1382.
- [16] 毕瑞, 甘淑, 袁希平, 等. 复杂地貌无人机遥感3D场景构

- 建[J].山地学报,2022,40(1):151-164.
- BI R, GAN S, YUAN X P, et al. 3D scene construction of complex landform based on UAV remote sensing[J]. Mountain Research,2022,40(1):151-164.
- [17] HAN Z, YANG X C, YIN X A, et al. Effect of exposed roots on the erosion characteristics of sloped land based on close-range photogrammetry in a karst rocky desertification region[J].Catena,2023,225:e107035.
- [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):88-95.
- FENG L, LI B B. Establishment of high precision terrain model of eroded gully with UAV oblique aerial photos and ground control points[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(3):88-95.
- [19] 高梓皓,张巧芬,王桂棠,等.复杂背景下相对运动恢复结构算法设计[J].电子测量技术,2023,46(1):97-102.
- GAO Z H, ZHANG Q F, WANG G T, et al. Algorithm design of structure from relative motion in complex background [J]. Electronic Measurement Technology, 2023,46(1):97-102.
- [20] 张锡英,孙守东,于海浩,等.基于空间传播的多视图三维重建[J].计算机工程,2024,50(7):293-302.
- ZHANG X Y, SUN S D, YU H H, et al. Spatial propagation-based multi-view 3D reconstruction[J].Computer Engineering,2024,50(7):293-302.
- [21] LI L, NEARING M A, NICHOLS M H, et al. Using terrestrial LiDAR to measure water erosion on stony plots under simulated rainfall[J].Earth Surface Processes and Landforms,2020,45(2):484-495.
- [22] LU L J, ZHOU Y, WALKER R T. Using historical aerial photographs to measure earthquake deformation: Testing the effects of scan resolution[J].Remote Sensing of Environment,2021,252:e112118.
- [23] 范亚雄,赵磊,陈尔学,等.高分航空多波段极化SAR寒温带针叶林蓄积量估测能力评价[J].遥感学报,2024,28(10):2525-2539.
- FAN Y X, ZHAO L, CHEN E X, et al. Evaluation of forest stock estimation ability of high resolution airborne multi-band PolSAR in cold temperate coniferous forests [J]. National Remote Sensing Bulletin,2024,28(10):2525-2539.
- [24] 孙欢,王让虎,杨久春,等.不同光照条件对侵蚀沟三维重建精度的影响[J].水土保持学报,2023,37(1):45-51.
- SUN H, WANG R H, YANG J C, et al. Influence of different illumination conditions on 3D reconstruction accuracy of erosion gully [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(1):45-51.
- [25] 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.
- [26] 李佳豪,靳国旺,熊新,等.利用光学阴影特征进行点位预测的星载合成孔径雷达影像灯杆提取方法[J].光学学报,2024,44(24):e2428013.
- LI J H, JIN G W, XIONG X, et al. Spaceborne synthetic aperture radar image lamp post extraction method using optical shadow feature for point prediction[J].Acta Optica Sinica,2024,44(24):e2428013.
- [27] NOUWAKPO S, WELTZ M, 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.
- [28] HE T, YANG Y, PENG T T, et al. The role of straw mulching in shaping rills and stabilizing rill network under simulated extreme rainfall[J].Soil and Tillage Research, 2023,229:e105656.
- [29] ZHANG K Q, CHEN S C, WHITMAN D, et al. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(4):872-882.
- [30] ZHAO X Q, GUO Q H, SU Y J, et al. Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2016,117:79-91.