

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.001.

李朋飞, 王锦博, 张晓晨, 等. 基于三维地形扫描的坡沟系统侵蚀产沙监测方法对比[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 75-85.

Li Pengfei, Wang Jinbo, Zhang Xiaochen, et al. Comparison of Erosion Monitoring Algorithms Used for Slope-Gully System Based on 3D Laser Scanning[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 75-85.

基于三维地形扫描的坡沟系统侵蚀产沙监测方法对比

李朋飞¹, 王锦博¹, 张晓晨¹, 胡晋飞¹, 刘立峰², 高健健², 党恬敏³

(1.西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054; 2.黄河水利委员会

绥德水土保持科学试验站, 陕西 榆林 719000; 3.黄河流域水土保持生态环境监测中心, 西安 710021)

摘 要: [目的] 阐明不同算法在坡面侵蚀监测中的精度和适用性, 进而为土壤侵蚀过程监测算法的选择和构建提供参考。[方法] 于黄土丘陵沟壑区典型流域同一自然坡面建立 5 个小区进行径流冲刷试验, 以 TLS 三维点云数据为基础, 通过 DEM of difference (DoD)、Cloud to Cloud (C2C)、Cloud to Mesh/Model (C2M) 和 Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2) 等方法计算侵蚀产沙量, 并分析了不同算法对于侵蚀产沙的监测差异。[结果] 不确定性分析结果表明: M3C2 平均不确定性最小, C2C, C2M 次之, DoD 最大。产沙结果表明: 大流量 (85, 70, 55 L/min) 下, 4 种算法单场次和累计场次产沙量与实测产沙量之间有显著的线性关系 ($R^2 > 0.62$, $p < 0.05$), M3C2 表现最优; 小流量 (40, 25 L/min) 下, 单场计算产沙量与实测产沙量之间的线性关系不显著但累计产沙量与实测产沙量之间有显著的线性关系 ($R^2 > 0.91$, $p < 0.05$), DoD 表现最优。侵蚀沉积空间分布特征表明: C2C, M3C2 和 DoD 均能反映梁峁坡和沟谷坡侵蚀发展经历的两个阶段 (快速发育和稳定发育), 其中 M3C2 能够检测到细微的地形变化, 但在 TLS 扫描盲区, M3C2 由于在法线方向上未找到对应点会出现“空洞”。[结论] M3C2 算法更适合监测复杂三维地形, 但在扫描盲区仍会失效, 未来应改进算法, 有助于应对更加复杂和剧烈的地形变化。

关键词: 三维激光扫描; 地形变化监测; 误差分析; 黄土高原

中图分类号: S157; P237

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0075-11

Comparison of Erosion Monitoring Algorithms Used for Slope-Gully System Based on 3D Laser Scanning

Li Pengfei¹, Wang Jinbo¹, Zhang Xiaochen¹, Hu Jinfei¹, Liu Lifeng², Gao Jianjian², Dang Tianmin³

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Suide Test Station of Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee of Ministry of Water Resources, Yulin, Shaanxi 719000, China; 3. Yellow River Basin Monitoring Center of Water-Soil Conservation and Eco-Environment, Xi'an 710021, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to elucidate the accuracy and applicability of different algorithms for detecting slope erosion, which can provide a reference for the selection and development of detection methods for soil erosion processes. [Methods] Five plots established on a natural slope in the loess hilly and gully region to conduct runoff scouring experiments. Using TLS data, we calculated erosion and sediment yield by using various methods such as Digital Elevation Model (DEM) of difference (DoD), Cloud to Cloud (C2C), Cloud to Mesh/Model (C2M), and Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2), and compared their results. [Results] The results of the uncertainty analysis showed that M3C2 produced the smallest average uncertainty, followed by C2C and C2M, while DoD yielded the largest uncertainty. The sediment yield calculated by the detection algorithms demonstrated that under high flow rates (85, 70 and

收稿日期: 2023-04-06

修回日期: 2023-09-20

资助项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项项目 (2022YFE0119200); 国家自然科学基金 (41977059; U2243211; 42207407); 水利部重大科技项目 (SKS-2022092); 陕西省自然科学基金 (2022JQ-259); 陕西省教育厅基金 (22JK0463)

第一作者: 李朋飞 (1986—), 男, 陕西渭南人, 博士, 教授, 主要从事地貌遥感研究。E-mail: pengfeili@xust.edu.cn

通信作者: 胡晋飞 (1992—), 男, 山西运城人, 博士, 副教授, 主要从事地貌遥感研究。E-mail: jinfeih@163.com

<http://stbcj.paperonice.org>

55 L/min), there was a significant linear relationship between consecutive sediment yield and cumulative sediment yield derived by the four algorithms and the corresponding measured sediment yield ($R^2 > 0.62$, $p < 0.05$), and M3C2 performed best; under low flow rates (40 and 25 L/min), no significant linear relationships were found between consecutive sediment yield and measured sediment yield, but significant linear relationships were found between cumulative sediment yield and measured sediment yield ($R^2 > 0.91$, $p < 0.05$), and DoD performed best. The spatial distribution of erosion and deposition indicated that C2C, M3C2, and DoD could reflect two stages of erosion evolution on hillslopes and gully slopes (rapid development stage and stable stage), with M3C2 being able to detect subtle topographic changes. However, M3C2 results were subject to ‘voids’ in the blind area of TLS scanning due to not finding corresponding points in the normal direction. [Conclusion] The M3C2 algorithm is more suitable for detecting complex terrain, but it will still fail in the blind spot of scanning, and the algorithm should be improved in the future to help cope with more complex and drastic terrain changes.

Keywords: three-dimensional laser scanning; terrain change detection; error analysis; Loess Plateau

土壤侵蚀指土壤及其母质被分离、搬运和沉积过程^[1-3]。坡面侵蚀是区域产沙的重要来源,深入理解坡面侵蚀产沙过程可为区域侵蚀防治提供重要依据,也是侵蚀过程监测与研究的重点^[4]。监测侵蚀导致的地形变化可反映其过程和速率。目前获取高精度地形信息主要技术有载波相位差分技术(Real-time kinematic, RTK)^[5]、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[6]、航空摄影测量^[7]、机载激光扫描测量(Airborne Laser Scanning, ALS)^[5-6]、地面三维激光扫描(Terrestrial Laser Scanning, TLS)^[7]。其中 ALS、航空摄影测量和 SAR 可覆盖大面积区域,但垂直精度有限,且航空摄影测量和 SAR 无法穿透植被,基于全站仪或 RTK 等测量仪器检测的高程精确,但点密度低^[4],限制高分辨率数据的生成。TLS 可快速获取高精度地形信息^[8],且具备穿透植被的能力,是土壤侵蚀监测的有力工具^[9-10]。

点云质量^[11]、监测算法^[8]、地形等^[4]影响 TLS 地形变化监测的精度^[12]。目前常用地形变化监测算法有 Cloud to Cloud (C2C)^[13], Cloud to Mesh/Model (C2M)^[8], Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2)^[7] 和 Digital elevation model (DEM) of difference (DoD)^[11]。其中 C2C 基于豪斯多夫算法(八叉树结构),逐点计算参考点云到对比点云最近点的距离,通过点云差异描述三维地形变化;C2M 建立参考点云的表面模型(如, TIN 三角网),逐点计算对比点云与参考点云最近节点的垂直距离,对比点云与表面模型的位置关系,以表达地形变化;M3C2 利用两片点云之间的正交距离衡量其差异;DoD 算法通过逐点计算由两片点云生成的 DEM 之间的差值。

已有研究将这 4 种算法用于监测土壤侵蚀。例如, C2C 和 C2M 用于冻土区热融滑塌监测^[8], DoD

用于流域尺度的侵蚀监测^[13], M3C2 用于悬崖崩塌^[7]和坡面侵蚀^[9]。不同监测算法计算原理和基本假设不同,导致其对土壤侵蚀的监测精度和效率不同,因而需要评估不同算法对土壤侵蚀的监测精度,为方法的选取提供依据。然而,目前仅有 Nourbakhshbeidokhti 等^[11]在河道侵蚀上进行对比,定性分析各算法侵蚀淤积空间特征,4 种算法在监测坡面侵蚀的产沙精度和适用性鲜有研究。

本研究选取黄土丘陵沟壑区典型流域辛店沟流域坡沟系统为研究对象,修建 5 个径流小区,开展放水冲刷试验。对比 C2C, C2M, M3C2 和 DoD 地形变化监测方法,分析 4 种地形变化监测算法不确定性差异的来源,结合侵蚀产沙实测数据对比 4 种算法量化侵蚀产沙及空间分布方面的监测精度,进而为不同需求下的地形变化监测方法选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辛店沟流域位于陕西省榆林市绥德县(图 1A), 位于东经 $110^{\circ}16'45''$ — $110^{\circ}20'00''$, 北纬 $37^{\circ}29'00''$ — $37^{\circ}31'00''$, 总面积 1.44 km^2 , 海拔高度 $990 \sim 1\,010 \text{ m}$ 。年平均气温 10.2°C , 年平均降水量为 513.1 mm , 其中 7—9 月降水量占年降水量的 73% ^[12], 且以短历时暴雨为主。流域内地形破碎, 沟壑纵横。土壤类型以黄棉土为主, 土质疏松, 易受侵蚀。20 世纪 70 年代以来, 辛店沟流域实施了大规模的水土保持措施, 包括建设淤地坝和水平梯田、退耕还林还草和植树造林等多种措施^[14], 目前, 林草覆盖率达到 75% 以上, 天然植被以狗尾草(*Setaria viridis*)、白草(*Pennisetum flaccidum* Griseb)和酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)为主, 人工植被以杨树(*Populus*)、旱柳

(*Salix matsudana*)、白榆(*Ulmus pumila*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为主,人工草以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall)为主。水土保持措施实施导致侵蚀强度明显下降,然而夏季暴雨期,植被稀疏的陡峭区域土壤侵蚀仍较为严重^[10]。

1.2 试验设计

本研究以黄土丘陵沟壑区典型流域辛店沟为研究区。试验布设前,调查辛店沟流域及其周边 20 个典型的坡沟系统,结果显示,梁峁坡的坡度为 3°~35°,沟谷坡的坡度为 45°~78°,梁峁坡与沟谷坡长度比例为 2.5:1~12:1,均值为 5:1,据此,本研究选取辛店沟流域内自然坡面建立 5 个坡沟系统试验小区。小区宽度为 1.5 m,梁峁坡,坡度在 2.4°~22°,坡长 5 m,沟谷坡,坡度人为塑至 70°,坡长 1 m(图 1B)。所构建坡沟系统长度较小,更适用于模拟尺寸较小的坡沟系统(如,发育初期的坡沟系统)。在坡面上端安装稳流槽(长 1.5 m、宽 0.3 m、深 0.5 m)、右端修建 40 m³ 蓄水池,水管连接稳流槽和蓄水池,并安装电磁流量计控制放水流量。在坡沟系统周围选择三处

平坦位置布设混凝土平面,放置标靶球,以对同场次内多次扫描的点云数据进行拼接及不同场次间的点云数据进行配准(图 1C)。

放水流量大小可根据当地降雨及小区尺寸进行计算^[15]:

$$F=\frac{W}{D}\cdot I\cdot A\cdot \cos \theta \cdot \vartheta$$

(1)

式中: F 为放水流量大小(L/min); W 为小区宽度(m); D 为梁峁坡宽度(m); I 为降雨强度(mm/min); A 为汇水面积(m²); θ 为坡度(°); ϑ 为径流系数。其中,将梁峁坡和沟谷坡的平均坡度分别设置为 14.55°,70°,根据辛店沟历史观测资料,我们将 D , I , A 和 ϑ 分别设置为 5 m,0.3~0.9 mm/min,300~400 m²,0.324~0.833。得到计算结果 F ,梁峁坡和沟谷坡分别在 8.46~87.10 L/min 和 2.99~30.77 L/min,据此,梁峁坡放水流量设置为 25,40,55,70,85 L/min(分别对应 5 号坡,4 号坡,3 号坡,2 号坡,1 号坡)(图 1D),沟沿线放水流量统一设置为 10 L/min 固定流量,试验时长设置为 30 min 介于辛店沟常规降雨时长为 2~70 min,5 个径流小区各进行 5 场试验。

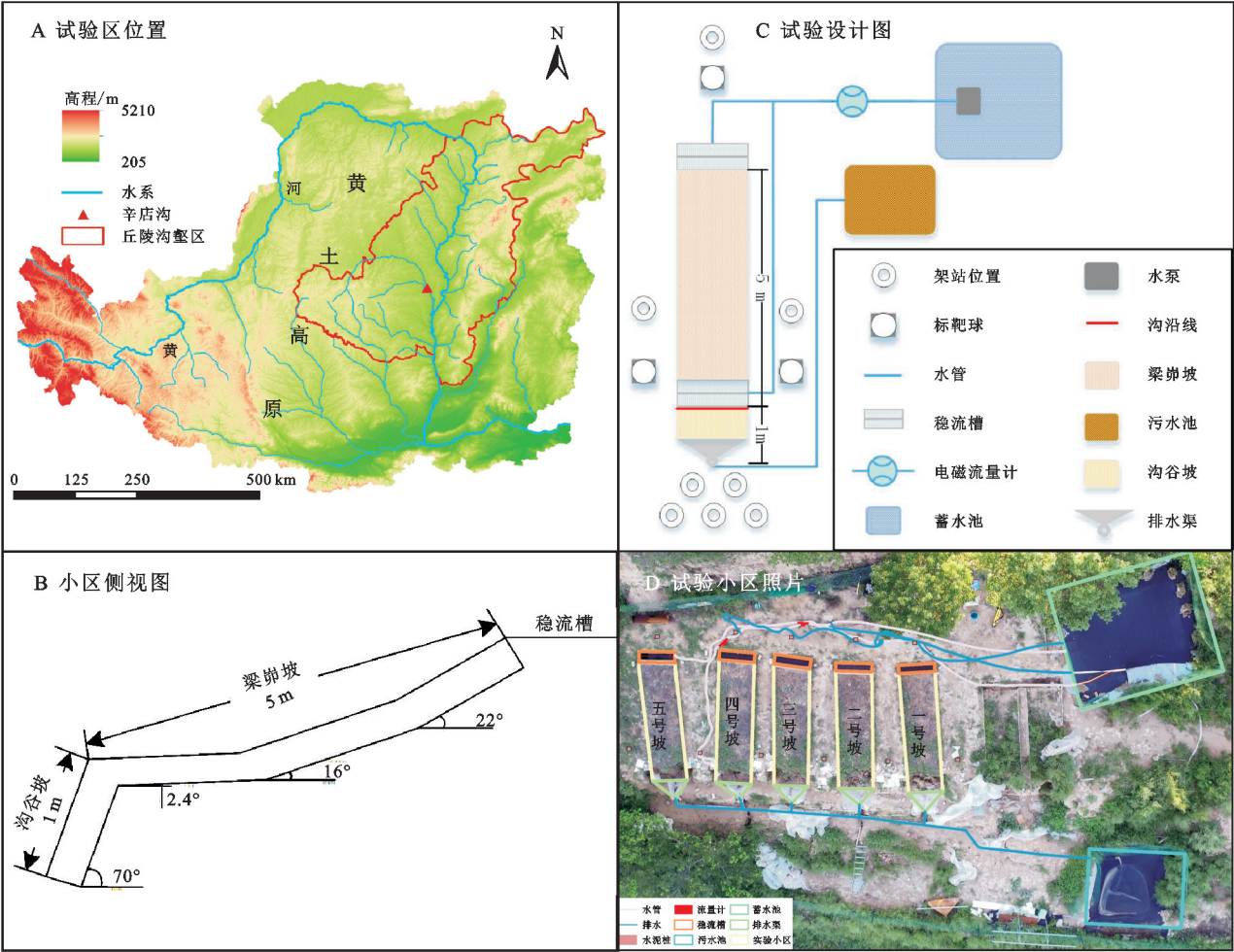


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study site

1.3 数据获取与预处理

1.3.1 数据获取 试验开始之前,使用喷雾器对小区进行喷洒,直至土壤含水量饱和,然后将小区覆盖 24 h,保证足够的水分入渗,最大程度降低小区间初始土壤含水量的差异。试验中,当径流从梁岭坡顶部至沟谷坡底部形成完整径流流路时开始计时,每隔 3 min 在梁岭坡径流集中的沟沿线顶部及其附近用量筒采集梁岭坡径流样本,在沟谷坡底部用桶采集坡沟系统径流样本,同时使用精度为 0.1 s 的秒表记录采样时间,并使用精确度为 0.1 g 的电子天秤称量含沙水样,然后将径流样品晾干,倒入铝盒放入烘干机,设置烘干时间 24 h(105℃),烘干后称重,得到干泥沙质量(产沙量)。在 5 场冲刷试验完成后,分别从梁岭坡和沟谷坡采集 3 个样本,并使用烘干法测量土壤容重,得到平均土壤容重值分别为 1.238, 1.227 g/cm³。

试验中使用地面三维激光扫描仪徕卡 C10 扫描,其测量目标扫描精度(即模型表面精度)、距离精度(即单次测量距离精度)、点位精度(即单次测量点位精度)分别为 2, 4, 6 mm, 垂直、水平视场角分别为 270°, 360°, 扫描范围达 300 m, 波长、扫描速度设置为 532 nm, 5 000 点/s。在放水冲刷试验开始之前和每次放水冲刷试验结束后,从多个架站位置收集坡面的

TLS 数据,架站高度为 1.3~2.0 m,架站位置如图 1B 所示。以防止遮挡造成点云空洞^[16],为监测坡沟系统侵蚀提供数据来源。

1.3.2 点云数据预处理 点云数据采集之后,需进行场次内的拼接和场次间的配准。首先将同一场次的扫描数据拼接为一个完整的坡面点云数据^[17],拼接完成后,以原始坡面为基准在场次间进行配准,其过程可通过物理目标或者曲面配准完成^[12,17],本文使用 Cloud Compare 中的 Align 工具进行配准。之后对小区数据进行裁剪(瓷砖、稳流槽和水泥桩)。最后采用手动方式进行滤波,剔除噪点、植被等非地面点(Terrasolid 软件进行裁剪和滤波)。

C2M 和 DoD 分别以 TIN 和 DEM 数据为基础,获取 DEM 数据时,首先将滤波后点云数据转为不规则三角网(triangulated irregular network, TIN),然后在 ArcGIS 中使用 TIN 转为栅格工具,将其插值生成数字高程模型(digital elevation model, DEM)。

1.4 地形变化监测方法

1.4.1 4 种地形变化监测方法原理 通过数据处理,获得地面点云、TIN 和 DEM,用于执行 C2C, C2M, M3C2 和 DoD 算法。各算法的具体计算原理如图 2 所示。

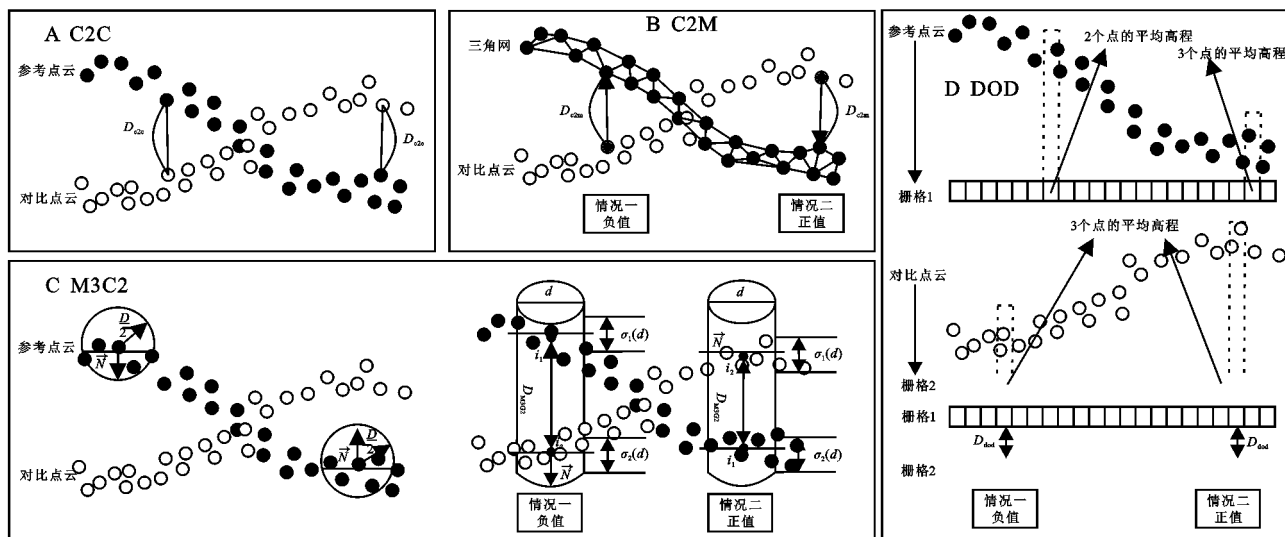


图 2 4 种地形变化监测算法的原理

Fig. 2 Principles of the four terrain change monitoring algorithms

1.4.2 C2C 方法 C2C 是一种基于豪斯多夫算法(八叉树结构)^[13],逐点计算参考点云到对比点云最近点的距离 D_{c2c} (图 2A),通过点云差异描述地形变化的三维方法^[7]。该方法计算结果为两片点云间的垂直距离^[11],但该方法不是测量垂直距离的准确方法且仅适用于密集点云^[13]。本文以两片点云间 Z 坐标差值的正负反映地形变化(正值为沉积,负值为侵蚀)。

The minimum level of detection(LoD)为不确定性,可用于区分真实地形变化与误差。柯林斯等提出加性均方根误差分析,认为这 3 种误差(地理配准误差 E_{survey} ; 仪器误差 E_{laser} ; 配准误差 E_{reg} ^[8])是各自独立的,本文不涉及地理配准过程,水泥桩用于计算配准误差,并取 95% 的置信区间作为是否显著的标准^[18], LoD_{C2C} 是 C2C 算法的 LoD,用于评估两点云之

间的变化是否显著^[9]。

$$\text{LoD}_{\text{C2C}} = \sqrt{E_{\text{laser}}^2 + (1.96E_{\text{reg}})^2} \quad (2)$$

式中: LoD_{C2C} 为 C2C 算法的 LoD; E_{laser} 为仪器误差; E_{reg} 为配准误差; E_{laser} 和 E_{reg} 均取 95% 的置信区间。

1.4.3 C2M 方法 C2M 算法建立参考点云的表面模型^[8] (TIN 三角网或者格网), 逐点计算对比点云与参考点云最近节点的垂直距离 D_{C2M} ^[7-8,11], 以对比点云与表面模型的位置关系为依据, 反映地形变化 (图 2B)。

假设仪器误差、配准误差和构建表面模型过程中产生的误差相互独立, 因此只需要在 C2C 公式上添加创建表面模型过程中产生的均方根误差, 便可计算 C2M 的 LoD, 具体公式如下:

$$\text{LoD}_{\text{C2C}} = \sqrt{E_{\text{laser}}^2 + (1.96E_{\text{reg}})^2 + (1.96E_{\text{model}})^2} \quad (3)$$

式中: LoD_{C2C} 为 C2M 算法的 LoD; E_{laser} 为仪器误差; E_{reg} 为配准误差; E_{model} 为点云生成模型的均方根误差; E_{laser} , E_{reg} 和 E_{TIN} 均取 95% 的置信区间。

1.4.4 M3C2 方法 M3C2 算法是一种利用两片点云之间的正交距离衡量两片点云差异的方法, 以核心点为球心, $D/2$ 为半径确定球体, 根据落在球体内部的点拟合平面, 确定出法线。以法线为轴、 $d/2$ 为半径构建圆柱体, 该圆柱体截出参考点云和对比点云的局部点云数量, 将所截两片局部点云投影在圆柱体的轴上, 可得到局部点云平均位置 i_1 (黑点)、 i_2 (黑点) 和局部点云粗糙度 $\sigma_1(d)$, $\sigma_2(d)$, M3C2 计算的即 i_1 , i_2 之间的距离 D_{M3C2} (图 2C); 该算法基于局部点云法线和粗糙度, 直接计算点云间距, 无需进行网格划分, 因此能够实现较为准确的微地形变化监测。

该算法基于高斯统计的参数估计, 假设 n_1, n_2 相互独立且均服从高斯分布^[7], 则 M3C2 的 LoD 计算公式如下:

$$\text{LoD}_{\text{M3C2}} = 1.96 \left(\sqrt{\frac{\sigma_1(d)^2}{n_1} + \frac{\sigma_2(d)^2}{n_2}} + E_{\text{reg}} \right) \quad (4)$$

式中: LoD_{M3C2} 为置信区间为 95% 的 M3C2 算法的不确定性; E_{reg} 为配准误差; n_1 和 n_2 为两片点云数量; $\sigma_1(d)$ 和 $\sigma_2(d)$ 分别为两片点云各自标准差。

1.4.5 DoD 方法 DoD 算法逐栅格计算两片点云生成的 DEM 之间的差值, 将参考点云和对比点云栅格化生成栅格 1 和栅格 2, 逐栅格计算出距离 D_{DoD} (图 2D)。

本研究假设每个误差独立分布, 通过提取 3 个标靶球上的点云数据 (标靶球 (上半球) 的点云数据分为 90% 的训练样本和 10% 的验证样本) 对应的 DEM 栅

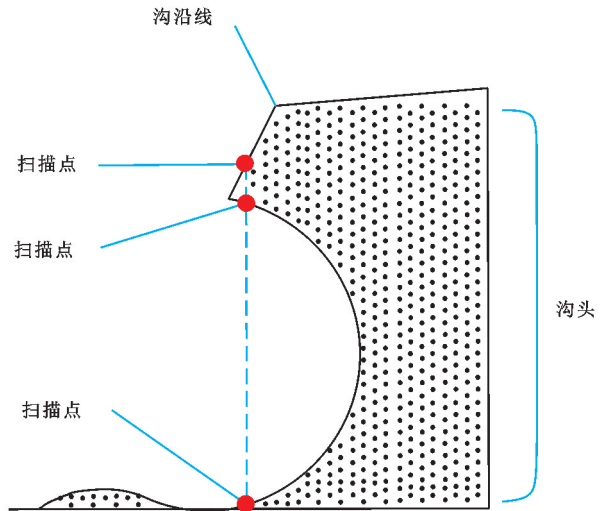
格高程值, 计算栅格高程值和验证点云高程值之间的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 确定单片点云的不确定性^[8,19]。组合前后两次 DEM 的 RMSE 作为整个 DoD 的 LoD。

$$\text{LoD}_{\text{DoD}} = 1.96 \sqrt{\delta z_{\text{old}}^2 + \delta z_{\text{new}}^2} \quad (5)$$

式中: LoD_{DoD} 为 DoD 中的传播误差; δz_{old} 和 δz_{new} 分别是第一片、第二片点云生成 DEM 过程中存在的 RMSE^[11], 并取 95% 的置信区间作为置信水平^[18]。

1.5 侵蚀产沙量计算

鉴于坡沟系统发育期间梁崩坡和沟谷坡差异明显, 因此将其划分为两个地貌单元进行单独研究。在试验开始之前, 沟谷坡的坡度为 70° , 随着试验的进行, 其地形越来越复杂, 点云数据因地形遮挡会导致缺失, 其插值生成的 DEM 同一个栅格对应多个高程属性值 (图 3), 进而导致 DoD 方法计算结果出现错误。为了解决上述问题, 在数据预处理时将沟谷坡的点云数据旋转 -70° 。具体操作如下: 基于 CloudCompare 软件的 Apply transformation 工具对点云进行旋转。沟谷坡侵蚀发生后的处理均以旋转后的点云为基础。



注: 虚线是 DEM 的俯视图方向, 红色圆点代表同一栅格对应的多个属性值。

图 3 DoD 算法的问题

Fig. 3 Problems with the DoD algorithm

以 C2C, M3C2 和 C2M 高程变化值及对应 LoD 的差值作为生成点云的 Z 坐标值, 并利用 ArcGIS 软件将生成点云插值生成 DEM 数据, 栅格大小为 5 mm ^[10], 栅格值为栅格单元内所有点的高程变化均值 ΔZ , 其中负值为侵蚀, 正值为沉积。DoD 算法首先计算两片点云经 ArcGIS 软件插值生成的 DEM 间的差值 ΔZ , 后逐栅格剔除 LoD 得到地形变化值 (正值为沉积, 负值为侵蚀)。每个栅格 ΔZ 转为体积如公式 (6) 所示, 体积转为质量如公式 (7) 所示。

$$V = s \cdot \sum \Delta Z \quad (6)$$

$$S = V \cdot D \cdot 1000 \quad (7)$$

式中: V 为侵蚀/沉积体积(m^3); s 为栅格单元大小(m^2); ΔZ 为侵蚀/沉积高程变化值(m), $\Delta Z \neq 0$; S 为产沙量(kg); D 为土壤容重(g/cm^3)。

1.6 精度评价

采用绝对误差(absolute error, AE)、相对误差(relative error, RE)、决定系数(coefficient of determination, R^2) 3 个指标来验证 4 种算法产沙量实测值与计算值之间的精度。其数学表达式分别为:

$$\text{AE} = |x_i - X_i| \quad (8)$$

$$\text{RE} = |x_i - X_i| / X_i \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (10)$$

式中: x_i 为计算的侵蚀产沙量; X_i 为实测侵蚀产沙量; \bar{X}_i 为实测侵蚀产沙量的平均值。

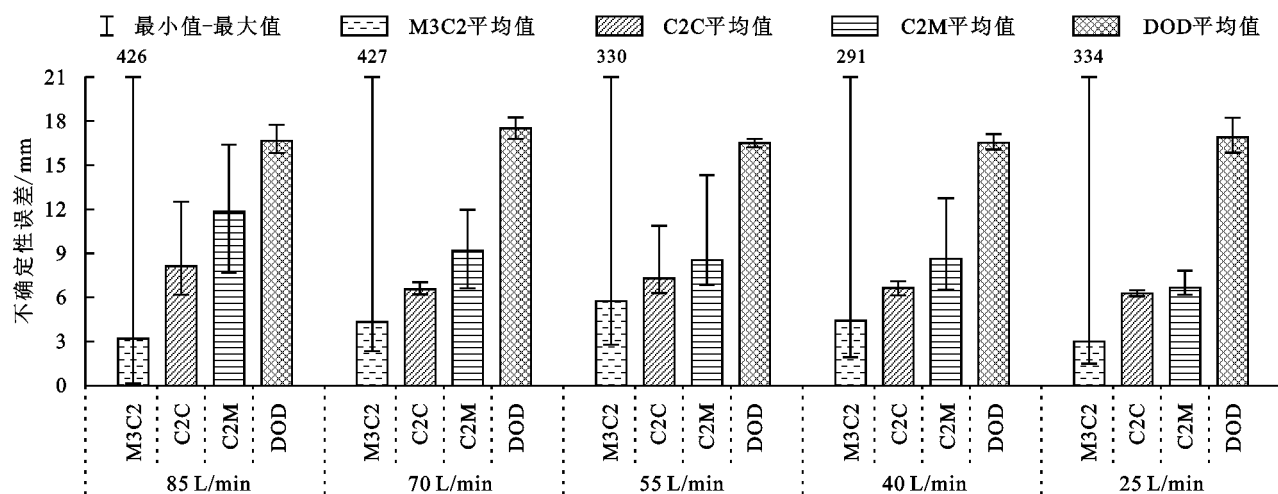


图 4 不同放水流量下, M3C2, C2C, C2M, DoD 在坡沟系统的不确定性

Fig. 4 Uncertainty of M3C2, C2C, C2M and DoD in the slope-gully system for different discharge flows

2.2 产沙量精度分析

4 种算法所量化的累计产沙量比单场产沙量拟合系数更高, 且累计计算产沙量的拟合直线更接近或趋向 1:1 标准线, 表明监测算法的结果接近真值(图 5)。在大流量下(85, 70, 55 L/min), C2M 算法在累计产沙量计算中拟合系数最高且有显著的线性关系($R^2=0.76$, $p<0.05$), 但单场产沙量计算中的拟合关系相较最差($R^2=0.63$, $p<0.05$), 说明该方法的计算结果并不稳定。相较于其他 3 种方法, M3C2 的拟合关系更趋近于标准线。而在小流量下(40, 25 L/min), DoD 算法的拟合系数最高, 该算法累计产沙量计算与实测产沙量有显著的线性关系($R^2=0.97$, $p<0.05$)。然而单场计算产沙量与实测产沙量之间的线性关系不显著($p>0.05$)。

通过分析单场和累计场次 4 种算法计算产沙量的误差, 累计场次的平均相对误差均小于单场次(表 1)。在大流量下, 累计场次中 M3C2 的平均相对/绝对误差

2 结果与分析

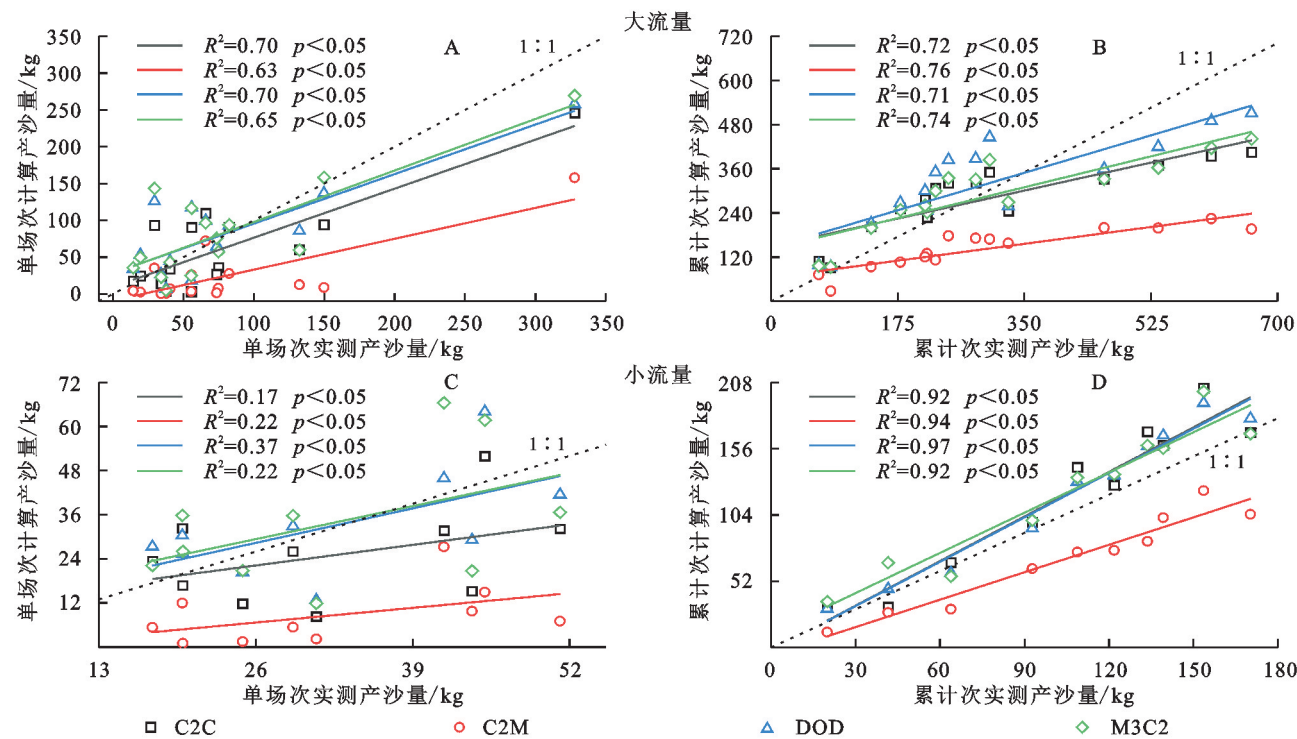
2.1 不确定性分析

不同流量下 4 种算法的不确定性从大到小依次为 DoD, C2M, C2C 和 M3C2(图 4)。由于 M3C2 和 C2C 算法直接基于点云监测地形变化, 而 C2M 和 DoD 在点云基础上增加插值过程, 因此前两种算法的不确定性更小。M3C2 的平均不确定性为 4.14 mm(3.02~5.75 mm), 该方法的不确定性极小值是 4 种方法中最小的, 因此能够监测到细微的地形变化(平均不确定性为 6.98 mm(6.26~8.12 mm))。C2M 的平均不确定性为 8.97 mm(6.66~11.83 mm), DoD 的平均不确定性为 16.81 mm(16.49~17.50 mm)该算法的平均不确定性稳定在较高水平, 误差分布范围未有明显变化。

最小, 值分别为 28.88%/87.44 kg, C2C 次之, 与其相差 1.29%/2.90 kg, 单场次中, C2C/M3C2 的平均相对/绝对误差最小, M3C2 的平均相对误差仅次于 C2C。在小流量下, DoD 在累计、单场次的平均相对/绝对误差最小, 值分别为 17.02%/15.39 kg 和 33.15%/10.01 kg, C2C 次之, C2C 与其相差 3.43%/2.09 kg 和 5.90%/2.48 kg。

2.3 坡面侵蚀沉积空间特征分析

侵蚀/沉积空间分布量化结果显示, 4 种算法在梁崩坡不同放水冲刷量下细沟发育过程量化结果基本一致(图 6)。在平坦地形中, M3C2 能监测到侵蚀和沉积的细微变化, 而 C2M, C2C, DoD 由于不确定性较大, 无法描述微小地形变化, 造成较小沉积区域成为 C2M, C2C 和 DoD 的检测盲区。以 55 L/min 为例, 冲刷初始在梁崩坡左上角形成多处小跌坎, 随着冲刷时间的增加, 细沟加长加宽, 发育成连续细沟, 而沉积主要分布在梁崩坡右侧及下侧, 伴随着沟壁崩塌, 沟沿线附近也出现了侵蚀。



注:将 85,70,55,40,25 L/min 分为大流量(85,70,55 L/min)和小流量(40,25 L/min),其中 A 和 B 分别为大流量下单场次、累计场次算法计算产沙量和实测产沙量的关系,C 和 D 为小流量。

图 5 4 种监测算法计算得到的产沙量与实测产沙量的关系

Fig. 5 Relationship between sand production calculated by the four monitoring algorithms and measured sand production

表 1 单场次和累计场次 4 种算法计算产沙量的误差

Table 1 Errors in calculating sand production by four algorithms for single and cumulative fields

场次	流量	监测 算法	绝对误差/kg			相对误差/%		
			最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
单场次	大流量	C2C	82.01	3.11	37.91	218.54	9.81	59.87
		C2M	170.02	5.91	56.78	98.75	9.56	73.79
		DoD	96.53	4.19	32.49	328.91	8.89	72.75
		M3C2	113.94	1.91	33.64	388.23	2.60	76.50
	小流量	C2C	28.76	3.11	12.50	73.06	10.71	39.05
		C2M	44.14	7.96	23.75	94.86	34.36	73.73
		DoD	19.04	3.80	10.01	58.64	10.45	33.15
		M3C2	24.86	4.13	13.59	79.83	16.57	41.67
累计场次	大流量	C2C	258.80	8.09	90.34	49.80	1.81	17.48
		C2M	467.94	6.29	160.19	70.45	9.56	46.60
		DoD	152.49	10.62	92.79	56.70	12.88	34.98
		M3C2	222.89	11.32	87.44	46.72	12.15	28.88
	小流量	C2C	49.80	1.81	17.48	62.39	1.06	20.45
		C2M	65.87	7.96	35.16	53.13	20.03	35.31
		DoD	38.18	0.63	15.39	52.39	0.68	17.02
		M3C2	47.28	2.75	18.60	79.83	1.61	25.68

侵蚀/沉积空间分布量化结果显示,除 C2M 外,其余 3 种算法在沟谷坡不同放水冲刷流量下所得沟道量化结果基本一致(图 7)。复杂地形特征下,C2C 和 DoD 算法得到的侵蚀和沉积空间分布更加完整,而 M3C2 算法得到的空间分布,由于在崩塌后复杂地形下法线方向上找不到相对应的点所致出现“空

洞”(如第 4 场试验)。C2M 算法结果显示内凹洞上侧产生多处沉积,与实际不符,因此该算法不适用于复杂地形的空间分布计算。冲刷(以 55 L/min 为例)开始在沟底形成内凹洞,随着时间的增加,内凹洞开始扩张,沟头崩塌,整个沟壁出现侵蚀,之后侵蚀减缓,沟底和沟壁形态稳定,沟头发育到稳定状态。

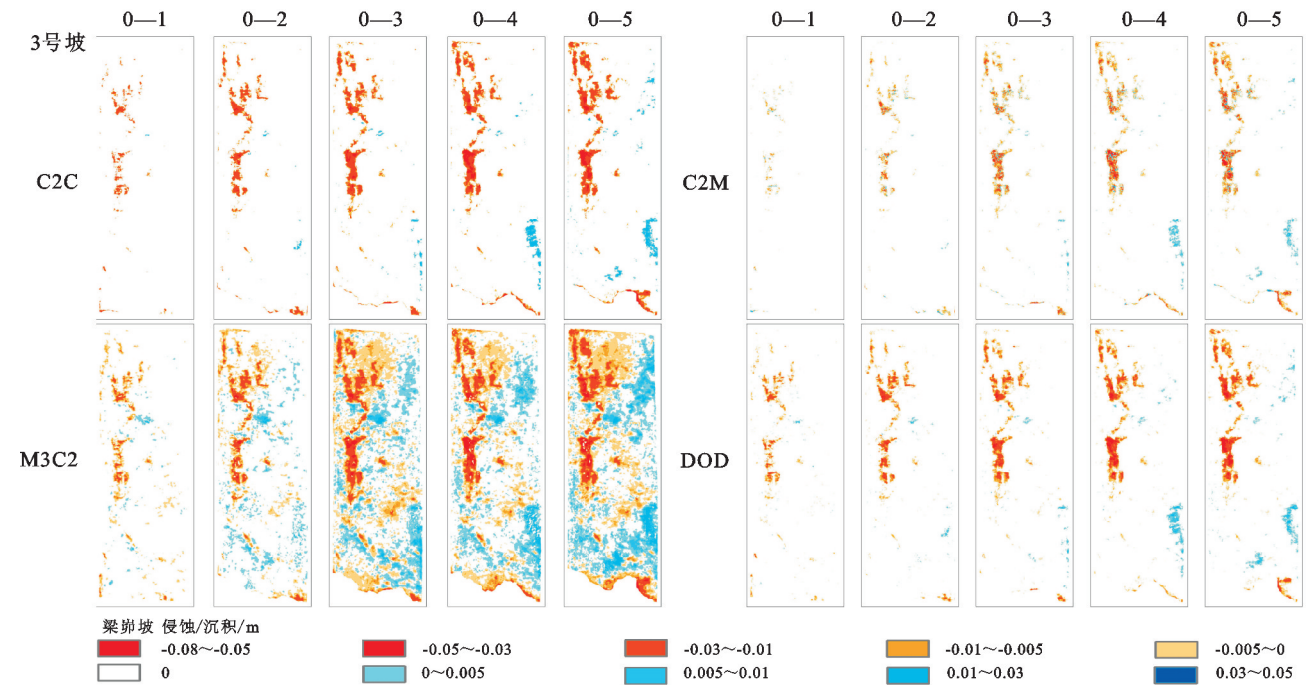
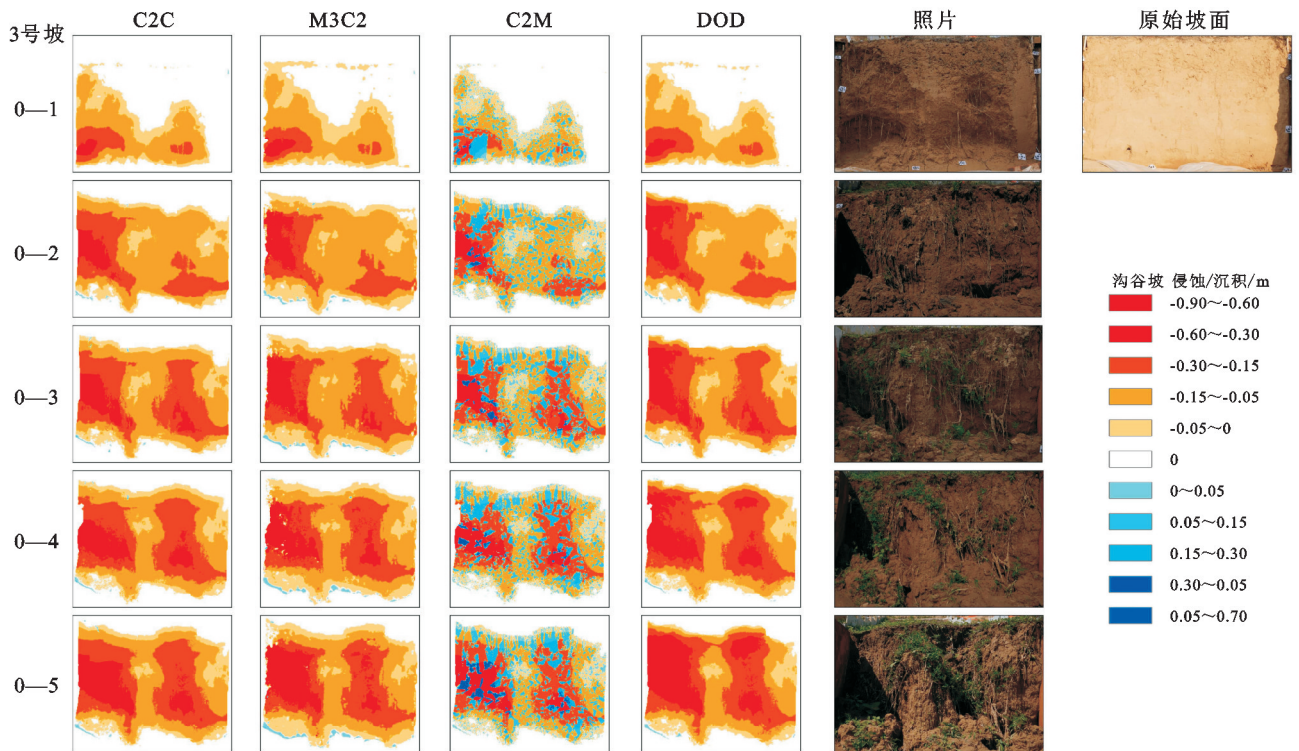


图 6 梁崩坡侵蚀/沉积空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of erosion/sedimentation on Hillslope



注:红色表示侵蚀,蓝色表示沉积,白色表示没有发生侵蚀或沉积。

图 7 沟谷坡侵蚀/沉积空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of erosion/sedimentation on Gullyslope

3 讨论

本研究梁崩坡坡度在 $2.4^{\circ} \sim 22^{\circ}$ (大部分的径流沿梁崩坡直接流出), 试验时间为 30 min (时间短), 而湿陷变形的充分完成需要足够的浸入水量和浸水

时间^[20], 同时辛店沟黄土为离石黄土^[21], 质地坚硬, 因此本试验中并未发现土壤沉陷的现象。已有的坡面侵蚀试验中, 通常使用回填土模拟坡面的侵蚀, 而回填土体由于结构被破坏, 不具备原状性, 无法反映野外真实土壤特征下的侵蚀产沙及形态发育特征。

本研究在同一自然坡面上建立径流小区进行冲刷试验,有助于揭示土壤抵抗径流冲刷的实质。目前基于TLS监测坡面产沙和空间分布特征,大多学者通过构建不同时相的DEM和Mesh来计算体积差,从而估算侵蚀量^[22],忽略了点云生成DEM或Mesh时的不确定性,且在坡面侵蚀中很少考虑直接基于三维点云测量距离变化,C2C和C2M的精度尚未被验证。4种地形变化监测算法在极端复杂地形下有明显的不足,因此需要对现有算法进行改进,使其适用于坡面侵蚀的研究。

3.1 不确定性讨论

4种算法(C2C,M3C2,C2M,DoD)的不确定性计算十分重要^[7]。Nourbakhshbeidokhti等^[11]根据更高精度的数据计算TLS构建的点云、网格和栅格的误差从而确定LoD,忽略了过程误差对LoD的影响。本文研究从过程误差角度出发,计算点云扫描精度^[5]、点云配准^[5,12]、生成Mesh/DEM存在的不确定性,并针对每一处理过程分析,从而确定出算法的LoD,并在统计意义上给定误差合理的置信区间,以评价各算法对真实地形变化的接近程度。

研究表明,平均不确定性从小到大排序依次为M3C2,C2C,C2M和DoD。这与理论设想的结论是一致的,C2M增加了参考点云生成Mesh的不确定性因素,DoD增加点云插值生成DEM的不确定性因素^[23]。此外,由于投影尺度范围内的地面点过少,造成局部表面粗糙度计算过大^[7],或是手动滤波提取地面点导致人工粗糙度大于真实表面粗糙度^[16],造成M3C2的不确定性增大,M3C2的最大不确定性明显大于其余3种。

冲刷流量为55 L/min时,M3C2方法计算的梁崱坡、沟谷坡和坡沟系统的平均不确定性达到最大,这与在投影尺度 d 范围内的表面粗糙度有密切联系^[24]。通过计算 d 尺度范围内的粗糙度发现,在不同冲刷量下3种地貌的粗糙度呈先减小后增大再减小的趋势,而M3C2的平均不确定性是先增大后减小,这是因为在冲刷量为85 L/min时,配准误差对不确定性的贡献小,局部表面粗糙度的贡献占主导地位,这与Lague等^[7]的研究结果一致,但在其余冲刷量下,表面粗糙度与配准误差对LoD的贡献相当。

3.2 地形变化监测方法讨论

Nourbakhshbeidokhti等^[11]基于薄层扫描研究对比了C2C,M3C2,C2M和DoD,但仅限于在流域尺度上的定性分析,并未定量对比各算法的优劣^[25],而本研究则对不同算法的精度进行了定量评价。地形变化监测方法不仅能够计算产沙量,还可以获得沟道的发育过程,根据各个算法明确侵蚀和沉积的空间分布,定量描述侵

蚀沉积分布面积,区分侵蚀发育阶段^[10](活跃期或稳定期),推断侵蚀形式(溯源侵蚀、沟壁扩张侵蚀还是下切侵蚀)^[9,26]。4种算法对沟道侵蚀形态发育的描述存在差异,从计算产沙量和实测产沙量之间的拟合关系看,在大、小流量下,M3C2和DoD分别表现出较好的线性关系,且在累积场次下两者的关系显著。从计算产沙量和实测产沙量之间的误差发现,M3C2和DoD分别在大、小流量下的相对误差和绝对误差值较小。4种算法的侵蚀/沉积空间分布特征表明,C2C,M3C2和DoD均能检测到沟道发育过程,而C2M在沟壁和沟头位置会存在侵蚀/沉积区分错误的问题,在地形复杂地区尤为明显,该算法不适合监测在小尺度上发生复杂地形变化的区域。

地形平坦区域(梁崱坡),M3C2能够检测到更多细节变化,DoD计算距离变化值偏小。C2C能够快速监测地形变化,M3C2检测到变化区域占总区域的比例为54.62%,而C2C和DoD占比最高仅为10.08%,10.06%。地形复杂地区(沟谷坡),扫描点云有“空洞”。C2C和DoD的侵蚀沉积分布比M3C2更加连续,这是因为C2C在比较云中能够找到对应点,DoD通过插值填充缺失数据,而M3C2限制在局部范围内,以法线为方向寻找对应点,若是在对比云没有找到对应点,则会出现“空洞”。虽然DoD与M3C2算法的LoD差距明显,但两种算法在描述沟谷坡侵蚀和沉积空间分布上差异不明显,这是因为沟谷坡的侵蚀产沙量大而LoD对侵蚀产沙量计算影响相对较小。与此相反,梁崱坡的侵蚀产沙量小,LoD对侵蚀和沉积空间分布的影响较为明显。在未崩塌之前,C2C,M3C2和DoD变化区域占总面积的比例分别为49.66%,61.38%,56.59%,M3C2检测到更多的地形变化;随后沟头崩塌,C2C,M3C2和DoD变化区域占比分别为93.20%,92.53%,94.05%。总而言之,点云不存在大面积“空洞”时M3C2在坡面尺度上精度最高;C2C对粗糙度和点云密度敏感^[27]且计算速度快,更适用于地形平坦和点云高密度区域;DoD在沟谷坡会损失实际的地形变化信息,C2M不适用于复杂地形变化的区域。

4 结论

本研究在黄土丘陵沟壑区自然坡沟系统上布设5个径流试验小区,每个小区分别进行5次径流冲刷试验,对比C2C,M3C2,C2M和DOD4种地形变化监测方法的精度。结果表明,C2M和DoD对原始点云进行插值过程,导致不确定性大,因此对细微地形变化监测能力较弱,而M3C2算法不确定性最小,因此能够检测到细微的地形变化。产沙量精度分析结果

表明,大流量下,M3C2 优于其余 3 种算法,小流量下,DoD 最优,平均相对误差和绝对误差分别小于 33.30%和 11.32kg。侵蚀沉积空间分布特征结果表明,C2M 算法并不适用于监测沟谷坡的地形变化,而 M3C2 能够监测到梁峁坡(地形平坦)和沟谷坡未崩塌前细微的地形变化(其余 3 种算法监测的盲区)区域,但在 TLS 扫描盲区,M3C2 由于在法线方向上未找到对应点会出现“空洞”。总而言之,M3C2 算法更适合监测复杂三维地形中的微小变化,C2M 算法不能描述坡沟系统侵蚀产沙空间分布,C2C 算法可以快速地监测地形变化,DoD 算法更适合监测平坦地形中的显著地形变化。

参考文献(References):

- [1] Wen X, Deng X Z. Current soil erosion assessment in the Loess Plateau of China: A mini-review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,276:123091.
- [2] Dai W, Qian W, Liu A L, et al. Monitoring and modeling sediment transport in space in small loess catchments using UAV-SfM photogrammetry[J]. *Catena*, 2022,214:106244.
- [3] 刘晓燕.黄土高原现状产沙情势评价[J].*水利学报*, 2023,54(1):24-33.
Liu X Y. Evaluation on present status of sediment yield in the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023,54(1):24-33.
- [4] Vanmaercke M, Panagos P, Vanwalleghem T, et al. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021,218:103637.
- [5] Abellán A, Calvet J, Vilaplana J M, et al. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring[J]. *Geomorphology*, 2010,119(3/4):162-171.
- [6] Passalacqua P, Belmont P, Staley D M, et al. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 148:174-193.
- [7] Lague D, Brodu N, Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z)[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 82:10-26.
- [8] Barnhart T B, Crosby B T. Comparing two methods of surface change detection on an evolving thermokarst using high-temporal-frequency terrestrial laser scanning, selawik river, Alaska[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6):2813-2837.
- [9] Gao C D, Li P F, Hu J F, et al. Development of gully erosion processes: A 3D investigation based on field scouring experiments and laser scanning[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021,265:112683.
- [10] Li P F, Hao M K, Hu J F, et al. Spatiotemporal patterns of hillslope erosion investigated based on field scouring experiments and terrestrial laser scanning[J]. *Remote Sensing*, 2021,13(9):1674.
- [11] Nourbakhshbeidokhti S, Kinoshita A M, Chin A, et al. A workflow to estimate topographic and volumetric changes and errors in channel sedimentation after disturbance[J]. *Remote Sensing*, 2019,11(5):586.
- [12] Shi P, Zhang Y, Zhang Y, et al. Land-use types and slope topography affect the soil labile carbon fractions in the Loess hilly-gully area of Shaanxi, China[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020,66(5):638-650.
- [13] Girardeau-Montaut D, Roux M, Marc R, et al. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2005,36(3):W19.
- [14] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. *Catena*, 2014,121:151-163.
- [15] Gong J G, Jia Y W, Zhou Z H, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes[J]. *Geomorphology*, 2011,125(1):203-213.
- [16] Day S S, Gran K B, Belmont P, et al. Measuring bluff erosion part 2: Pairing aerial photographs and terrestrial laser scanning to create a watershed scale sediment budget[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013,38(10):1068-1082.
- [17] Fan L, Smethurst J A, Atkinson P M, et al. Error in target-based georeferencing and registration in terrestrial laser scanning [J]. *Computers & Geosciences*, 2015,83:54-64.
- [18] Lane S N, Westaway R M, Hicks D M. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003,28(3):249-271.
- [19] Collins B D, Corbett S C, Fairley H C, et al. Topographic Change Detection at Select Archeological Sites in Grand Canyon National Park, Arizona, 2007—2010 [M] US Department of the Interior: US Geological Survey, 2012.
- [20] 刘明振.湿陷性黄土间歇浸水试验[J].*岩土工程学报*, 1985,7(1):47-54.
Liu M Z. Intermittent water immersion test for wet subsidence loam[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1985,7(1):47-54.
- [21] 刘东生,张宗祜.中国的黄土[J].*地质学报*, 1962,42

- (1):1-14.
- Liu D S, Zhang Z H. Loess in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1962,42(1):1-14.
- [22] 孙玉柱,郑粉莉,张姣.基于 LIDAR 和 GIS 技术的坡面侵蚀沟空间发育分析[J].*水土保持研究*,2014,21(3):20-24.
- Sun Y Z, Zheng F L, Zhang J. Analysis of gully erosion development based on LIDAR and GIS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014,21(3):20-24.
- [23] Cavalli M, Goldin B, Comiti F, et al. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models[J]. *Geomorphology*, 2017,291:4-16.
- [24] Winiwarter L, Anders K, Höfle B, M3C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021,178:240-258.
- [25] Mukupa W, Roberts G W, Hancock C M, et al. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures[J]. *Survey review*, 2017,49(353):99-116.
- [26] Wang N, Yao Z H, Liu W Q, et al. Spatial variabilities of runoff erosion and different underlying surfaces in the Xihe River Basin[J]. *Water*, 2019,11(2):352.
- [27] 李朋飞,张晓晨,党旭,等.基于三维激光扫描的坡沟系统侵蚀产沙过程研究[J].*水土保持研究*,2023,30(2):13-21.
- Li P F, Zhang X C, Dang X, et al. Investigation of erosion processes on the slope-gully system using 3D laser scanning[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):13-21.

~~~~~

(上接第 66 页)

- [26] 马瑞,张富,周波,等.甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评估模型[J].*水土保持通报*,2021,41(4):139-144.
- Ma R, Zhang F, Zhou B, et al. Risk assessment model for dam break in Gansu Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(4):139-144.
- [27] 罗鹏飞,董燕君.超高土石坝变形监测新技术探讨[J].*人民黄河*,2022,44(S2):275-277.
- Luo P F, Dong Y J. Discussion on new deformation monitoring technology of ultra-high earth-rock dam[J]. *Yellow River*, 2022,44(S2):275-277.
- [28] 万智勇,黄耀英,赵新瑞,等.三维激光扫描技术在面板堆石坝挤压边墙变形监测中的应用[J].*长江科学院院报*,2017,34(6):56-61.
- Wan Z Y, Huang Y Y, Zhao X R, et al. Application of three-dimensional laser scanning technique in deformation monitoring of extrusion sidewall of concrete-faced rockfill dam[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017,34(6):56-61.
- [29] 马松增,徐建昭,何明月,等.河南省淤地坝安全自动化监测系统设计与应用[J].*水土保持通报*,2020,40(5):112-117.
- Ma S Z, Xu J Z, He M Y, et al. Design and application of automatic safety monitoring system for soil-saving dams in Henan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(5):112-117.
- [30] 于沐,李颖哲,姚雪飞,等.淤地坝系风险预警防控平台研究与应用[J].*水土保持通报*,2023,43(1):84-91.
- Yu S, Li Y Z, Yao X F, et al. Research and application of risk warning prevention and control platform for check dam systems[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):84-91.

~~~~~

(上接第 74 页)

- [15] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation [C]// *Proceedings 12th international soil conservation organization conference*. Beijing: Tsinghua University Press. 2002.
- [16] 赖承义,左舒翟,任引.不同生态修复措施和环境因素对亚热带红壤区针叶纯林坡面水土保持功能的影响[J].*生态学报*,2021,41(12):4913-4922.
- Lai C Y, Zuo S D, Ren Y. Impacts of different ecological restoration measures and environmental factors on water and soil conservation of the slope in the pure coniferous forest of the subtropical red soil area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(12):4913-4922.
- [17] 汤崇军,刘宇,徐爱珍,等.红壤径流小区覆被格局的水土保持效应评价[J].*中国水土保持科学*,2020,18(2):36-42.
- Tang C J, Liu Y, Xu A Z, et al. Effect assessment of land cover pattern on soil and water loss on red soil plots[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020,18(2):36-42.
- [18] 吴蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].*水土保持研究*,2019,26(6):133-138,144.
- Wu L, Mu X M, Gao P, et al. Effects of vegetation coverage on runoff and sediment yield in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(6):133-138,144.