

基于 TLS 的全风化花岗岩地区水土保持措施 减沙效益研究

陈若^{1,2}, 夏永华^{2*}, 杨明龙^{2**}, 孔志刚¹, 葛华³, 蒋毅³, 朱琪^{1,2}

¹昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

²昆明理工大学云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 云南 昆明 650093;

³国家管网集团西南管道有限责任公司技术中心, 四川 成都 610037

摘要 云南西部龙陵地区分布有大片的花岗岩,其表层风化强烈,地区雨水充沛,致使边坡坡面侵蚀强烈,水土流失极其严重,现急需开展针对性的水土流失治理方案。以云南省龙陵县花岗岩分布区的风化残积砂质土为研究对象,设计了工程措施、植物措施、工程+耕作措施3种水土保持措施和3个地表坡度(10°,20°,40°)的人工模拟降雨实验,利用三维激光扫描技术对不同坡度下的水土保持措施的水土保持效果进行高精度实时监测,并以产沙率特征和减沙效益特征评价水土保持措施的有效性。实验结果表明:一定降雨强度条件下,坡度是影响坡面侵蚀的最重要因素,坡度越大,产沙速率越快;3种水土保持措施均有不同程度的减沙作用;两种相结合措施的水土保持效果远远优于单一措施。

关键词 全风化花岗岩; 土壤侵蚀; 地面激光扫描(TLS); 减沙效益; 水土保持措施

中图分类号 TP79

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1028005

Effect of Soil and Water Conservation Measures on Sediment Reduction in Fully Weathered Granite Area Based on TLS

Chen Ruo^{1,2}, Xia Yonghua^{2*}, Yang Minglong^{2**}, Kong Zhigang¹, Ge Hua³,
Jiang Yi³, Zhu Qi^{1,2}

¹Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093,
Yunnan, China;

²Surveying & Mapping Technology and Application Research Center on Plateau Mountains of Yunnan Higher
Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

³Technology Center of Southwest Pipeline Co., Ltd., National Pipeline Network Group, Chengdu 610037,
Sichuan, China

Abstract A large amount of granite is distributed in the Longling area of western Yunnan. Its surface weathering is high, and there is a lot of rain, resulting in a severe erosion of the side slope surface and extremely serious soil and water loss. Therefore, targeted soil and water loss control scheme is urgently required. In this study, the weathered sandy soil in the granite distribution area of Longling County, Yunnan Province was considered as the research object and artificially simulated rainfall experiments were designed for three soil and water conservation measures, including engineering, plant, and engineering + tillage measures, and three

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-04-29; 录用日期: 2021-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(41861054)、科技服务项目(KKF0201856026, KKF0201956004)、科技开发项目(2018016)

通信作者: *617073761@qq.com; **76925746@qq.com

surface slopes (10° , 20° , and 40°). Three-dimensional laser scanning technology was employed to monitor the effects of soil and water conservation measures under different slopes with high precision and real time, and the effectiveness of soil and water conservation measures was assessed using the characteristics of sediment yield rate and sediment reduction benefit. The experimental results show that the slope is the most important factor influencing slope erosion under certain rainfall intensity conditions; the steeper the slope, the faster the sediment yield rate. The three types of soil and water conservation measures have different degrees of sediment reduction effect. The effect of soil and water conservation of the two combined measures is far superior to that of a single measure.

Key words fully weathered granite; soil erosion; terrestrial laser scanning (TLS); sediment reduction benefit; soil and water conservation measure

1 引言

我国滇西龙陵地区分布着大量的全风化花岗岩,花岗岩在太阳辐射、大气、水和生物作用下易出现破碎、疏松等现象,其表面容易产生裂隙,分离而风化,尤其是粗粒结构的花岗岩更易风化。花岗岩风化后,岩土体物质成分和结构构造都发生显著变化,力学性质急速降低^[1]。龙陵地区位于怒江西岸,地形起伏较大,属于亚热带山原季风气候,降雨量充沛^[2],一旦表层土壤层被破坏,下层全风化花岗岩层极易受冲刷,形成较严重的坡面侵蚀,造成大面积的水土流失,致使生态景观破碎,人民生命财产安全受到严重威胁。为了保障人民生命财产安全,并服务于“绿水青山就是金山银山”理念,急需开展针对全风化花岗岩地区的水土保持研究。

目前,监测土壤侵蚀的方法有很多,有研究者采用传统手工测量方法来监测土壤侵蚀。常用的传统手工测量方法主要有侵蚀针法、填土法、容积法和核示踪法等,但这些方法具有操作过程复杂、精度低、成本高、费时等缺点^[3-5]。Couper 等^[3]运用侵蚀针法来测量土壤侵蚀和泥沙沉积,但侵蚀针受人为主观因素的影响大,精度较低,且与侵蚀针自身的密度密切相关,当土壤侵蚀监测面积较大时,该方法将耗费大量的人力、物力。近年来,“三维激光扫描技术”又称为“实景复制技术”^[6],已被应用于土壤侵蚀定量研究、复杂地形图测绘、地质灾害预警、地理数据采集等研究中。徐加盼等^[7]利用三维激光扫描技术对全风化花岗岩土体的土壤表面侵蚀形态的微观变化及过程进行高精度的实时监测。Lu 等^[8]利用地面三维扫描仪获取数字高程模型(DEM),通过比较不同时间段内的数字高程模型,生成差分DEM(DOD),从而分析特定

时段内地形和体积变化,该方法可以量化侵蚀和沉积的时空动态。张姣等^[9]利用三维激光扫描技术实现沟蚀发育过程动态监测的方法和流程。不少国内外研究学者仍采用传统方法进行土壤侵蚀变化监测,而如何采用地面激光扫描(TLS)监测全风化花岗岩地区的土壤侵蚀变化情况,并定量评估水土保持措施的水土保持效果的研究鲜见报道。

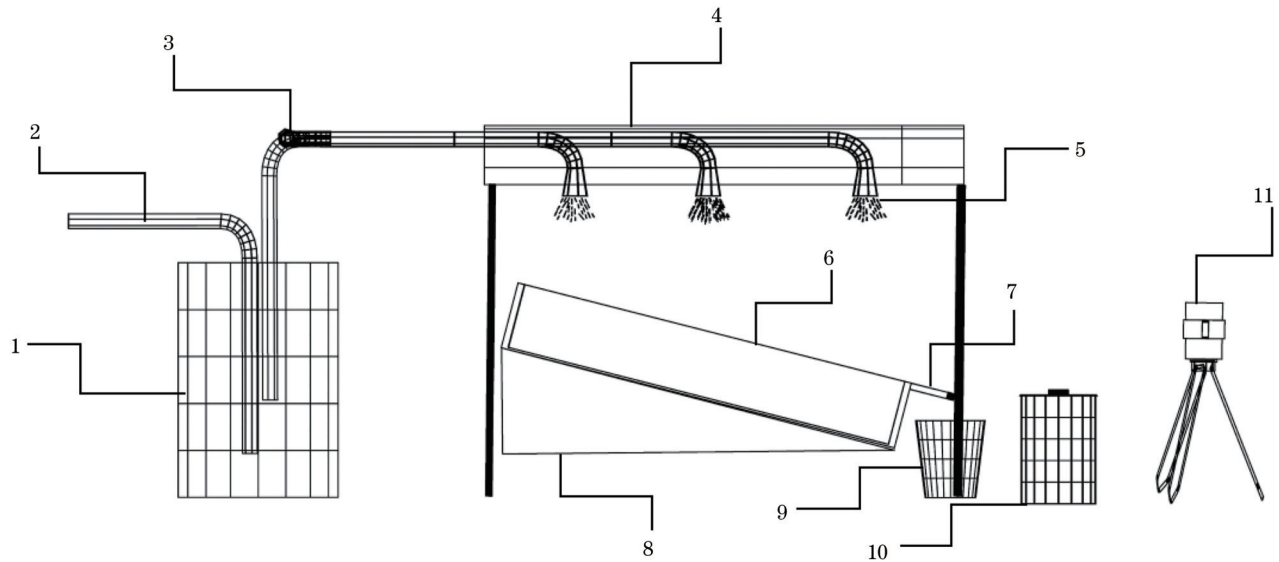
鉴于此,本文以云南省保山市龙陵县的花岗岩风化残积砂质土为研究对象,基于室内人工模拟降雨实验,采用三维激光扫描技术来监测不同坡度和水土保持措施下的产沙情况,然后对不同水土保持措施的水土保持效果进行定量评估,为后续的水土保持和水工保护研究提供科学依据。

2 实验方案设计

2.1 实验材料

实验于2020年8月2日至8月23日在昆明理工大学水工保护与水土保持实验室进行。实验装置主要包括可变坡透明矩形钢槽、降雨系统、排水系统、传感器以及三维激光扫描仪等,实验装置示意图如图1所示。实验所用坡面实体模型土槽是长为3 m、宽为2 m、深为0.5 m的移动式可变坡矩形钢槽。钢槽由A、B、C三个槽组成,其中A、C槽宽0.5 m, B槽宽1 m, A、B、C三槽前端分别有独立的地表径流收集系统,用于收集降雨时产生的泥沙和径流。降雨模拟器采用喷嘴式降雨模拟器。实验前为保证采集的坡面点云数据完整性和便于观察产流和泥沙搬运过程,需将三维激光扫描仪架设在合适的位置,并确保每次扫描的角度应尽可能地与坡面保持垂直。

实验土壤是野外现场采集的龙陵段花岗岩风化残积砂质土,在取土的过程中,因地表有少量的



1. storage bucket; 2. water supply pipe; 3. stabilizing water pump, flow meter and tap; 4. rainfall simulator; 5. rainfall nozzle; 6. experimental plot; 7. triangular diversion weir; 8. slope; 9. runoff bucket; 10. samples; 11. 3D laser scanner

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experiment setup

杂草和碎石,为保证实验数据和结果的准确性,利用筛分法将自然风干后的土壤过 10 mm 的标准筛,以便于去除杂草和直径较大的碎石,最终进行颗粒组成的测定,结果如表 1 所示。实验前在土槽底部填入 10 cm 厚的细沙,在细沙上铺一层易于透水的细纱布,这样能有效地保持土壤的良好透水性,使之接近于天然坡面;然后采用分层压实的方法将土壤填

至可升降的矩形钢槽中,分层厚度为 5 cm,并采用环刀法测定土体干密度,使其控制在 $1.3 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$,还要注意土槽四周尽量压实,以减少边壁效应的影响。装填土结束后,用木条将土表面刮平,制造一定的地表糙度,然后在实验土槽中布设不同水土保持措施,以模拟不同护坡条件下的坡面侵蚀特征。

表 1 砂质土的粒径级配

Table 1 Particle size grading of sandy soil

Particle size /mm	>5.0	5.0-0.5	0.50-0.075	<0.075
Mass fraction /%	8.74	47.78	42.35	1.13

降雨之前,在土体表层洒少量水使表土接近饱和,然后调节变坡钢槽至实验所需坡度。正式降雨实验开始后,将人工标记刻度的大桶放置于集流口处,用于接收降雨过程中产生的径流和泥沙,同时采用体积为 1 L 的塑料瓶来收集泥沙样,采样间隔为每次 2 min。降雨结束后,对采集得到的全部泥沙进行体积量测后烘干称重,得到侵蚀量。

2.2 实验设计

降雨强度、土壤类型、坡度、坡长、植被覆盖类型及水土保持措施是影响土壤侵蚀的重要因子^[10],而坡度是坡面侵蚀的重要空间尺度之一^[11]。本实验在坡长相同的情况下,选择 3 种坡度(10° , 20° , 40°)、1 种雨强(220 mm/h)、3 种水土保持措施,分

析坡面土壤侵蚀的变化规律并计算产沙率及减沙效益。本实验中,裸坡作为对照(CK),分析工程措施、植物措施、工程+耕作措施 3 种水土保持措施。工程措施(EM)设置了排水沟+土工格栅+木排,采用长 3 m、半径 10 cm 的半圆形 PVC 管模拟排水沟,用木排模拟浅埋挡土墙;植物措施(PM)分别设置了覆盖度为 70% 和覆盖度为 60% 的人工草地;工程+耕作措施(ET)分别设置了耕植土+土工格栅+木排+排水沟+截水沟和耕植土+排水沟+截水沟。 10° 斜坡下选用工程措施 EM 和工程+耕作措施 ET1, 20° 斜坡下采用植物措施 PM1 和 PM2, 40° 斜坡下采用工程+耕作措施 ET1 和 ET2。以上实验均在可变坡矩形钢槽中进行。实验小区的设计和表 2 所示。

表 2 实验小区的设计与处理

Table 2 Design and treatment of experiment plot

Slope	Soil and water conservation measure	Numbering of plots	Treatment of plots
	No control measure	CK	Bare slope, without any vegetation cover and water and soil conservation measures
10°	Engineering measure	EM	Drainage ditch (semicircular PVC pipe with a length of 3 m and a radius of 10 cm) + geogrid + wooden rafter (simulated shallow buried retaining wall)
	Engineering+ Tillage measures	ET1	The topmost layer is laid with 10 cm thick planting soil, drainage ditch + drainage ditch
20°	Plant measure	PM1	Artificial grassland (60% coverage)
	Plant measure	PM2	Artificial grassland (70% coverage)
40°	Engineering+ Tillage measures	ET2	The topmost layer is laid with 10 cm thick tillage soil, geogrid + wooden rafters + drainage ditches + cut-off ditches
	Engineering+ Tillage measures	ET1	The topmost layer is laid with 10 cm thick planting soil, drainage ditch + drainage ditch

2.3 数据分析

以裸坡处理作为对照基准,通过对比其他实验处理下的侵蚀量,即可获得不同水土保持措施的减沙效益。

$$s_{rb} = \left(1 - \frac{s_i}{s_{ck}}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: s_{rb} 为减沙效益; s_{ck} 为裸坡处理的土壤侵蚀总量; s_i 为其他水土保持措施处理的土壤侵蚀总量; i 为不同措施方案。

采用 Maptek I-Site Studio 6.0 软件对点云数据进行预处理,在 Geomagic Studio 2015 软件中对点云数据进行模型构建,在 ArcMap 10.5 软件中计算土壤侵蚀量,在 Microsoft Excel 2010 软件和 Origin 2018 软件中进行数据统计整理和作图分析。

3 数据预处理及表面建模

本次实验采用澳大利亚 MAPTEK 公司生产的 I-Site 8200ER 型高精度三维激光扫描仪作为扫描仪器,用来采集坡度分别为 10°, 20°, 40° 的三期的坡面点云数据,采集点云数据之前必须要停止降雨,以消除雨滴对激光的阻挡^[12-13]。对坡面点云数据进行点云去噪预处理,如图 2(a)所示,去噪后的点云数据通过其配套软件生成复杂 3D 表面,但该模型表面粗糙、混乱且不规则,所以需要将其导入至 Geomagic Studio 建模软件中进行模型重构。Geomagic Studio 软件的原理是通过若干个空间三角面片来还原实体原型^[14]。在本次建模过程中,为保证重构模型的光滑性和精确性,需要对点云数据

进行等间距重采样;另外,在降雨过程中,当冲刷深度及面积达到一定程度时,此时无法获取全部的坡面点云数据,生成的模型会出现空缺部分。对于空缺部分,模型需要运用 Geomagic Studio 软件中的多边形处理模块对三角网格进行优化处理,修补三角网中存在的漏洞等;然后通过形状模块对三角网模型进行曲率或轮廓探测,生成四边域曲面片,并最终通过曲面拟合生成 NURBS 曲面^[15],如图 2(b)所示。

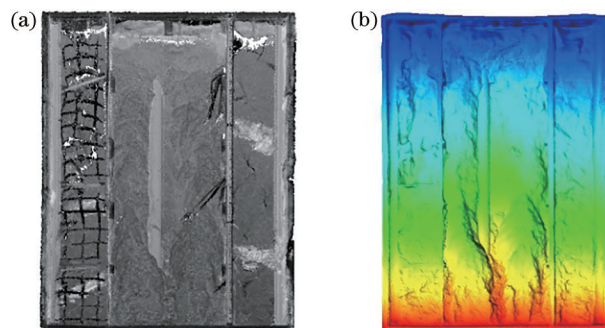


图 2 坡面点云及表面建模。(a)坡面点云;(b)表面建模
Fig. 2 Slope point cloud and surface modeling. (a) Slope point cloud; (b) surface modeling

4 DEM 表面特征分析

NURBS 曲面模型的构建是生成 DEM 的基础。生成 DEM 的主要流程包括:输入 NURBS 曲面模型、在 Maptek I-Site Studio 6.0 软件中对模型进行格式转换、创建 las 数据集、las 数据集转 tin、tin 转栅格,生成的 DEM 质量主要取决于三维模型的精度。图 3 为点云数据生成的 DEM 结果。坡面的沟深、沟宽、

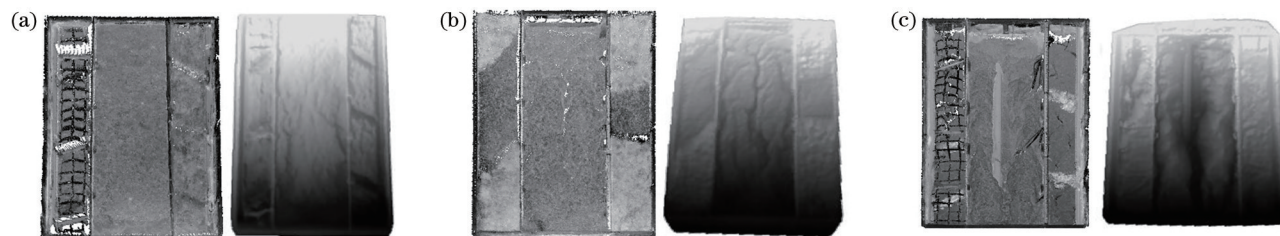


图3 坡面点云及DEM对比图。(a) 10°; (b) 20°; (c) 40°

Fig. 3 Point cloud on slope and DEM contrast map. (a) 10°; (b) 20°; (c) 40°

沟长均随坡度的增加而呈逐渐增加的趋势,如表3所示,且细沟周围出现了多条分支细沟,细沟外部高程明显降低,沟头及两侧沟坡降低了2~45 cm,径流携带泥沙从沟头上部搬运至沟尾,使沟尾出现了明显的土体堆积;坡面侵蚀在10°、20°时仅仅只出现了轻

微的细沟侵蚀,但在40°时出现了沟蚀,且沟蚀范围逐渐变大,说明出现沟蚀的坡度临界值为20°~40°;坡面上部侵蚀程度较下部严重,这是由于径流在重力作用下搬运泥沙,随坡度增加沟蚀程度加深。所以坡度是影响坡面侵蚀的最重要因素之一。

表3 第3场降雨后各坡度细沟的微观指标

Table 3 Microscopic indexes of each slope rill after the third rainfall

Indicator	10°	20°	40°
Average gap long /m	0.937	1.910	2.927
Biggest gap long /m	1.422	2.401	2.985
Average groove depth /m	0.136	0.286	0.386
Biggest groove depth /m	0.108	0.226	0.462
Average groove width /m	0.164	0.245	0.769
Biggest groove width /m	0.330	0.383	0.886

5 结果与分析

5.1 地表产沙特征分析

由图4可以看出,裸坡坡面的产沙率随降雨时间的变化呈先快速增加后减小并逐渐相对稳定的趋势,且均出现了峰值,只是不同坡度下裸坡坡面的产沙率的峰值不同。这是由于降雨初期裸坡坡面含有大量松散碎屑物质,地表径流优先搬运这些物质,导致产沙率迅速增加并达到峰值;其后,随着降雨的持续进行,坡面土壤密度逐渐增加,坡面可供搬运的物质逐渐减少,导致产沙率逐渐减

小并趋于相对稳定。从10°到40°,裸坡坡面的平均产沙率分别为11.17,35.40,1619.58 g/(m²·h),水土保持措施处理下的坡面平均产沙率分别为1.00,0.8,3.42,1.82,30.14,233.62 g/(m²·h)。相比之下,水土保持措施处理下的坡面平均产沙率明显低于裸坡坡面,且呈现相对比较稳定的变化趋势。但是,不同水土保持措施之间的产沙率随降雨时间的变化也具有一定的差异,这是由于水土保持措施对降雨和径流都具有削减作用和调节作用,通过影响径流水动力特征来影响其侵蚀

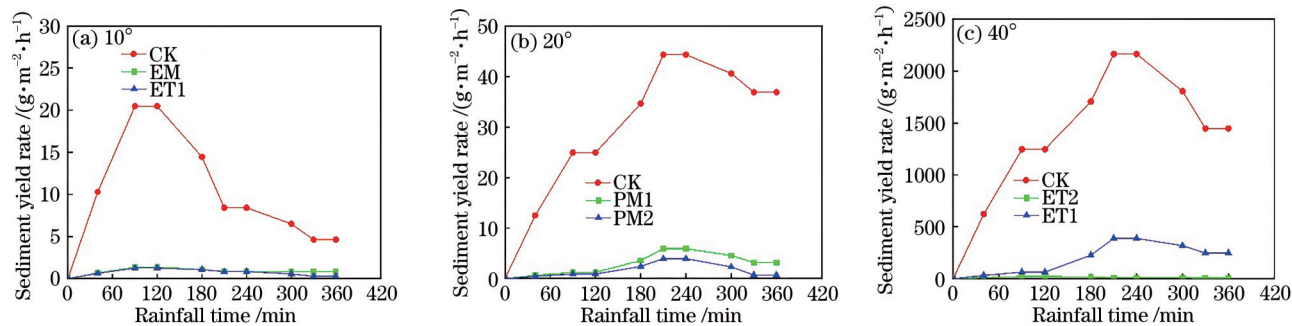


图4 产沙率

Fig. 4 Sediment yield rate

能力和挟沙能力^[16]。以上结果表明,水土保持措施不仅能调节坡面径流过程,而且也能有效控制土壤侵蚀过程。

坡度对坡面产沙率具有一定的影响,坡面产沙率随坡度的增大呈增加的趋势,这是由于坡度为泥沙的输移提供了有利环境。坡度通过影响坡面径流来影响产沙速率,就各坡面的产沙率而言,表现为 40°下的产沙率大于 20°下的产沙率大于 10°下的产沙率;裸坡坡面产沙率受坡度的影响较为显著,而设置了水土保持措施的坡面产沙率随坡度的增加变化不明显。由此可见,坡度是影响坡面产沙的最重要因素。坡度相同时,裸坡坡面产沙率明显大于设置了水土保持措施的坡面,设置了水土保持措施的坡面的产沙率在 10°, 20°, 40°下随降雨时间的增加出现了峰值之后又下降的趋

势,这说明降雨时间和坡面设置也是影响坡面产沙的因素。

5.2 土壤侵蚀量计算及精度分析

通过 ArcGIS 中的 3D 分析工具中的填挖方功能来计算降雨前后模型体积的变化,以未降雨前所获得的模型表面作为基准面,以后期数据作为参考,将前期数据与后期数据结合计算填挖方,若参考数据在基准面之上为“填方”,之下则为“挖方”^[17]。然后再根据体积与质量、密度的关系计算土壤累积侵蚀量。对实验采集得到的泥沙样进行体积量测,之后烘干称重作为真实泥沙侵蚀量,与以上的土壤侵蚀量计算值进行对比,从而验证三维激光扫描仪所获得的坡面侵蚀体积的准确性。真实泥沙侵蚀量与计算的土壤累积侵蚀量如表 4 所示。

表 4 实际累积侵蚀量与计算累积侵蚀量对比

Table 4 Comparison of actual cumulative erosion amount and calculated cumulative erosion amount

Slope	Soil and water conservation measure	Actual cumulative erosion / (g·m ⁻²)	Calculated cumulative erosion / (g·m ⁻²)	Absolute error / (g·m ⁻²)	Relative error / %
10°	EM	180.0	183.0	3.0	1.74
	CK	2010.6	2058.6	48.0	2.40
	ET1	143.4	146.4	3.0	1.94
20°	PM1	615.0	629.4	14.4	2.3
	CK	6372.6	6532.8	160.2	2.51
	PM2	328.2	336.6	8.4	2.53
40°	ET2	5424.6	5564.4	139.8	2.58
	CK	291523.8	303272.4	11748.6	4.03
	ET1	42051.6	43077.6	1026.0	2.44

本次实验采用 Maptek I-Site 8200ER 三维激光扫描仪来估算土壤侵蚀量的精度误差,最大仅为 4.03%,而张鹏等^[18]研究发现莱卡三维激光扫描仪对侵蚀量的估算精度误差为 4.56%,高精度 GPS 对侵蚀量的估算精度误差为 7.38%,测针板法对侵蚀量估算精度误差为 -12.78%。由此可见,三维激光扫描仪在坡面产沙研究方面具有效率高、速度快及分析精度高等优点。

5.3 减沙效益分析

对于总侵蚀量,10°坡度下裸坡的侵蚀量分别是工程措施 EM、工程+耕作措施 ET1 的 11.17 倍、14.02 倍;20°坡度下,分别为植物措施 PM1、植物措施 PM2 的 10.36 倍、19.42 倍;40°坡度下,分别为工程+耕作措施 ET1、工程+耕作措施 ET2 的 6.93 倍、53.74 倍。表明不同坡度下的不同水土保持措施均能有效减少侵蚀量。原因主要有 3 个方

面:一是水土保持措施能削减雨滴对地表的溅蚀动能,水土保持措施越复杂,其削减雨滴动能的作用就越明显;二是水土保持措施能调节地表径流,通过影响径流流速来改变其挟沙能力和侵蚀能力;三是水土保持措施能改善土壤团聚体结构,使表层土壤致密,从而提高土壤的抗蚀抗冲能力,减少侵蚀量。

由表 5 可知,从 10°至 40°,减沙效益最好的分别是工程+耕作措施 ET1(10°)、植物措施 PM2(20°)以及工程+耕作措施 ET2(40°),且两种水土保持措施相结合的减沙效益要远远优于单一措施,这是由于两种水土保持措施可以大大地增加坡面的粗糙程度,减少地表径流量的产生,增加入渗,通过影响坡面侵蚀能力和挟沙能力来影响不同坡面下水土保持措施的减沙效益。

表 5 减沙效益对比

Table 5 Comparison of sediment reduction benefits

Slope	Soil and water conservation measure	Total erosion / (g · m ⁻²)	Sediment reduction benefit / %
10°	CK	2010.6	0
	EM	180.0	91.04
	ET1	143.4	92.87
20°	CK	6372.6	0
	PM1	615.0	90.35
	PM2	328.2	94.85
40°	CK	291523.8	0
	ET2	5424.6	98.14
	ET1	42051.6	85.58

6 结 论

基于人工模拟降雨实验方法,采用三维激光扫描技术来监测小区域的土壤侵蚀变化情况,并获取不同坡度下的最佳水土保持措施。实验结果表明:三维激光扫描技术不仅可以获取坡面完整的几何纹理信息,还可以精确分析坡面的产沙特征和减沙效益特征,所以三维激光扫描技术在水土保持研究方面具有速度快、精度高、可靠性高等优点;在本次实验中影响土壤侵蚀的因素是坡度和水土保持措施,坡度对坡面产沙率影响具有差异,不同坡度下,裸坡坡面的产沙率随降雨时间的增加呈先迅速上升后逐渐降低再稳定的趋势,而产沙量随坡度的增加而增大;水土保持措施均有不同程度的减沙作用,水土保持措施越复杂,坡面减沙效益越好。所提方法仅针对小区域土壤侵蚀,而对于大范围、长历时的土壤侵蚀监测还有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] 吴志峰,王继增. 华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 31-35.
Wu Z F, Wang J Z. Relationship between slope disintegration and rock soil characteristics of granite weathering mantle in South China[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(2): 31-35.

[2] 宋银,朱杰勇,李诗平. 云南龙陵地热资源特征及成因分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(4): 94-100.
Song Y, Zhu J Y, Li S P. Characteristics and genesis analysis of geothermal resources in Longling, Yunnan[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2020, 31(4): 94-100.

[3] Couper P, Stott T, Maddock I. Insights into river

bank erosion processes derived from analysis of negative erosion-pin recordings: observations from three recent UK studies[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(1): 59-79.

[4] 赵宇,陈晓燕,米宏星,等. 基于体积法对黄土细沟侵蚀沿程分布模拟的研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1234-1241.
Zhao Y, Chen X Y, Mi H X, et al. A volumetric method based study on distribution of erosion along rills on loess slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(6): 1234-1241.

[5] 张合兵,聂小军,程静霞. ¹³⁷Cs示踪采煤沉陷坡土壤侵蚀及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 137-143.
Zhang H B, Nie X J, Cheng J X. ¹³⁷Cs tracing of soil erosion and its impact on soil nutrients across subsidence slope induced by coal mining[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 137-143.

[6] 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.
Wang Y F, Niu J, Zhang C W. Application study of soil erosion in slope runoff plot based on 3D laser scanner technology[J]. China Agriculture Information, 2013(23): 151-152.

[7] 徐加盼,王秋霞,邓羽松,等. 基于三维激光扫描技术的花岗岩风化土体侵蚀表面特征研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 14-19.
Xu J P, Wang Q X, Deng Y S, et al. Study on characteristics of erosion surface on weathered granite soil based on three-dimensional laser scanning technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 14-19.

[8] Lu X Y, Li Y K, Washington-Allen R A, et al.

- Structural and sedimentological connectivity on a rilled hillslope[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 1479-1494.
- [9] 张姣, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程的方法研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(6): 89-94.
- Zhang J, Zheng F L, Wen L L, et al. Methodology of dynamic monitoring gully erosion process using 3D laser scanning technology[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(6): 89-94.
- [10] Khan M, Gong Y B, Hu T X, et al. Effect of slope, rainfall intensity and mulch on erosion and infiltration under simulated rain on purple soil of south-western Sichuan Province, China[J]. *Water*, 2016, 8(11): 528.
- [11] Morbidelli R, Saltalippi C, Flammini A, et al. Role of slope on infiltration: a review[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 878-886.
- [12] 柏宏强, 夏永华, 杨明龙, 等. 基于三维激光点云特征线提取的溶洞多分辨率三维重建方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 202802.
- Bai H Q, Xia Y H, Yang M L, et al. Multi-resolution 3D reconstruction of Karst caves based on the feature line extraction of 3D laser point cloud[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 202802.
- [13] 龙丽娟, 夏永华, 黄德. 一种基于三维激光扫描点云数据的变电站快速建模方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 202801.
- Long L J, Xia Y H, Huang D. Fast modeling method for substation based on 3D laser scanning point cloud data[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 202801.
- [14] 张子健, 程效军, 曹宇杰, 等. 结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1110001.
- Zhang Z J, Cheng X J, Cao Y J, et al. Application of 3D reconstruction of relic sites combined with laser and vision point cloud[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1110001.
- [15] 罗城仔, 魏永超, 邓岚, 等. 基于Geomagic Studio的航空发动机叶片曲面建模[J]. *机械工程与自动化*, 2020(3): 13-14.
- Luo C Z, Wei Y C, Deng L, et al. Surface modeling of aeroengine blades based on Geomagic Studio[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2020(3): 13-14.
- [16] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 429-436.
- [17] 吴立新, 许志华, 范松滔, 等. 植被稀疏地区沟蚀变化的地面激光扫描监测与沟蚀量估算[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(10): 1343-1349.
- Wu L X, Xu Z H, Fan S T, et al. Gully erosion TLS monitoring and estimation in area of sparse vegetation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1343-1349.
- [18] 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): 11-15, 20.
- Zhang P, Zheng F L, Wang B, et al. Comparative study of monitoring gully erosion morphology change process by using high precision GPS, Leica HDS 3000 laser scanner and needle board method[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(5): 11-15, 20.