

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.04.026

冯凯月, 马利霞, 于东升, 等. 基于地基激光雷达监测不同地表覆盖条件的土壤侵蚀试验研究. 土壤, 2022, 54(4): 856–864.

# 基于地基激光雷达监测不同地表覆盖条件的土壤侵蚀试验研究<sup>①</sup>

冯凯月<sup>1,2</sup>, 马利霞<sup>1</sup>, 于东升<sup>1,2\*</sup>, 陈洋<sup>1,2</sup>, 王鑫<sup>1,2</sup>, 宋洁<sup>1,2</sup>, 刘晓利<sup>3</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站(中国科学院南京土壤研究所), 江西鹰潭 335000)

**摘要:** 土壤侵蚀量是土壤退化风险评估的重要指标, 地基激光雷达(TLS)为土壤侵蚀量动态监测提供新技术手段, 但野外不同地表覆盖条件对监测精度的影响尚不明确。基于 2019 年 11 月和 2021 年 7 月在鹰潭红壤生态实验站获取的地表裸露、石块、稀疏象草、马尾松、马尾松+石块, 马尾松+稀疏象草等不同地表覆盖条件的 6 个径流小区两期 TLS 数据, 运用移动曲面拟合滤波和反距离加权插值方法估算土壤侵蚀量, 结合实测侵蚀量数据评价 TLS 精度, 并探讨不同地表覆盖条件下 TLS 的最小变化识别度(minLOD)。研究表明, TLS 监测精度与土壤侵蚀量呈正相关关系, 更适用于中等强度以上或长时间发生明显侵蚀的土壤侵蚀区监测。不同地表覆盖条件下 minLOD 为 4~60 mm, TLS 监测相对误差(RE)依次为: 地表裸露(RE=-9.4%)<马尾松+石块(RE=12.6%)<石块(RE=15.5%)<稀疏象草(RE=-18.9%)<马尾松(RE=23.4%)<马尾松+稀疏象草(RE=-25.2%); 地表覆盖条件不仅影响土壤侵蚀强度、地表粗糙度, 也产生点云滤波及空间插值误差, 进而影响 TLS 识别 minLOD 准确度和土壤侵蚀监测精度。本研究为野外复杂地表条件下 TLS 监测土壤侵蚀提供参考。

**关键词:** 地基激光雷达(TLS); 土壤侵蚀; 不同地表覆盖条件; 最小变化识别度(minLOD)

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

## Experimental Research on Soil Erosion Monitoring of Different Ground Cover Conditions Using Terrestrial Laser Scanning (TLS)

FENG Kaiyue<sup>1,2</sup>, MA Lixia<sup>1</sup>, YU Dongsheng<sup>1,2\*</sup>, CHEN Yang<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>1,2</sup>, SONG Jie<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoli<sup>3</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Farmland Ecosystem National Field Observation and Research Station, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335000, China)

**Abstract:** The amount of soil erosion is a key indication for assessing the risk of soil degradation. Terrestrial laser scanning (TLS) is a new technical tool for monitoring soil erosion in real time, but its monitoring accuracy under various ground cover conditions is still unclear. In this study, two TLS scans with six different ground cover conditions were undertaken in Yingtan Red Soil Ecological Experimental Station in November 2019 and July 2021. Moving surface fitting filtering and the inverse distance weighted interpolation methods were used to create DEM. The erosion mass and accuracy of TLS were assessed using a combination of DEM datasets and a minimal level of detection. The results showed that there was significant positive correlation between the accuracy of TLS and soil erosion amount. TLS was better suited for monitoring the areas with moderate erosion intensity or higher, as well as the areas with significant erosion over time. Ground cover conditions not only influenced the intensity of soil erosion and surface roughness, but also caused point cloud filtering and spatial interpolation errors, which affecting TLS recognition minLOD and soil erosion monitoring accuracy. This study can provide reference for TLS monitoring of soil erosion in the wild under complicated surface conditions.

**Key words:** Terrestrial laser scanning; Soil erosion; Different ground cover conditions; Minimum of level of detection

①基金项目: 中国地质调查项目(DD20190540)、国家自然科学基金项目(42001302, 41571206)和土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放研究基金项目(Y812000002)资助。

\* 通讯作者(dshyu@issas.ac.cn)

作者简介: 冯凯月(1996—), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事地基激光雷达及水土流失研究。E-mail: fengkaiyue@issas.ac.cn

土壤侵蚀导致土壤肥力下降、水体污染、空气质量降低<sup>[1]</sup>, 严重威胁侵蚀区内的粮食生产及生态环境可持续发展。因此开展土壤侵蚀监测研究具有重要意义。传统的土壤侵蚀定位监测方法成熟多样, 在实际应用中发挥了重要作用, 但也具有一定缺陷性。径流小区法和水文学法<sup>[2]</sup>收集试验小区径流泥沙耗时费力, 特大暴雨监测条件时有疏漏。针对侵蚀样点监测, 核素示踪法<sup>[3]</sup>无法估算短期或某个特定事件引起的土壤侵蚀速率<sup>[4]</sup>, 且符合要求的对照基准点难以寻找。侵蚀针法<sup>[5]</sup>受人为干扰影响监测精度较低。因此, 土壤侵蚀定位监测需要新方法。

现代地形高精度测量为土壤侵蚀定位监测提供新技术支持。数字摄影测量技术获取影像纹理、光谱等丰富信息, 监测速度快、存储成本低<sup>[6]</sup>, 但无法实现密集植被覆盖下的地形测量, 对大气能见度要求高。机载激光雷达(ALS)技术一般用于大、中尺度的滑坡、泥石流和冲沟等裸露样区侵蚀监测<sup>[7-8]</sup>, 由于植被遮挡难以应用于林下侵蚀监测; 地基激光雷达(TLS)克服 ALS 缺陷, 其采用近距离观测及静态采集方式, 生成更高分辨率和精度的 3D 模型<sup>[9]</sup>, 更适用于小微尺度样区或样点定位监测<sup>[10-11]</sup>。但 TLS 监测土壤侵蚀还具有较高不确定性, 如 Li 等<sup>[12]</sup>在室内模拟降雨条件下利用 TLS 监测土壤侵蚀量的相对误差为 6.8% ~ 31.8%; Goodwin 等<sup>[11]</sup>基于 GPS 全站仪单点地表高程数据验证了 TLS 监测地表高程的精度, 结果表明两者的高程标准差为 4.7 cm。因此, 需要深入研究和分析 TLS 监测土壤侵蚀的不确定性因素, 以提升监测精度。

在 TLS 监测土壤侵蚀过程中, 监测精度受点位精度、配准误差、地表粗糙度及点云质量等产生噪声的影响<sup>[13]</sup>。为此相关学者提出最小变化识别度(minimum of level of detection, minLOD), 即 TLS 可识别高程变化的最小限度<sup>[14]</sup>, 以区分高程变化噪声和真实高程变化量, 进而提取真实地表形变, 并确保 TLS 监测精度。Brasington 等<sup>[15]</sup>曾提出基于两期 DEM 误差计算 minLOD 的方法, 但未考虑配准误差的影响。Lague 等<sup>[16]</sup>利用配准误差和地表粗糙度改进了 minLOD 计算方法, 却忽略了点云缺失区域的实际高程变化。因此, 需同时考虑配准误差和点云缺失区域的噪声, 以优化空间尺度上的 minLOD。

目前, 已有研究多基于模拟降雨条件下裸露土槽径流实验开展 TLS 监测土壤侵蚀精度的评价<sup>[12, 17]</sup>, 而在野外自然降雨和地表覆盖条件下 TLS 监测精度<sup>[14, 18-19]</sup>评价与分析严重不足。南方红壤区土壤侵

蚀多发生在土壤母质出露、植被稀疏的山地丘陵区, TLS 监测土壤侵蚀易受植被和砾石遮挡, 影响点云数据完整性, 进而影响监测精度<sup>[12]</sup>, TLS 监测土壤侵蚀的可靠性尤需探究。因此, 本研究通过设置不同植被类型和砾石覆盖的侵蚀径流小区, 在自然降雨条件下利用采集的径流泥沙实测数据验证 TLS 监测土壤侵蚀量精度, 并探讨不同地表覆盖条件下 TLS 的 minLOD, 为 TLS 野外定位监测土壤侵蚀提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验位于南方红壤丘陵区鹰潭红壤生态实验站(28°15'N, 116°55'E)。该站处于中亚热带季风气候区, 干湿季节明显, 多年平均降水量为 1 785 mm, 集中在 7—9 月<sup>[20-21]</sup>; 平均气温 17.8 °C, 热量充沛。现有植被主要为马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、象草(*Pennisetum purpureum* Schum.) 和白茅(*Imperata cylindrica* (L.) Beauv)<sup>[22]</sup>。试验土壤为第四纪红色黏土发育的红壤<sup>[21]</sup>, 土壤砂粒、粉粒、黏粒含量分别为 24.56%、37.48%、37.96%, 土壤有机质含量为 18.07 g/kg, 土壤容重为 1.23 g/cm<sup>3</sup><sup>[22]</sup>。

### 1.2 试验设计

依据南方红壤侵蚀区常见的地表条件特征, 2019 年 11 月改建 6 个径流小区并开始试验(图 1)。P1 ~ P6 小区改建前地表覆盖类型分别为不同高度和覆盖度的稀疏马尾松裸地、马尾松+象草地和象草地。各小区坡度为 8°, 水平投影面积 2.5 m × 10.0 m; 小区四周用水泥板与外部隔开, 在坡面下方设置 3 个径流桶以收集径流泥沙, 桶高及内径分别为 0.88、0.55 m。各小区内地表条件设置处理如表 1, 其中, P1、P5 小区设有稀疏低矮象草覆盖, 平均高度为 50cm; P3、P4 小区分别均匀放置 146.30、156.40 kg 当地第四纪红色黏土层常夹有的长、宽分别为 5.0 ~ 20.0 cm 和 5.0 ~ 15.0 cm 鹅卵石, 块石出露度<sup>[23]</sup>(石块出露面积占小区面积百分比)平均为 3.7%; P4、P5、P6 小区留有 7、8、8 棵马尾松, 平均高度 3.2 m(图 1), 覆盖度 35% ~ 46%。试验期间通过浅扒不断地破坏土壤表层结皮, 人为增加侵蚀强度。

每次降雨并产生径流后, 分别采集各小区径流收集桶中水样和过滤网袋中泥沙样, 测定径流含沙量及泥沙含水量, 测量径流桶水深及滤网总泥沙量。至 2021 年 7 月, 各小区分别收集径流泥沙样品 41 组。同时, 通过实验站内气象站点(<http://www.yingtan.cern.ac.cn>)获取同期逐日降水数据。

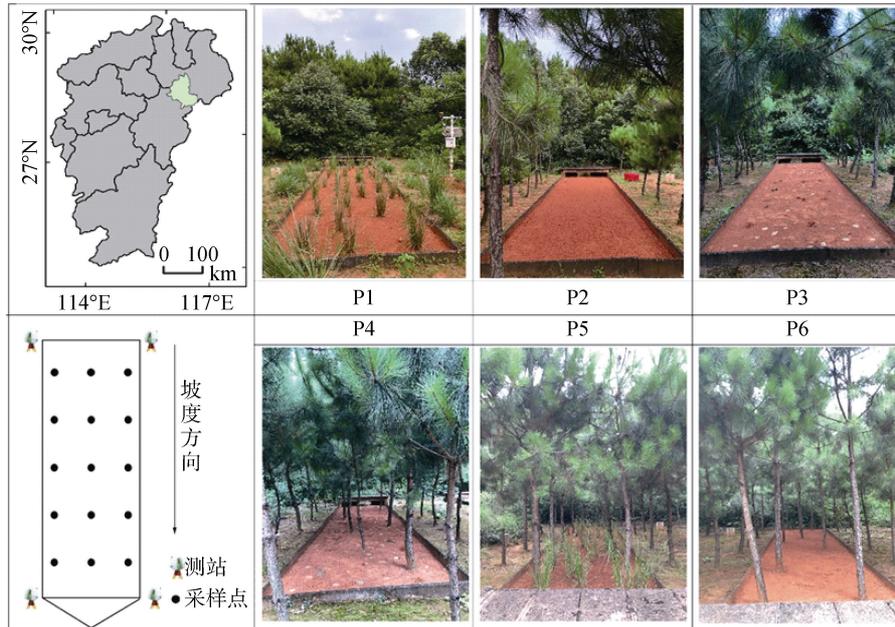


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of study area

表 1 径流小区不同地表覆盖条件

Table 1 General characteristics of ground cover in runoff plots

| 小区编号 | 坡度(°) | 植被类型   | 植被覆盖度(%) | 块石出露度(%) |
|------|-------|--------|----------|----------|
| P1   | 8     | 象草     | 11.0     | 0.0      |
| P2   | 8     | 无      | 0.0      | 0.0      |
| P3   | 8     | 无      | 0.0      | 3.6      |
| P4   | 8     | 马尾松    | 46.0     | 3.8      |
| P5   | 8     | 马尾松、象草 | 42.0     | 0.0      |
| P6   | 8     | 马尾松    | 35.0     | 0.0      |

2019年11月、2021年7月利用地面三维激光扫描仪(Leica ScanStation P40)分别对P1~P6小区进行四站扫描(图1)获取TLS点云数据,各测站水平、垂直视角分别设置为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、 $-45^\circ \sim 90^\circ$ 。为提高多站/多期点云数据配准精度,在小区周围设置3个水泥制固定基台,确保Leica黑白标靶每次均能放置在同一空间位置。扫描方位角和天顶角方向分别设置 $0.036^\circ$ 角度增量,在距离扫描仪10 m范围内点云间距小于5 mm。以2019年TLS第一测站的坐标系为空间参考,利用Cyclone软件将多站/多期数据配准得到完整小区点云数据,并对明显植被点进行手动滤波。

在TLS扫描后随即沿坡面方向自上而下均匀设置了5行3列15个土壤容重采样点,获取各小区表层土壤容重平均值。土壤含水量、泥沙干重及土壤容重均利用烘干法进行测定<sup>[24]</sup>。

### 1.3 实测土壤侵蚀量计算

各小区利用径流泥沙数据获得次降雨侵蚀量的计算方法如下式<sup>[21]</sup>:

$$S_i = \left( \frac{M_i}{V_i} \times h_i \times \pi \times r^2 + C_i \times (1 - C_{wi}) \right) / 1000 \quad (1)$$

式中: $S_i$ 为第*i*次降水产生的土壤侵蚀量(kg), $M_i$ 为径流样品泥沙干重(g), $V_i$ 为径流样品体积( $\text{cm}^3$ ), $h_i$ 为径流水深(cm), $r$ 为圆柱径流桶半径(cm), $C_i$ 为滤网泥沙湿重(g), $C_{wi}$ 为滤网泥沙含水量(%)。

各小区观测期间平均土壤侵蚀强度(模数)计算如下式:

$$A_i = \frac{S_i \times 12}{\text{area}_i \times 20} \quad (2)$$

式中: $A_i$ 为第*i*个小区土壤侵蚀模数( $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ), $\text{area}_i$ 为第*i*个小区地表面积( $\text{m}^2$ ),20(个月)指本研究中观测时段,12指一年的12个月。

### 1.4 TLS监测土壤侵蚀方法

**1.4.1 点云滤波** 利用移动曲面拟合方法<sup>[25]</sup>进行点云滤波以去除植被、石块等非地面点噪声。考虑到各小区最大地物尺寸,首先构建 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的固定网格,按平面坐标将点云数据网格化。将每个网格作为目标,依据地形坡度(Slope,式3)构建其邻域。基于大量实验确定,当 $\text{Slope} > 5^\circ$ 时选择邻域为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 网格,反之为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 网格。然后,将邻域内各网格的高程最低值作为初始地面点,构建最小

二乘曲面(式 4)。计算目标网格中所有的点与曲面高差，通过设置高差阈值，去除非地面点。

$$\text{Slope} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \frac{|Z - Z_i|}{\sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2}} \quad (3)$$

式中： $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别为目标格网高程最低点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标， $i$  为第  $i$  个邻域网格， $X_i$ 、 $Y_i$ 、 $Z_i$  为第  $i$  个邻域格网中高程最低点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标。

$$z_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2 \quad (4)$$

式中： $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  分别为第  $i$  个初始地面点的坐标， $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$  分别为拟合参数。

本研究的非地面点主要为树干、象草及石块，经统计与地面的高差范围为 0~5 cm。为确定最优高差阈值，以 0.5 cm 为间隔，依次比较 0~5 cm 范围内不同高差阈值的滤波效果。试验表明 P2 小区最优高差阈值为 2 cm，其余小区为 1.5 cm。将距离曲面高差大于高差阈值的非地面点予以滤除，反之保留。最后利用反距离加权方法(IDW)对点云数据缺失区域进行插值，并生成各小区 2019 年 11 月和 2021 年 7 月两期完整 DEM 数据。

**1.4.2 地表形变监测算法** 利用 Brasington 等<sup>[15]</sup>和 Lague 等<sup>[16]</sup>的计算方法，将配准误差和点云粗糙度纳入最小变化识别度 minLOD 计算。假设两期 DEM 误差相互独立，则计算公式如下：

$$\begin{aligned} \text{min LOD} = \\ \pm 1.96 \times \left( \sqrt{\sigma_{\text{DEM1}}^2 + \sigma_{\text{DEM2}}^2} + \text{registration error} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $\sigma_{\text{DEM1}}$ 、 $\sigma_{\text{DEM2}}$  分别为前后两期 DEM 的去趋势化粗糙度(m)，即目标栅格中所有地面点距最近邻 9 个初始地面点构建拟合曲面的去趋势化高程的标准差<sup>[14]</sup>；registration error 为在 cyclone 软件中两期数据配准误差的最大值(m)<sup>[16]</sup>；1.96 指 95% 的置信度。

将 DEM 形变与 minLOD 空间分布数据叠加，获取监测的地表高程变化量。只有高程发生显著变化(高程变化大于 minLOD)的栅格才参与土壤侵蚀量计

算<sup>[12, 15-16]</sup>。其中，高程变化量正值表明泥沙沉积，负值为土壤侵蚀。

**1.4.3 TLS 监测土壤侵蚀量** 将每一栅格的面积、高程变化量及土壤容重数据进行乘法运算即可得到土壤侵蚀量：

$$\Delta m = \rho b \times \sum_{i=1}^n (h_i \times \text{cellsize}^2) \quad (6)$$

式中： $\Delta m$  为土壤侵蚀量(kg)； $\rho b$  为土壤容重(kg/m<sup>3</sup>)； $h_i$  为第  $i$  个像元高程变化量(m)；cellsize 为栅格像元大小，本文取值 0.01，即 1 cm。

**1.4.4 TLS 监测结果验证** 通过比较实测与 TLS 监测土壤侵蚀量数据，利用相对误差(RE)、均方根误差(RMSE)对 TLS 监测精度进行评价：

$$\text{RE} = \frac{P_{\text{red}} - O_{\text{bs}}}{O_{\text{bs}}} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{\text{redi}} - O_{\text{bsi}})^2} \quad (8)$$

式中：RE 为相对误差(%)，RMSE 为均方根误差(kg)， $P_{\text{red}}$  为 TLS 监测土壤侵蚀量(kg)， $O_{\text{bs}}$  为实测土壤侵蚀量(kg)， $n$  为试验小区数量。

## 2 结果与分析

### 2.1 实测小区径流与土壤侵蚀量

试验区侵蚀性降水量标准为 12 mm<sup>[26]</sup>，研究时段内共观测到 93 次侵蚀性降水事件，降水量合计 2 446.5 mm，集中于 6—7 月(图 2)。不同地表覆盖条件下各小区逐月累积径流量及土壤侵蚀量存在差异(图 3)。P2、P4 小区累积径流量多达 12 m<sup>3</sup>，其余小区累积径流量较少，但也超出 9 m<sup>3</sup>。不同地表覆盖条件对小区径流产生明显影响。

研究时段内 P2 小区侵蚀最为强烈，侵蚀强度为强烈侵蚀，P1、P3、P4 为中度侵蚀，P5、P6 小区侵蚀作用较弱，为轻度侵蚀(表 2，图 3)。不同植被覆盖类型及结构影响了雨滴到达地表过程和土壤受雨

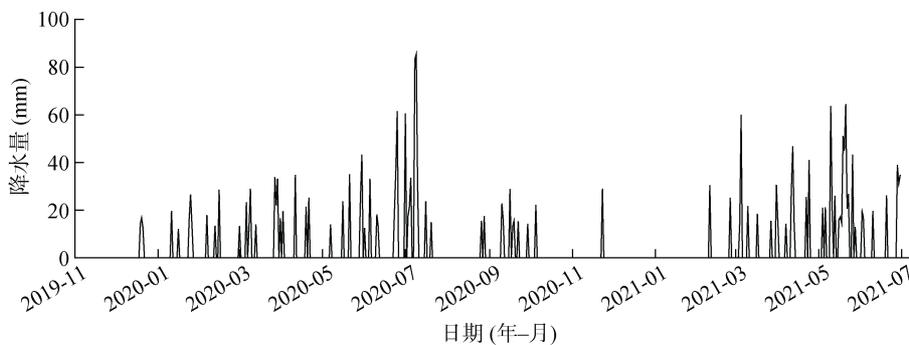


图 2 研究时段内逐日降水量  
Fig. 2 Daily precipitation in the study period

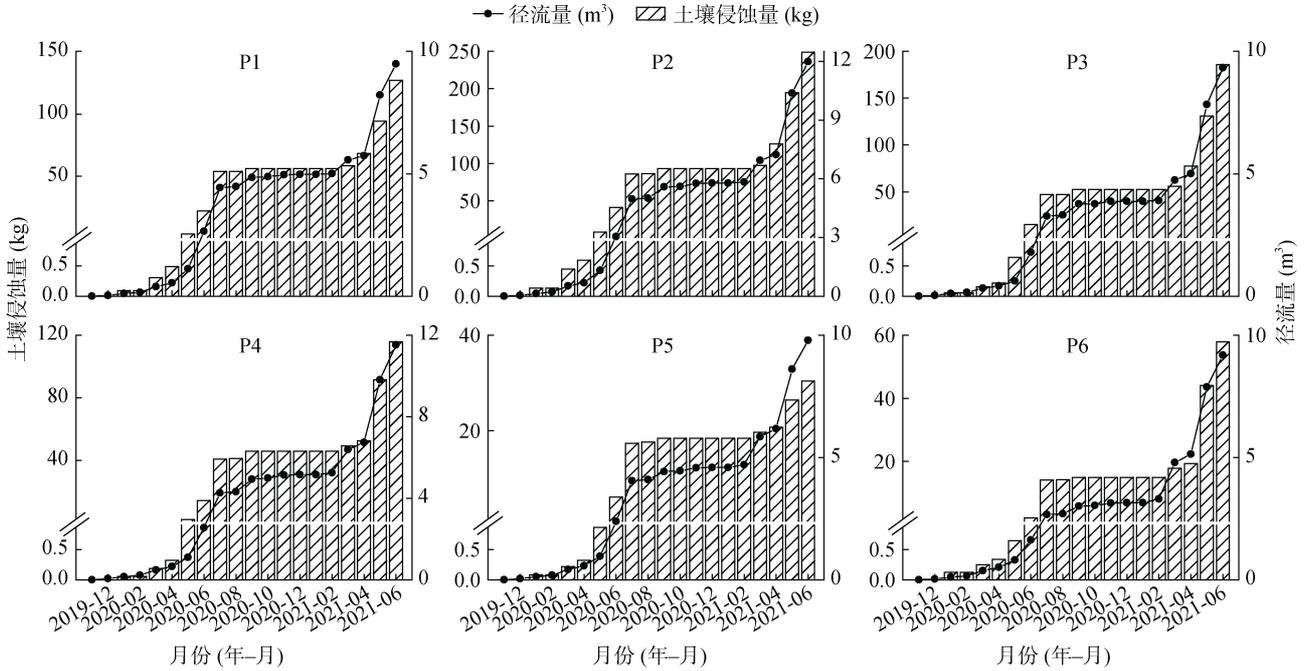


图 3 各试验小区逐月径流及土壤侵蚀量累积分布  
 Fig. 3 The cumulative distribution of monthly runoff and soil erosion in each plot

表 2 径流小区的土壤侵蚀强度分级

Table 2 Classification of soil erosion intensity in runoff plots

| 试验小区 | 土壤侵蚀模数(t/(km <sup>2</sup> ·a)) | 土壤侵蚀强度分级 <sup>[30]</sup> |
|------|--------------------------------|--------------------------|
| P1   | 3 044.13                       | 中度                       |
| P2   | 5 972.20                       | 强烈                       |
| P3   | 4 455.14                       | 中度                       |
| P4   | 2 773.15                       | 中度                       |
| P5   | 729.95                         | 轻度                       |
| P6   | 1 387.19                       | 轻度                       |

水打击的响应<sup>[22, 27]</sup>, 造成了各小区土壤侵蚀量的差异。冠层截留雨滴、减小雨滴到达地表的动能及净降水量, 植被覆盖度高的小区(P4、P5、P6)土壤侵蚀量均小于植被覆盖度低的小区(P1、P2、P3)<sup>[28]</sup>。相较于马尾松林, 低矮灌草的土壤渗透能力较弱, 土壤侵蚀量随地表径流增加而增大<sup>[29]</sup>, 稀疏象草分布的 P1 小区土壤侵蚀量高于马尾松覆盖的 P4、P5 和 P6 小区。当地表石块出露时, 石块拦截局部地表径流, 径流能量受阻挡而削减, 流速降低, 水分入渗增加, 一定程度减弱土壤侵蚀<sup>[23]</sup>, 石块出露的 P3 小区土壤侵蚀量低于无地物覆盖的 P2 小区。不同地表覆盖条件对土壤侵蚀存在明显影响作用。

2.2 TLS 监测的土壤侵蚀特征

试验小区地表形变的 TLS 监测结果表明, 各试验小区的侵蚀过程占主导地位, 沉积作用较弱(表 3)。试验小区 P2 侵蚀面积最大, P3 次之, P5 最小。植

被覆盖通过改善地表水热条件、土壤孔隙度和团聚体, 增加土壤入渗和抗蚀能力<sup>[22]</sup>, 地表裸露和石块出露的 P2、P3 小区土壤侵蚀面积高于其他有植被覆盖的小区。马尾松和象草分层覆盖的 P5 小区侵蚀面积最小, 原因在于多冠层植被结构可显著减弱雨滴动能, 增大土壤持水率和径流拦蓄率<sup>[24]</sup>。

表 3 试验小区地表形变统计特征

Table 3 Surface deformation statistics of runoff plots

| 试验小区 | 侵蚀高程均值 (mm) | 侵蚀区域面积(m <sup>2</sup> ) | 沉积高程均值 (mm) | 沉积区域面积(m <sup>2</sup> ) |
|------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| P1   | -18         | 5.70                    | 15          | 1.23                    |
| P2   | -17         | 10.89                   | 10          | 0.30                    |
| P3   | -17         | 10.41                   | 12          | 0.21                    |
| P4   | -19         | 6.37                    | 11          | 1.23                    |
| P5   | -13         | 3.36                    | 13          | 2.07                    |
| P6   | -12         | 6.47                    | 10          | 2.20                    |

受径流影响, 各小区下坡汇水面积、径流量及流速远大于上坡, 下坡位置侵蚀过程相对强烈<sup>[31]</sup>(图 4)。但由于植被和石块对径流的分配作用, 不同地表覆盖条件下土壤侵蚀空间分布存在差异。P1 小区侵蚀主要分布在无象草覆盖区域, 沉积发生在象草根部分, 是因为径流总沿着阻力最小的方向移动, 象草起到拦蓄泥沙作用<sup>[24]</sup>。相较于地表裸露的 P2 小区, 石块出露的 P3 小区侵蚀主要发生在小区中部, 这是由于出露石块促进坡面汇流, 增加径流集中程度, 因此中下部

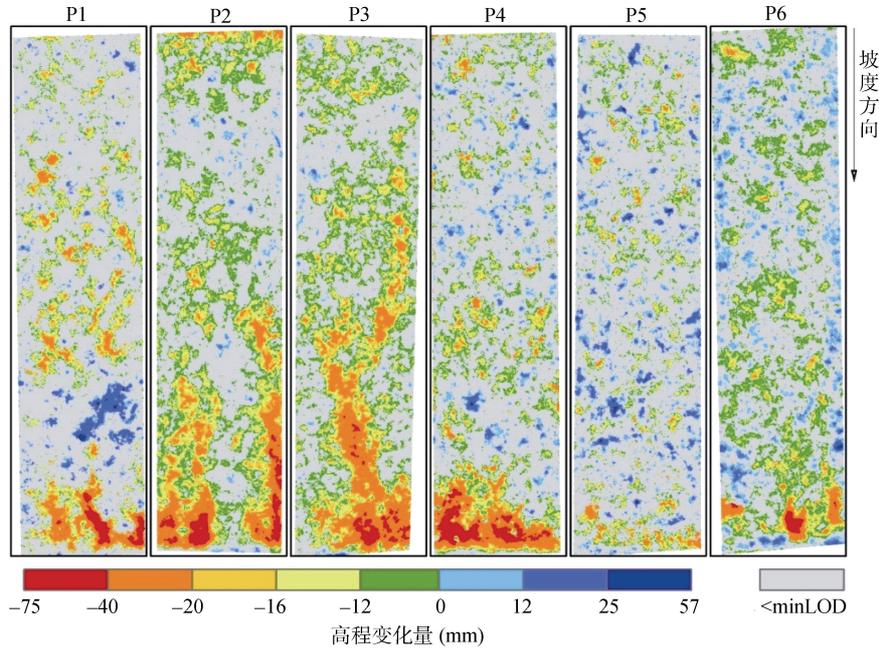


图 4 土壤侵蚀-沉积空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of soil erosion and deposition in runoff plots

侵蚀作用更强<sup>[23]</sup>。而 P2 小区裸土坡面径流分散，受地表微地形起伏影响，在下坡两侧区域形成细沟<sup>[31]</sup>。P4 小区下坡石块出露度高，不透水面积大，土壤水分入渗率低，侵蚀较强烈<sup>[23]</sup>。马尾松和象草覆盖增加土壤入渗率并减弱径流动力，P5 小区侵蚀集中在出水口区域，沉积区域以斑点状分布于植被根部位置。P6 小区侵蚀作用主要发生在马尾松冠层空隙或无植被覆盖区域，而边缘位置由于受到石板阻滞，出现少量泥沙沉积。

TLS 监测的不同地表覆盖条件土壤侵蚀与沉积空间分布特征存在明显差异，而传统径流小区泥沙观测难以揭示该特征，这体现了 TLS 定位监测土壤侵蚀的技术优势。

### 2.3 TLS 监测精度评价

以实测土壤侵蚀量为评价基准，不同地表覆盖条件下 TLS 监测土壤侵蚀量的相对误差绝对值 ARE<25.2%，RMSE 为 20 kg(表 4)。地表裸露的 P2

小区 RE 最小，马尾松及稀疏象草分层覆盖的 P5 小区 RE 最大。TLS 在 6 个径流小区侵蚀量监测精度依次为：P2(地表裸露)>P4(马尾松+石块)> P3(石块)>P1(稀疏象草)>P6(马尾松)>P5(马尾松+稀疏象草)。相较于实测土壤侵蚀量，TLS 监测的 P1、P2、P5 号小区存在低估，其余小区存在高估(图 5)。显然，不同地表覆盖条件对 TLS 监测土壤侵蚀的精度产生了影响。

## 3 讨论

### 3.1 TLS 监测方法的适用性

本研究 TLS 监测野外土壤侵蚀量误差(ARE, 9.4%~25.2%)与 Li 等<sup>[12]</sup>在模拟不同强度降水和坡度条件下监测土槽裸露砂砾壤土侵蚀的误差范围相近(7%~32%)。而肖海等<sup>[17]</sup>室内模拟降水条件下 TLS 监测裸露小区土壤侵蚀量 ARE 也达到 9.3%，说明 TLS 适用于野外条件下土壤侵蚀量监测。

表 4 实测与 TLS 监测土壤侵蚀量误差统计

Table 4 Comparison between measured and TLS-monitored soil erosion amounts

| 试验小区 | 土壤容重(kg/m <sup>3</sup> ) | 侵蚀体积(m <sup>3</sup> ) | TLS 监测土壤侵蚀量(kg) | 实测土壤侵蚀量(kg) | RE(%) | RMSE(kg) |
|------|--------------------------|-----------------------|-----------------|-------------|-------|----------|
| P1   | 1 213.90                 | 0.085                 | 102.90          | 126.84      | -18.9 | 20.00    |
| P2   | 1 263.93                 | 0.178                 | 225.57          | 248.84      | -9.4  |          |
| P3   | 1 219.54                 | 0.176                 | 214.44          | 185.63      | 15.5  |          |
| P4   | 1 235.45                 | 0.105                 | 130.15          | 115.55      | 12.6  |          |
| P5   | 1 229.81                 | 0.019                 | 22.75           | 30.41       | -25.2 |          |
| P6   | 1 215.51                 | 0.059                 | 71.30           | 57.80       | 23.4  |          |

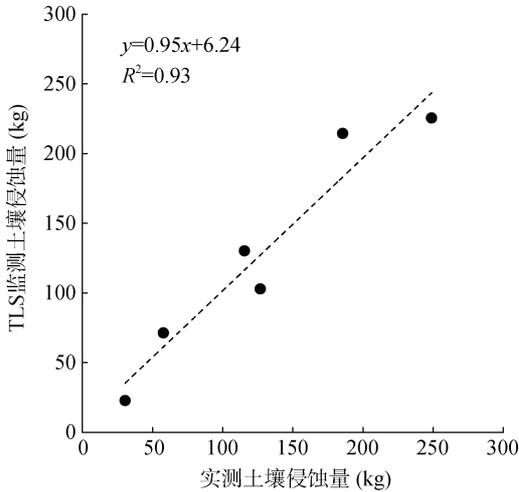


图 5 实测与 TLS 监测土壤侵蚀量相关性

Fig. 5 Correlation between measured and TLS-monitored soil erosion amounts

土壤表面高度变化越大, TLS 垂直方向上激光传播误差产生影响越小<sup>[32]</sup>, 侵蚀作用越强烈, TLS 监测精度越高<sup>[12]</sup>。本试验研究表明 TLS 监测误差与实测土壤侵蚀量存在显著负相关关系( $R^2=0.79, P<0.01$ ) (图 6A), 轻度侵蚀小区(P5、P6)的监测精度均低于中度、强烈侵蚀的小区(P1~P4), TLS 监测技术对中等

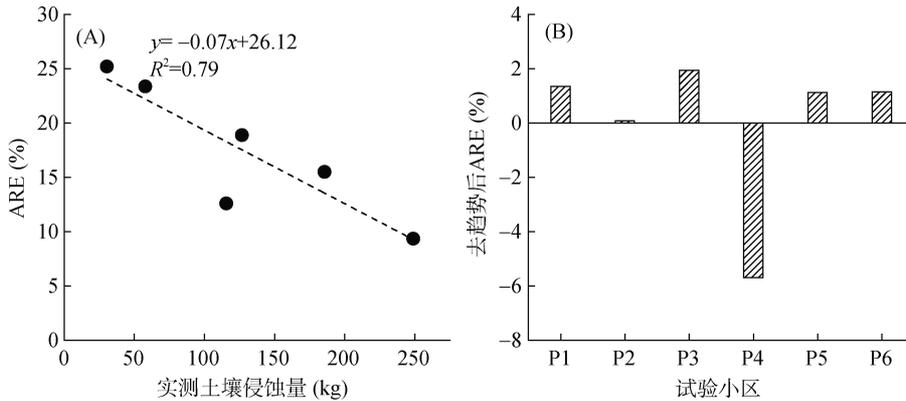


图 6 实测土壤侵蚀量与 TLS 监测 ARE 线性趋势(A)和去趋势后 ARE(B)

Fig. 6 Measured soil erosion amount and TLS-monitored ARE linear trend (A) and ARE after detrending (B)

总之, TLS 监测精度受到土壤侵蚀量<sup>[12]</sup>、地表覆盖条件及由此产生的点云滤波、插值方法等因素的综合影响。

### 3.3 地表覆盖条件对 TLS 监测 minLOD 影响

TLS 监测点云高程变化噪声主要来自点云质量、配准误差和地表粗糙度<sup>[16]</sup>。配准误差及地表粗糙度越大, minLOD 也越大。本研究平均 minLOD(8 mm)较 Li 等<sup>[12]</sup>(1 mm)的大, 原因在于后者的配准误差为室内单一理想条件下同一固定表面两期点云高差的标准差; 而本研究中 TLS 野外监测的配准误差

强度以上的水土流失区具有更好适用性。粤闽赣红壤区稀疏马尾松林等侵蚀劣地处于中度及以上侵蚀强度面积达 11%<sup>[33]</sup>, 可利用 TLS 在该地区进行小尺度侵蚀高精度长期定位监测。

### 3.2 地表覆盖条件对 TLS 监测精度影响

除土壤侵蚀强度的趋势化影响外(图 6A), 不同地表覆盖条件对 TLS 监测精度也产生影响(图 6B)。TLS 监测存在不同程度的高估或低估现象。P1、P5 小区存在低估的原因主要在于近地表象草覆盖, 滤波过程中未将其基部去除, 造成 2021 年点云高程被高估, 进而导致土壤侵蚀量的低估。P3、P4 小区监测存在高估, 主要因为雨水冲刷导致前后两期点云数据内石块的相对位置发生改变, 产生土体形变噪声, 误差较大。由于植被遮挡, IDW 插值方法造成 2021 年点云高程低估, 导致 P6 小区土壤侵蚀量被高估。相较于 P5、P6 小区, 近地表象草覆盖度高的 P1 小区受遮挡、点云滤波、插值的影响更大, 故误差较高, 表明近地表灌草比乔木更容易影响 TLS 监测精度。而降水冲刷导致砾石位移, 引起两期点云数据中砾石空间位置的不匹配是导致 P3、P4 小区监测误差最大的原因。

为 Cyclone 软件中 3 个黑白标靶点配准误差的最大值<sup>[16]</sup>, 且 P1~P6 多数小区地表分布植被和石块, 使得配准误差和地表粗糙度均较大。但本研究 6 个小区的 minLOD 范围(4~60 mm)与 Eltner 等<sup>[34]</sup>(20 mm)和 Lague 等<sup>[16]</sup>(6~60 mm)在野外农田及河岸侵蚀研究的计算范围相近, 表明相较于室内理想模拟条件, 野外地表条件下的 minLOD 均较大。

此外, TLS 野外监测过程中, 受地表条件及坡度等因素的影响, 难以控制地表粗糙度产生的噪声, 只能通过减小配准误差, 将 minLOD 降至最低。长时

间序列土壤侵蚀监测中,用于配准的标靶点位置不能轻易受环境影响<sup>[35]</sup>,配准误差在空间分布上需尽可能均匀分布<sup>[12, 16]</sup>。因此,如何在长时间序列土壤侵蚀监测过程中降低点云数据的配准误差,并确定其空间分布,提高野外复杂地表条件下 TLS 的 minLOD 的精确度,还需深入探究。

#### 4 结论

1) TLS 适用于不同地表覆盖条件下土壤侵蚀监测(RMSE=20.00 kg, ARE<25.2%),但在象草、裸露及马尾松+象草小区存在低估,在其余小区存在高估;地表条件对 TLS 监测造成的误差为 0.08%~5.69%。象草小区近地表覆盖度大于马尾松小区,受点云缺失造成插值误差的影响大,监测误差较大;而降雨冲刷引起砾石位移,造成两期点云数据中砾石空间位置不匹配,导致砾石小区误差最大。

2)土壤侵蚀量是影响 TLS 监测精度的主要因素,两者呈极显著的正相关关系( $R^2=0.79$ ,  $P<0.01$ ); TLS 在土壤侵蚀累积达到中等强度及以上(>2 500 t/(km<sup>2</sup>·a))的水土流失区具有更好适用性,其监测精度均高于 80%。因此, TLS 更适用于中等侵蚀强度以上或长时间序列发生明显侵蚀的裸露及稀疏林地的土壤侵蚀监测。

#### 参考文献:

- [1] 韩光中,王德彩,谢贤健. 土壤退化时间序列的构建及其在我国土壤退化研究中的意义[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1015-1020.
- [2] 梁音,田刚,潘贤章,等. 不同监测方法对土壤侵蚀监测结果的影响——以江西省潯水河流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 18-23.
- [3] 隋志龙,杨浩,杨九东,等. 宁镇地区 <sup>137</sup>Cs 与 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 坡面分布特征的地统计学分析[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 673-682.
- [4] 唐强,鲍玉海,贺秀斌,等. 土壤侵蚀监测新方法和新技术[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 11-18.
- [5] 姜艳敏. 土壤侵蚀下垫面形态演化数字近景摄影观测系统研究[D]. 杨凌: 中国科学院大学, 2020.
- [6] Ouédraogo M M, Degré A, Debouche C, et al. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds[J]. Geomorphology, 2014, 214: 339-355.
- [7] Bremer M, Sass O. Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event[J]. Geomorphology, 2012, 138(1): 49-60.
- [8] Perroy R L, Bookhagen B, Asner G P, et al. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California[J]. Geomorphology, 2010, 118(3/4): 288-300.
- [9] Telling J, Lyda A, Hartzell P, et al. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 169: 35-68.
- [10] Eitel J U H, Williams C J, Vierling L A, et al. Suitability of terrestrial laser scanning for studying surface roughness effects on concentrated flow erosion processes in rangelands[J]. CATENA, 2011, 87(3): 398-407.
- [11] Goodwin N R, Armston J, Stiller I, et al. Assessing the repeatability of terrestrial laser scanning for monitoring gully topography: A case study from Aratula, Queensland, Australia[J]. Geomorphology, 2016, 262: 24-36.
- [12] 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.
- [13] Wheaton J M, Brasington J, Darby S E, et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(2): 136-156.
- [14] Vericat D, Smith M W, Brasington J. Patterns of topographic change in sub-humid badlands determined by high resolution multi-temporal topographic surveys[J]. Catena, 2014, 120: 164-176.
- [15] Brasington J, Langham J, Rumsby B. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport[J]. Geomorphology, 2003, 53(3/4): 299-316.
- [16] Lague D, Brodeur 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.
- [17] 肖海,夏振尧,朱晓军,等. 三维激光扫描仪在坡面土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 198-200.
- [18] Eltner A, Baumgart P. Accuracy constraints of terrestrial Lidar data for soil erosion measurement: Application to a Mediterranean field plot[J]. Geomorphology, 2015, 245: 243-254.
- [19] Rengers F K, Tucker G E, Moody J A, et al. Illuminating wildfire erosion and deposition patterns with repeat terrestrial lidar[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121(3): 588-608.
- [20] Zhang W T, Yu D S, Shi X Z, et al. Variation of sediment concentration and its drivers under different soil management systems[J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 578-585.
- [21] 张黎明,于东升,史学正,等. 不同降雨类型下的南方典型土壤侵蚀量差异研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 1-6.

- [22] 陈洋, 张海东, 于东升, 等. 南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 150–157.
- [23] 张思琪, 马芊红, 朱彤, 等. 基于三维激光扫描技术的喀斯特地表微地形特征及其侵蚀响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 8–14.
- [24] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1060–1066.
- [25] 张小红, 刘经南. 机载激光扫描测高数据滤波[J]. 测绘科学, 2004, 29(6): 50–53, 4.
- [26] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705–711.
- [27] [27] Xu C, Yang Z J, Qian W, et al. Runoff and soil erosion responses to rainfall and vegetation cover under various afforestation management regimes in subtropical montane forest[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(14): 1711–1724.
- [28] 张海东, 于东升, 董林林, 等. 侵蚀红壤恢复区植被垂直结构对土壤恢复特征的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1142–1148.
- [29] Price K, Jackson C R, Parker A J. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 383(3/4): 256–268.
- [30] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [31] 霍云云, 吴淑芳, 冯浩, 等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 32–37, 46.
- [32] Hartzell P J, Gadowski P J, Glennie C L, et al. Rigorous error propagation for terrestrial laser scanning with application to snow volume uncertainty[J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(230): 1147–1158.
- [33] 中华人民共和国水利部. 2019 年中国水土保持公报 [N]. 2020-09-24. [http://mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202009/t20200924\\_1448752.html](http://mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202009/t20200924_1448752.html).
- [34] Eltner A, Maas H G, Faust D. Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes[J]. *Geoderma*, 2018, 313: 217–232.
- [35] 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.