三维激光扫描仪在坡面土壤侵蚀研究中的应用

肖 海[1]，夏振尧[2]，朱晓军[3]，杨悦舒[1]，李 瑶[1]

(1. 三峡大学 土木与建筑学院，湖北 宜昌 443002；2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心，湖北 宜昌 443002；3. 三峡大学 水利与环境学院，湖北 宜昌 443002)

摘 要：采用人工模拟降雨，在 20°的坡面土槽上进行了 3 场降雨强度为 60，90 和 105 mm/h 的降雨。通过使用三维激光扫描仪对每场降雨前后的坡面形态进行扫描，定量分析坡面土壤侵蚀量。结果表明，径流量及侵蚀量随着降雨强度的增加而增加，而且降雨强度增加对侵蚀量的影响大于对径流量的影响。使用三维激光扫描仪在降雨前后对坡面进行扫描，所得计算侵蚀量误差较小。3 次计算误差分别为0.872%，9.349%和 4.495%，计算误差均在 10%以内。使用该仪器同时能够很直观地观察坡面侵蚀部位及破碎情况。使用三维激光扫描仪能够快速、精确地计算出坡面侵蚀体积及侵蚀量，同时能够很直观地观测到侵蚀的空间分布。

关键词：土壤侵蚀；三维激光扫描仪；坡面

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2014)03-0198-03 **中图分类号**：S157

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.039

Application of Three-dimensional Laser Scanner on Research of Slope Soil Erosion

XIAO Hai[1], XIA Zhen-yao[2], ZHU Xiao-jun[3], YANG Yue-shu[1], LI Yao[1]

(1. *College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 2. *Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in the Three Gorges Area, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 3. *College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*)

Abstract: At three artificial rainfall intensities of 60, 90 and 105 mm/h, soil erosion on a slope of 20° was investigated using a three-dimensional laser scanner before and after rainfall. Results show that the amounts of runoff and erosion increased with the increasement of rainfall intensity, while the influence of increasing rainfall intensity on soil erosion is much larger than that on runoff. The calculated errors for the data of the three rainfall intensities using the three-dimensional laser scanner before and after rainfall were 0.872%, 9.349% and 4.495%, respectively, being less than 10%. At the same time, the eroded position and fragmentation could be observed intuitively. Using the three-dimensional laser scanner is able to calculate the volume and amount of soil erosion in a quick and accurate way, and observe the spatial distribution of soil erosion visually.

Keywords: soil erosion; three-dimensional laser scanner; slope

土壤侵蚀是危及人类生存与发展的主要环境问题之一，因此，土壤侵蚀研究在世界各国受到普遍重视[1]。常规土壤侵蚀监测方法主要包括调查法、径流小区法、侵蚀针法、水文法、模型估算法和遥感解译法等。上述方法具有野外工作量大、效率低、周期长等缺点[2]。近年来核素示踪应用较为广泛，并在定量研究土壤侵蚀方面取得了大量成果[3-4]。但对于野外大面积次降雨侵蚀，如何快速获取土壤侵蚀信息，对土壤侵蚀进行检测，评估次降雨的危害，为水土保持规划做出指导，这些方法尚不成熟。三维激光扫描技术以激光应用为基础，能够快速获取所扫描区域坐标点，并使用软件进行三维建模。本文通过人工降雨试验，使用三维激光扫描仪在降雨前后对坡面进行扫描，分析其计算过程及计算精度，为该技术应用于野外大面积土壤侵蚀研究提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计及研究方法

将长 3 m，宽 0.5 m，高 0.5 m 钢质土槽架设于所砌的造坡墙上形成 20°坡度，土槽下端设集流装置用以收集径流泥沙样品。试验用土取自湖北省宜都市丘陵区坡耕地表层红壤，其黏粒含量 16.8%，粉粒

收稿日期：2013-06-27 修回日期：2013-07-18

资助项目：国家自然科学基金项目“三峡库区紫色土的植物根系加固效应与机制研究”(41202250)

作者简介：肖海(1988—)，男(汉族)，湖南省郴州市人，硕士研究生，研究方向为水土流失机理。E-mail：xiaohai19881104@sohu.com。

通信作者：夏振尧(1981—)，男(汉族)，湖北省武汉市人，副教授，博士，主要从事边坡生态防护研究。E-mail：xzy_yc@126.com。

含量 74.6%,沙粒含量 8.6%,有机质含量 1.5%。土壤容重为 1.25 g/cm³。填土前先在土槽底下装填 25 cm 厚的天然细沙,以保证良好的透水性,然后以 5,5,5,4,1 cm 分层装填 20 cm 厚的土壤,通过称重控制容重在 1.25 g/cm³。

人工降雨试验在三峡大学人工模拟降雨试验场开展。降雨设施采用南京南林电子科技生产的 NLJY-10-01 型便携式人工模拟降雨系统,降雨高度 4 m,由 9 组大中小喷头均匀喷出雨滴,降雨均匀度大于 0.86,降雨强度为 60,90,105 mm/h。利用均匀分布于坡面中的雨量筒,通过多次测定平均降雨强度对降雨强度率定。每次试验铺设好土槽后,对其进行雾化降雨,使坡面接近产流,并静置 15 h 左右。静置完成后,每次降雨开始前,先将坡面表层湿润,直至接近产生地表径流。然后,使用 Leica Stanstation C10 脉冲式三维扫描仪对坡面进行扫描得到降雨前的坡面数据,之后将降雨强度调至设定值,在降雨开始产流后,开始计时,以 3 min 为时间间隔接取全部泥沙样品以待测试。同时照相并对试验过程进行记录。降雨 30 min 结束后,关闭降雨器,并再次使三维扫描仪对坡面进行扫描得到降雨侵蚀后的坡面数据。最后在坡面上取环刀样以测得降雨后的土壤容重。泥沙样品接收后静置至泥沙沉淀,倒掉上部清液,并将下部泥沙烘干称重保存于自封袋中。

1.2　三维激光扫描及测量原理

地面三维激光扫描仪由激光发射器、接收器、时间计数器、马达控制可旋转的滤光镜、彩色 CCD 相机、微电脑、控制电路及其他附件组成。

三维激光扫描工作原理是激光发射器发射窄波脉冲,发射到目标物体表面后反射回探测器。发射脉冲与接收回波脉冲之间的时间间隔 t 由数字转换器(TDC)测量并被用来计算目标物体表面与发射器的距离。此距离为:

$$D=ct/2 \tag{1}$$

式中:D——距离(m);c——光速(m/s)。

除距离外,三维激光扫描仪还测得并记录了水平方向角度和竖直方向角度及扫描点的反射强度等原始观测数据。根据前两种数据计算扫描点的三维坐标,反射强度则用来给反射点匹配颜色。点 P 的坐标由公式(2)计算获得:

$$\begin{cases} X=s\times\cos\beta\times\cos\alpha \\ Y=s\times\cos\beta\times\sin\alpha \\ Z=s\times\sin\beta \end{cases} \tag{2}$$

式中:β,α——纵向和横向扫描角度观测值;X,Y,Z——扫描点的坐标;s——原点到扫描点的直线长度。

三维激光扫描仪可以将各种大型建筑物的表面快速直接地变换成离散的点云数据,从而用于快速地目标实体的三维可视化重构,因而在测绘、计量、仿真等方面得到广泛应用。

2　结果与分析

2.1　不同降雨强度下的总径流量及侵蚀量分析

3 次模拟降雨试验所产生的径流量及侵蚀量见表 1,结果表明,径流量及侵蚀量随着降雨强度的增大而增加,这是因为降雨强度增加,坡面承雨量增加,从而使得净流量增加,同时随着降雨强度增大,雨滴能量增大,引起侵蚀量增加,而且降雨强度增加对侵蚀量的影响大于径流量,这与其他学者研究一致[5]。

表 1　不同降雨强度下的径流量及侵蚀量对比

降雨强度/(mm·h⁻¹)	径流量/kg	侵蚀量/kg	径流量增量/kg	侵蚀量增量/kg
60	19.887	18.948	—	—
90	31.650	25.482	11.763	6.533
105	43.516	38.685	11.866	13.203

2.2　扫描处理过程分析

扫描完成后,将次降雨侵蚀前的扫描数据导入 Cyclone 软件中进行数据除噪并进行剪切等初始处理去掉无效点后留下土层及槽上边沿数据。然后将整个坡面数据转化为同一个坐标系并生成 Tin 网格。然后以土槽上边缘的某一点作为原点,并通过计算确定垂直于坡面 20°的法向量来确定通过原点且平行于侵蚀前坡面的公共面,将土层表面以 0.05 m 为采样间隔投影至公共面,最后使用 Cyclone 软件的测量功能测得坡面至公共面的体积。以同样的方法将侵蚀后的坡面投影至同一公共面上,并计算出侵蚀后坡面至同一公共面的体积。三维扫描数据处理流程如图 1 所示。

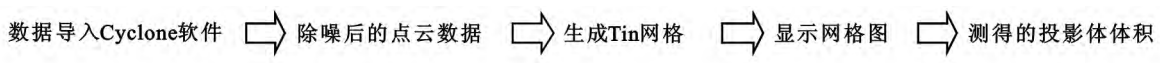


图 1　三维扫描数据处理流程

2.3　扫描结果分析

通过扫描分析,得到各次侵蚀情况如图 2 所示。由于每次降雨侵蚀前后坡面拉伸到同一面的体积,则侵蚀体积等于侵蚀前体积减去侵蚀后体积;计算侵蚀量由侵蚀体积与干密度相乘并换算单位得到;误差为计算侵蚀量与实际侵蚀量之差与实际侵蚀量之比的

百分比，具体方程如下：

$$V_c = V_f - V_l \tag{3}$$

$$E_c = V_c \times 1\,000 \times \rho_d \tag{4}$$

$$E_r = \frac{E_c - E_a}{E_a} \times 100\% \tag{5}$$

式中：V_c——计算侵蚀体积；V_f————侵蚀前体积；V_l————侵蚀后体积；E_c——计算侵蚀量；E_a——实际侵蚀量；ρ_d——坡面土壤干密度；E_r————计算误差。

使用环刀法在坡面取样，得到降雨后坡面土壤干密度为 $\rho_d = 1.353\ g/cm^3$，使用公式(3)—(5)计算各个参数，并汇总于表 2。从表 2 中可以看出，计算侵蚀量与实际侵蚀量相差不大，3 次降雨计算误差分别为 0.872%，9.349%和 4.495%，计算误差均在 10%以内。表明了使用三维激光扫描仪对坡面进行扫描能够精确的计算侵蚀量。同时，从图 2 中还可以直观的看出侵蚀发生部位，其中 60 mm/降雨强度下侵蚀主要发生在下坡面，中上坡面侵蚀不明显，而 90 mm/h 降雨强度下侵蚀主要发生在中下坡面，侵蚀范围与 60 mm/h 降雨强度下有所增大；105 mm/降雨强度下坡面除了坡顶外均能够观察到明显侵蚀，坡面破碎程度明显大于前两次较小降雨强度，说明随着降雨强度的增加，不仅是侵蚀量大幅度增加，而且能够加快细沟的发育，增加坡面破碎程度。

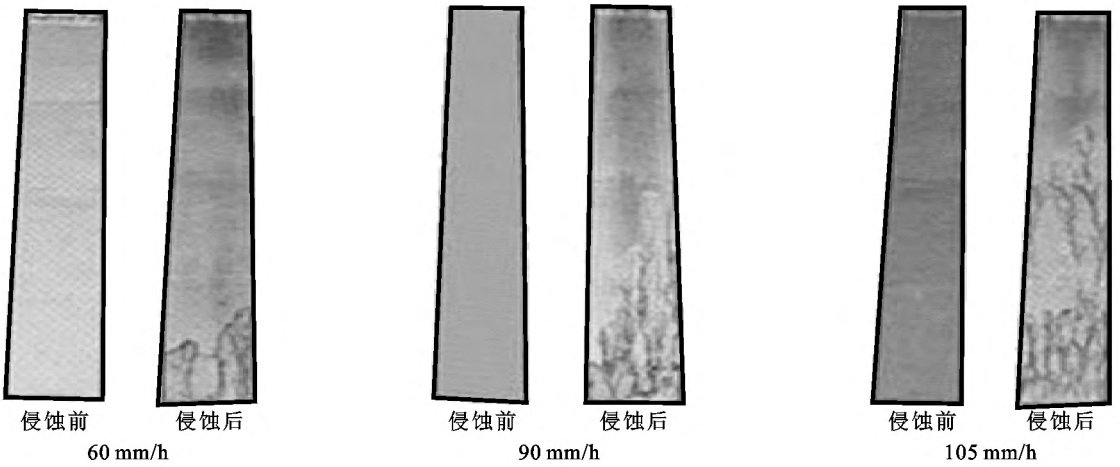


图 2 各次降雨前后坡面的扫描效果

表 2 计算侵蚀量与实际侵蚀量对比分析

降雨强度 P/(mm·h^{-1})	体积/m^3		计算侵蚀体积 V_c/m^3	计算侵蚀量 E_c/kg	实际侵蚀量 E_a/kg	计算误差 E_r/%
	侵蚀前 V_f	侵蚀后 V_l				
60	0.099	0.113	0.014	19.113	18.948	0.872
90	0.077	0.097	0.021	27.864	25.482	9.349
105	0.087	0.117	0.030	40.424	38.685	4.495

3 结论

(1) 径流量及侵蚀量随着降雨强度的增大而增加，而且降雨强度增加对侵蚀量的影响大于对径流量的影响。

(2) 使用三维激光扫描仪在降雨前后对坡面进行扫描，所得计算侵蚀量误差较小，3 次计算误差分别为 0.872%，9.349%和 4.495%，计算误差均在 10%以内。

(3) 随着降雨强度的增加，不仅是侵蚀量大幅度增加，而且能够加快细沟的发育，增加坡面破碎程度。

(4) 使用三维激光扫描仪能够快速、精确的计算出坡面侵蚀体积及侵蚀量，同时能够很直观的观测到侵蚀的空间分布，因此，该方法在技术层面上可以应用于野外土壤侵蚀研究。

[参 考 文 献]

[1] 王红兵，许炯心，颜明. 影响土壤侵蚀的社会经济因素研究进展[J]. 地理科学进展，2011，30(3)：268-274.

[2] 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.

[3] 汤振权，刘刚，许文年. 稀土元素示踪技术及其在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 中国稀土学报，2011，29(5)：515-522.

[4] 石辉，刘普灵，田均良. 核示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持通报，1997，17(3)：44-49.

[5] 和继军，蔡强国，刘松波. 次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J]. 应用生态学报，2012，23(5)：1263-1268.