

# 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

张鹏<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 王彬<sup>1,2</sup>, 陈吉强<sup>1,2</sup>, 丁晓斌<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部

水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 采用连续模拟降雨试验, 对坡沟系统概化模型进行坡面沟蚀发育过程模拟, 再现坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变过程。结合 3 种测量技术从测量精度、测量人员要求、数据处理、数据通用性、配套软件使用、前期投入、测量条件等几个方面入手, 对比分析高精度 GPS (Trimble 5700)、三维激光扫描仪 (Leica HDS 3000) 和测针板的 3 种测量方法的优缺点, 同时对 3 种测量方法在沟蚀过程监测和侵蚀量估算方面进行对比研究。结果表明, 激光扫描仪能很好地监测沟蚀演变过程, 且对侵蚀量估算精度较高, 误差仅为 4.5%。高精度 GPS 也能很好地监测沟蚀演变过程, 对侵蚀量估算精度误差为 7.38%。测针板法不能很好的反映沟蚀演变过程, 但是对于侵蚀量的估算可以满足日常要求, 误差为 -12.78%。

**关键词:** GPS (Trimble 5700); Leica HDS 3000 激光扫描仪; 测针板; 测量方法

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)05—0011—05

中图分类号: S157, P204

## Comparative Study of Monitoring Gully Erosion Morphology Change Process by Using High Precision GPS, Leica HDS 3000 Laser Scanner and Needle Board Method

ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, ZHENG Fen-li<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>1,2</sup>, CHEN Ji-qiang<sup>1,2</sup>, DING Xiao-bin<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment Sciences, Northwest A & F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The development process of slope-gully erosion was simulated to understand the generalized model of slope-gully system in Ansai comprehensive experimental station by using the method of continuous simulated rainfall. The erosion processes from sheet erosion, rill erosion, and to gully erosion were represented as well. Advantages and disadvantages of the three measuring technologies of GPS, Leica HDS 3000 laser scanner, and measuring needle plate method were contrasted from the aspects of measuring accuracy, requirements of survey crew, data processing, data generality, software application, previous investment, and measurement conditions.

**Keywords:** GPS (Trimble 5700); Leica HDS 3000 laser scanner; measuring needle plate; measurement method

坡面侵蚀方式演变过程和土壤侵蚀监测研究对加深坡面土壤侵蚀过程机理, 估算土壤侵蚀量具有重要意义。近年来 GPS 和三维激光扫描等高新技术的发展为土壤侵蚀监测研究的快速发展带来了新的曙光, 使土壤侵蚀监测手段由侵蚀沟体积量测等传统测量方法迈入侵蚀沟体积的精确测量。目前对沟蚀发育过程动态监测的研究刚刚起步, 应用的监测手段包

括测尺法、测针板法<sup>[1-3]</sup>、GPS 测量法<sup>[4-5]</sup>和三维激光扫描<sup>[6]</sup>等。但由于研究基础薄弱, 研究资料较少, 至今尚未有不同测量方法监测沟蚀过程优缺点的对比研究, 也没有统一的测量规范, 严重影响土壤侵蚀测量技术的发展和沟蚀量的精确估算。

本研究在人工建造的坡沟系统模型上进行连续的模拟降雨试验, 再现片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀

收稿日期: 2008-03-05

修回日期: 2008-07-15

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB407201); 国家自然科学基金重点项目 (40335050); 黄河水利委员会治黄专项 [黄水保 (2006) 51]

作者简介: 张鹏 (1980—), 男 (汉族), 山东省诸城市人, 硕士研究生, 主要从事高新技术在沟蚀动态监测应用研究。E-mail: chian\_zhangpeng@163.com。

通信作者: 郑粉莉 (1960—), 女 (汉族), 陕西省蓝田县人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报和侵蚀环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn。

育过程,并利用三维激光扫描仪(Leica HDS 3000)、高精度 GPS(Trimble-5700)和测针板对每次模拟降雨形成的地面侵蚀形态进行测量,应用 ArcGIS 9.0 对 3 种测量数据进行后期处理,对比 3 种测量方法监测沟蚀发育过程的优缺点,以期为土壤侵蚀监测提供技术支持。

## 1 试验设计与研究方法

### 1.1 坡沟系统试验模型

坡沟系统试验模型建在安塞水土保持综合试验站。该试验模型根据黄土丘陵沟壑区纸坊沟流域数字高程模型(DEM)提取的坡沟空间分异特征和野外调查量化的典型坡沟系统的参数特征<sup>[7]</sup>进行制作(图 1)。试验模型高 6.01 m,宽 3 m,长度 13 m,投影面积 39.7 m<sup>2</sup>,试验模型矩心实测位置为 36°51'27"N, 109°19'20"E,高程 1 040.151 m。根据黄土丘陵区坡面坡度分级,将该试验模型从坡上到坡下分成 5 个坡度段,坡度值分别为 5°、10°、15°、20°、35°<sup>[8]</sup>。

坡沟系统概化模型由位于坡面上部的梁坡坡面系统和位于坡面下部的沟坡系统组成。在试验模型沟坡系统下端设置一个三角集流口,用于动态监测次降雨过程中坡沟系统的产流和产沙过程。梁坡水平投影为 7 m,对应于 5°、10°、15°、20° 这 4 个坡段的水平投影分别为 1、2、2、2 m;沟坡水平投影 5 m,对应坡度为 35°。坡沟系统参数特征如图 1 所示,梁坡坡面和沟坡坡面面积比例大致控制在 1.4 : 1.0,基本能代表黄土高原地区的坡面和坡沟部分的实际比例关系。

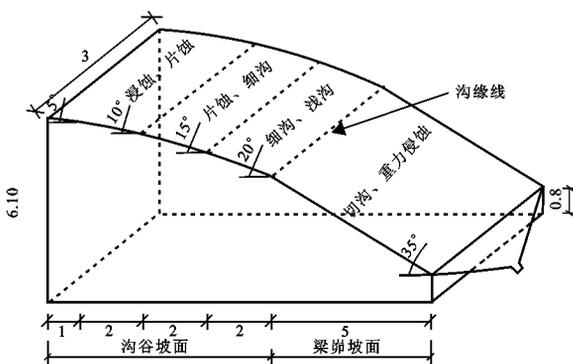


图 1 坡沟系统概化模型示意图

试验过程中为保证土壤水充分下渗,在试验土槽底部装填 15 cm 的沙子和透水性强的炉渣等材料,并用力压实;在其上方装填安塞耕层土壤(黄绵土),装填时保持土的自然结构状态。为了确保每次降雨试验时下垫面的均匀性,试验填土时土壤容重控制在 1.29 g/cm<sup>3</sup>,按每层 10 cm 分层装土,装土深度从试验土槽底部的 35 cm 逐渐增至顶端的 85 cm。

### 1.2 模拟降雨试验

为了完整模拟坡面切沟侵蚀发育过程,根据降雨强度变化,对于每个试验处理连续降雨试验 5~7 次,使坡面从片蚀演变到细沟侵蚀,最后演变到稳定阶段的切沟侵蚀。确定坡面切沟侵蚀发育处于稳定阶段,是以试验土槽沿坡长方向大部分切沟沟槽下切至试验土槽底部沙层时为准。

降雨机采用侧喷式模拟降雨系统,3 组侧喷式降雨设备(6 个喷头对喷),喷头距地面 7.5 m,设计降雨强度 50 mm/h。试验前一天,用 30 mm/h 降雨强度进行前期降雨,直至坡面出现产流为止,前期降雨的目的是保证每次试验下垫面地表状况均一。为确保降雨均匀度和降雨强度达到试验要求,每次试验前后均对降雨强度进行 2 次率定,2 次率定误差不超过 5%。降雨过程中当坡面产流后,每隔 3 min 取径流泥沙样一个,并用秒表测定径流泥沙采集时间。在降雨过程中用测尺法记录试验土槽沟蚀发育情况,并用数码相机拍照记录沟蚀演变过程。本次试验连续模拟降雨试验 5 场次,即后一次降雨试验是在前一次降雨试验形成地面侵蚀形态的基础上进行。

降雨结束后,量取每个径流样的体积,并用烘干法测定泥沙量,计算每次降雨的侵蚀产沙量,以此作为标准,评价 3 种测量方法估算侵蚀量的精度。

### 1.3 测量方法

进行降雨试验前,首先利用三维激光扫描仪(Leica HDS 3000)、高精度 GPS(Trimble 5700)测针板对初始坡面进行测量,获取降雨前最基本的坡面形态。每次模拟降雨结束后,再利用 3 种测量技术对坡面侵蚀形态进行测量。

**1.3.1 三维激光扫描仪测量** 每次降雨试验结束后的第二天进行三维激光扫描仪测量。测量前在试验模型周边固定 5 个靶点,作为后期数据拼接参考点。由于试验模型的坡度变化较大,加上降雨过程中侵蚀沟发育的深浅不一且很不规则,使激光扫描仪测量精度受到影响。因此,为了更加有效地获取坡面侵蚀形态数据,将测量区域划分为 5 个区段进行测量,各个测量区段之间的数据靠靶点进行拼接。每次测量获取约 230 万个数据,测量时间为 3.5 h,测量数据处理运用仪器配套软件(Cyclone)。

**1.3.2 GPS 测量** 为了不破坏坡面侵蚀形态,在每次降雨试验结束后的第二天进行高精度 GPS 测量。测量前在试验模型 4 个边角上固定 4 个参考坐标点,作为后期数据分析的参考点。测量方法利用 RTK(real time kinematic)实时动态测量。测量时为了更好地进行后期数据处理,对试验模型的 4 边进行了加

测,减少边界效应的影响,利用 TGO(trimble gomatics office)软件对测量数据进行初步数据处理;同时为了充分反映坡面沟蚀形态的空间分布,测量时对沟壁沟槽部位进行了加密测量。每次测量获取约 2 000 个数据,测量时间为 3.5 h。

1.3.3 测针板测量 地形测针板主要由刻度面板和竹签测针组成(条件允许可以使用塑料测针),刻度面板使用一薄铁皮上面粘贴坐标刻度纸制成。本次试验所用的测针板规格为长 100 cm,宽 60 cm,每隔 5 cm 安装一个测针,共 11 个测针,测针板两边第一个测针距测边为 2.5 cm。

为了保证测量时测针板水平,在测针板上安装一个水平仪。测量时一改传统的纸质记录方式,而采用数码相机拍照记录的方式,这样极大地缩短了记录时间,加快了测量速度使得测量效率得到明显的提高。拍照时注意拍摄角度要与测针板垂直,否则会出现记录误差。坡面形态的高低起伏通过测针在坐标纸上面的刻度得以显示,显示的具体数值又通过数码相机进行照相记录。在 3 m 宽的土槽上根据测量板宽度每行只需变换位置 6 次便可以完成。每次测量获取 1 640 数据,测量时间为 3 h。

#### 1.4 数据处理与次降雨侵蚀量估算

1.4.1 三维激光扫描仪 首先,在 Cyclone 软件中依据标靶点对 5 次测量数据进行拼接;其次,在可视化界面里面对整体数据进行操作,去除四周无用数据点,提取坡面点数据;再次,对数据点集进行分析,剔除明显的的数据误差点;最后,运用 ArcGIS 9.0 软件对试验模型测量数据进行分析。

1.4.2 GPS 测量 GPS 的测量数据处理按照下面步骤进行。(1) 剔除误操作点;(2) 坐标转换;(3) 降噪处理;(4) 统一测量区划定;(5) 数据转换;(6) ArcGIS 9.0 数据分析。同时,针对漏测校正坐标点的情况,在这里利用了 AutoCAD 与 TGO 软件相结合对测量数据进行矫正分析。

1.4.3 测针板测量 在室内对相片数据进行整理,整理时运用两台电脑一台显示数据图片,另一台进行数据录入。录入时依据拍照时间从下向上按顺序逐行进行;数据录入后检查错误,同时针对异常数据点要对照测量实拍相片进行确认;数据经过初步分析之后导入软件 ArcGIS 9.0 进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 三种测量方法监测沟蚀过程的对比

在试验过程中分别利用 3 种不同的测量方法对同一模拟降雨坡面进行实际测量,图 2a 到图 4a 是降雨

的不同时期,利用激光扫描仪、GPS 和测针板 3 种测量仪器进行实际测量并利用测量数据生成的 DEM。

激光扫描仪对坡面具有较高的模拟效果,能清晰地分辨出降雨坡面上细沟的侵蚀情况,对坡面出现的细小侵蚀穴表达明显,通过图 2a 可以发现坡面上部在雨滴的溅蚀之后,由于坡面土壤径流抗侵蚀力的差异和水流的影响而出现了细沟侵蚀,激光扫描仪对沟蚀的细节描述非常突出,对比实拍相片(图 2b)与生成图像(图 2a) 1 号位置的细沟沟头在生成图像中纹理显示清晰,2 号位置作为坡面和沟道的分界线在它的下部模拟了黄土高原坡面切沟、重力侵蚀为主的坡面侵蚀形态,生成图像上的暗线勾绘情况对应了实拍相片中沟道的曲折变化,同时颜色的渐变对应了沟道的深浅,而且位置与深度都能够得到很好的印证,充分说明利用激光扫描技术对坡面形态进行模拟具有较高的模拟精度,也验证了运用激光扫描仪进行坡面动态变化测量的可行性。

高精度 GPS 对沟蚀的模拟情况要稍差于激光扫描技术。从图 3a 可以看出,由于坡面部分侵蚀沟已经切入试验土槽底部的沙层,坡面侵蚀沟发育开始进入相对稳定阶段;生成图像中的暗线纵横交错,坡面重点侵蚀部位的颜色深度明显加深,支离破碎的沟网在生成图像上得到很好的展示。对应实拍相片与生成图像发现,由于受到流水切割的影响,坡面出现了多条侵蚀沟,如图 3b 中的 5~6 m 处出现的 5 条侵蚀沟与生成图像 3a 中的 5~6 m 处出现的曲折暗线一一对应,图 3b 中 4 m 处的 2 号位置出现的侵蚀坑在生成图像 3a 中 4 m 处的 2 号位置也得到明显反映。明暗部分差异的大小反映了侵蚀程度的加剧。如 1 号和 3 号位置(图 3a)颜色深度明显加深,说明坡面这些部位随着降雨过程的进行,土壤侵蚀强度明显加剧,因此,这些部位是坡面土壤侵蚀的严重部位,也是土壤侵蚀的重点治理部位。通过同实拍相片(图 3b)的对比,发现生成图像反映的坡面严重侵蚀部位与实拍相片完全吻合,进一步说明了高精度 GPS 在沟蚀动态监测中的适用性和可行性。

测针板法测量数据生成的 DEM 效果不是特别理想(图 4a),但是仍可以区分坡面侵蚀发生的重点部位和坡面侵蚀的强弱,侵蚀的形态也可以通过生成的 DEM 得到描述。对比实拍相片(图 4b)和测量数据生成图像(图 4a)可以看出发生侵蚀的部位与生成图像中的明暗纹理一一对应,在实拍相片(图 4b)的 3 m 处出现的侵蚀坑在生成图像(图 4a)中得到了明显表达,中间的主沟道在生成图像中有较直观地显示,在实拍相片中主沟的形态及演变情况通过 DEM 生成图像也可以辨认出来。

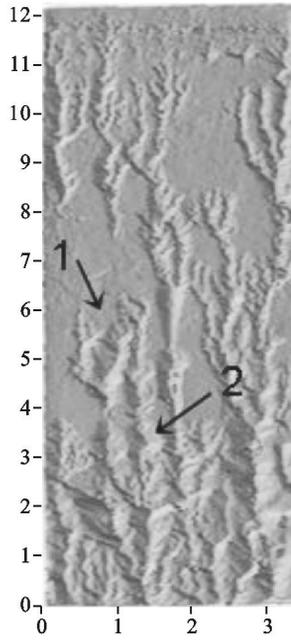


图 2a 三维激光扫描测量数据图像

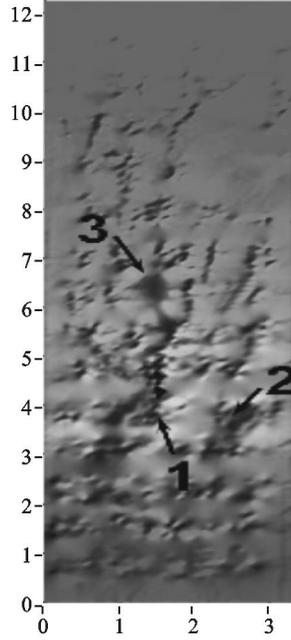


图 3a GPS 测量数据图像

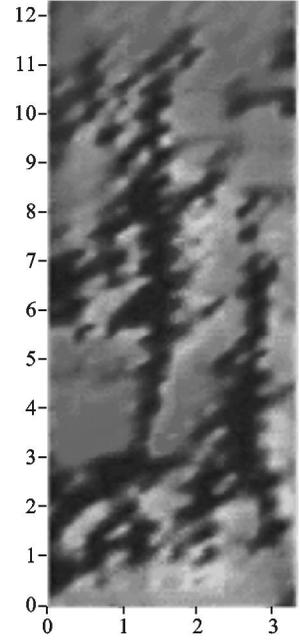


图 4a 测针板法测量数据图像

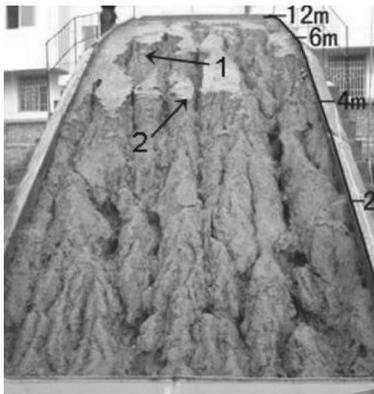


图 2b 三维激光扫描实拍相片

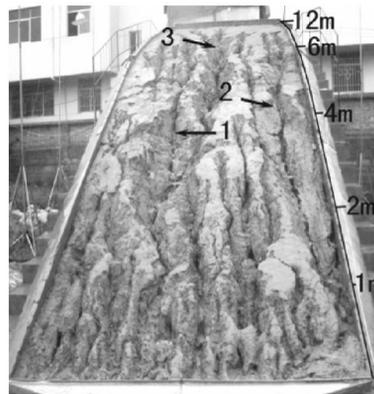


图 3b GPS 测量实拍相片

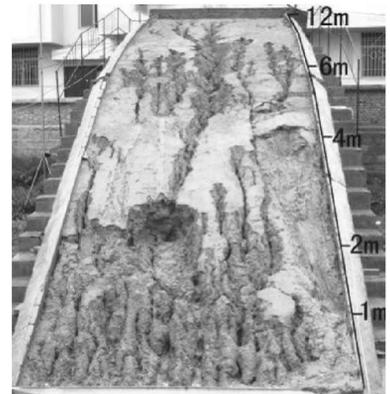


图 4b 测针板法实拍相片

### 2.2 三种测量方法的对比

2.2.1 次降雨侵蚀量估算 在 ArcGIS 9.0 平台支持下,使用相同的处理方法对每次降雨的测量数据生成的 DEM 进行 3D 分析,计算每次模拟降雨试验之后坡面模型的体积量,两次体积量的差值便是体积的变化,根据实测土壤容重  $1.29 \text{ g/cm}^3$  计算次降雨侵蚀量。

2.2.2 三种测量方法估算侵蚀量的对比 表 1 对比了 3 种测量方法估算模拟降雨坡面侵蚀量的精度,Leica HDS 3000 激光扫描仪的平均误差在 3 个测量方法中最小仅为 4.56%,在各次测量中最大误差达到 6.36%,而最小误差仅为 1.08%。

从表 1 中可以发现激光扫描技术估算次降雨坡面侵蚀量时估算误差并不是随着沟蚀发育程度的增加而减小,而是与三维激光扫描仪的扫描形式有关,激光扫描仪的扫描光束不能很好地到达坡面侵蚀沟的底部是产生上述情况的主要原因。建议在测量过

程中采用多站点、多角度测量的方法进行,从而避免扫描死角的出现,用补全测量数据点的方法提高测量数据的精度。

测针板计算误差最大,为 - 12.78%,但是仍然可以满足测量使用数据的要求。从表 1 中可以发现随着降雨场次的增加和坡面侵蚀强度的加剧,侵蚀量的估算值与实测值之间的误差逐渐减小并趋于稳定,而且测针板法测量侵蚀量比实际测量侵蚀量小。造成这种结果的主要原因是在进行坡面测量数据值到标准测量值的转换过程中,测量换算的方法是以当地测量点数据乘以当地坡面角度的三角函数<sup>[3]</sup>,这时如果两条测量线刚好处于坡度变换线的两侧,那么两条测量线跟坡度变换线所形成的三角体的体积就会被忽略掉,从而造成测针板法测量侵蚀量减少。为了避免上述情况的发生,建议在以后的测量过程中在坡度改变的位置增加一次数据测量。

高精度 GPS 的估算误差介于上述两种方法之间,其误差为 7.38%,侵蚀量的估算值与实测值之间的误差随着降雨场次的增加和坡面侵蚀强度的加剧而逐渐减小。

由于第一次降雨后坡面侵蚀以细沟侵蚀为主,侵蚀沟的尺寸较小,增加了 GPS 的测量难度,影响了

GPS 的测量精度,这时 GPS 测量数据估算的误差比较大,达到了 17.19%。此后随着降雨场次的增加,坡面侵蚀沟不断发育,侵蚀沟的尺寸明显增大,GPS 的测量误差也逐渐减小,GPS 估算值与实测值之间的最小误差仅为 0.81%,而且估算侵蚀量的误差随着测量点的增多而逐渐减小。

表 1 三种测量方法估算侵蚀量的对比

| 测量方法 | 各次降雨生成侵蚀量与实测侵蚀量误差 |        |        |        |        |        | %    |
|------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
|      |                   |        |        |        |        |        | 平均误差 |
| 激光扫描 | 6.67              | 1.08   | 4.10   | 6.36   | 4.59   | 4.56   |      |
| GPS  | 17.19             | 13.42  | 0.81   | 4.63   | 0.87   | 7.38   |      |
| 测针板法 | -18.07            | -12.61 | -10.77 | -11.06 | -11.41 | -12.78 |      |

2.2.3 三种测量方法测量条件的对比 Leica HDS 3000 不受环境的影响,但距离的远近和测量物体的表面反光性对于测量影响较大。GPS 的测量很容易受到卫星信号质量(卫星数量 4 颗)和周围信号干扰影响,而且雷雨等恶劣天气不适于观测的进行,况且每个测量地点都需要测量人员亲临现场,许多领域的高危险性限制了 GPS 的应用发展。测针板法适用于小区域的测量研究,但是野外复杂地形条件给测针板法的使用带来了许多意想不到的难度,限制了它的应用。

2.2.4 三种测量方法数据处理的对比 GPS 测量数据的修正需要在测量区域里面设定校正点,它决定了后期数据坐标的转换,小面积区域进行观测时可以利用 3 个校正点建立独立的小区坐标系统。Leica HDS 3000 的数据拼接也需要 3 个以上的固定标靶点,标靶点的作用类似于坐标校正点,经过校正后的数据集合到一起便是测量的最终数据。测针板的数据是实测数据,数据处理时要针对该测量点所在位置的坡长和坡度进行数据修订。

Trimble 5700 GPS 和 Leica HDS 3000 激光扫描仪分别运用了自身的配套软件 TGO 和 Cyclone。这些软件的一个共同特点就是支持多种数据格式的导入与输出,支持 GIS 数据的导出,可以直接运用于空间分析软件。为了更加便于地理信息系统的建立,通常把测量的数据输出成数据库格式如 \*.dbf。测针板同样也可以在数据的记录时保存为 \*.CSV 格式为以后的数据处理做好前期准备。

2.2.5 其它对比 对于测量人员要求上,Leica HDS 3000 和高精度 GPS 仅需要 1 名专业人员便可以完成测量操作,激光扫描仪本身集成大部分测量功能,但是只能在本身自带系统软件的操作下才可以完成测量操作;GPS 仪器操作复杂,牵扯到电台和天线

的连接与设置,因此也要求专业测量人员进行操作;测针板法的测量需要 1 人操作测针板,1 人拍照记录测量数据,至少需要 2 个人才能进行测量,但是操作简单容易掌握,对测量人员的要求最低。

在前期投入上,Leica HDS 3000 激光扫描仪、高精度 GPS 和测针板 3 种测量仪器都是前期一次性投入,Leica HDS 3000 的投入价格较高限制了它的普及运用,但是测量精度最高,常被运用于文物土建的非接触性测量;高精度 GPS 价格适中而且在地籍、公路、城建测量方面已经被广泛的应用;测针板价格低廉,操作简单,容易普及。

### 3 结论

#### 3.1 三种测量方法监测沟蚀过程的对比

在同一模拟降雨试验装置上,采用 3 种不同的测量方法进行沟蚀过程的监测,3 种测量方法生成的 DEM 都可以很好地描述沟蚀的演变过程,其中三维激光扫描数据生成的 DEM 对沟蚀演变的描述最好,可以具体到每条细沟的具体形态和细沟的深浅,甚至可以明显地观察到坡面土层因为受到雨滴溅蚀和坡面薄层水流的片蚀作用而生成的细小侵蚀坑洼点。高精度 GPS 生成的坡面侵蚀图像稍逊于三维激光扫描技术生成的坡面侵蚀图像,但是也能够清晰地表达每条细沟的大体形态和深度,对侵蚀沟的动态发育演变过程可以进行很好地描述。

采用测针板法生成图像的效果最差,仅能描述区分坡面侵蚀发生的重点部位和坡面各部位侵蚀的强弱,它们之间的描述依靠生成 DEM 图像的颜色过渡来区分,虽然也可以描述主沟的发育情况监测侵蚀沟的发展变化趋势,但是对于沟道的具体形态表达不是很理想。

(下转第 20 页)

(4) 将本文提出的判定式应用到浅沟侵蚀和切沟侵蚀分布提取中,结果与实地情况相符,浅沟和切沟分布结果显示,浅沟侵蚀主要发生在 15°~35° 的沟间地,分布面积占整个沟间地面积的 60%,切沟侵蚀主要发生在大于 35° 的沟坡地上,占整个沟坡地的 93%。

(5) 临界公式所需参数少且容易从地形图和卫片上获得,为该公式的推广应用提供了有利条件。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郑粉莉,高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000:96—119.
- [2] Patton P C, Schumm S A. Gully erosion, Northwestern Colorado: a threshold phenomenon [J]. *Geology*, 1975, 3: 83—90.
- [3] Begin Z B, Schumm S A. Instability of alluvial valley floors: a method for its assessment [J]. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 1979, 22: 347—350.
- [4] Vandaele K, Poesen J, Govers G, et al. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision [J]. *Geomorphology*, 1996, 16: 161—173.
- [5] 唐克丽,席道勤,郑世清,等. 杏子河流域的土壤侵蚀方式及其分布规律[J]. *水土保持通报*, 1984, 4(5): 10—19.
- [6] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(2): 309—319.

(上接第 15 页)

### 3.2 三种测量方法估算侵蚀量的对比

Leica HDS 3000 激光扫描仪的估算误差在 3 种测量里面最小,仅为 4.56%。每次降雨后的坡面侵蚀量估算值并没有成规律性变化。测针板法计算误差值在 3 种测量里面最大,达到了 -12.78%。而且,测针板法测量侵蚀量比实际测量侵蚀量小,但是仍然可以满足实验人员的观测要求。高精度 GPS 的估算误差介于两者之间,为 7.38%,侵蚀量的估算值与实际值之间的误差随着降雨场次的增加和坡面侵蚀强度的加剧而逐渐减小,并且估算侵蚀量的误差随着测量点的增多而逐渐减小。

总之,对于沟蚀过程监测,3 种测量方法三维激光扫描、高精度 GPS 和测针板都可运用于切沟形成的动态演变过程监测,而且得到了令人满意的结果。对于估算侵蚀量方面,3 种测量方法得到的结果也很理想。但是,在水土保持方面测量体系尚不完善,方法步骤也不健全,这极大地限制了测量工作的进行,在以后的研究工作中应完善水土保持测量的标准体系,统一测量标准。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. *水土保持通报*, 1989, 9(4): 41—45.
- [2] 吴普特,周佩华,武春龙,等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(2): 47—56.
- [3] 丁文峰,张平仓,李勉. 地形测针板在坡面土壤侵蚀研究中的应用[J]. *中国水土保持*, 2006(1): 46—51.
- [4] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探:以东北漫川漫岗黑土区为例[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 16—19.
- [5] 游智敏,伍永秋,刘宝元. 利用 GPS 进行切沟侵蚀监测研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 91—94.
- [6] 于泳,王一峰. 浅谈基于 GIS 的三维激光扫描仪在水土保持方案编制中应用的可行性[J]. *亚热带水土保持*, 2007, 19(2): 53—55.
- [7] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 中国黄土高原耕地坡度分级数据集[M]. 北京:海洋出版社,1990: 69—70.
- [8] 肖培青. 黄土丘陵区坡沟系统侵蚀产沙过程及动力学机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2007:15—18.