

# 基于立体摄影技术的细沟与细沟水流参数测量

覃超<sup>1</sup> 郑粉莉<sup>1,2</sup> 徐锡蒙<sup>1</sup> 何煦<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 细沟和细沟水流参数的准确测量可为深化坡面土壤侵蚀过程研究提供重要理论依据。基于立体摄影测量技术,以坡度为15°和20°的黄土坡面为研究对象,采用人工模拟径流冲刷的方法,对比不同时刻坡面的高精度数字高程模型DEM,提出了动床条件下坡面细沟宽度、深度以及细沟水流宽度、深度的测量和计算方法,分析了2个坡度处理下坡面细沟形态、细沟水流特征及其变化规律,探讨了立体摄影测量技术与其他测量技术在细沟形态及径流特征参数测量方面的异同。结果表明:经过比例尺的校正,可以在垂直拍摄的立体摄影照片上直接准确测量细沟宽度和细沟水流宽度;运用内插法,立体摄影测量技术能较准确地测量细沟深度和细沟水流深度的实时动态变化。随坡长的增加,细沟深度逐渐增大,而细沟水流深度则无明显变化趋势;细沟宽度随坡长的增加呈先增大后减小的变化趋势,而细沟水流宽度逐渐减小;20°坡度下细沟宽度和深度的增加速率分别是15°坡度下的1.7倍和1.3倍;同20°坡度相比,15°坡度条件下的细沟水流的宽度增加了1.7%~13.1%,而2个试验坡度下的细沟水流深度无明显差异。

**关键词:** 摄影测量; 细沟形态; 细沟水流; 动床冲刷试验; 坡面流深度

**中图分类号:** S157      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0150-07

## Measurement and Characteristics of Rill Geometry and Flow Parameter Based on Photogrammetry

Qin Chao<sup>1</sup> Zheng Fenli<sup>1,2</sup> Xu Ximeng<sup>1</sup> He Xu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loessial Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Accurate measurements of rill geometry and flow parameters provide theoretical basis for erosion processes on hillslopes. Rill width and depth are basic rill morphological characteristics. Rill flow width and depth are the foundation for calculating hydraulic and hydrodynamic parameters. A soil box (2.0 m long, 0.3 m wide and 0.5 m deep) was subjected to a 140 s movable-bed scouring test under a surface inflow rate of 1 L/min with slope gradients of 15° and 20°. Based on photogrammetry, point cloud and high-precision DEMs of the soil bed at different times were extracted. Measurements of rill depth and width, and rill flow depth and width were made. Variation trends of rill morphology and rill flow characteristics were analyzed and differences between photogrammetry and other measurement methods were discussed. The results showed that rill width and rill flow width could be measured directly from perpendicularly shot photographs after proportional scale calibration. Based on interpolation principal, dynamic variations of rill depth and rill flow depth could be measured. With increasing slope length, rill depth was increased while rill flow depth showed no significant trend. Rill width was increased and then decreased while rill flow width was decreased gradually along the soil bed. Increasing rates of rill widths

收稿日期: 2016-06-08 修回日期: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271299)和水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金项目(2017001)

作者简介: 覃超(1989—),男,博士生,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究,E-mail: glqinchao@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 郑粉莉(1960—),女,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究,E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

and depths with slope gradient of  $20^\circ$  were 1.7 and 1.3 times as those with slope gradient of  $15^\circ$ . Rill flow widths in different cross-sections with slope gradient of  $15^\circ$  were 1.7% ~ 13.1% larger than those with slope gradient of  $20^\circ$ , while rill flow depths showed little difference between these two slope gradients. Rill depths and rill flow depths obtained by manual measurements with a steel ruler were 3.3% ~ 5.1% and 91.0% ~ 178.5% higher than those obtained by photogrammetry. Compared with traditional methods and 3D laser scanning technique, photogrammetry had speed, resolution and non-contact advantages and it can also overcome rill wall shield and prevent the occurrence of point cloud "black holes".

**Key words:** photogrammetry; rill morphology; rill flow; movable-bed scouring test; overland flow depth

## 引言

近年来细沟形态特征研究受到了广泛关注<sup>[1-2]</sup>,细沟宽度和深度是其基本形态指标,也是科学评估坡面侵蚀沉积状况和土壤侵蚀强弱的基础<sup>[3-4]</sup>。坡面薄层水流塑造了细沟和细沟间 2 种侵蚀形态,细沟水流作为坡面细沟形成后的重要坡面流形式,是沟头溯源、沟底下切和沟壁崩塌的主要侵蚀动力<sup>[1]</sup>;细沟水流宽度和深度是计算其他水动力学要素,如雷诺数、弗劳德数和水流剪切力、水流功率的基础,其与流速、流量和水力半径等水力学参数密切相关<sup>[5-7]</sup>。然而,由于细沟水流具有流速快、流深浅、含沙浓度大等特点,导致动床条件下动态监测细沟水流宽度和深度相当困难<sup>[8]</sup>。因此,细沟和细沟水流参数测量一直是坡面土壤侵蚀研究的难点。

近年来,众多学者对细沟形态和细沟水流参数的测量方法进行了大量研究并取得了丰富的成果。对于坡面细沟形态,目前采用较多的测量方法包括测尺法、测针板法和三维激光扫描法,这些方法的成功运用极大地加深了人们对坡面侵蚀机理的认识<sup>[9-13]</sup>。然而,测尺法和测针板法对坡面扰动较大,测量工具精度较低且易受人工读数误差的影响;而三维激光扫描法耗时相对较长,在模拟试验过程中很难实时、动态获取坡面径流和侵蚀的真实情况。由于坡面细沟水流的宽度和深度均在厘米级,致使河流中常用的测深杆法、超声波法和红外光法等测量方法均不适用于坡面流的测量<sup>[14]</sup>。因此,目前坡面细沟水流宽度和深度的测量大多仍采用人工直接测量,测量工具包括钢尺、游标卡尺和水位测针,以及通过流速测量反推流深的间接测量<sup>[15-17]</sup>。然而,直接测量不但有人为误差,更重要的是测量工具对坡面径流场扰动较大,而间接测量又受流速测量精度影响,容易产生二次计算误差。近年来,基于遥感影像解译原理的近景立体摄影测量技术在获取高分辨率数字高程模型 DEM 上取得了新进展,且也被成功运用在土壤侵蚀研究领域<sup>[18-20]</sup>,为动床条件下坡面细沟和细沟水流形态特征的实时动态监测提供了

新思路。

因此,本研究采用人工模拟径流冲刷的方法,通过有、无径流 2 种坡面条件的间隔拍照,基于立体摄影测量技术提取的高精度 DEM,探讨细沟宽度、深度以及细沟水流宽度、深度的实时动态测量方法,以期为坡面土壤侵蚀监测提供新途径。

## 1 测量原理与方法

细沟沟底下切侵蚀的速率在细沟发育不同阶段有所不同<sup>[17]</sup>,但在一段相对较短的时间内,可以假设细沟沟底下切侵蚀的速率基本不变<sup>[21]</sup>。这样,可基于立体摄影测量技术,获取某一时刻的细沟宽度、深度和细沟水流宽度、深度。本文中的细沟水流是指细沟形成后集中在细沟沟槽内的水流。

### 1.1 细沟真实深度的测量

分别获取  $T_1$  时刻和  $T_{n+1}$  时刻坡面无径流情况下细沟形态的真实数据,测得  $T_1$  和  $T_{n+1}$  时刻细沟真实深度分别是  $H_1$ 、 $H_{n+1}$  (cm),如图 1 所示。

在  $T_1 \sim T_{n+1}$  时间段内每隔时间  $t$  (s) 拍照一次,共拍照  $n+1$  次,历时  $nt$ ;假定在  $T_1 \sim T_{n+1}$  时刻这一较短时间段内细沟深度的变化速率恒定,则第  $m$  个照相时刻  $T_m$  的细沟真实深度  $H_m$  ( $m=2,3,\dots,n$ ) (cm) 可用内插法计算,计算式为

$$H_m = H_1 + \frac{T_m - T_2}{(n-2)t} (H_{n+1} - H_1) \quad (1)$$

### 1.2 细沟水流深度的测量

在坡面有径流情况下,假设  $T_m$  时刻通过立体摄影测量获得的细沟深度为表征沟深  $h_m$  (cm) (图 1),则表征沟深  $h_m$  和真实沟深  $H_m$  符合关系

$$H_m = h_m + d_m \quad (2)$$

式中  $d_m$ —— $T_m$  时刻的细沟水流深度, cm

将式(2)代入式(1),则第  $m$  个拍照时刻  $T_m$  的细沟水流深度  $d_m$  ( $m=2,3,\dots,n$ ) 计算式为

$$d_m = H_1 + \frac{T_m - T_2}{(n-2)t} (H_{n+1} - H_1) - h_m \quad (3)$$

### 1.3 细沟水流宽度的测量

经过比例尺校准,细沟水流的宽度可以通过立

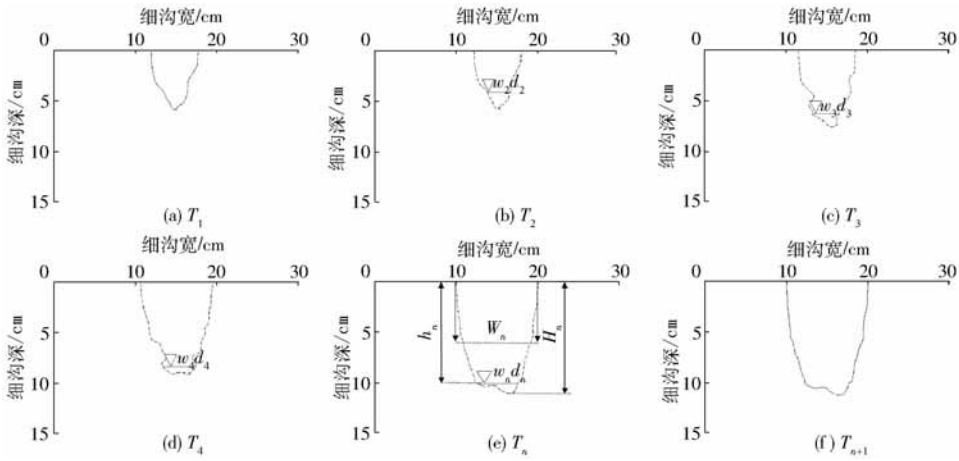


图1 不同时刻细沟横断面特征示意图

Fig. 1 Sketches of rill cross-section at different time phases

体摄影测量照片实时精确测量,则每个拍照时刻细沟水流的宽度为  $w_2, w_3, \dots, w_n$  (cm)。

#### 1.4 细沟宽度的测量

由于细沟水流深度较浅,任意时刻细沟宽度远大于细沟水流深度,由立体摄影测量法拍摄照片测量得到的细沟宽度均不受细沟水流宽度的影响,因此,任意时刻细沟的宽度为  $W_1, W_2, \dots, W_n, W_{n+1}$  (cm)。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料与设备

供试土壤为黄土高原丘陵沟壑区安塞县的耕层黄绵土,其中有机质质量比为  $5.9 \text{ g/kg}$ ,黏粒、粉粒与砂粒质量分数分别为  $13.6\%$ 、 $58.1\%$  和  $28.3\%$ 。供试土槽长  $200 \text{ cm}$ 、宽  $30 \text{ cm}$ 、深  $50 \text{ cm}$ ,一端可升降,坡度调节范围为  $0^\circ \sim 25^\circ$ ;上方有恒定水头供水装置,通过调节水阀开度控制入流量大小,流量调节范围为  $0 \sim 10 \text{ L/min}$ ;在坡长  $70, 120 \text{ cm}$  处的土槽正上方 ( $1.5 \text{ m}$  高) 平行架有 2 台能手动对焦的数码相机 (Canon EOS 5D Mark II)。

### 2.2 试验设计

试验设计 2 个坡度 ( $15^\circ$  和  $20^\circ$ ) 和 1 个流量 ( $1.0 \text{ L/min}$ ),每次试验持续  $140 \text{ s}$ ,整个试验过程中每隔  $10 \text{ s}$  拍照 1 次;按照测量原理与方法,本试验中,  $n=14, t=10 \text{ s}, T_1=0 \text{ s}, T_2=10 \text{ s}, T_n=130 \text{ s}, T_{n+1}=140 \text{ s}$ ;选取如图 2 所示时间点的照片提取 DEM,对比分析坡面有、无径流 2 种情况下的细沟和细沟水流特征。其中,  $T_1$  和  $T_{15}$  时刻为坡面无径流的时刻,  $T_2 \sim T_{14}$  时刻为坡面有径流的时刻。

为了形成更接近真实情况的细沟,本研究设计了前期预冲刷试验,即在正式试验开始前先将坡度调至  $15^\circ$ ,率定上方汇流强度,用  $2.0 \text{ L/min}$  的汇流量对试验土槽坡面进行冲刷,待坡面细沟溯源侵蚀结束并形成发育完好的细沟沟槽后 (图 3a、3b),再

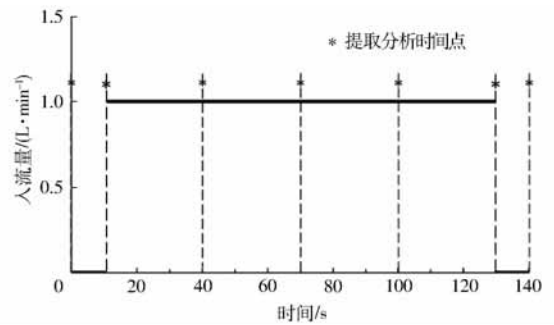


图2 试验流程图

Fig. 2 Flow chart of experiment process

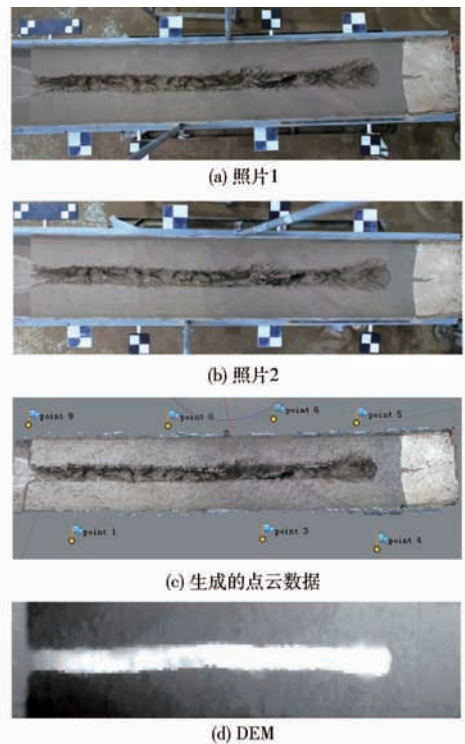


图3 立体摄影测量相机同时拍摄的一组照片、生成的点云数据和 DEM

Fig. 3 A pair of photos obtained from photogrammetry, point cloud data and DEM

开始正式径流冲刷试验。

## 2.3 试验步骤

(1) 试验土槽填土。试验土槽深 50 cm, 其中土槽底部 0 ~ 35 cm 装填细沙, 35 ~ 50 cm 装填黄绵土, 装土容重为  $1.15 \text{ g/cm}^3$ , 每 5 cm 填装一层; 在装上层土之前, 先扒松下层土壤表面, 以减少土壤分层现象。其中, 在装表层 5 cm 黄绵土时, 需在坡长 170 cm 处放置一个 5 cm 高的挡板, 仅在挡板上游方向装填黄绵土, 目的是建造锥形沟头, 以使细沟从沟头向上游溯源直至土槽顶端, 形成发育良好的细沟<sup>[21]</sup>。在完成试验土槽装土后, 小心将 0 ~ 30 cm 坡长处的表层 10 cm 土壤取出, 混以水泥(水泥和土的质量比为 5:2), 然后回填坡面<sup>[22]</sup>, 其目的是减少上方汇流对坡顶过渡段的非正常冲刷。

(2) 为保证试验前期土壤条件的一致性并使混有水泥的土壤表面充分凝固, 正式降雨的前一天将土槽坡度调至  $3^\circ$  并在土槽表面覆盖纱网, 采用  $30 \text{ mm/h}$  降雨强度进行预降雨至坡面产流为止。预降雨结束后, 将试验土槽调平( $0^\circ$ ), 静置 10 h, 以使土壤表面形成结皮<sup>[22]</sup>。

(3) 正式试验开始前在土槽上方同一高度架设 2 台数码相机, 设置照片的拍摄规格为 RAW, 分辨率设置为相机的最大分辨率( $2720 \text{ 像素} \times 4080 \text{ 像素}$ ), 调节相机的方向并使其拍摄角度与坡面始终保持垂直; 调节相机场景模式至“M 手动”, 使光圈最大、ISO 感光度最低、快门速度适中, 然后对焦, 待图像清晰后将对焦模式设置为手动, 并确保两台相机在整个试验过程中的焦距始终不变(图 3a、3b)。

(4) 在试验土槽四周设置 8 个黑白标靶, 使标靶与试验土槽土壤表面保持平行, 并保证任意 5 个标靶不在同一条直线上, 试验前用全站仪测量每一个标靶的相对位置, 以保证后期照片的拼接精度。

(5) 进行预冲刷试验, 然后调整土槽坡度, 率定上方汇流量, 当率定流量与设计目标流量的相对误差小于 2% 时即可开始正式试验。

(6) 试验开始后即连续接取径流泥沙样, 为使径流泥沙样的接样时间与拍照时间间隔一致, 设计每个径流泥沙样的接样时间为 10 s; 在拍照间隙, 用钢尺分别循环测量细沟的宽度、深度和细沟水流的宽度、深度。

(7) 冲刷结束后将径流泥沙样静置 12 h, 去除径流泥沙样的上层清液, 在干燥箱内( $105^\circ\text{C}$ )干燥至恒质量, 然后计算径流量和侵蚀量。

## 2.4 数据处理

试验结束后将拍摄照片导入 Agisoft Photoscan Professional 1.2.4 软件, 在完成照片标靶设置、图像拼接、校正后, 生成高密度点云数据(图 3c)后导出

(.txt 格式); 然后将该文本文件导入 Cyclone 6.0 软件进行进一步的降噪、坐标系设置等处理; 然后将处理后的数据导入 ArcGIS 10.1 软件, 生成渔网并进行空间校正, 然后生成 DEM(图 3d), 通过三维分析和表面分析模块, 获取有、无径流 2 种条件下的坡面细沟形态特征及细沟水流宽度和深度等指标, 具体操作步骤与三维激光扫描技术所获点云数据的后期处理步骤类似<sup>[17]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 无径流条件下坡面细沟形态特征

$T_1$  和  $T_{15}$  时刻是上方暂停供水的时刻, 这 2 个时刻的坡面细沟形态特征参数是后续计算的基准, 因此获取这 2 个时刻的细沟形态特征有利于用内插法计算任意时刻下细沟深度等其他形态特征指标。试验结果表明(表 1),  $T_1$  和  $T_{15}$  时刻下 2 个试验坡度的细沟深度均随坡长的增加总体上呈增加趋势, 细沟宽度随坡长均呈先增加后减小的趋势; 在  $15^\circ$  坡度处理下坡长 74 cm 处, 细沟深度比其相邻断面的细沟深度大, 其原因为细沟内出现了新的二级下切沟头, 二级沟头的出现能加快细沟下切侵蚀的速率<sup>[17]</sup>。经过 120 s 历时后,  $15^\circ$  和  $20^\circ$  坡度下, 细沟深度分别平均增加 1.16、1.96 cm, 细沟宽度分别平均增加 0.64、0.80 cm,  $20^\circ$  坡度下细沟宽度和深度的增加速率分别是  $15^\circ$  坡度下的 1.7、1.3 倍。2 个坡度下, 下坡段(108 ~ 159 cm 坡长)细沟平均宽度的增加量大于上坡段(40 ~ 91 cm 坡长), 而细沟平均深度在上、下坡段的增加量差别不大。

表 1  $T_1$  和  $T_{15}$  时刻下细沟真实深度和宽度

Tab.1 Measured real rill depth and rill width

$S_D/(\circ)$	$S_L/\text{cm}$	at time of $T_1$ and $T_{15}$				cm	
		$T_1$ 时刻		$T_{15}$ 时刻		$\Delta H$	$\Delta W$
		$H_1$	$W_1$	$H_{15}$	$W_{15}$		
15	142	6.45	7.33	7.37	8.08	0.92	0.75
	108	5.41	8.61	6.32	9.29	0.91	0.68
	74	5.78	7.08	6.58	7.60	0.80	0.52
	40	1.50	6.31	2.98	6.64	1.48	0.33
20	142	6.27	8.32	7.94	9.49	1.67	1.17
	108	5.06	8.17	7.20	9.28	2.14	1.11
	74	4.02	10.06	5.60	10.60	1.58	0.54
	40	1.01	8.58	2.75	8.80	1.74	0.22

注:  $S_D$  为坡度,  $S_L$  为坡长,  $H$  为细沟真实深度,  $W$  为细沟宽度,  $\Delta H$  为细沟深度增加值,  $\Delta W$  为细沟宽度增加值, 下同。

### 3.2 有径流条件下坡面细沟形态特征

在坡面有径流存在的情况下, 现有测量方法如测尺法和三维激光扫描法均较难快速、准确剔除径流因素的影响并准确获取某一时刻细沟深度的变化

情况。运用立体摄影测量技术,在试验过程中使2台相机同时拍摄照片,通过生成DEM获得的细沟深度为细沟的表征深度 $h$ ,表征深度 $h$ 与细沟的真实深度 $H$ 之间存在一个径流深的差值 $d$ ,运用1.2节中计算的无径流条件下细沟的真实深度进行内插,即可得到有径流条件下不同坡长和坡度的细沟真实深度 $H$ (表2)。结果表明,细沟的真实深度和宽度均随试验历时的增加(由 $T_2$ 时刻变化到 $T_{14}$ 时刻)而增加,这较好地模拟了黄土坡面细沟发育过程中坡面侵蚀形态的变化过程<sup>[11]</sup>;细沟宽度随试验历时的变化呈非线性增加,这可归因于细沟沟壁崩塌具有随机性和不确定性的特点<sup>[17-18]</sup>。在2个坡度处理下,细沟的真实深度随坡长的增加总体上呈增加趋势,细沟宽度随坡长则先增加后减小的趋势。

### 3.3 有径流条件下坡面细沟水流形态特征

试验结果表明,运用立体摄影测量技术获取坡面细沟水流形态,可使细沟水流宽度和深度的测量精度达到毫米级且避免了对坡面的人为扰动。由表3可知,与细沟真实深度的变化规律相同,细沟表征深度随坡长总体上也呈增加趋势。2个坡度处理下,随着坡长的增加,坡面细沟水流宽度逐渐减小(表3),其原因为:①下坡段的流速大于上坡段流速

( $15^\circ$ 和 $20^\circ$ 坡度处理下,下坡段流速分别比上坡段大38.3%~41.9%和35.4%~38.7%)。②上坡段的径流比较分散,下坡段径流相对集中,这可归因于随着坡长的增加,细沟宽度和深度大体上均呈增加趋势(表2),但细沟深度的增加速率远大于细沟宽度(表1),从而导致上坡段细沟呈“宽浅型”,而下坡段细沟呈“窄深型”。细沟水流深度随坡长无明显变化规律。就坡面细沟水流的平均宽度和深度而言, $15^\circ$ 坡度下细沟水流宽度略大于 $20^\circ$ 坡度下的细沟水流宽度,偏大幅度为1.7%~13.1%,而细沟水流深度在2个坡度下差别不明显。

表2  $T_5$ 、 $T_8$ 、 $T_{11}$ 时刻下计算的细沟真实深度和细沟宽度

**Tab. 2 Calculated real rill depth and rill width at time of  $T_5$ ,  $T_8$  and  $T_{11}$**

$S_D/(\circ)$	$S_L/\text{cm}$	time of $T_5$ , $T_8$ and $T_{11}$						cm
		$T_5$ 时刻		$T_8$ 时刻		$T_{11}$ 时刻		
		$H_5$	$W_5$	$H_8$	$W_8$	$H_{11}$	$W_{11}$	
15	142	6.68	7.65	6.91	7.71	7.14	8.07	
	108	5.64	8.74	5.87	8.93	6.09	9.08	
	74	5.98	7.25	6.18	7.33	6.38	7.44	
	40	1.87	6.39	2.24	6.58	2.61	6.55	
20	142	6.69	8.66	7.11	8.91	7.52	9.46	
	108	5.60	8.40	6.13	8.73	6.67	8.99	
	74	4.42	10.18	4.81	10.33	5.21	10.58	
	40	1.45	8.60	1.88	8.69	2.32	8.73	

表3  $T_2$ 、 $T_5$ 、 $T_8$ 、 $T_{11}$ 、 $T_{14}$ 时刻下细沟表征深度、计算的细沟水流深度和细沟水流宽度

Tab. 3 Characterized rill depth, calculated rill flow depth and rill flow width at time of  $T_2$ ,  $T_5$ ,  $T_8$ ,  $T_{11}$  and  $T_{14}$

$S_D/(\circ)$	$S_L/\text{cm}$	$T_2$ 时刻						$T_5$ 时刻			$T_8$ 时刻			$T_{11}$ 时刻			$T_{14}$ 时刻		
		$h_2$	$d_2$	$w_2$	$h_5$	$d_5$	$w_5$	$h_8$	$d_8$	$w_8$	$h_{11}$	$d_{11}$	$w_{11}$	$h_{14}$	$d_{14}$	$w_{14}$			
15	142	6.28	0.17	1.66	6.50	0.18	1.77	6.72	0.19	1.73	6.93	0.21	1.85	7.15	0.22	1.76			
	108	5.29	0.12	2.85	5.49	0.15	2.69	5.72	0.15	2.64	5.91	0.18	2.55	6.13	0.19	2.89			
	74	5.60	0.18	3.25	5.78	0.20	3.10	5.97	0.21	3.19	6.16	0.22	3.29	6.36	0.22	3.16			
	40	1.38	0.12	4.43	1.74	0.13	3.69	2.09	0.15	3.58	2.46	0.15	3.40	2.79	0.19	3.32			
20	142	6.12	0.15	1.64	6.53	0.16	1.66	6.95	0.16	1.64	7.35	0.17	1.66	7.77	0.17	1.64			
	108	4.88	0.18	2.38	5.43	0.17	2.40	5.96	0.17	2.46	6.48	0.19	2.28	7.02	0.18	2.21			
	74	3.85	0.17	3.01	4.26	0.16	3.15	4.64	0.17	3.20	5.03	0.18	3.17	5.40	0.20	3.01			
	40	0.83	0.18	3.75	1.26	0.19	3.66	1.68	0.20	3.42	2.11	0.21	3.79	2.54	0.21	3.64			

## 4 讨论

立体摄影测量技术通过2台数码相机在同一时刻拍摄的两张照片,基于两张照片交叉重叠的部分提取高精度DEM,只需2台能够手动对焦的普通相机即可实现对坡面微地形的实时精确测量,对被测物体的表面形态进行三维分析,具有速度快、精度高、非接触式和有效克服遮挡等特点。由于目前还没有比较准确的测量动床条件下坡面细沟和细沟水流参数的方法,因此本文在进行立体摄影测量的同

时,还进行了传统的手工测量(测尺法),以期对比分析2种方法的异同。试验结果表明(表4),立体摄影测量技术与测尺法所测的细沟深度、宽度和细沟水流深度、宽度随坡长和坡度均有相同的变化规律,说明立体摄影测量技术所测的数据是准确可靠的。与传统测量手段和三维激光扫描技术相比,立体摄影测量技术在刻画地表微地形、获取地面真实形态和测量坡面薄层水流参数方面有如下特点:

(1)速度快,获取一次地面形态的时间小于1s,远小于三维激光扫描仪扫描坡面以及用测针板或钢

表 4 人工测尺法和立体摄影法测量的细沟深度、宽度和细沟水流深度、宽度

Tab. 4 Rill depth, width and rill flow depth, width measured by manual measurement with steel ruler and photogrammetry

坡度/(°)	坡长/cm	测量方法	H		W		d		w	
			平均值/cm	标准差	平均值/cm	标准差	平均值/cm	标准差	平均值/cm	标准差
15	108	测尺	6.0	0.41	9.0	0.47	0.4	0.05	3.2	0.32
		摄影	5.81	0.39	8.89	0.30	0.16	0.03	2.72	0.14
	74	测尺	6.4	0.48	7.3	0.27	0.4	0.04	3.3	0.22
		摄影	6.13	0.34	7.32	0.22	0.21	0.02	3.20	0.07
20	108	测尺	6.3	1.08	8.7	0.52	0.3	0.05	2.7	0.23
		摄影	6.00	0.91	8.64	0.48	0.18	0.01	2.35	0.10
	74	测尺	5.0	0.76	10.4	0.26	0.4	0.05	3.4	0.22
		摄影	4.71	0.67	10.29	0.23	0.18	0.02	3.11	0.09

尺人工测量坡面形态所需的时间,可以用于沟壁崩塌前的裂隙观测及滑坡侵蚀等发生发展迅速的土壤侵蚀过程监测。

(2)精度高,传统测量手段仅能达到厘米级精度,且所得重复数据之间的相对误差均大于立体摄影法的相对误差(表 4),三维激光扫描虽能达到毫米级精度,但受测量距离及角度的影响,扫描所得到的点云密度不一,一般会呈现近密远疏的情况,立体摄影测量技术不仅能获得密度相对一致的点云数据且均能达到毫米级精度。

(3)非接触,立体摄影测量技术与三维扫描技术一样,都是非接触式测量方法,从而有效避免传统测量方法对坡面的扰动。

(4)有效克服沟壁遮挡的影响,立体摄影测量技术通过正射影像获取点云数据,能将弯曲的细沟沟底形态和洼地准确表达建模,减少遮挡“黑洞”的出现。

(5)立体摄影测量技术克服了人工目视观测带来的误差,通过毫米级精度的照片及生成的 DEM,可以直接精确量取坡面流的宽度,计算流深;2 种方法所测的细沟宽度与细沟水流宽度的相对误差分别为 0.21% ~ 0.65% 和 2.56% ~ 16.01%。细沟深度与细沟水流深度虽有相同的变化趋势,但与立体摄影法相比,通过人工测尺法测量得到的细沟深度和细沟水流深度均偏大,偏大幅度分别为 3.3% ~ 5.1%、91.0% ~ 178.5% (表 4),这与 VINCI 等<sup>[12]</sup> 研究有类似的结论,他们指出人工测量法比三维激光扫描法在估算细沟侵蚀量上偏大 15%。分析其原因,这主要与人工俯视读数有关,特别是在测量细沟水流深度时,测针或者钢尺插入含沙浓度较大的细沟水流内,较难控制插入的深度,会对细沟水流形成阻碍,使钢尺刻度无法看清且钢尺上方的水深明显偏大,因此,在运用测尺法测量细沟和细沟水流深度时,需要对原始读数进行相应的校正。

(6)通过无径流时刻地表真实形态的获取,能

用差分法准确计算浑浊含沙水流的深度及相应时刻的细沟深度。

综上所述,立体摄影测量技术较好地解决了坡面土壤侵蚀过程中下垫面变化迅速这一动床条件下细沟深度和含沙水流深度的精确测量问题,为坡面细沟和细沟水流参数快速、准确测量提供了一种有效方法。然而,本研究仅限于上方汇流条件下单条细沟和细沟水流形态特征参数的测量,今后研究可继续探索在模拟降雨条件下坡面存在多条细沟时的测量方法。

## 5 结束语

利用人工模拟冲刷试验,基于立体摄影测量技术,提出了动床条件下坡面细沟宽度、深度以及细沟水流宽度、深度的测量和计算方法,分析了 15° 和 20° 坡度处理下坡面细沟和细沟水流特征及其变化规律,探讨了立体摄影测量技术与其他测量技术在细沟及细沟水流形态特征参数测量方面的异同。结果表明:在坡面无径流条件下,基于立体摄影技术提取的高精度 DEM,能直接准确测量细沟的宽度和深度;在坡面有径流条件下,通过立体摄影照片可以直接量取细沟宽度和细沟水流宽度,运用内插法,立体摄影技术能较准确地测量细沟深度和细沟水流深度的实时动态变化。与通过立体摄影测量技术获得的细沟形态和细沟水流特征相比,通过测尺法测量得到的细沟深度和细沟水流深度均不同程度偏大,细沟宽度和细沟水流宽度虽然差别不大,但通过测尺法所获数据的精度较低,重复性较差,相对误差均大于立体摄影测量法。就坡长而言,随坡长的增加,细沟深度逐渐增大,细沟水流深度则无明显变化规律,细沟宽度先增大后减小,细沟水流宽度逐渐减小;就 2 个坡度处理而言,20° 坡度下细沟宽度和深度的增加速率分别是 15° 坡度下的 1.7 倍和 1.3 倍,15° 坡度下细沟水流的宽度比 20° 坡度下的流宽 1.7% ~ 13.1%,而流深差别不大。

## 参 考 文 献

- 1 蔡强国, 朱远达, 王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 12-18.  
CAI Qianguo, ZHU Yuanda, WANG Shiyong. Research on processes and factors of rill erosion [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 12-18. (in Chinese)
- 2 SHEN H O, ZHENG F L, WEN L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology [J]. Geomorphology, 2015, 231: 193-201.
- 3 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. 土壤学报, 1989, 26(2): 109-116.  
ZHENG Fenli, TANG Keli, ZHOU Peihua. Study on factors affecting rill erosion on cultivated slope land [J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(2): 109-116. (in Chinese)
- 4 BRUNTON D A, BRYAN R B. Rill network development and sediment budgets [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(7): 783-800.
- 5 DE LIMA J L M P, ABRANTES J R C B. Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(10): 1293-1300.
- 6 啜瑞媛, 雷廷武, 史晓楠, 等. 测量坡面薄层水流流速的电解质示踪真实边界条件法与系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 77-83.  
CHUO Ruiyuan, LEI Tingwu, SHI Xiaonan, et al. Method and system for measuring hill-slope shallow water flow velocity with realistic boundary condition of electrolyte tracer [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 77-83. (in Chinese)
- 7 ZHANG G H, LIU B Y, LIU G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 713-719.
- 8 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 162-170.  
SHEN Haiou, ZHENG Fenli, WEN Leilei, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 162-170. (in Chinese)
- 9 肖培青, 郑粉莉, 姚文艺. 坡沟系统侵蚀产沙及其耦合关系研究[J]. 泥沙研究, 2007(2): 30-35.  
XIAO Peiqing, ZHENG Fenli, YAO Wenyi. Study on sediment yield and coupling mechanism of slope-gully system [J]. Journal of Sediment Research, 2007(2): 30-35. (in Chinese)
- 10 REJMAN J, BRODOWSKI R. Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30(2): 231-239.
- 11 韩鹏, 倪晋仁, 李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 115-125.  
HAN Peng, NI Jinren, LI Tianhong. Headcut and bank landslip in rill evolution [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(2): 115-125. (in Chinese)
- 12 VINCI A, BRIGANTE R, TODISCO F, et al. Measuring rill erosion by laser scanning [J]. CATENA, 2015, 124: 97-108.
- 13 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 48-59, 116.  
ZHENG Fenli, XU Ximeng, QIN Chao. A review of gully erosion process research [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 48-59, 116. (in Chinese)
- 14 朱良君, 张光辉, 胡国芳, 等. 坡面流超声波水深测量系统研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 235-239.  
ZHU Liangjun, ZHANG Guanghui, HU Guofang, et al. Study on evaluation ultrasonic measurement system of overland flow depth [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 235-239. (in Chinese)
- 15 覃超, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 玉米秸秆缓冲带防治黄土坡面细沟侵蚀的效果[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 35-42.  
QIN Chao, ZHENG Fenli, XU Ximeng et al. Effects of maize straw buffer in preventing rill erosion on loess slope [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(1): 35-42. (in Chinese)
- 16 施明新, 李陶陶, 吴秉校, 等. 地表粗糙度对坡面流水动力学参数的影响[J]. 泥沙研究, 2015(4): 59-65.  
SHI Mingxin, LI Taotao, WU Bingxiao, et al. Influences of surface roughness on overland flow hydraulic characteristics [J]. Journal of Sediment Research, 2015(4): 59-65. (in Chinese)
- 17 覃超, 吴红艳, 郑粉莉, 等. 黄土坡面细沟侵蚀及水动力学参数的时空变化特征[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 146-154, 207.  
QIN Chao, WU Hongyan, ZHENG Fenli, et al. Temporal and spatial variations of rill erosion and hydrodynamic parameters on loessial hillslope [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 146-154, 207. (in Chinese)
- 18 WELLS R R, MOMM H G, RIGBY J R, et al. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows [J]. CATENA, 2013, 101: 114-121.
- 19 BERGER C, SCHULZE M, RIEKE-ZAPP D, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456-1467.
- 20 GESSESSE G D, FUCHS H, MANSBERGER R, et al. Assessment of erosion, deposition and rill development on irregular soil surfaces using close range digital photogrammetry [J]. The Photogrammetric Record, 2010, 25(131): 299-318.
- 21 WELLS R R, BENNETT S J, ALONSO C V. Modulation of headcut soil erosion in rills due to upstream sediment loads [J]. Water Resources Research, 2010, 46(12): 1-16.
- 22 WELLS R R, ALONSO C V, BENNETT S J. Morphodynamics of headcut development and soil erosion in upland concentrated flows [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(2): 521-530.