

# 近景摄影测量技术在坡耕地土壤侵蚀速率研究中的应用

杨超<sup>1,2</sup>, 苏正安<sup>2</sup>, 熊东红<sup>2</sup>, 杨鸿琨<sup>3</sup>, 徐霞<sup>1</sup>, 董一帆<sup>2</sup>

(1. 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610101; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500)

**摘要:** 以 5°, 10°, 20° 的紫色土坡耕地为研究对象, 分别进行 5, 10, 15 次强度的模拟耕作试验, 在此基础上采用 60 L/min 的流量进行 3 轮放水冲刷试验, 采用近景摄影测量技术监测试验前后紫色土坡耕地小区的地形变化, 通过生成高精度 DEM 数据计算土壤流失体积, 并采用插钎法测量土层深度变化, 验证近景摄影测量技术测定地形变化的准确度, 进而推算不同坡度条件下的紫色土坡耕地耕作侵蚀速率和水力侵蚀速率。结果表明: (1) 采用近景摄影测量技术能够准确监测地形变化, 其测算结果与插钎法的结果比较接近, 且通过计算土壤流失体积推算土壤侵蚀速率的方法比较可靠, 精度较高; (2) 紫色土坡耕地在坡度为 5°, 10°, 20° 条件下平均耕作侵蚀速率分别为 69.85, 131.45, 155.34 t/(hm<sup>2</sup> · tillage pass), 耕作侵蚀速率随坡度增加呈增加趋势, 随着耕作次数增加则呈逐渐减小的趋势; (3) 紫色土坡耕地在坡度为 5°, 10°, 20° 条件下平均水力侵蚀速率分别为 1 892.52, 2 961.76, 4 405.93 t/(hm<sup>2</sup> · h), 水力侵蚀速率与坡度呈正相关关系, 与此同时, 随着耕作强度的增加, 水力侵蚀也呈逐渐增大的趋势, 表明耕作侵蚀对水力侵蚀有加速作用。该研究为紫色土坡耕地耕作侵蚀和水力侵蚀交互作用下的土壤侵蚀研究提供技术支撑和数据基础。

**关键词:** 无人机; 坡耕地; 耕作侵蚀; 水力侵蚀; 侵蚀速率; 坡度; 耕作强度

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)01-0121-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.020

## Application of Close-range Photogrammetry Technology in the Study of Soil Erosion Rate on Slope Farmland

YANG Chao<sup>1,2</sup>, SU Zheng'an<sup>2</sup>, XIONG Donghong<sup>2</sup>, YANG Hongkun<sup>3</sup>, XU Xia<sup>1</sup>, DONG Yifan<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500)

**Abstract:** To determinate tillage erosion rate and hydraulic erosion rate of purple soil under different slope gradients, a series of simulated tillage experiments (5, 10, and 15 operation tillage) were conducted on 5°, 10°, and 20° slope farmlands, respectively. Then a series of scouring experiments with water discharge of 60 L/min were carried out on those slopes. Close-range photogrammetry technology was used to monitor the landform changes of purple slope farmland, and the high resolution digital elevation models (DEMs) were generated to calculate the net soil loss volume. Meanwhile, erosion pins were used to verify the accuracy of close-range photogrammetry technology by measuring the depth variation of soil layer, and the erosion rate and hydraulic erosion rate of purple slope farmland under different slope conditions were calculated. Results showed that the close-range photogrammetry technology was reliable and efficient to monitor landform changes and calculate the soil erosion rates. The calculated results of DEMs were similar to those of erosion pins. The average tillage erosion rates were 69.85, 131.45 and 155.34 t/(hm<sup>2</sup> · tillage pass) on 5°, 10° and 20° purple slope farmland, respectively, and tillage erosion rate showed an increase trend with the increasing of slope gradient, while it decreased with the increasing of tillage intensity. The average hydraulic erosion rates were 1 892.52, 2 961.76 and 4 405.93 t/(hm<sup>2</sup> · h) on 5°, 10° and 20° purple slope farmland, respectively. Hydraulic erosion rate was positively related to the slope gradient. Meanwhile, hydraulic erosion rate showed an increase trend with the increasing of tillage intensity, indicating that tillage erosion would accelerate the

收稿日期: 2017-07-21

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505102); 国家自然科学基金项目(41401313, 41571267); 四川师范大学 2017 年研究生优秀论文培育基金项目(川师研(2017)17 号-42)

第一作者: 杨超(1992—), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事遥感技术在土壤侵蚀中的应用研究。E-mail: fqschaozi@gmail.com

通信作者: 苏正安(1980—), 男, 四川江油人, 博士, 副研究员, 硕导, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: suzhengan@imde.ac.cn

hydraulic erosion. These results could provide technical support and data foundation to the studies about soil erosion in purple slope farmland under tillage erosion and hydraulic erosion.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle (UAV); slope farmland; tillage erosion; hydraulic erosion; erosion rate; slope gradient; tillage intensity

紫色土一方面具有较好的母质肥力性成为宝贵的农业耕作土壤,同时受限于其有机质含量低、容重高、分散率高、团聚体含量少等缺点,使紫色土区成为仅次于黄土地区土壤流失最严重的地区之一<sup>[1]</sup>。紫色土坡耕地因强烈的人为耕作活动,导致坡耕地土层变薄,养分流失加剧,生产力低下,严重阻碍了当地农业的可持续发展<sup>[2]</sup>。因此开展紫色土坡耕地土壤侵蚀研究,对研究坡耕地地形演化过程、土壤质量改变、土壤养分转移与重分布、土壤有机质含量及土壤碳储量变化等有重要影响<sup>[3]</sup>。

耕作侵蚀和水力侵蚀是发生在紫色土坡耕地上的两种重要侵蚀类型<sup>[4]</sup>。目前针对紫色土耕作侵蚀和水力侵蚀已经进行了大量的研究<sup>[5-7]</sup>,但是耕作侵蚀和水力侵蚀在侵蚀过程中存在交互作用,以往研究指出耕作侵蚀部位主要集中在坡顶凸起部位,而水力侵蚀则作用在下凹部分强烈<sup>[8]</sup>,两者交互作用下对土壤流失和地形改变过程具有促进作用,关于这方面的研究还很少被报道。目前耕作侵蚀速率的计算方法主要有物理示踪法、<sup>137</sup>Cs 示踪剂法、模型法和梯级法<sup>[9]</sup>,水力侵蚀速率的计算方法主要有模型模拟、元素示踪等方法。有学者分别采用全站仪<sup>[10]</sup>、3D 扫描仪<sup>[11]</sup>等设备开展坡面地形演变过程研究,但该方法往往受制于设备昂贵、数据精度不高等不足,近些年利用无人机进行地形演变的动态监测,应用于土壤侵蚀研究工作中,被证明是一种高效可行的技术<sup>[12]</sup>。Van Oost 等<sup>[13]</sup>通过<sup>137</sup>Cs 示踪的方法研究了耕作侵蚀和水力侵蚀对土壤总侵蚀量贡献的改变。Lindstrom 等<sup>[14]</sup>研究表明耕作土壤位移与坡度和耕作方向紧密相关。张建辉等<sup>[15]</sup>通过示踪法定量研究了耕作侵蚀中土壤位移距离和耕作侵蚀速率与坡度、坡长的关系。苏正安等<sup>[9]</sup>采用梯级法和模型法研究了线形坡上耕作侵蚀速率随耕作强度的变化,同时研究了经过耕作后坡耕地不同耕作部位土壤水分入渗的变化。Su 等<sup>[10]</sup>通过生成高精度 DEM (Digital Elevation Model) 数据,研究了在不同坡形上经过不同强度耕作后,坡耕地地形的演变过程。

目前,针对紫色土坡耕地土壤侵蚀的研究主要侧重于单一侵蚀类型的影响作用,而不是耕作侵蚀和水力侵蚀交互作用下的坡耕地土壤侵蚀过程。因此,本文采用模拟耕作试验和放水冲刷试验,通过设置不同的坡度和耕作强度,结合无人机摄影测量技术生成的

高精度 DEM 数据,定量研究紫色土坡耕地在耕作侵蚀和水力侵蚀作用下的土壤侵蚀速率,为进一步开展紫色土坡耕地耕作侵蚀和水力侵蚀交互作用下的土壤侵蚀研究提供技术支撑和数据基础。

## 1 研究区概况

本研究区位于云南省楚雄彝族自治州元谋县(101°35'—102°06' E, 25°23'—26°06' N)。元谋县地处滇中高原北部,龙川江下游,地势呈四周高,中间低,由南向北倾斜的“筲箕凹”形。全县南北长 77.25 km,东西宽 42.0 km,区域面积 2 021.46 km<sup>2</sup>,海拔 898~2 835.5 m,高差悬殊,相对高差 1 937.5 m,生态环境垂直分异明显。该研究区属南亚热带干热季风气候,年平均气温 21.9 °C,年日照时数 2 670.4 h,年均相对湿度为 53%,年均降雨量 613.8 mm,年均蒸发量 3 627 mm,四季不分明,全年基本无霜,适合亚热带作物生长。全县土壤类型包括燥红土、紫色土等共 9 大土类,14 个亚类,25 个土属,51 个土种。元谋县干热河谷(海拔 1 650 m 以下)主要以燥红土为主,但在海拔 1 650~2 400 m 的山区主要以紫色土为主<sup>[16]</sup>,且分布了大量的坡耕地。该地区耕作方式主要以顺坡耕作锄耕为主,紫色土坡耕地集中分布在 5°~20°的坡度范围内。

## 2 数据与方法

### 2.1 试验平台构建

本试验于 2017 年 5 月在中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所与云南省农科院共建的元谋干热河谷沟蚀崩塌观测研究站进行,该研究站设置有不同坡度的紫色土坡耕地径流小区。本次试验选用径流小区的坡度分别为 5°,10°,20°,每种坡度分别设置有 4 个径流小区,编号为 1~4 号小区,长×宽为 10 m×2.5 m。每个小区四周及底部采用水泥砂浆砌有边界,边界上每隔 2 m 标记一个地面控制点,使用 RTK-GPS (Trimble R8,水平精度 1 cm,垂直精度 2 cm)测得控制点坐标。所有径流小区均采用模拟自然容重状态下的紫色土进行填充,填充时间为 2006 年,目前已经进行了 10 多年的耕作活动。在本次试验之前,所有小区地表以上的农作物均已经收割,地表以下的作物根系也均已清除,地形进行了耕作抚平。

### 2.2 研究方法

2.2.1 模拟耕作试验 模拟耕作试验在 3 种坡度上的 4 个小区上进行,用来模拟当地农民在坡耕地上进

行长期传统耕作活动后所造成的地形变化。为保证各小区的土壤紧实度、土壤容重等初始条件一致,采用逆坡耕作的方法翻耕松土,最大程度上保证该小区内土壤未发生位移,作为初始地形条件。每种坡度的 1 号小区在初始地形条件下未经过顺坡耕作,而 2~4 号小区分别进行 5, 10, 15 次强度的耕作试验,用来模拟 5, 10, 15 年的农业耕作活动,模拟耕作试验由当地农民沿坡顶至坡脚的方向进行顺坡耕作,耕作试验采用相同的耕作方式和耕作工具。不同的耕作强度用来模拟较长时间尺度上农民在坡耕地上经多次耕作活动所造成的地形改变,同时多次模拟耕作试验之间形成重复对照。坡耕地在经过强烈的耕作之后,坡顶的耕层土壤完全被搬移,而在坡耕和坡脚堆积大量土壤,在坡耕地上形成明显的土壤侵蚀区和土壤堆积区<sup>[9]</sup>,因此确定耕作侵蚀区土壤流失体积成为计算耕作侵蚀速率的关键。

本研究利用无人机采集地形数据,通过数字建模生成耕作后坡耕地径流小区的正射影像,通过目视解译结合耕作前后地形变化(图 1),确定耕作侵蚀区边界和面积,利用 ArcGIS 10.4 提供的填挖方工具计算出耕作后坡顶部土壤净流失体积。模拟耕作试验开始前和完成后均在每个试验小区的上、中、下部采集土壤样品,计算土壤容重。



(a) 原始地形 (b) 耕作地形 (c) 冲刷地形 (d) 耕作试验

图 1 耕作前后地形变化及其耕作试验

2.2.2 放水冲刷试验 放水冲刷试验在每个坡度 2 号小区模拟耕作试验的基础上进行,依据研究区气象站收集的降水资料,设置放水冲刷流量为 60 L/min,共进行 3 轮冲刷试验,每一轮放水冲刷试验总时间为 100 min。试验开始前在小区顶部放置一个紧贴小区内壁的稳流槽,稳流槽由白铁皮制成,稳流槽长×宽×高为 245 cm×25 cm×25 cm,稳流槽下铺垫一层塑料不透水薄膜,薄膜长度略长于稳流槽,防止水流从稳流槽中漫出后直接冲击土壤形成跌穴。试验开始后,控制水流先进入稳流槽中,待槽内积满水后,水流由稳流槽稳定溢出后冲刷土壤,每冲刷 20 min 停水一次,利用无人机采集一次地形数据。每轮冲刷试验完成后使用锄具将坡

面冲刷出的侵蚀沟进行左右抚平,测量土层深度数据,然后采用相同的耕作方法再进行 5 次模拟耕作试验,接着开始下一轮放水冲刷试验,直至第 3 轮放水冲刷试验完成。通过在同一小区内轮流进行耕作试验和放水冲刷试验,模拟紫色土坡耕地在 5, 10, 15 年内耕作侵蚀和水力侵蚀交互作用下的地形改变,通过计算坡耕地在不同侵蚀力作用前后地形的改变情况,区分不同侵蚀类型分别对土壤侵蚀的贡献度。

2.2.3 地形数据采集 目前获取 DEM 的方法大多使用离散高程点数据,通过不同的插值方法生成<sup>[17]</sup>,相较于 LiDAR 高昂的测量成本和复杂的后期处理技术,使用无人机获取高重叠度、多视角的相片,通过 SfM(Structure from Motion)的方法配合少量控制点可以快速生成具有现实世界空间坐标系的正射影像和高程点云数据<sup>[18]</sup>。本研究中采用大疆精灵 4 (DJI Phantom 4) 无人机进行地形数据采集,无人机携带数码相机(像素 1 200 万)在径流小区上空 5~6 m 高度,采集 3 种坡度上每个径流小区耕作试验和冲刷试验前后的地形数据。每个小区拍摄清晰无云的地形照片 13~16 幅,相邻照片之间的重叠度在 80% 以上,便于后期进行影像拼接和高程点云生成。

通过插钎法测定坡耕地径流小区在放水冲刷试验后的土层深度变化,推算土壤流失体积。在每一轮模拟耕作试验前后,以及放水冲刷试验后抚平地形的基础上,沿各小区中轴线位置顺坡方向每隔 2 m 的距离,将一固定长度的钢筋(1.5 m)垂直插入地面直至径流小区底面,同时用钢卷尺测量露出小区土层之上的钢筋长度,计算耕作试验前后和冲刷试验后小区内土壤平均降低高度,进而分别推算整个坡面经过模拟耕作试验和放水冲刷试验之后的土壤流失体积。

## 2.3 数据处理

使用 Agisoft PhotoScan 软件加载径流小区试验前后采集的地形数据,配合地面控制点生成高程点云数据,在 ArcGIS 10.4 平台中采用 IDW(Inverse Distance Weighted)、OK(Ordinary Kriging)和 LPI(Local Polynomial Interpolation) 3 种插值方法生成高精度 DEM 数据,以 ME(Mean Error)、RMSE(Root Mean Square Error)来评价插值精度,优选出最佳插值方法,通过最优插值方法生成格网大小为 0.001~0.100 m 的 5 组 DEM 数据,计算耕作试验和冲刷试验前后土壤流失体积,分析其与不同格网大小之间的相关关系,确定生成 DEM 数据的最佳格网大小。

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^* - Z)^2 \quad (1)$$

式中:ME 为平均误差(m);n 为样本个数;Z\* 为高程数据的实测值(m);Z 为高程数据的估计值(m)。

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^* - Z)^2 \right]^{0.5} \quad (2)$$

式中:RMSE 为中误差(m)。

采用模型法通过耕作前后地形变化计算得出模拟耕作试验中土壤流失体积,结合土壤容重和耕作次数推算耕作侵蚀速率,计算公式为:

$$R_t = \frac{V_t \times \rho_b \times 10}{A \times N} \quad (3)$$

式中: $R_t$  为坡面耕作侵蚀模数( $t/(hm^2 \cdot tillage\ pass)$ ); $V_t$  为耕作后坡面被侵蚀的土体体积( $m^3$ ); $\rho_b$  为土壤容重( $1\ 311.00\ kg/m^3$ ); $A$  为坡面面积( $m^2$ ); $N$  为耕作次数。

根据冲刷前后地形变化计算结果,通过动态模拟得出水力侵蚀速率,计算公式为:

$$R_w = \frac{V_w \times \rho_b \times 10}{A \times T} \quad (4)$$

式中: $R_w$  为水力侵蚀速率( $t/(hm^2 \cdot h)$ ); $V_w$  为冲刷

后坡面土壤流失体积( $m^3$ ); $\rho_b$  为土壤容重( $1\ 080.00\ kg/m^3$ ); $T$  为冲刷时间(h)。

数据处理用 Origin Pro 2016 软件进行统计分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 DEM 数据精度验证

采用 3 种不同插值方法(IDW, OK, LPI), 分别对试验前后高程点云数据进行插值分析,依据公式(1)、公式(2)计算得到不同时期 DEM 数据精度(表 1)。RMSE 并不反映单个误差的大小,而从整体意义上描述地形参数与真实值的离散程度。由表 1 可知,在插值点数量足够多时(70 万),通过各种插值方法得到 DEM 数据精度都较高,且不同方法的插值精度相差不大。相比之下,采用普通克里金插值法和反距离权重法插值得到的数据精度较优,与李瑾杨等<sup>[19]</sup>的研究结果相似。本文选用反距离权重法进行 DEM 数据生成。

表 1 不同插值方法的统计分析比较

单位:m

插值方法	ME			RMSE		
	原始地形	耕作后地形	冲刷后地形	原始地形	耕作后地形	冲刷后地形
OK	$6.89 \times 10^{-5}$	$1.25 \times 10^{-7}$	$-6.18 \times 10^{-5}$	$6.67 \times 10^{-3}$	$1.24 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-2}$
LPI	$8.24 \times 10^{-5}$	$8.20 \times 10^{-6}$	$1.55 \times 10^{-5}$	$6.70 \times 10^{-3}$	$1.24 \times 10^{-2}$	$1.59 \times 10^{-2}$
IDW	$6.89 \times 10^{-5}$	$1.25 \times 10^{-7}$	$-6.18 \times 10^{-5}$	$6.67 \times 10^{-3}$	$1.24 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-2}$

注:OK 为普通克里金法;LPI 为局部多项式法;IDW 为反距离权重法。

采用反距离权重法插值生成 5 种不同格网大小(0.001~0.100 m)的 DEM 数据,通过 ArcGIS 10.4 提供的填挖方工具,计算出径流小区耕作前后的土壤流失体积,分析其与 DEM 分辨率的相关关系。由图 2 可知,随着 DEM 分辨率的减小,土壤流失体积逐渐增加,在 0.005 m 时趋于稳定,当格网大小减小至 0.001 m 时,土壤流失体积减小,同时考虑不同格网大小插值生成 DEM 数据所需时间,本文选用 0.005 m 的格网大小生成 DEM 数据。

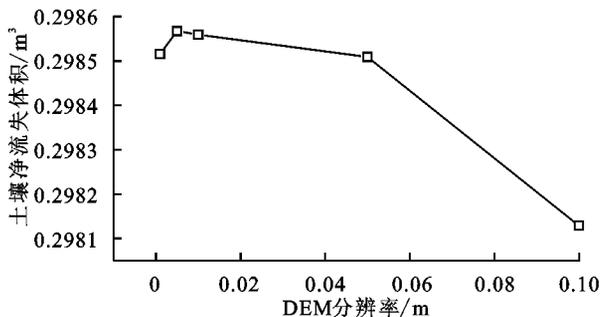


图 2 不同分辨率下土壤流失体积的变化趋势

### 3.2 耕作侵蚀对地形变化的影响

3.2.1 耕作强度与坡度对土壤流失体积的影响 本研究采用插钎法测定模拟耕作试验前后径流小区土壤净侵蚀区平均土层深度变化,从而验证近景摄影测量方法计算地形变化的准确度(表 2)。通过测量坡顶净侵蚀区土壤位移距离,估算经过模拟耕作试验后

不同坡度、不同耕作强度条件下土壤净流失体积。经过模拟耕作试验,采用两种方法计算得出的土壤净流失体积结果相近,由此表明采用摄影测量方法的计算结果可信。

相较于传统测量计算方法,新方法克服了传统计算方法中人为因素对地形扰动的影响,同时,传统放水冲刷试验中主要通过收集径流泥沙样品,进而推算整个径流小区的土壤侵蚀体积及土壤侵蚀速率,但该方法受制于收集泥沙浓度不均匀,泥沙整体称重困难等不足,因此采用本方法能够使监测过程更高效,更省时省力。

由表 2 和图 3 可知,经过人工模拟耕作试验后,随着耕作强度和坡度的增加,不同坡位土层深度变化逐渐增大,即土壤净流失体积分别与坡度和耕作强度成正相关关系,与此同时,坡顶处土壤向坡脚方向位移距离逐渐增大,土壤净流失体积也随之增加。当坡度为  $5^\circ$  时,经过 5, 10, 15 次耕作后土壤净流失体积分别为 0.10, 0.11, 0.14  $m^3$ , 当坡度增加为  $10^\circ$  时,经过 5, 10, 15 次耕作后土壤净流失体积分别为 0.13, 0.25, 0.36  $m^3$ , 当坡度增加为  $20^\circ$  时,经过 5, 10, 15 次耕作后土壤净流失体积分别为 0.15, 0.30, 0.42  $m^3$ 。农民单次耕作下土壤位移量大致相等,但随着耕作次数的增加,土壤净流失体积并未随之呈线性趋势增

大,造成这一现象的主要原因可能是由于本试验中不同小区是由不同农民耕作,不同个体在耕作过程中存

在耕作力气大小差异,导致土壤净流失体积未呈现显著的线性增加趋势。

表 2 不同方法推算耕作侵蚀土壤流失体积结果验证

坡度/ (°)	耕作 强度/次	原始土层 深度/m	耕作后土层 深度/m	土壤位移 距离/m	插钎法测算土壤 净流失体积/m <sup>3</sup>	摄影测量土壤 净流失体积/m <sup>3</sup>
5	5	0.60	0.52	0.41	0.08	0.10
	10	0.54	0.43	0.33	0.09	0.11
	15	0.53	0.41	0.74	0.23	0.14
10	5	0.55	0.44	0.54	0.15	0.13
	10	0.56	0.42	0.74	0.26	0.25
	15	0.58	0.42	1.07	0.41	0.36
20	5	0.54	0.47	0.56	0.10	0.15
	10	0.53	0.38	0.85	0.33	0.30
	15	0.57	0.32	0.97	0.61	0.42

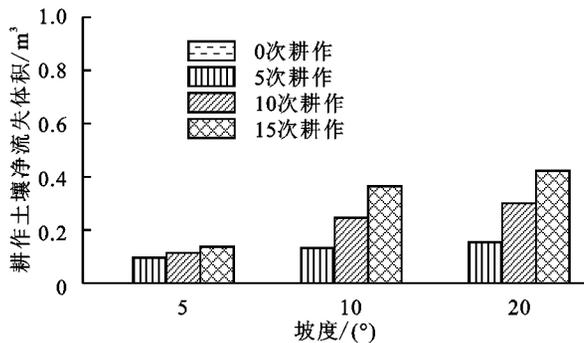


图 3 不同坡度和耕作强度对土壤净流失体积的影响

Su 等<sup>[10]</sup>在坡度为 12.6% 的线形坡上分别经过 5, 10, 15 次耕作后,土壤净流失体积分别为 0.52, 1.40, 1.85 m<sup>3</sup>,本研究中坡度为 10° 的线形坡,经过相同强度耕作后,土壤净流失体积分别为 0.13, 0.25, 0.36 m<sup>3</sup>。试验结果偏小的原因可能是由于本研究中径流小区的坡长和坡度较小,同时不同农民单次耕作的土壤位移量也不尽相同。

3.2.2 耕作强度与坡度对耕作侵蚀速率的影响 张建辉等<sup>[15]</sup>研究指出在坡长大体相等的情况下,耕作侵

蚀速率与坡度呈正相关关系。由公式(3)计算得出不同坡度和耕作强度下紫色土坡耕地耕作侵蚀速率(表 3), 5°, 10°, 20° 坡耕地平均耕作侵蚀速率分别为 69.85, 131.45, 155.34 t/(hm<sup>2</sup> · tillage pass), 坡耕地耕作侵蚀速率与坡度呈正相关关系。相同耕作坡度下,耕作侵蚀速率随耕作强度的增加而呈逐渐减小的趋势。坡度的大小决定了重力沿坡面方向的分力大小,直接影响耕作过程中土壤位移的大小,还影响耕作工具的土壤携带能力<sup>[20]</sup>。在本研究中坡度的变化主要由短时强烈耕作造成的坡形变化和地形坡度整体增加两方面造成。在地形坡度相同的条件下,由于短时间内经过人为多次重复耕作,坡耕地顶部耕作层土壤被侵蚀,向坡脚搬运堆积,从而坡形逐渐变缓<sup>[9]</sup>,因此耕作侵蚀速率逐渐减小,而在相同耕作强度条件下,虽然经过多次耕作,坡形有所变缓,但是相较于强烈耕作造成的坡形变缓,地形坡度增大更加明显,导致了耕作侵蚀速率呈增大趋势。本研究结果与苏正安等<sup>[9]</sup>在线形坡不同耕作强度条件下的研究结果相近。

表 3 不同坡度条件下土壤耕作侵蚀速率

坡度/ (°)	耕作 强度/次	土壤净流 失体积/m <sup>3</sup>	面积/m <sup>2</sup>	土壤容重/ (kg · m <sup>-3</sup> )	耕作侵蚀速率/ (t · hm <sup>-2</sup> · tillage pass <sup>-1</sup> )	平均耕作侵蚀速率/ (t · hm <sup>-2</sup> · tillage pass <sup>-1</sup> )	变异 系数/%
5	5	0.10	25.00	1311.00	100.79	69.85	39.19
	10	0.11	25.00	1311.00	59.80		
	15	0.14	25.00	1311.00	48.94		
10	5	0.13	25.00	1311.00	138.24	131.45	4.50
	10	0.25	25.00	1311.00	128.72		
	15	0.36	25.00	1311.00	127.39		
20	5	0.15	25.00	1311.00	160.95	155.34	4.47
	10	0.30	25.00	1311.00	157.49		
	15	0.42	25.00	1311.00	147.58		

### 3.3 水力侵蚀对地形变化的影响

3.3.1 耕作强度与坡度对土壤流失体积的影响 通过插钎法测定放水冲刷试验前后径流小区土壤平均土层深度变化,估算放水冲刷试验中不同坡度、不同耕作强度条件下土壤净流失体积,与采用近景摄影测量方法的

计算结果进行对比分析。由表 4 可知,在 3 种坡度条件下,采用插钎法和摄影测量法计算得出的土壤净流失体积误差范围分别是 ±0.1, ±0.3, ±0.1 m<sup>3</sup>,除坡度为 10°,经过 10 次强度耕作后的土壤净流失体积相差略大外,其他条件下两种方法得出的土壤流失体积误差值均

在 $\pm 0.1 \text{ m}^3$  范围内,采用不同方法计算得出的土壤流失体积与水力侵蚀速率差异不显著。

由此可见,采用近景摄影测量方法计算土壤侵蚀速率较为可靠,且相较于传统人工测量计算方法,测定时间更短,效率更高。以往研究中多采用径流桶完全收集、烘干、称重试验过程中所产生的径流泥沙,或

者使用径流瓶收集少量泥沙样品,以此推算整个径流小区土壤流失体积,但以上方法在野外实际操作过程中存在因泥沙含量大不能完全收集称重,样品采集不均匀不能反应真实情况等,导致推算土壤流失体积不可靠,而采用本方法能够克服以上缺点,使计算结果更加可信。

表 4 不同方法推算水力侵蚀土壤流失体积结果验证

坡度/ (°)	耕作 强度/次	冲刷后坡面平均 下降高度/m	小区 面积/ $\text{m}^2$	插钎法测算土壤 净流失体积/ $\text{m}^3$	摄影测量土壤 净流失体积/ $\text{m}^3$	误差 范围/ $\text{m}^3$
5	0	0.02	25.00	0.46	0.47	$\pm 0.1$
	5	0.01	25.00	0.30	0.37	
	10	0.03	25.00	0.83	0.73	
	15	0.05	25.00	1.25	1.25	
10	0	0.03	25.00	0.81	0.84	$\pm 0.3$
	5	0.04	25.00	1.06	0.73	
	10	0.05	25.00	1.13	1.20	
	15	0.06	25.00	1.54	1.62	
20	0	0.04	25.00	0.93	1.08	$\pm 0.1$
	5	0.05	25.00	1.13	1.13	
	10	0.07	25.00	1.86	1.76	
	15	0.11	25.00	2.76	2.61	

通过计算耕作侵蚀和水力侵蚀交互作用下的土壤流失体积,模拟 5,10,15 年内,水力侵蚀对坡耕地地形演变的影响(图 4)。在 3 种坡度下,随着放水冲刷时间的增加,无耕作位移小区的土壤流失体积随时间推移呈线性增加趋势,而发生耕作位移小区的土壤流失体积呈现先急后缓的增加趋势。造成这一现象的主要原因可能是无耕作位移小区的土壤质地、容重分布均一,在坡度、流量一定的情况下,土壤流失体积随冲刷时间呈线性增加,而经过不同强度耕作后发生土壤位移的小区,土壤分布发生改变,坡上部土壤浅薄,下部土壤厚重,坡形发生变化具有夷平趋势,且在冲刷过程的后半段,土壤处于过饱和状态,易出现侵蚀沟侧边土壤突然坍塌的现象,造成土壤流失体积的突然增大。

在不同坡度上,随着耕作次数的增加,土壤流失体积不断累积,且土壤流失体积随坡度的增加不断增大。随着坡度的增加,土壤自身重力和水流冲刷力沿坡面方向的分力之和逐渐增大,导致土壤易发生位移,土壤流失体积增大。

在 $5^\circ$ 和 $10^\circ$ 的缓坡上,经过 5 次耕作后冲刷土壤流失体积略小于无耕作位移小区的土壤流失体积,而在 $20^\circ$ 的陡坡上,经过 5 次顺坡耕作后冲刷土壤流失体积略大于无耕作位移小区的土壤流失体积。造成这一现象的主要原因可能是由于在 $5^\circ$ 和 $10^\circ$ 的缓坡上,经过 5 次耕作后,相较于无耕作位移小区,坡面出现了显著的夷平化趋势,坡脚部堆积的土壤对坡面径流具有阻碍作用,导致其土壤流失体积减小。在 $20^\circ$ 陡坡上,虽然经过多次耕作之后坡脚堆积了大量土壤,并能够在一定程度上减缓坡面径流的冲刷作用,但由于整个坡面的坡度较

大,坡面径流的势能仍然较大,径流冲刷能力较强,且坡脚处堆积的土体没有经过长期的固结作用,抗蚀抗冲性较差,致使在 $20^\circ$ 坡度条件下,无耕作位移小区和经 5 次顺坡耕作小区的土壤流失量差异不显著。

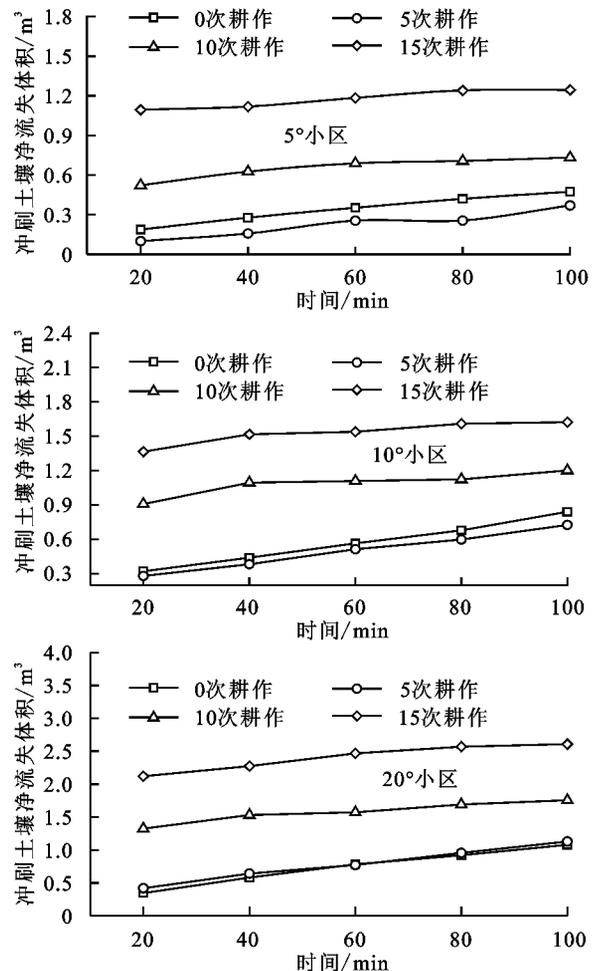


图 4 水力侵蚀对土壤流失体积的影响

3.3.2 耕作强度与坡度对水力侵蚀速率的影响 由公式(4)计算得出,不同坡度和不同耕作年限条件下,紫色土坡耕地水力侵蚀速率(表 5)。坡度为 5°,10°,20°的小区平均水力侵蚀速率分别为 1 892.52,2 961.76,4 405.93 t/(hm<sup>2</sup>·h),水力侵蚀速率随坡度的增加而增大。由图 5 可知,在相同坡度条件下,无耕作位移的线形坡耕地经过放水冲刷后,水力侵蚀速率略大于经过 5 次耕作后的坡耕地水力侵蚀速率,而在模拟强烈耕作位移的坡耕地上,水力侵蚀速率随耕作强度的增加而逐渐增大。由公式(4)可知,水力侵蚀速率的大小主要取决于冲刷后土壤流失

体积和土壤容重。紫色土坡耕地经过多次人工耕作后基本维持在 1 080.00 kg/m<sup>3</sup>,水力侵蚀速率的大小主要取决于经过多年冲刷后土壤流失的体积。经过 5,10,15 次耕作后的紫色土坡耕地,土壤流失体积不断累积,造成水力侵蚀速率不断增大。

以往研究将发生在坡耕地上的水力侵蚀和耕作侵蚀分开进行考虑<sup>[21]</sup>,而本文通过在同一坡耕地径流小区上轮流进行模拟耕作试验和放水冲刷试验,研究了耕作侵蚀和水力侵蚀交互作用下的土壤侵蚀过程,结果表明耕作侵蚀对水力侵蚀具有一定的加速作用。

表 5 不同坡度条件下土壤水力侵蚀速率

坡度/ (°)	耕作 强度/次	土壤净流 失体积/m <sup>3</sup>	容重/ (kg·m <sup>-3</sup> )	系数	面积/ m <sup>2</sup>	水力侵蚀速率/ (t·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	平均水力侵蚀速率/ (t·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	变异 系数/%
5	0	0.47	1311.00	10.00	25.00	1489.13	1892.52	51.22
	5	0.37	1080.00	10.00	25.00	957.27		
	10	0.73	1080.00	10.00	25.00	1896.43		
	15	1.25	1080.00	10.00	25.00	3227.23		
10	0	0.84	1311.00	10.00	25.00	2644.25	2961.76	32.88
	5	0.73	1080.00	10.00	25.00	1880.43		
	10	1.20	1080.00	10.00	25.00	3114.84		
	15	1.62	1080.00	10.00	25.00	4207.51		
20	0	1.08	1311.00	10.00	25.00	3991.64	4405.93	38.84
	5	1.13	1080.00	10.00	25.00	2923.53		
	10	1.76	1080.00	10.00	25.00	4549.27		
	15	2.61	1080.00	10.00	25.00	6759.28		

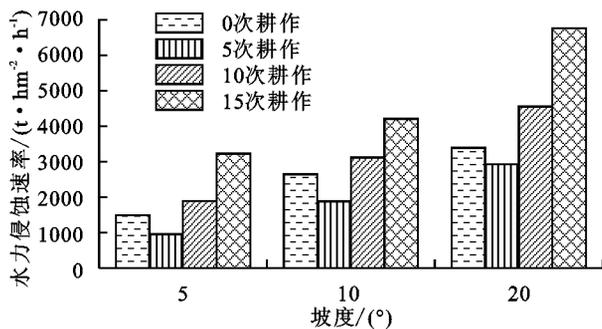


图 5 水力侵蚀速率随坡度和耕作强度的变化

### 4 结论

(1)采用无人机摄影测量技术,生成耕作试验及冲刷试验前后高精度地形数据,能够快速准确计算耕作侵蚀和水力侵蚀过程中土壤流失体积,进而推算土壤侵蚀速率。

(2)在 5°,10°,20°条件下,紫色土坡耕地耕作侵蚀速率分别为 69.85,131.45,155.34 t/(hm<sup>2</sup>·tillage pass),耕作侵蚀速率与坡度呈正相关关系,随着耕作次数的增加,坡耕地地形具有夷平化趋势,耕作侵蚀速率呈现逐渐降低的趋势。

(3)在 5°,10°,20°条件下,紫色土坡耕地水力侵蚀速率分别为 1 892.52,2 961.76,4 405.93 t/(hm<sup>2</sup>·h),水力

侵蚀速率与坡度正相关,耕作侵蚀对水力侵蚀有一定的促进作用,随着耕作强度的增加,水力侵蚀速率呈逐渐增加的趋势。

#### 参考文献:

- [1] 苏正安,张建辉,聂小军. 紫色土坡耕地土壤物理性质空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. 农业工程学报,2009,25(5):54-60.
- [2] 周萍,文安邦,严冬春,等. 紫色土坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤颗粒组成及分形特征[J]. 水土保持研究,2017,24(2):84-88.
- [3] 张加琼,杨明义,刘章,等. 耕作侵蚀研究述评[J]. 中国水土保持科学,2016,14(1):144-150.
- [4] Wang B, Zheng F L, Roemkens M J M, et al. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences [J]. Geomorphology, 2013, 187: 1-10.
- [5] Su Z A, Zhang J H, Xiong D H, et al. Assessment of soil erosion by compensatory hoeing tillage in a purple soil [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(1): 59-66.
- [6] 苏正安,李艳,熊东红,等. 龙门山地震带坡耕地土壤侵蚀对有机碳迁移的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(3):118-124.
- [7] 苏正安,张建辉,周维. 川中丘陵区耕作侵蚀对土壤侵蚀贡献的定量研究[J]. 山地学报,2006,24(增刊 10):64-70.