

# 地表糙度测定方法研究

张娜娜<sup>1</sup>, 王兵<sup>1,2</sup>, 张宝琦<sup>1</sup>, 李永宁<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学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;

2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 地表微地形测量是地表粗糙度定量化的基础,对地表形态动态监测和土壤侵蚀过程相关研究具有重要意义。采用链条法、照相机法和无人机法,选取常规人工降雨土槽和野外径流小区,设置裸地和植物根系2个处理,分别测定其地表糙度。结果表明:(1)链条法、照相机法和无人机法测定的平均弯曲性指数分别为0.257,0.219,0.248,与标件实际平均弯曲性指数0.242偏差小于 $<10\%$ ;其中链条法测定的弯曲性指数整体偏大(6.2%),照相机法测定的弯曲性指数整体偏小(-9.5%),无人机法测定的弯曲性指数略有偏大,但误差仅为2.5%。(2)裸地土槽细沟较深,链条法和照相机法测定结果与实际不符,无人机法测定结果与实际较为一致,链条法和照相机法相对无人机法均偏小了50.0%和40.3%;有根系土槽链条法测定结果与实际不符,照相机法和无人机法测定结果与实际较为一致,链条法相对于照相机法和无人机法均偏小了48.2%和57.8%。(3)受地形因素限制,照相机法无法测定径流小区地表糙度;对于裸地和有根系小区,无人机法测定结果与实际较为相符,而链条法测定结果与地表起伏不一致,链条法相对于无人机法测定的地表弯曲性指数分别偏大了28.6%和24.8%。总体而言,立体摄影测量能有效地反映地表糙度,但受拍摄高度和地形因素的限制,照相机法测定结果会存在低估或使用受限,无人机法测定结果相对稳定;受人为操作和本身测定过程误差的影响,链条法测定结果偏差相对较大,但对于立体摄影测量无法测定的立地环境,链条法仍可作为地表糙度测量的有效方法。

**关键词:** 地表糙度; 立体摄影测量法; 链条法; 照相机法; 无人机法

中图分类号:S157;P208

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0135-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.020

## Study on Determination Method of Surface Roughness

ZHANG Nana<sup>1</sup>, WANG Bing<sup>1,2</sup>, ZHANG Baoqi<sup>1</sup>, LI Yongning<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

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

**Abstract:** Surface microtopography measurement is the basis of surface roughness quantification, which is of great significance to the dynamic monitoring of surface morphology and the study of soil erosion process. This research adopted the chain method, cameras and unmanned aerial vehicle (uav) method, selected the conventional artificial rainfall soil bin and field runoff plots, set up the bare land and two processing plant roots respectively, to determine the surface roughness. The results showed that: (1) The average curvature indexes determined by the chain method, cameras and uav method were 0.257, 0.219 and 0.248, respectively, with the average actual bending index deviation was less than  $0.242 < 10\%$ . Among them, the bending index measured by the chain method was relatively large as a whole (6.2%), the bending index measured by the camera method was relatively small as a whole (-9.5%), and the bending index measured by the uav method was slightly large, but the error was only 2.5%. (2) The groove of bare soil was deep, and the measured results of chain method and camera method were inconsistent with the reality. The measured results of uav method were relatively consistent with the reality, and the chain method and camera method were slightly smaller than uav method by 50.0% and 40.3% respectively. The results of the chain method with root soil groove were not consistent with the actual conditions, and the results of the camera method and the uav method were relatively consistent with the actual conditions. The chain method was 48.2% and 57.8% respectively smaller than the camera method and the uav method. (3) Limited by the topographic factors, the

收稿日期:2019-06-12

资助项目:国家自然科学基金项目(41771555,41530858);国家重点研发计划项目(2016YFC0501603)

第一作者:张娜娜(1993-),女,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:18394590508@163.com

通信作者:王兵(1982-),男,陕西武功人,博士,副研究员,主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail:bwang@ms.iswc.ac.cn

camera method could not determine the surface roughness of runoff plot. For bare land and rooted plots, the measured results of uav were relatively consistent with the actual situation, while the measured results of chain method were inconsistent with the ups and downs of the surface. The surface bending index measured by chain method was slightly higher than that by uav method by 28.6% and 24.8%, respectively. In general, stereoscopic photogrammetry could effectively reflect surface roughness. However, due to the limitations of shooting height and terrain factors, the measurement results of camera method might be underestimated or limited, and the measurement results of uav method were relatively stable. Due to the influence of human operation and the error of the measurement process, the error of the measurement results of the chain method was relatively large.

**Keywords:** surface roughness; stereophotogrammetry; chain method; Method of camera; Unmanned aerial vehicle method

地表糙度是指在一定面积的地块上,由土块、团聚体、作物种植和人为管理或降雨击溅、径流冲刷等自然和人为因素共同作用而形成的凸凹不平的一种地表现象<sup>[1-3]</sup>。地表糙度可显著影响土壤侵蚀过程,也是土壤侵蚀预报模型重要的特征参数。大量研究<sup>[4-6]</sup>表明,地表糙度具有削减侵蚀的作用,主要是在水流运动方向上由于地形的起伏或土块的凹凸变化,增加了坡面的径流流动阻力,进而降低了水流速度或增长了径流路径,减小了径流前进方向上的流速梯度。目前,地表粗糙度定量化常用的方法主要有统计学指数<sup>[7-10]</sup>和地统计学指数<sup>[2,11-13]</sup>等,测定方式主要分为接触式和非接触式两大类<sup>[2,14-15]</sup>,接触式方法中最常用的有测针法<sup>[16]</sup>和链条法<sup>[17]</sup>,非接触式方法主要有激光扫描仪法<sup>[18]</sup>和立体摄影测量法<sup>[19-20]</sup>。其中测针法和链条法测量方便操作简单,但对地表微地形的破坏比较严重,导致测定结果的实用性不强,尤其测针法,在地表坡度较大时难以实现;激光扫描法<sup>[18]</sup>是通过激光扫描仪测定地表高程数据,借助 GIS 建立地表微地形模型 DEM(栅格大小为 0.002 m),再根据 DEM 的标准差结合相应的计算公式获取地表糙度值或由 GIS 中的“Surface Length”命令获取表面线长度,再结合相应公式获取地表糙度值。该方法是一种高效、易用的地表糙度测定方法,但是该方法存在盲点数据,需要多位置扫描后进行数据拼接等处理,地形比较大的情况下不宜使用,并且仪器成本较高不易普及<sup>[21]</sup>。照相机法是立体摄影测量技术常用的一种方法,具有不破坏地表、影像信息量丰富、测量精度高、容易处理等优点<sup>[22-23]</sup>,但受到拍摄角度和地形因素的限制,测定结果存在偏差甚至使用受限。无人机法则可克服照相机法上述不足,使得地表糙度的测量更接近地表实际情况,加之近年来随着无人机相关技术的普及,无人机法已成为地表糙度测定的常用方法,但是有关无人机测定地表糙度的研究颇少。基

于此,本研究采用链条法、照相机法和无人机法 3 种常用土壤糙度测定方法,选取常规人工降雨土槽和野外径流小区,设置裸地和植物根系 2 个处理,测定其地表弯曲性指数,通过与地表实际特征进行比对,评估链条法、照相机法和无人机法测定土壤糙度的效果及其造成偏差的原因,以期土壤侵蚀相关研究提供借鉴。

## 1 试验设计与研究方法

### 1.1 试验设计与处理

本研究是在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室和安塞方家河流域完成,人工土槽试验是在 2018 年 4 月初填装土槽并种植白羊草,2018 年 10 月基于冲刷试验(冲刷流量 1.5 L/s,冲刷历时 5 min)后进行,2018 年 7 月修建野外径流小区并在 8 月中旬进行试验。分别采用链条法、照相机法和无人机法测定不同立地条件的地表糙度,地表糙度用表面弯曲性指数表征。测定对象为降雨或坡面流冲刷后的裸土样地和有根系样地,基于常规模拟降雨试验和野外径流泥沙观测试验,选择人工土槽(长×宽×深为 2.0 m×0.5 m×0.5 m)和野外径流小区(裸地:长×宽为 5.800 m×2.750 m;根系小区:长×宽为 6.300 m×3.000 m)进行地表糙度测定。对于人工土槽(坡度为 15°),分别设有裸地和根系 2 个处理,通过对其进行放水冲刷模拟土壤侵蚀过程,随后测定其地表糙度;对于野外径流小区,同样设置裸地和根系 2 个处理,并在雨季结束后测定其地表糙度。同时,设置不同数量标件梯度,采用链条法、照相机法和无人机法进行地表糙度测定,通过对比地表糙度测定值与计算值(依据标件尺寸计算)间的差异,评估上述 3 种方法测定效果。具体处理及地表特征信息见表 1。

### 1.2 地表糙度测量过程

1.2.1 链条法 将选定的测定区域按照一定间距进行地表轮廓线测定。对于长方体标件,由于其外观比较规整,沿标件宽度方向测定地表轮廓线,共测定 6 组,每种标件数量处理下测定方式相同;对于人工土

槽,用链条沿坡面方向测定地表轮廓线,共测定 40 组轮廓线,每组轮廓线间隔 1 cm,裸地土槽和根系土槽测定方式相同;对于野外径流小区,由于坡面较长,沿坡面方向测定误差相对较大,因此用链条在垂直于坡面方向横向测定地表轮廓线,坡上、坡中和坡下分别测定 100 组轮廓线,每组间隔 1 cm,共计测定 300 组轮廓线;裸地小区和根系小区测定方式相同。

表 1 各测定区域的尺度

测定对象	处理	测定区域 (长×宽)/m	测定方法
标件	1 个标件 <sup>①</sup>	0.515×0.515	链条法
	2 个标件		照相机法
	3 个标件		无人机法
	5 个标件		
人工土槽	裸土样地	1.820×0.400	链条法
	根系样地	1.800×0.400	照相机法
			无人机法
野外径流小区	裸土样地	5.550×2.500	链条法
	根系样地	6.100×2.800	无人机法 <sup>②</sup>

注:①标件长×宽×高为 0.50 m×0.04 m×0.022 m,材质为木头;②受地形因素限制,野外径流小区无法采用照相机法。

1.2.2 照相机法和无人机法 在摄影区四周做明显的标记(测量各点之间的距离建立相对坐标系),分别采用照相机(相机型号:Canon Eos 80D,焦距:50 mm,分辨率:6 000×4 000)和无人机(大疆精灵 4 Pro V 2.0,分辨率 5 472×3 078)对测定区域进行多角度拍摄其全景(简称照相机法和无人机法),基于立体摄影测量对其进行处理,用以获取地表糙度。在摄影测量过程中,应注意相机拍摄位置和光照因素以消除地表阴影产生的影响。对于标件,照相机和无人机拍摄高度分别为 1.50,6 m,对于土槽,分别为 2.5,6 m,对于野外径流小区,照相机因地形限制无法拍摄全景,仅用无人机进行拍摄,拍摄高度为 10~12 m。选择不同方向拍摄的 16 张照片导入 Photoscan 软件中,根据实际距离输入标记点坐标软件运行进行拼接,可得到摄影区的 DEM。

### 1.3 地表糙度的计算

地表糙度用弯曲性指数表征。对于链条法,弯曲性指数采用公式(1)进行计算<sup>[25]</sup>。

$$T = (L - L_0) / L_0 \quad (1)$$

式中: $L$  为地表轮廓线长度(cm); $L_0$  为地表轮廓线的水平长度(cm); $T$  为弯曲性指数。

照相机法和无人机法获取的 DEM 是一个面,无法与链条法测定结果进行比较。因此将生成的 DEM 导入 ArcGIS10.5 裁剪出测量区域,建立线图层画出链条法测量过的每条线,利用 ArcGIS 软件中的“Surface Length”命令得到地表轮廓线的长度<sup>[26-27]</sup>,

通过公式(1)计算出地表弯曲性指数,从而通过对链条法、照相机法和无人机法测定的弯曲性指数,以评估 3 种方法测定地表糙度的效果。

## 2 结果与分析

### 2.1 标准件糙度测量

链条法、照相机法和无人机法测定的标准件糙度均与真实计算值存在一定偏差(图 1)。相对于标件不同梯度计算的真实弯曲性指数(变化范围为 0.088~0.440),链条法测定的标件弯曲性指数与计算的真实弯曲性指数差值为-0.017~0.042,照相机法为-0.036~-0.014,无人机法为-0.030~0.041(表 2)。此外,标件不同梯度下计算的真实弯曲性指数平均值为 0.242,链条法测定的标件弯曲性指数平均值为 0.257,较真实弯曲性指数高估了 6.2%;照相机法测定的标件弯曲性指数平均值为 0.219,较真实弯曲性指数低估了-9.5%;无人机法测定的标件弯曲性指数平均值为 0.248,较真实弯曲性指数高估了 2.5%。造成误差的原因可能是:一方面,由于链条在测定地表糙度时铁环间存在一定空隙,导致弯曲性指数偏大;另一方面,照相机拍摄过程中高度不够存在部分盲区,导致弯曲性指数偏小。总体而言,链条法、照相机法和无人机法测定的弯曲性指数相比于计算的真实弯曲性指数,其相对误差均 $<10\%$ ,其中无人机法相对误差较小。

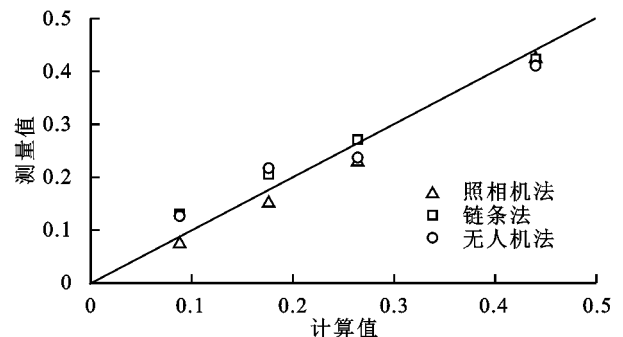


图 1 计算值与测量值之间的差异

### 2.2 人工模拟降雨土槽地表糙度测量

基于上述标件糙度测定结果,将链条法、照相机法和无人机法应用于小尺度地表糙度测量,结果表明,3 种方法测定的裸地小区和植被小区地表糙度均存在差异(图 2 和图 3)。对于裸地小区,冲刷后地表起伏较大,其中测定距离为 1~14,30~40 cm 区间内冲刷深度较深,起伏度较大(最大冲刷深度为 0.13 m);而在测定距离为 15~29 cm 区间内,冲刷深度较浅,起伏度较小。链条法在测定距离为 1~14,15~29,30~40 cm 区间内测定平均弯曲性指数分别为 0.170,0.188,0.150,照相机法平均弯曲性指数分别为 0.176,0.192,0.238,无人机法平均弯曲性指数分别为 0.343,0.268,0.404。无人机法测定结果更能表现出裸地小区这种“高一低一高”

的地表糙度变化趋势,而链条法和照相机法则与实际地表糙度变化不符。相对于无人机法,链条法和照相机法平均弯曲性指数分别减少了 50.0% 和 40.3%。对于植被小区,残留的植物地上部分和冲刷后裸露于地表的根系都在很大程度上影响着地表的糙度。链条法、照相机法和无人机法均能体现出根系小区不同区域地表糙度的变化情况,3 种方法弯曲性指数随测定距离表现出相似的变化趋势,但链条法测定的

平均弯曲性指数(0.057)明显低于照相机法(0.110)和无人机法(0.135),分别偏小了 48.2% 和 57.8%。在实际测定中,链条法遇到分蘖较多的根基或悬空的根系时,测得的弯曲性指数偏小(平均弯曲性指数为 0.057),这也在一定程度表明植被根系的存在对链条法的测定结果具有较大的影响。因此,本研究认为照相机法和无人机法均能有效表征植被根系小区地表起伏,与地表糙度实际情况更为一致。

表 2 标件的糙度值

梯度	链条法			无人机法		照相机法	
	计算值	测量值	偏差	测量值	偏差	测量值	偏差
1	0.088	0.130	0.042	0.127	0.039	0.074	-0.014
2	0.176	0.205	0.029	0.217	0.041	0.151	-0.025
3	0.264	0.271	0.007	0.237	-0.027	0.228	-0.036
5	0.440	0.423	-0.017	0.410	-0.030	0.424	-0.016
平均值	0.242	0.257	0.015	0.248	0.006	0.219	-0.023

(a) 裸地土槽正射影像

(b) 裸地土槽DEM

(c) 根系土槽正射影像

(d) 根系土槽DEM

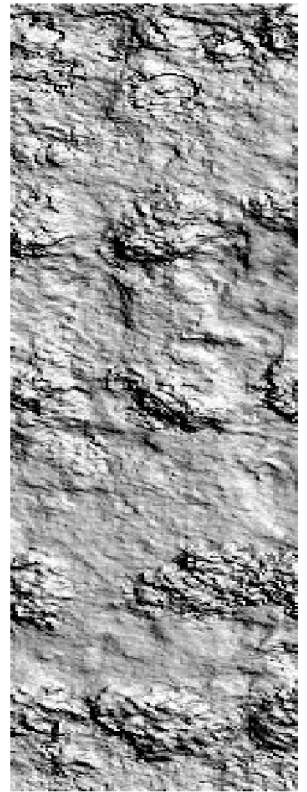
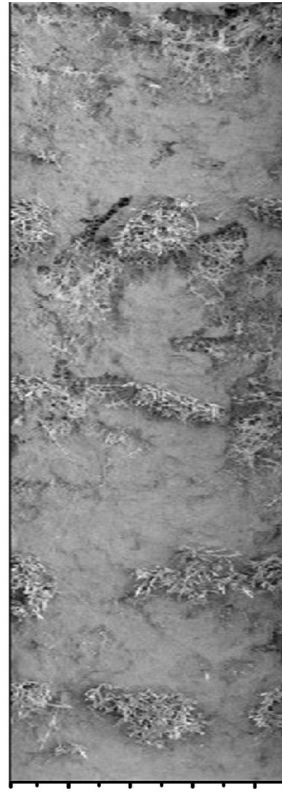
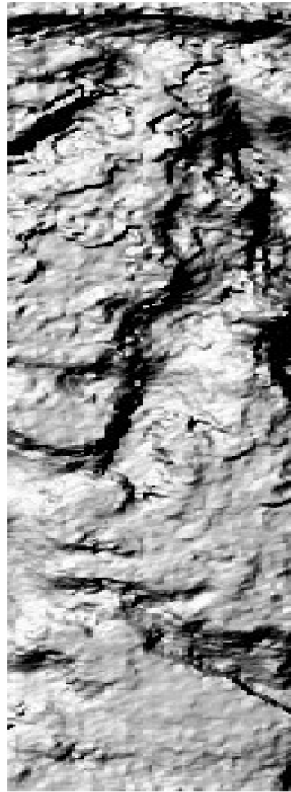
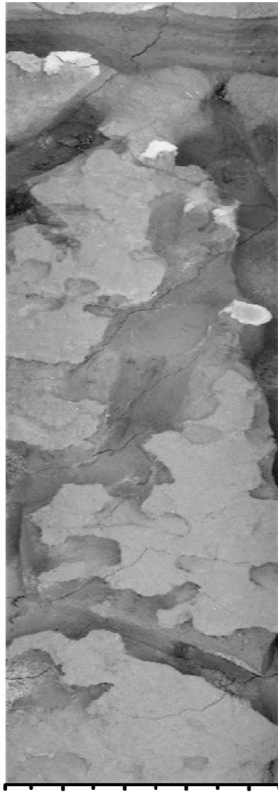


图 2 人工模拟降雨土槽裸地和根系处理正射影像及其相应的 DEM

### 2.3 野外径流小区地表糙度测量

野外径流小区是原位观测土壤侵蚀过程相关研究的常用方法,本研究中,照相机法无法拍摄到小区全景,不能进行拼接生成 DEM。因此,野外径流小区地表糙度的测量采用无人机法和链条法。裸地径流小区选定的 3 个测定区间分别为 0~100, 200~300, 455~555 cm。由图 4 和图 5 可知,在 0~100 cm 测定区间,地表起伏较大,且有较多的土块分布,土壤糙度较大;在 200~300

cm 测定区间,地表起伏相对较小,土块分布较少,土壤糙度较低;在 455~555 cm 测定区间,地表更为平坦,几乎没有散布的土壤颗粒,土壤糙度更低。无人机法在 3 个测定区间测得的平均弯曲性指数依次为 0.062, 0.026, 0.010, 基本符合上述地表糙度下降的变化趋势;链条法在 3 个测定区间平均弯曲性指数分别为 0.055, 0.035, 0.036, 相较于测定区间 200~300 cm, 弯曲性指数在测定区间为 455~555 cm 时并没有下降趋势,不符合地表实

际起伏变化情况。相对于无人机法,链条法测定的裸地小区平均弯曲性指数偏高了 28.6%。植被径流小区选定的 3 个测定区间分别为 0~100, 200~300, 510~610 cm。在 0~100, 510~610 cm 测定区间, 植物根系分布较少, 地表起伏较小, 土壤糙度较小; 而在 200~300 cm 测定区间, 植物根系分布比较稠密, 地上植物残留部分所占比重较大, 地表起伏度较高, 土壤糙度较大。无人机法在 3 个测定区间测定的平均弯曲性指数依次为 0.036, 0.079, 0.034, 基本符合上述地表糙度中间高、两边低的变化趋势; 链条法在 3 个测定区间平均弯曲性指数分别为 0.024, 0.080, 0.082, 尤其是在

510~610 cm 测定区间, 链条法测得的弯曲性指数显著高于无人机法(58.5%), 与实际地表不符, 很大程度是由于在该测定区间植物分布较为分散导致的, 而无人机法则不易受到这种情况的影响。此外, 在 200~300 cm 测定区间内, 虽然链条法(0.080)和无人机法(0.079)测定的平均弯曲性指数几乎相等, 但照片显示地表起伏度在 200~250, 251~300 cm 测定区间明显不同, 而链条法在 200~300 cm 测定区间内弯曲性指数总体平缓, 则无人机法更能反映地表的实际情况。相对于无人机法, 链条法测定的有根系小区平均弯曲性指数偏高了 24.8%。

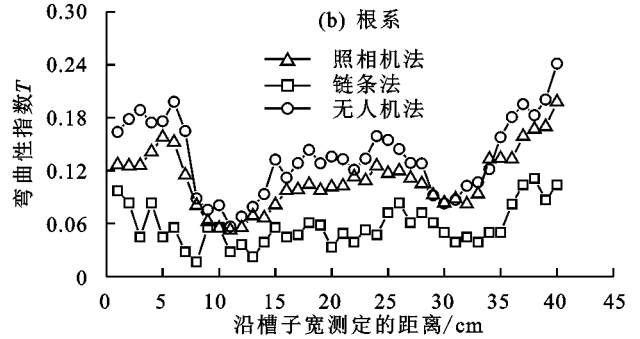
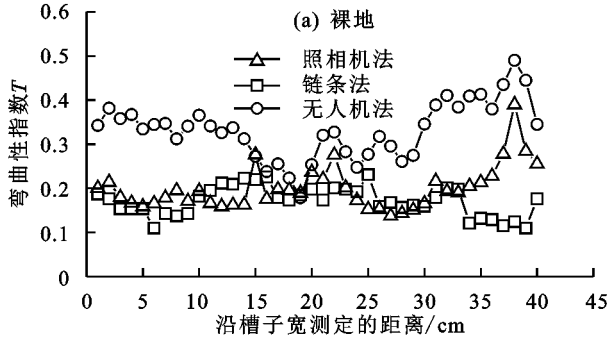


图 3 人工模拟降雨土槽裸地和根系处理地表糙度

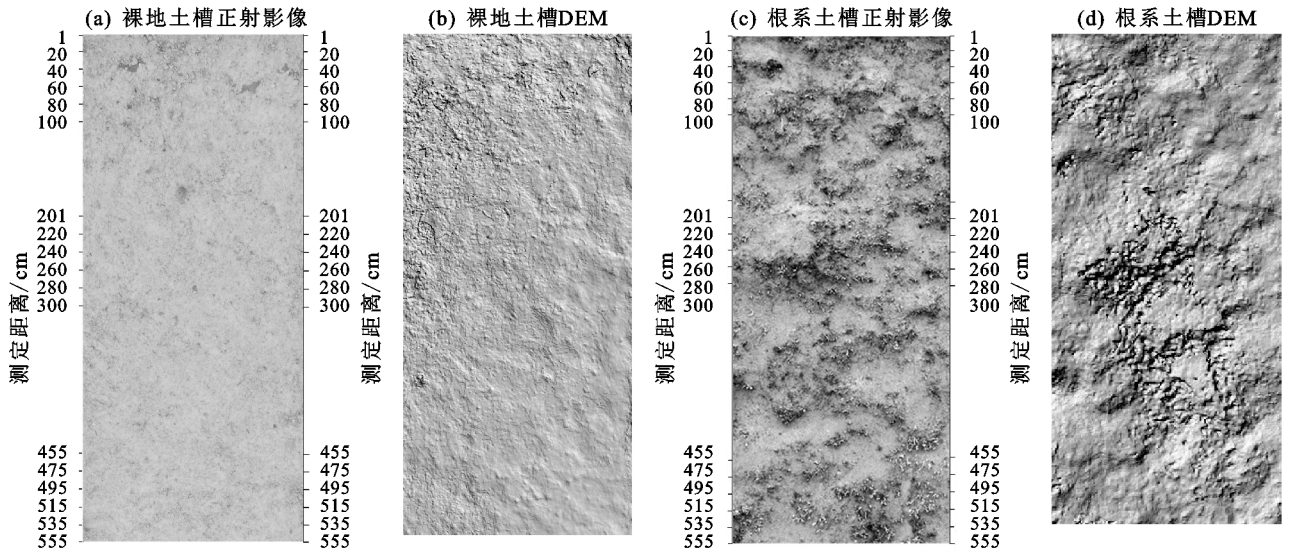


图 4 野外径流小区裸地和根系处理正射影像及其对应的 DEM

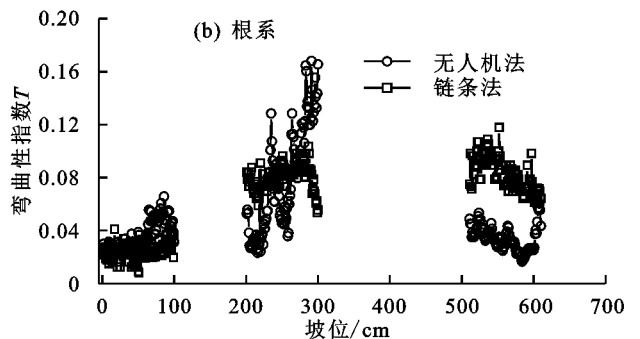
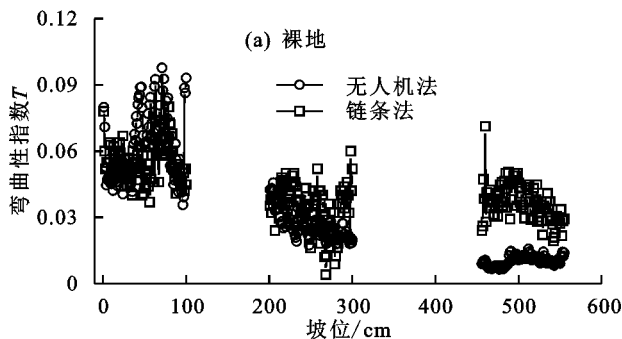


图 5 野外径流小区裸地和根系处理地表糙度

### 3 讨论

链条法、照相机法和无人机法是测定近地表糙度常

用方法<sup>[17,26-27]</sup>, 受测定对象或条件差异的影响, 上述 3 种方法测定的地表糙度值有所不同。本研究中, 标件尺寸总体比较规则, 链条法、照相机法和无人机法测定的弯

曲性指数总体差异不大,与实际计算的弯曲性指数偏差 $<10\%$ 。一方面,由于链条是由一系列铁环相扣而成,定型性能和受力性较差,且在测定糙度过程中需尽量贴紧标件表面折点,不易过度拉紧,铁环间存在空隙,而糙度测定结束后链条标记点长度的测量通常是将链条拉直进行测量,从而导致测定的地表轮廓线偏长,弯曲性指数偏大;另一方面,照相机和无人机均是基于 PhotoScan 生成的高精度 DEM 进行地表轮廓线提取,虽然照相机拍摄的照片精度高于无人机拍摄精度,但由于照相机拍摄高度有限,在标件排列较多的情况下,对地面凸起背面拍摄效果一般,使得多视角合成的立体摄影图片存在部分盲区或死角<sup>[28]</sup>;而无人机法则由于拍摄高度较高,盲区相对较少,甚至没有<sup>[29]</sup>,则生成的高精度 DEM 更能反映地表实际情况。

对于不同规格的裸地小区和根系小区,地表往往存在发育较好的细沟、较大的土块或团聚体、植物根基及其径流淘刷后悬空的根系,地表特征较为复杂。相对于链条法和照相法,无人机法测量地表糙度整体效果更好。链条经过植物根系分蘖时,链条测量的是根系表面的轮廓线长度,无法测得分蘖间的空隙;而经过裸露或悬空的植物根系时,根系的支撑使得链条并不能紧贴根系下方的土壤表面,这 2 种情况导致测得的地表轮廓线长度偏短,弯曲性指数偏小。当测定区间植物根系分布较为分散时,链条法测量过程中虽然比较容易接触到植物和土壤间的折点,但容易导致链条堆积或弯曲,造成测定的弯曲性指数偏大。此外,赵龙山等<sup>[27]</sup>研究结果也表明,链条法在测定地表轮廓线时受人为操作影响很大,链条往往是依照地表起伏自然放置,但在测定区域总有上下偏离,导致测定结果误差较大。照相机法主要受拍摄高度的影响,当地表起伏较大时其测定的弯曲性指数偏低,同时受小区规格影响和地形限制较大,本研究中由于照相机无法拍摄到径流小区全景,使得照片的重复覆盖率不够,导致不能采用 Photoscan 软件进行拼接构建地形 3 维模型进而生成 DEM,这也是照相机的另一个受限因素<sup>[28]</sup>。而无人机法测定的弯曲性指数基本都与地表实际起伏一致,结果比较稳定。

总体而言,链条法是测定地表糙度的经典方法,适用性较广,但使用过程中容易破坏地表,糙度的测定结果往往受到地形复杂程度和人为操作等多因素的影响,存在一定误差。照相机法在地表起伏不大时其糙度测定结果精度更高,而地表起伏过大时测定的糙度值偏低,适用性受拍摄区域地形和测定区域面积影响较大。无人机法测定的地表糙度更能反映地表实际起伏状况。

## 4 结论

(1)标件的尺寸比较规则,与实际计算结果相比,链条法测定的弯曲性指数整体偏大(6.2%),照相机

法测定的弯曲性指数整体偏小(-9.5%),无人机法测定的弯曲性指数略有偏大,但误差仅为 2.5%。

(2)土槽尺寸相对较小,链条法测定的弯曲性指数与实际地表起伏不一致,而且偏低;照相机法在裸地土槽测定的弯曲性指数偏低,在有根系土槽与实际地表起伏一致;无人机法测定的弯曲性指数则都比较符合地表起伏实际情况。

(3)野外径流小区尺寸较大,加上地形限制,照相机法无法使用。链条法测定的弯曲性指数与地表起伏不一致,且结果偏高;无人机法则与地表实际起伏比较一致。

(4)链条法受地表特征和小区尺寸的影响,测定结果受人为操作和链条本身影响存在误差,导致测定的弯曲性指数与实际不符;照相机法测定结果则主要受拍摄高度影响,地表高差较大时测定结果容易偏小,同时受地形影响使用受限;总体而言,无人机法测定的地表糙度更能反映地表实际起伏状况,而且结果比较稳定,但是,当地表有植被覆盖时使用受限。

### 参考文献:

- [1] 孙达,张妙仙,吴希媛,等.野外人工模拟降雨条件下荒草坡产流产沙试验研究[J].水土保持通报,2008,28(3):121-123.
- [2] 吴发启,郑子成.坡耕地地表糙度的量测与计算[J].水土保持通报,2005,25(5):71-74.
- [3] 王鹏飞,郑子成,张锡洲.玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):30-34.
- [4] 李陶陶.降雨过程中地表糙度与细沟侵蚀的关系研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [5] 李清溪,丁文峰,朱秀迪,等.雨强和地表糙度对坡面微地形及侵蚀的影响[J].长江科学院院报,2019,36(1):45-51.
- [6] 郑子成,何淑勤,吴发启.降雨条件下地表糙度对片蚀的影响及其变化[J].农业工程学报,2010,26(1):139-145.
- [7] 郑子成,何淑勤,吴发启.侵蚀过程中地表糙度变化特征的研究[J].水土保持学报,2003,17(5):166-168.
- [8] García M R, Diaz A M C, Tarquis A A M, et al. Shadow analysis of soil surface roughness compared to the chain set method and direct measurement of micro-relief[J]. Biogeosciences, 2010, 7(1):2477-2487.
- [9] 梁心蓝,赵龙山,吴佳,等.模拟条件下不同耕作措施和雨强对地表糙度的影响[J].中国农业科学,2014,47(24):4840-4849.
- [10] Huang C, Gascuel-Oudou C, Cros-Cayot S. Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion [J]. Catena, 2002, 46:177-188.
- [11] Croft H, Anderson K, Kuhn N J. Characterizing soil surface roughness using a combined structural and spectral approach [J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60(3):431-442.

关( $P < 0.01$ ), 渠道水深和底宽的交互作用对累积入渗量的影响同样呈极显著相关( $P < 0.01$ )。

本文只针对渠道水深、底宽和边坡系数 3 个因素对渠道入渗速率及累积入渗量的影响进行分析, 此外应开展土壤质地、容重、初始含水率、湿周等因素的交互影响分析, 今后将在多因素互交影响的前提下, 开发新的渠道渗漏损失计算公式。

#### 参考文献:

- [1] 郭元裕主编. 农田水利学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 122-125.
- [2] 郭历华. 渠道防渗衬砌相关技术及其应用[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(4): 146-147.
- [3] 刘巍. 黑龙江省灌溉水利用效率时空分异规律及节水潜力研究[D]. 长春: 东北农业大学, 2017.
- [4] 李安国, 建功, 曲强. 渠道防渗工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 10-15.
- [5] 孙美, 毛晓敏, 陈剑. 渠道渗漏室内试验土壤水分运动数值模拟[C]// 中国农业工程学会. 纪念中国农业工程学会成立 30 周年暨中国农业工程学会 2009 年学术年会 (CSAE 2009). 山西 晋中: 山西农业大学, 2009: 1246-1251.
- [6] 孙美, 毛晓敏, 陈剑, 等. 夹砂层状土条件下渠道渗漏的室内试验和数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 33-38.
- [7] Phogat V, Malik R S, Kumar S. Modelling the effect of channel bed elevation on seepage and water table rise in a sand box filled with loamy soil [J]. Irrigation Science, 2009, 27(3): 191-200.
- [8] 付强, 李玥, 李天霄, 等. 渠道渗漏 HYDRUS 模拟验证及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 112-118.
- [9] 李红星. 基于点入渗参数计算土渠床渗漏损失的方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [10] 张勇勇. 垄沟灌溉土壤水分入渗模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
- [11] 李玥. 基于 HYDRUS 的渠道渗漏室内试验数值模拟及入渗模型建立[D]. 长春: 东北农业大学, 2018.
- [12] 郭向红, 孙西欢. 不同入渗水头条件下的 Green-Ampt 模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 64-68.
- [13] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 61-67.
- [14] 范严伟, 赵文举, 王昱. 入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(1): 65-70.
- [15] 王锐, 孙西欢等. 不同入渗水头条件下土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 45-49.
- [16] 中华人民共和国水利部. 渠道防渗工程技术规范 GB 50600-2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011: 92-104.
- [12] Vázquez E V, Vieira S R, Maria I C D, et al. Fractal dimension and geostatistical parameters for soil micro-relief as a function of cumulative precipitation [J]. Scientia Agricola, 2010, 67(1): 78-83.
- [13] 江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(3): 293-298.
- [14] 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 坡面水蚀过程中地表糙度的研究进展[J]. 节水灌溉, 2008(8): 8-11.
- [15] 朱良君, 张光辉. 地表微地形测量及定量化方法研究综述[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 114-122.
- [16] Burwell R E, Allmaras R R, Amemiya M. A Field measurement of total porosity and surface microrelief of soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(6): 697-700.
- [17] Ali S, 刘增文. 用链条法测定地表糙度[J]. 水土保持科技情报, 1995(1): 14-16.
- [18] Huang C, White I, Thwaite E G, et al. A Noncontact laser system for measuring soil surface topography [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(2): 350-355.
- [19] García M R, Requejo A S, Alonso A M T, et al. Shadow analysis: A method for measuring soil surface roughness [J]. Geoderma, 2008, 146(1/2): 201-208.
- [20] Jester W, Klik A. Soil surface roughness measurement: Methods, applicability, and surface representation [J]. Catena, 2005, 64: 174-192.
- [21] 张姣, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程的方法研究[J]. 水土保持通报, 2016, 31(6): 89-94.
- [22] 王贞志. 基于普通数码影像的近景摄影测量技术研究[J]. 电子技术与软件工程, 2017(20): 76.
- [23] 顾峰华, 高井祥, 仇春平. 近景摄影测量监测小变形体的误差分析与精度评定[J]. 矿山测量, 2005(2): 43-45, 48.
- [24] 刘朝辉. 小型无人机遥感平台在摄影测量中的应用[J]. 工程技术研究, 2017(6): 46-47.
- [25] Boiffin J. Structural degradation of the soil surface by the action of rainfall [D]. Paris, France: Institut National Agronomique Paris Grignon, 1984.
- [26] 任磊, 李光录, 杨晨辉, 等. 坡面微地形 DEM 最佳分辨率的选择方法[J]. 西北农林科技大学学报, 2015, 43(5): 129-142.
- [27] 赵龙山, 梁心蓝, 张青峰, 等. 基于 DEM 的黄土坡耕地地表糙度测定方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(4): 86-89.
- [28] 宋月君, 黄炎和, 杨洁, 等. 近景摄影测量在土壤侵蚀监测中的应用[J]. 测绘科学, 2016, 41(6): 80-83.
- [29] 杨超. 基于无人机高分数据的紫色土坡耕地微地貌演化过程研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2018.

(上接第 140 页)