

沟壁坡度对侵蚀沟三维重建误差的影响

甄怀才^{1,2}, 张兴义^{1,2}, 杨薇³, 乔宝玲^{1,2}, 徐金忠³, 谷思玉², 李浩¹

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081;

2.东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 3.黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150081)

摘要:以无人机为主体的天地一体化立体测量为地表精准快速测量提供了有利条件。无人机拍摄正射影像时,陡坡影响拍摄视角,可能对地表三维测量精度产生影响。选取发展大型切沟(BG)、稳定中型切沟(MG)和小型浅沟(SG),采用三维激光扫描(Terrestrial Laser Scanning, TLS)和无人机正射摄影(Structure from Motion, SfM)2种方法获取地表DSM(Digital Surface Model, 数字表面模型),并以TLS的DSM为基准,分析了坡度对SfM的DSM的高程误差的影响。结果表明:(1)高程误差均随沟壁坡度呈指数增加,拟合程度较好($P < 0.0001$, $R^2 > 0.80$),拐点出现在 60° 附近,坡度 $< 60^\circ$ 时高程误差变化幅度为 $0 \sim 10$ cm,坡度超过 60° 后高程误差急剧增大为 $10 \sim 60$ cm;(2)侵蚀沟愈活跃,其坡比愈大,高程误差占比愈集中在较大坡度的范围内。对于发育中切沟BG,约75%的高程误差量集中在 $15^\circ \sim 75^\circ$;对于趋于稳定的中型切沟MG,约66%的高程误差量集中在 $0 \sim 60^\circ$;而对于小型浅沟SG,约54%的高程误差量集中在 $0 \sim 40^\circ$ 。

关键词: 侵蚀沟; 无人机; 高程误差; 沟壁坡度; 数字表面模型; 三维重建

中图分类号: P231; S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0061-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.010

Influence of Gully Sidewall Slope Steepness on the Error of 3D Reconstruction in the Erosion Gully

ZHEN Huaicai^{1,2}, ZHANG Xingyi^{1,2}, YANG Wei³,

QIAO Baoling^{1,2}, XU Jinzhong³, GU Siyu², LI Hao¹

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences,*

Harbin 150081; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural

University, Harbin 150030; 3. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150081)

Abstract: The integrated stereo measurement of the sky and earth with UAV as the main body provides favorable conditions for the accurate and rapid measurement of the earth's surface. When the UAV takes an orthophoto, the steep slope affects the shooting angle, which may affect the accuracy of the three-dimensional measurement of the surface. In this study, three typical farmland gullies, which were active gully (BG), stable gully (MG) and ephemeral gully (SG), were chosen to investigate the effect gully bank slope gradients on SfM-DSM error. The surface DSM (digital surface model) was obtained by using three-dimensional laser scanning (TLS) and structure from motion (SfM) methods. The elevation error of slope to the DSM of SfM was analyzed based on the DSM of TLS. The results show that: (1) The elevation error increased exponentially with the slope of gully wall, and the fitting degree was good (P value was less than 0.0001, R^2 was greater than 0.80). The inflection point appeared near 60° , when the slope was less than 60° , the variation range of elevation error was $0 \sim 10$ cm, and when the slope was more than 60° , the elevation error increased sharply to $10 \sim 60$ cm. (2) The more active the gully was, the larger the slope ratio was, and the higher the proportion of elevation error was concentrated in the range of larger slope. For the developing gully of BG, about 75% of the elevation error was concentrated between 15° and 75° . For the stable gully of MG, about 66% of the elevation error was concentrated between 0 and 60° . For the ephemeral gully of SG, about 54% of the elevation error was concentrated between 0 and 40° .

收稿日期: 2019-10-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504200); 国家自然科学基金青年基金项目(41601289)

第一作者: 甄怀才(1990—), 男, 山东聊城人, 在读硕士研究生, 主要从事黑土水土保持研究。E-mail: zhenhuaicai@163.com

通信作者: 李浩(1986—), 男, 山东聊城人, 助理研究员, 博士, 主要从事黑土侵蚀和地理信息系统研究。E-mail: lihao@iga.ac.cn

Keywords: erosion ditch; unmanned aerial vehicles (UAVs); elevation error; gully wall slope; DSM; 3D reconstruction

东北黑土区是我国的粮食主产区之一,粮食产量占全国的近 1/5。然而由于长期过度垦殖和粗放经营,水土流失严重,尤其是沟道侵蚀^[1-2]。据第一次全国水利普查东北黑土区侵蚀沟道专项普查^[3],目前东北黑土区沟长大于 100 m 的侵蚀沟道 29.6 万条,损毁耕地面积约占该区域的 0.5%,极端区域可达 3%。沟道侵蚀不仅吞噬耕地,而且造成土地支离破碎,既不利于农业机械作业,也不利于土地管理,阻碍农业现代化进程。东北黑土区已成为我国水土流失的 3 个亟需治理的区域之一^[4]。因此,开展东北黑土区沟道侵蚀规律的研究,能够为该区域侵蚀沟预防与治理提供科学数据支撑,对保障国家粮食生产安全具有重要的意义。

基于准专业级消费级无人机航拍照片的三维重建方法(简称三维重建方法)能够快速、准确及高精度地获取侵蚀沟三维数字表面模型,已经在土壤侵蚀研究中得到了应用^[5-9]。在对侵蚀沟进行连续观测以获取不同时期 DSM 的基础上,进行空间叠加,能够得到沟道表面变化的空间分布,即不同位置的侵蚀—沉积变化,从而反演侵蚀外营力在沟道侵蚀过程中的作用^[10-11]。由于每期 DSM 均有一定的误差,因此 2 期的相减值也包含一定的误差,在剔除了误差量后的 DSM 差值的变化量可认为是“真侵蚀量”^[12-13]。

拍摄角度影响三维重建方法的误差^[14]。以常用的正射摄影方法为例,该方法采用单个相机,镜头垂直于地面拍摄照片,再通过光束平差法提取位置相邻照片中的同名地物点云,进而生成 DSM。因此地表坡度能够通过改变垂直向下镜头在地表的入射角度(图 1),从而影响同名地物点与 DSM 的生成,以及 DSM 的误差。在较为平缓区域(如汇水区)做三维重建时,地表坡度对 DSM 误差的影响较小。而侵蚀沟表面平均坡度(简称沟壁坡度)远大于汇水区,局部沟壁坡度能达到 60°以上,对测量误差影响较大,且误差的空间异质性增加。受地表布设验证点数量的限制,仅能用其计算平均值来表征整个区域的误差值,难以获取误差值的空间分布及随坡度的变化。此外,沟道坡比与侵蚀沟活跃程度有关,如浅沟或趋于稳定切沟坡比小于活跃期切沟,即处于不同发展阶段侵蚀沟的坡比不同,故三维重建方法的误差累积分布也有可能不同。因此,开展沟壁坡度对沟道三维重建过程 DSM 误差的空间分布影响的研究,有助于明确三维重建方法获取沟道侵蚀—沉积空间分布的准确程度,进而明晰侵蚀外营力的作用强度。

当前对无人机三维测量精度研究较少,尤其是对小区域地形起伏大的侵蚀沟道三维测量精度鲜有报道。本研究利用三维激光扫描地面测量精度高的优势,采用无人机正射摄影和地面 RTK (Real-Time Kinematic,载波相位差分技术)控制点的精准测量相结合的方法,获取基于照片三维重建的沟道数字表面模型(SfM-DSM),并以三维激光扫描仪获取的沟道三维模型(TLS-DSM)作为无误差的本底数据,比较分析沟壁坡度对三维重建侵蚀沟误差的影响,探讨不同类型(坡比)侵蚀沟下三维重建方法精度。

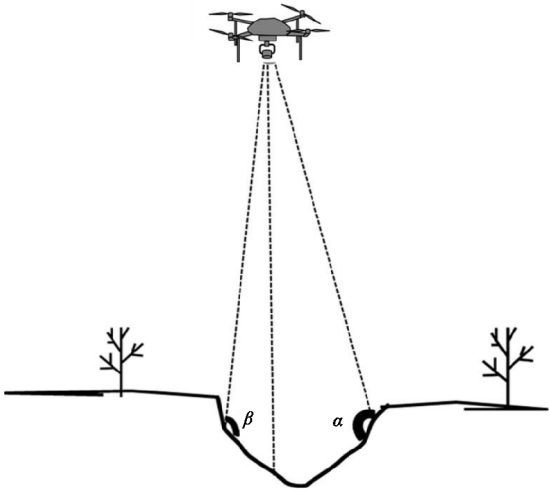


图 1 不同拍摄角度示意

1 材料与方法

1.1 数据来源

本试验在东北典型黑土区的黑龙江省海伦市的中国科学院海伦水土保持监测研究站(126°50′1.42″E, 47°21′12.61″N)进行。东北黑土区是我国粮食重要产区,然而严重的水土流失,尤其是沟道侵蚀,破坏耕地,阻碍农机具通行,正威胁着该区域粮食生产。坡耕地中切沟侵蚀是水土流失严重的标志之一,其有明显沟缘,横断面呈“V”或“U”形,阻碍耕作,吞食耕地^[15]。结合侵蚀沟活跃程度及松辽水利委员会制定的侵蚀沟分级标准^[16],选取了东北黑土区农田中较为典型的处于活跃期的大型切沟(BG)、趋于稳定的中型切沟(MG)和发育于农田中的浅沟(SG)作为研究对象(图 2)。考虑到三维重建误差的普适性,在每条沟道中选取能够代表整条切沟坡比的部分沟道(约 100 m 长)作为研究区域。每条侵蚀沟的基本信息见表 1。

1.2 数据获取

本研究于 2018 年 10 月 22 日入冬前进行,此时作物已收获并翻耕,从而消除了农作物影响。首先在每条侵蚀沟研究区域均匀布设 9 个地面测量砧板,包

括 6 个控制点,以及 3 个验证点。使用南方测绘公司银河 6 RTK 的实时动态测量模式,精度为 $\pm(8\text{ mm}+1\text{ mm/km}\times d)$,来获取每个点的三维坐标,建立独立坐标系(0—XYZ)。使用 Faro X330 地面三维激光扫描仪(10 m : 2 mm / 25 m : 3.5 mm)对 3 条侵蚀沟依次进行三维激光扫描,其中,对于 BG,在沟岸两侧均匀设置 4 站点,在两侧沟壁均匀设置 4 站点,在

沟底均匀设置 3 站点;对于 MG 和 SG,在沟岸两侧均匀设置 6 站点。同步利用大疆精灵 4 Professional 无人机(1 英寸 CMOS,有效像素 2 000 万)低空航拍,使用 DJI ground station 结合遥感影像规划沟道拍摄航线,航向重叠度 80%,旁向重叠率 70%。为了有效避开树和电线等障碍物,并且可以保证较高的分辨率,航拍高度设定 30 m。

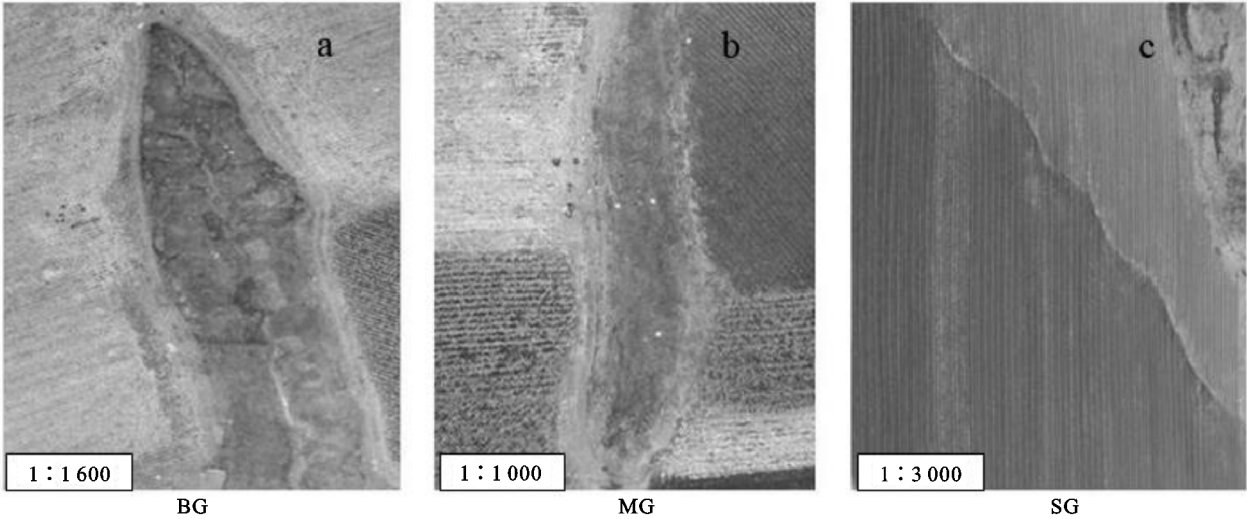


图 2 3 条供试侵蚀沟

表 1 3 条供试侵蚀沟基本信息

侵蚀沟	总长度 (研究长度)/m	均宽/ m	均深/ m	平均 坡比
BG	600(80)	19.1	8.5	1 : 1.1
MG	250(60)	8.0	1.5	1 : 2.6
SG	150(150)	2.4	0.4	1 : 3.3

1.3 分析方法

将三维激光扫描数据导出后,应用 CloudCompare 转换成分辨率为 6 cm 的栅格文件,即生成 TLS—DSM。应用 Pix4D 对无人机拍摄的侵蚀沟照片进行三维重建,经过软件自带的滤波功能处理后生成分辨率为 6 cm 的栅格文件,即生成 SfM—DSM。二者均应用 RTK 获取的地面控制点配准到相应的独立坐标系中。

在 ArcGIS 中将根据每条沟的研究区域,对 TLS—DSM 与 SfM—DSM 进行裁剪。由 TLS—DSM 生成研究区域的坡度,并统计 0~90°的每个坡度下的沟道面积占比。以 TLS—DSM 为基准,对 SfM—DSM

进行相减,获得两者高程差值和绝对值。汇总区域内高程误差总量,并根据每个坡度,分区统计相应的高程误差量占高程误差总量的比例。

2 结果与分析

2.1 高程误差总量

表 2 列出了应用 2 种方法(三维激光扫描与基于无人机照片三维重建)获取的 3 条侵蚀沟体积。其中, ΔV 是 2 种方法获取的侵蚀沟的总体积差异, $|\Delta V|$ 是单位坡度平均高程误差的绝对值与单位坡度所对应的面积相乘,所得到的体积差异。 $|\Delta V|$ 数值越大,说明 2 种 DSM 在单位坡度的高程误差也越大。尽管不同比降侵蚀沟的体积误差比率不同,但是在研究区 2 种方法获取的侵蚀沟体积差异小,3 条侵蚀沟的体积差异均小于 1%。这说明基于照片三维重建方法能够较为准确地获取不同发展阶段侵蚀沟的沟道侵蚀总量,从而用于沟道侵蚀强度的估算。

表 2 3 条侵蚀沟体积总误差及误差绝对值

沟道	X 误差/cm	Y 误差/cm	Z 误差/cm	$V_{\text{TLS}}/\text{m}^3$	$V_{\text{SfM}}/\text{m}^3$	$\Delta V/\%$	$ \Delta V /\%$
BG	0.56	0.40	0.25	3771	3777	0.2	3.4
MG	0.63	0.43	0.32	1581	1590	0.6	1.7
SG	0.56	0.18	0.10	783	779	0.5	2.2

2.2 高程误差

2.2.1 高程误差统计分布 3 条侵蚀沟 TLS—DSM 与 SfM—DSM 的高程差值均近似正态分布(图 3a~图 3c)。BG 与 MG 的高程差值为-60~60 cm,而

SG 的高程差值为-20~20 cm。由于高程差值有正负值,正负值间的互相抵消导致三者的高程差值平均值均约为零。这表明在不考虑正负值的情况下,应用三维重建方法获取的沟道体积误差将很小。

严格来讲,由于无论正值还是负值均能体现真实误差,因此需要将高程差值取绝对值以估算三维重建方法的真实误差。图 3d~图 3f 统计了高程差值的绝对值,简称高程误差。BG 和 MG 2 条侵蚀沟超过

95%的高程误差<20 cm,二者的平均高程误差分别为 8.5,3.0 cm。对于 SG,超过 25%的高程误差>20 cm,平均高程误差为 4.7 cm,满足 1:1 000 地形图制图要求^[17]。

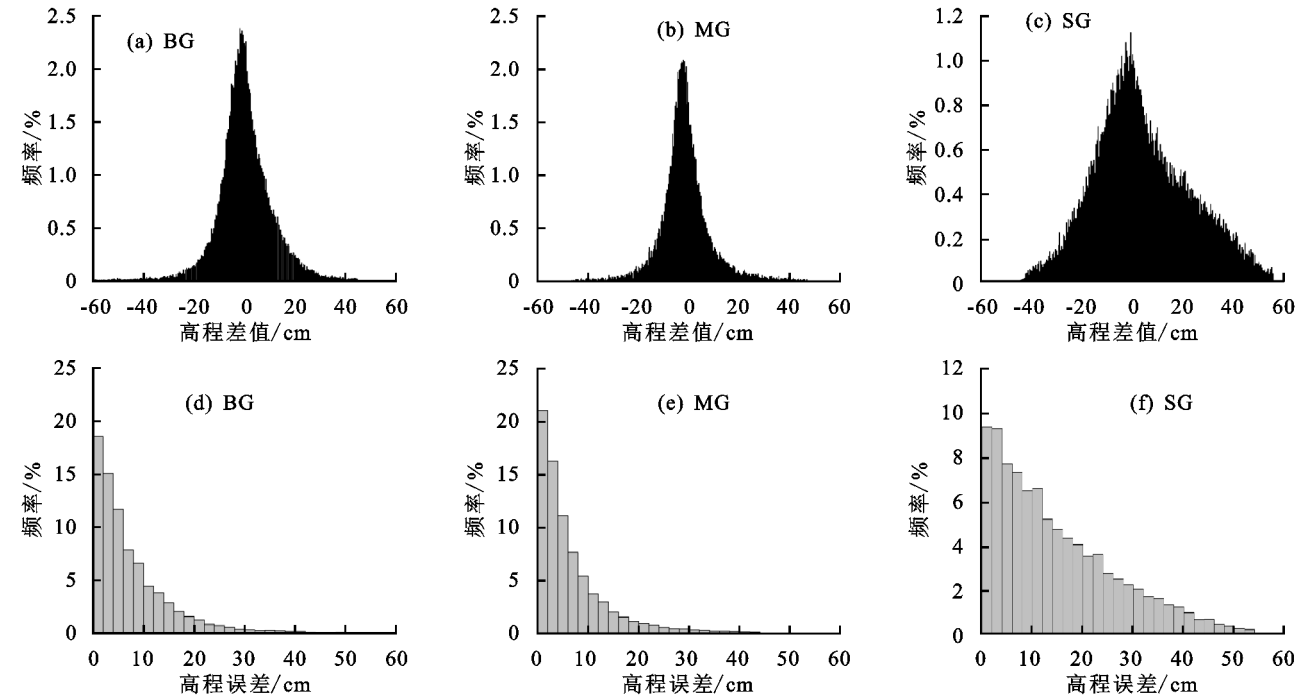
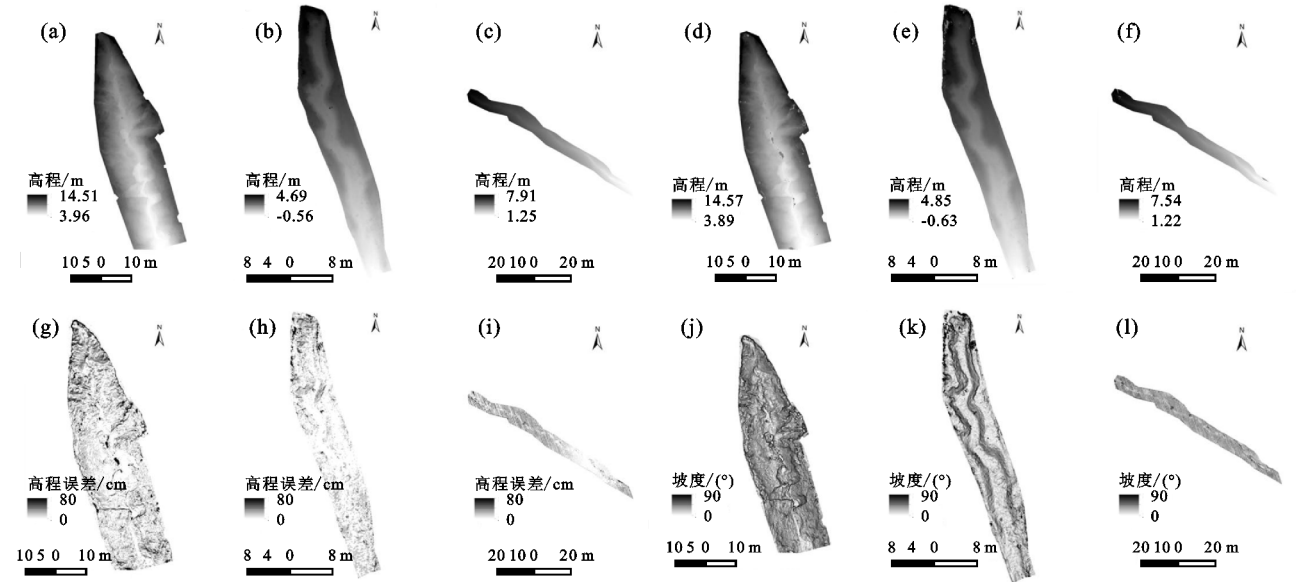


图 3 高程差值和高程误差直方图

2.2.2 高程、高程误差和坡度的空间分布 在高程误差空间分布图中,颜色越深代表高程差值越大。从图 4g~图 4i 中可以看出,BG 和 MG 高程误差大的区域多呈线状分布。同时,图 4j~图 4l 中也能观察

到,坡度大的区域也多为线状分布。结合图 2 的航拍照片及图 4j~图 4l 发现,BG 和 MG 作为切沟,沟缘内侧的坡度较大,即沟壁较陡。上述结果直观地反映出高程误差主要发生在沟壁坡度较大的区域。



注:a,b,c 为 SfM 的 DSM;d,e,f 为 TLS 的 DSM;g,h,i 为高程误差图;j,k,l 为坡度图;从左向右依次为 BG、MG 和 SG。

图 4 SfM 及 TLS 的高程、坡度和高程误差的空间分布

2.3 坡度对高程误差的影响

2.3.1 高程误差随坡度的分布 图 5 点绘了 3 条沟的高程误差随坡度的分布。BG、MG 和 SG 高程误差均随坡度增加呈指数增长趋势,拟合程度较好(R^2 分

别为 0.99,0.94,0.82)。当地表坡度接近于 0 时,BG、MG 及 SG 的高程误差为 3~4 cm。在坡度 0~60°范围内的高程误差变化幅度较小(0~10 cm),但在坡度 60°~90°范围内高程误差随坡度增大而急剧增大,

分别从 12.5, 10.1, 7.5 cm 增加到 63.6, 79.6, 42.2 cm。这表明地表坡度较小时, 三维重建方法的高程误差随坡度增加缓慢增加, 而当坡度超过一定条件时, 高程误差趋向于急剧增加。同时 3 条不同坡比的沟道的高程误差均随坡度指数增加且趋势类似, 表明坡比对该指数关系的影响很小, 该规律具有一定的普适性。赵文强等^[18]在将相机与研究物体间距设定为 30 cm 时, 也发现高程误差随坡度误差呈指数分布(拐点处坡度约为 50°), 与本文研究结果类似。已有研究^[19]显示, 三维激光扫描方法的高程误差随坡度为线性分布, 这说明三维重建方法的高程误差随坡度的分布规律(指数)与三维激光扫描方法(线性)是不同的, 可能原因是 2 种方法获取三维点云的原理不同所致^[20]。

不同发育阶段侵蚀沟的坡比差异较大, 导致 3 条侵蚀沟的沟壁坡度分布有较大差异。从高程误差随坡度变化的规律(图 5)可推出, 在不同类型侵蚀沟中, 不同坡度下的高程误差量占高程误差总量也有区别, 需统计 3 条侵蚀沟下的不同坡度占总面积的比例, 再统计不同坡度下的高程误差量在高程误差总量中的比例, 进而明确侵蚀沟形态的坡度分布对高程误差的影响。

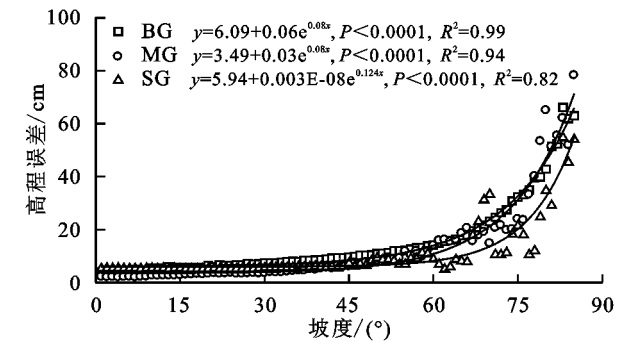
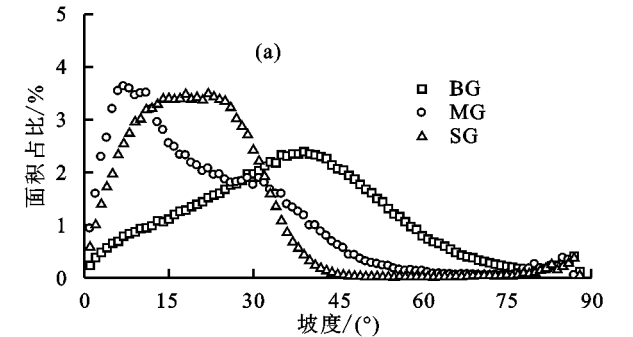


图 5 高程误差随坡度的变化

2.3.2 坡度面积分布 3 条侵蚀沟不同坡度的面积在沟道总面积的占比(简称面积占比)及其累积分布见图 6。BG、MG 和 SG 的面积占比随坡度变化均呈单峰曲线, 且面积占比最多的坡度分别为 40°, 8°, 13°(图 6a)。BG 的坡度主要分布在 10°~60°, 而 MG 和 SG 的坡度主要分布在 0~45°(图 6a)。BG 坡度在 45°以下的沟道面积累积量占比超过 70%; 而对于 MG 和 SG, 其坡度在 40°以下的沟道面积累积量占比均超过 90%(图 6b)。因此, 从面积占比峰值、集中程度及累积量 3 个方面来看, 沟道坡比越大, 面积占比越集中在较大坡度的范围内。

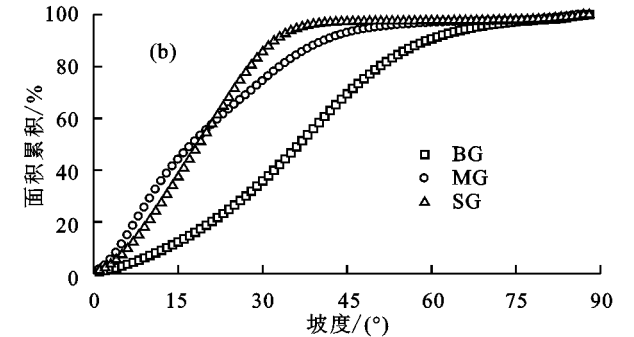


图 6 面积占比随坡度的变化及累积分布

2.3.3 高程误差占比分布 每条侵蚀沟下的高程误差总量以及每个坡度下的高程误差量在高程误差总量中的占比(简称高程误差占比)统计结果见图 7。BG、MG、SG 的高程误差占比随坡度变化均呈单峰曲线, 且高程误差占比最多的坡度分别为 46°, 10°, 13°(图 7a)。对于 BG, 约 75% 的高程误差量集中在 15°~75°; 对于 MG, 约 66% 的高程误差量集中在 0~60°; 而对于 SG, 约 54% 的高程误差量集中在 0~40°(图 7a)。对于 3 条侵蚀沟 BG、MG、SG, 坡度 45°以下的高程误差累积量占比分别为 46%, 60%, 77%(图 7b)。因此, 从高程误差峰值、集中程度及累积量 3 个方面来看, 沟道坡比越大, 高程误差占比越集中在较大坡度的范围内。此外, 3 条侵蚀沟的高程误差占比曲线(图 7a)与面积分布曲线(图 6a)的走势相似, 这是因为 3 条侵蚀沟的高程误差随坡度的曲线走势相似(图 5)。

3 讨论

3.1 不同类型侵蚀沟对三维重建方法高程误差的影响

基于无人机摄影, 数码照片的地表空间信息三维重建, 快速获取沟道侵蚀—沉积分布, 厘清误差的空间分布有助于明晰侵蚀—沉积真实值。本文选取的发育中切沟(BG)、趋于稳定切沟(MG)和浅沟(SG)基本能够代表东北黑土区坡耕地中不同类型侵蚀沟, 无人机摄影获取的侵蚀沟高程误差随坡度呈指数增加, 对应坡度拐点位于 60°左右, 这说明在应用该方法研究沟壁陡峭区域的侵蚀过程时, 如沟壁崩塌或重力侵蚀, 应当注意布设足够的地面控制点以减少误差^[21]。不同类型侵蚀沟的坡比差异较大, 发育中侵蚀沟的平均坡度多大于趋于稳定的侵蚀沟。因此在单位沟道面积下, 前者的高程误差量可能大于后者。

3.2 高程误差来源

本文研究的高程误差包含了高程差值本身及水

平错位后的高程差值,而没有区分二者各自对高程误差的贡献。通过 DSM 相减,进而求得沟道侵蚀—沉积量是沟道侵蚀研究中常用的方法。已有学者^[18]认为,在坡度很大时,较小的水平错位也可能会导致较大的高程误差,表明水平错位可能是本研究中坡度较大时高程误差急剧增大的因素之一。此外,在坡度较大的区域,点云密度也低于坡度较小的区域^[22]。相机在高空垂直拍摄,受入射角度的影响,光束平差法

在坡度大的区域难以提取足够数量的同名地物点,进而造成水平与高程方向的错位,影响高程误差。本试验的验证点误差 $<1\text{ cm}$,同时侵蚀沟 DSM 的分辨率为 6 cm ,意味着单位栅格位置的不确定性较小,因此可认为高程误差的变化主要是坡度的变化导致的。此外,3 条试验沟道的结果均表现出了类似的高程误差随坡度增加的趋势,因此进一步验证了三维重建方法中,高程误差随坡度指数增加的客观事实。

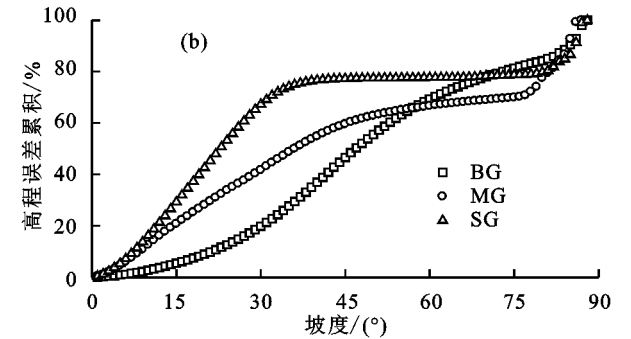
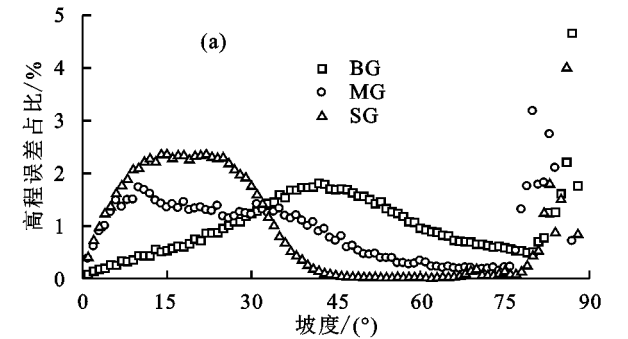


图 7 单位坡度的误差百分比随坡度的变化及累积分布

4 结论

(1)利用无人机垂直摄影可获取与三维激光扫描相近的侵蚀沟三维模型,但获得的高程存在正负误差,相互抵消后体积误差 $<1\%$;采用高程绝对值误差计算,侵蚀沟体积误差达到 3% 。

(2)对于基于照片的侵蚀沟三维重建方法,高程误差均随坡度增加呈指数增长趋势,拟合程度较好($P<0.000\ 1,R^2>0.80$)。拐点出现在 60° 附近。在坡度 $0\sim60^\circ$ 范围内的高程误差变化幅度较小,但在坡度 $60^\circ\sim90^\circ$ 范围内高程误差随坡度增大而急剧增大。

(3)愈活跃侵蚀沟,其坡比愈大,高程误差占比愈集中在较大坡度的范围内。对于发育中切沟 BG,约 75% 的高程误差量集中在 $15^\circ\sim75^\circ$;对于 MG,约 66% 的高程误差量集中在 $0\sim60^\circ$;而对于 SG,约 54% 的高程误差量集中在 $0\sim40^\circ$ 。

参考文献:

[1] Liu X B, Zhang X Y, Wang Y X, et al. Soil degradation: A problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China[J]. Plant Soil and Environment, 2010, 56(2): 87-97.

[2] Chen Y, Liu S, Li H, et al. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 115/116: 56-61.

[3] 李智广,王岩松,刘宪春,等.我国东北黑土区侵蚀沟道的普查方法与成果[J].中国水土保持科学,2013,11(5): 9-13.

[4] 李浩,张兴义,刘爽,等.典型黑土区村级尺度侵蚀沟演

变[J].中国水土保持科学,2012,10(2):21-28.

[5] Stöcker C, Eltner A, Karrasch P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry: A case study from Andalusia, Spain [J]. Catena, 2015, 132: 1-11.

[6] Hänsel P, Schindewolf M, Eltner A, et al. Feasibility of high-resolution soil erosion measurements by means of rainfall simulations and SfM Photogrammetry [J]. Hydrology, 2016, 3(4): 38-53.

[7] Sebastian D O O, Irene M, Daniel P K, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in morocco [J]. Remote Sensing, 2012, 4(11): 3390-3416.

[8] Glendell M, Mcshane G, Farrow L, et al. Testing the utility of structure from motion photogrammetry reconstructions using small unmanned aerial vehicles and ground photography to estimate the extent of upland soil erosion [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(12): 1860-1871.

[9] 杨超,苏正安,马菁,等.基于无人机影像快速估算矿山排土场边坡土壤侵蚀速率的方法[J].水土保持通报, 2016, 36(6): 126-130.

[10] Frankl A, Stal C, Abraha A, et al. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling [J]. Catena, 2015, 127: 92-101.

[11] 覃超,何超,郑粉莉,等.黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J].农业工程学报,2018,34(6):160-167.

[12] Wells R R, Momm H G, Castillo C. Quantifying uncertainty in high-resolution remotely sensed topographic surveys for ephemeral gully channel monitoring[J]. Earth Surface Dynamics, 2017, 5(3): 347-367.

加,加剧了茎秆基部周围细沟侵蚀的发生。

综上,在研究玉米坡地土壤侵蚀机制时,应考虑茎秆流对坡地的土壤侵蚀作用。

参考文献:

- [1] 马波,吴发启,陈宇,等.玉米不同生育期茎秆流特征及其模型构建[J].农业工程学报,2011,27(1):118-123.
- [2] 吕刚,刘雅卓,陈鸿,等.褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(3):64-69.
- [3] Lamm F R, Manges H L. Partitioning of the sprinkler irrigation amount by a corn canopy[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(4): 909-918.
- [4] Haynes J L. Ground rainfall under vegetative canopy of crops[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1940, 32(1): 176-184.
- [5] Gwynne M D, Glover J. Light rainfall and plant survival: Measurement of stem flow run-off[J]. Nature, 1961, 191(3): 1321-1322.
- [6] 和继军,吕焯,宫辉力,等.细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J].水利学报,2013,44(4):398-405.
- [7] 马波,马璠,李占斌,等.模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J].农业工程学报,2014,30(16):136-146.
- [8] 吴淑芳,刘政鸿,霍云云,等.黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J].土壤学报,2015,52(1):48-56.
- [9] 刘战东,刘祖贵,张寄阳,等.夏玉米降雨冠层截留过程及其模拟[J].灌溉排水学报,2015,34(7):13-17.
- [10] Bui E N, Box J E J. Stemflow, rain throughfall, and erosion under canopies of corn and sorghum[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(1): 242-247.
- [11] 马波,李占斌,马璠,等.模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配过程的影响[J].生态学报,2015,35(2):497-507.
- [12] Van Elewijck L. Influence of leaf and branch slope on stemflow amount[J]. Catena, 1989, 16: 525-533.
- [13] 马波,吴发启,马璠,等.叶面积和降雨强度对大豆茎秆流的影响[J].中国水土保持科学,2008,6(6):58-62.
- [14] 马璠,吴发启,马波,等.叶面积和降雨强度对玉米茎秆流量的影响[J].农业工程学报,2008,24(10):25-28.
- [15] 董莉丽,马孝燕,胡丹,等.吴起县退耕还林样地土壤粒径分布的单一和多重分形特征[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):111-115.
- [16] 盛贺伟,蔡强国,孙莉英.黄土质地对坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):31-35.
- [17] 赵艳茹,王瑄,丘野,等.模拟降雨下土壤剥蚀率和水流含沙量的关系[J].水土保持学报,2010,24(5):97-100.
- [18] 郑世清,周佩华,周保林.黄土高原沟壑区土壤抗冲性研究:以黄委会西峰水土保持试验站为例[J].水土保持通报,1994,14(1):12-16.
- [19] 高素娟,王占礼,黄明斌,等.黄土坡面土壤侵蚀动态变化过程试验研究[J].水土保持通报,2010,30(1):63-68.
- [20] 赵龙山,侯瑞,吴发启,等.水蚀过程中裸露陡坡耕地土壤侵蚀特征[J].水土保持学报,2018,32(1):74-79.
- [21] 郭继成,张科利,董建志,等.西南地区黄壤坡面径流冲刷过程研究[J].土壤学报,2013,50(6):1102-1108.
- [22] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):24-29.
- [23] 张梦,李冬杰,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):85-90.
- [24] 杨帆,姚文艺,戴文鸿,等.植被影响下的坡面水力侵蚀研究进展[J].人民黄河,2013,35(1):72-74.
- [13] Lague D, Brodu N, Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z)[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 82: 10-26.
- [14] James M R, Robson S, D'oleire-Oltmanns S, et al. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment[J]. Geomorphology, 2017, 280: 51-66.
- [15] 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.
- [16] 白建宏.东北黑土区侵蚀沟分级初探[J].中国水土保持,2017(10):41-42.
- [17] 国家标准局 GB 7930-87, 1: 500, 1: 1000, 1: 2000 地形图航空摄影测量内业规范[S].北京:中国标准出版社,1987:710-711.
- [18] 赵文强,林舟.SfM 精细表面测量:分辨率和精度的评估及误差分析[J].地理与地理信息科学,2016,32(6):25-31.
- [19] Bater C W, Coops N C. Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation [J]. Computers and Geosciences, 2009, 35(2): 289-300.
- [20] James M R, Robson S, Smith M W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: Precision maps for ground control and directly georeferenced surveys[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(12): 1769-1788.
- [21] 冯林,李斌兵.利用无人机倾斜影像与 GCP 构建高精度侵蚀沟地形模型[J].农业工程学报,2018,34(3):88-95.
- [22] Remondino F, Guarnieri A, Vettore A. 3D modeling of close-range objects: Photogrammetry or laser scanning? [R]. Proceedings of the Electronic Imaging, 2004: 216-225.

(上接第 66 页)