# 不同光照条件对侵蚀沟三维重建精度的影响

孙 欢<sup>1</sup>,王让虎<sup>1,2</sup>,杨久春<sup>2</sup>,张树文<sup>2</sup>,岳书平<sup>3</sup>

(1.山西大学黄土高原研究所,太原 030006; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 3.南京信息工程大学地理科学学院,南京 210044)

摘要:为深入探究不同光照条件下无人机重建三维模型精度的差异,在晴天以及阴天条件下,采用无人机 摄影技术获得 4 期数字表面模型,并分别以 RTK(real-time kinematic)测量的高程点和三维激光扫描仪获 取的数字高程模型为基准,在典型剖面和整个侵蚀沟 2 个不同尺度上,分析在不同光照条件下侵蚀沟三维 重建的高程精度差异。结果表明:(1)典型剖面尺度上,阴天构建的模型高程精度最高,晴天中午的高程模 型精度相较于上午和下午的更高,而剖面阴影区高程误差比非阴影区增加 0.138~0.217 m。(2)整个侵蚀 沟尺度上,阴天条件下航测的高程模型的均方根误差达到最小仅为 0.155 m;对于晴天的不同时段,中午航 测所得的 DSM 高程误差最低,但仍比阴天 DSM 的高程误差高 0.411 m;综合晴天的 3 期高程模型,阴影区 高程误差比非阴影区增加 0.250~0.346 m。(3)从不同坡向来看,阳坡的高程误差最低,而阴影面积的增 加导致其他坡向误差进一步加大。光照产生的阴影显著降低高程模型精度,研究结果可为基于无人机的 侵蚀沟航测制图研究提供参考。

关键词: 侵蚀沟; 光照条件; 阴影; 无人机遥感; 三维重建

**中图分类号:**S252.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2023)01-0045-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.007

# Influence of Different Illumination Conditions on 3D Reconstruction Accuracy of Erosion Gully

SUN Huan<sup>1</sup>, WANG Ranghu<sup>1,2</sup>, YANG Jiuchun<sup>2</sup>, ZHANG Shuwen<sup>2</sup>, YUE Shuping<sup>3</sup>

(1.Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006; 2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102; 3.Institute of Geographical Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: In order to further explore the differences in accuracy of UAV-derived 3D models under different lighting conditions, four phases of digital surface models were constructed by UAV photography technology under sunny and cloudy conditions, and elevation points measured by RTK (real-time kinematic) and digital elevation model obtained by 3D laser scanner were taken as benchmark, respectively. At the typical section and the entire erosion gully scale, the difference in elevation accuracy of 3D reconstruction of erosion gully under different lighting conditions was analyzed. The results showed that: (1) At the typical section scale, the elevation accuracy of the model constructed on cloudy days was the highest, and the elevation accuracy of the model constructed on cloudy days was the highest, and the elevation, while the elevation error of the shaded area was  $0.138 \sim 0.217$  m higher than that in the non-shaded area. (2) At the entire erosion gully scale, the root mean square error of the aerial survey elevation model on cloudy days was only 0.155 m, which was the minimum. For different periods of sunny days, the elevation error of DSM obtained by UAV survey at noon was the lowest, but it was still 0.411 m higher than that of DSM on cloudy days. Based on the three elevation models of sunny days, the elevation error of sunny slope was the lowest, while the increasing of shadow area led to the further increase of other slope aspects

**收稿日期:**2022-06-14

**资助项目:**国家自然科学基金项目(42171380,41801350,41901355);国家重点研发计划项目(2021YFD1500102-4);山西省应用基础研究计划 项目(201901D211119)

第一作者:孙欢(1995-),女,硕士研究生,主要从事无人机遥感应用研究。E-mail:huansunmail@163.com

通信作者:王让虎(1990-),男,博士,讲师,主要从事资源环境遥感研究。E-mail:wangranghu@sxu.edu.cn

errors. The results showed that the shadow caused by illumination significantly reduced the accuracy of the elevation model, which could provide a reference for the research of aerial mapping of erosion gully based on UAV. **Keywords**: erosion gully; illumination conditions; shadow; UAV remote sensing; 3D reconstruction

侵蚀沟是地表径流不断冲刷土壤形成的沟壑,可严 重破坏道路、蚕食耕地、造成水土流失<sup>[1]</sup>,因而准确获取 侵蚀沟的地表特征,监测其动态变化对预防水土流失、 制定合理的土地管理措施具有重要意义。近年来,侵 蚀沟监测技术已经从传统的地面测量方法(如皮尺测 量<sup>[2]</sup>、针桩测量、微地形剖面仪)逐渐发展到多尺度遥 感监测,高分辨率卫星遥感和航空摄影测量<sup>[3]</sup>覆盖范 围大,但偏差大、精度低;机载/地基激光雷达能够获 取高精度的三维点云数据,但数据量大,设备价格昂 贵;高精度差分 GPS<sup>[45]</sup>定位精度高,稳定性好,但只适 用于小尺度沟蚀监测;而无人机遥感具有成图快、精度 高等优点,其核心技术从运动恢复结构(SFM,structure from motion)的三维重建方法可以从未标定的二维图像 中重建三维点云<sup>[6-7]</sup>,在地形地表监测及其他领域应用 众多<sup>[8]</sup>,是地面尺度和卫星尺度的有力补充<sup>[9]</sup>。

针对无人机航片三维重建模型精度的评估结果表 明其精度可以达到厘米级,接近于 Lidar(light detection and ranging)<sup>[10]</sup>。部分学者针对数据采集过程或地表地 形特征对三维重建结果的影响开展研究发现,地形坡 度[11]、地面控制点设置[12]、航线规划、飞行高度、飞行重 叠率[13]等因素对模型精度都产生不同程度的影响。光 照条件是无人机采集数据过程中一个重要的环境因 素[14],光照造成的阴影直接影响图像匹配的精度,以及 物体识别的准确度,降低生成的数字正射影像精度, 大大增加地物提取、空间分析等后续操作的难度[15]。 尽管很多无人机厂商和学者建议在多云天气或者正 午时刻采集影像[16],但定量探讨光照对无人机三维 重建精度影响的研究较少,特别是光照对于地形起伏 大的侵蚀沟三维重建模型精度影响的定量评估鲜有 报道。易桂全等<sup>[17]</sup>在总面积不足6m<sup>2</sup>的范围开展不 同光照条件对沟头数字高程模型(digital elevation model, DEM)精度的影响研究。但在更大范围、更 大地表起伏的流域尺度,不同光照条件对侵蚀沟三维 重建结果的影响还有待进一步研究。

因此,本文以黑土区小流域内典型侵蚀沟为研究对 象,在阴天以及晴天的上午、中午和下午4种光照条件 下,采用无人机遥感对侵蚀沟进行三维重建,获得4期 侵蚀沟数字表面模型(digital surface model, DSM),并将 RTK(real-time kinematic)测量的高程点和三维激光扫 描仪获取的 DEM 数据作为基准,定量分析侵蚀沟三维 重建 DSM 在阴影区和非阴影区的高程误差,评估不同 光照条件下侵蚀沟三维重建精度的差异。

## 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

研究区域位于黑龙江省齐齐哈尔市克山县河北乡 的东大沟流域,中心坐标 125°52′40″E,48°04′55″N,海拔 高度 285.05~325.43 m,地形北高南低,地势起伏较 为明显,是典型的漫川漫岗丘陵地貌(图 1)。该侵蚀 沟面积 3.97 hm<sup>2</sup>,总体呈自南向北的放射状,主要坡 向为东一西方向(图 2),其分布面积占沟壑总面积 的 43.36%。沟内最大宽度超过 30 m,最大深度超过 10 m,沟道下游已下切到地下水层,且趋于稳定,上 游部分的侵蚀仍比较活跃,沟壁陡立,沟头处崩塌、垮 塌作用显著,沟坡虽有多年生或一年生植被覆盖,但 水土流失现象仍然比较严重。





#### 1.2 数据获取

本研究的室外数据获取工作于 2020 年 10 月 28-29 日 2 天内完成。首先在研究区均匀布设 21 个地面 控制点,其中 11 个参考点,10 个检查点(图 1)。利用 合众思壮 G970II RTK 结合 HLJCORS 获取控制点 的三维坐标,测量的水平精度优于 3 cm、垂直精度优 于 5 cm,投影坐标系为 CGCS2000\_3\_Degree\_GK\_ CM\_126E。随后在阴天(28 日)上午以及晴天(29 日)的上午 8:00、中午 12:00 和下午 3:00 4 种不同光 照条件下,采用大疆 Phantom4 RTK 无人机对侵蚀 沟进行遥感航测,通过遥控器内置 GS RTK App 规 划拍摄航线,旁向重叠率为 75%,航向重叠率为 80%,飞行高度为 100 m,每次用时 30 min。



为了对侵蚀沟三维重建精度进行验证评估,一方面利用 RTK 放样功能选取 5 个典型侵蚀沟横剖面进行高程点采集;另一方面,采用 FARO Focus 三维激光扫描仪对整个侵蚀沟进行测量,获取高精度毫米级的三维点云。

#### 1.3 数据处理分析

本研究使用 Pix4Dmapper 软件对无人机照片进 行三维重建,生成 4 期正射影像和 SfM-DSM 数据, 包括 阴天 的 DSM ( $DSM_{\text{H}}$ )、晴天上午的 DSM ( $DSM_{\text{E}}$ )、中午的 DSM ( $DSM_{\text{H}}$ )以及下午的 DSM ( $DSM_{\text{F}}$ )。遥感图像中阴影区由于自身或其他物体 的阻挡而使得光线无法到达,因而与非阴影区相比, 通常具有色调和饱和度较高、亮度值较低的明显特 征<sup>[16-17]</sup>。本研究中,由于研究区面积较小,采用手动 勾绘阴影区和非阴影区的方式较为准确且易于实现, 因此分别对晴天获取的 3 期正射影像在 ArcGIS 中 手动目视解译提取由于太阳光直射被遮挡造成的阴 影区,其余部分则视为非阴影区。阴天正射影像均视 为非阴影区。

利用 ArcGIS 的提取值至点工具,提取典型剖面上 RTK 测量的高程点所在位置的 DSM 高程值,对比 RTK 高程值进一步评估不同光照条件获取的 DSM 在阴影区 和非阴影区的高程精度误差。将三维激光扫描的点云 数据经地面控制点配准后利用 Global Mapper 软件生成 DEM<sub>TLS</sub>栅格数据,以其为基准数据,对4期 SfM – DSM 数据进行对比,进而评估不同光照条件下阴影 对侵蚀沟三维重建精度的影响。

# 2 结果与分析

## 2.1 侵蚀沟三维重建精度整体评估

高精度三维重建是后期进行模型分析的前提和

基础,因此需首先对4期影像建模结果精度进行评估。由表1可知,4种光照条件建模成果的地面控制 点均方根误差(root mean squared error,RMSE)均达到厘米级水平,满足侵蚀沟建模的精度要求,可进 行后续的分析操作。

表 1 4 期建模成果的地面控制点误差

出。	e.		
里1	W.	:	m

影像	校制上	误差	误差	误差	平面
	侄前悬	X	Y	Ζ	误差
阴天	参考点	0.016	0.011	0.015	0.020
	检查点	0.017	0.018	0.018	0.025
晴天上	参考点	0.029	0.018	0.015	0.035
	检查点	0.029	0.020	0.016	0.035
咭工	参考点	0.030	0.018	0.017	0.035
明入中	检查点	0.025	0.022	0.010	0.025
晴天下	参考点	0.019	0.018	0.041	0.026
	检查点	0.020	0.023	0.040	0.031

#### 2.2 光照对高程精度的影响

2.2.1 典型剖面尺度 将 5 个剖面上 RTK 获取的 高程点集与 TLS-DEM、SfM-DSM 提取的高程值 进行对比(图 3)。除个别位置外,4 期 SfM-DSM 均 较为客观地表达出侵蚀沟剖面形态,其提取的高程值 与 RTK 高程值基本吻合。剖面 2 由于在 12~17 m 处生长有数株较高的灌木,在该位置 4 期 SfM-DSM 与 RTK 测量值和 DEM<sub>TLS</sub>存在较为明显的差 异,后续研究过程中已将这部分误差较大的点集剔 除,以提高结果的准确性。

以RTK高程点集为基准,定量评估TLS-DEM和 4期SfM-DSM在5个剖面上的高程精度(图4)。综合 5个坡面,DEM<sub>TLS</sub>、DSM<sub>H</sub>、DSM<sub>±</sub>、DSM<sub>+</sub>、DSM<sub>下</sub>的高 程均方根误差分别为0.110,0.143,0.244,0.161, 0.172 m。整体来看,TLS-DEM的高程值与RTK 高程值最为接近,其在剖面4上的均方根误差最小仅 为0.046 m,可作为后续SfM-DSM整体高程分析 的验证数据。阴天条件下航测获取的DSM高程值 较晴天获取的DSM高程值更准确,更能反映实际的 地形起伏;在同一天中,中午航测获取的DSM高程 值均方根误差相对于早上、下午获取的DSM高程值 均方根误差更小。

为探究光照对无人机三维重建模型高程精度的 影响,进一步定量分析 5 个剖面上阴影区和非阴影区 的高程精度。由表 2 可知,SfM-DSM 的高程误差 在阴影区和非阴影区存在显著差异。无论哪一时间、 哪个剖面,三维模型在阴影区的高程均方根误差均比 非阴影区大,处于阴影区和非阴影区的高程均方根误 差分别为 0.263~0.320,0.103~0.125 m。总体来 看,基于 RTK 验证的剖面阴影区高程误差比非阴影 区增加 0.138~0.217 m。由此可见,光照产生的阴影 显著降低无人机影像三维建模结果的精度。





2.2.2 整个侵蚀沟尺度 利用 ArcGIS 的栅格计算器,以 TLS-DEM 为基准,评估不同光照条件下构 建的 SfM-DSM 精度,并按阴影区和非阴影区进行 区分得到图 5。研究中已将存在较高植被的区域剔 除以提高数据的可信度。经统计计算,早上、中午、下 午所得影像中阴影面积分别为 1.65,0.89,1.41 hm<sup>2</sup>。 依据 4 期高差图分别汇总不同时段构建的高程模型 在阴影区和非阴影区的高程均方根误差(表 3)。

从 4 期高程模型的总误差来看,相对于晴天条件下的 3 次航测成果,阴天条件下航测的高程模型的均 方根误差达到最小,仅为 0.155 m;对于晴天的不同 时段,由于中午产生的阴影面积最小,其航测所得的 DSM 高程误差最低,为 0.566 m,但仍比阴天构建的 DSM 高程误差高 0.411 m。对于晴天构建的 3 期高 程模型,非阴影区和阴影区高差误差分别为 0.488~ 0.550,0.770~0.896 m,总体上阴影区高程误差比非 阴影区增加 0.250~0.346 m。而在同一时间内,非阴 影区的高程误差均比阴影区的小,最小误差为晴天中 午航测所得到的 DSM,为 0.488 m。

### 2.3 高程精度的坡向分异

侵蚀沟通常形态结构复杂多样,不同坡向面积占 比各不相同,太阳光照在不同坡向上产生的阴影面积 大小也不同,从而导致无人机构建的三维模型在不同 坡向上的高程精度有差异。为了进一步明确阴影对 三维建模高程精度的影响,分别统计不同时段下阴影 在侵蚀沟不同坡向上的面积分布(图 6)及高程模型 在不同坡向上的高程精度差异(图 7)。从图 6 可以 看出,对于晴天上午,西坡阴影面积最大,西北坡其 次;对于晴天中午和下午,东坡的阴影面积最大,西坡 其次。南坡在 3 个时段中的阴影面积均为最小。由 图 7 可知,4 期 SfM-DSM 的高程均方根误差在不 同坡向上的分布呈现大致相同的趋势,低值区均位于 阳坡(东南坡、南坡和西南坡)。对于晴天上午,高程 误差高值区位于西坡、西北坡和北坡;对于晴天中午 和下午,高程误差高值区均位于东北坡和东坡。对比 阴天高程模型的误差高值区分布,晴天模型阴影面积 的扩大,进-

型阴影面积 的扩大,进一步增加高程误差。

	表 2	SfM-DSM 在	典型剖 囬 阴 影 [	2 和 非 阴 影 区 的	局柱均力根误差	Ē	単位:m
项目	区域	剖面 1	剖面 2	剖面 3	剖面 4	剖面 5	总误差
DSM <sub>±</sub>	非阴影区	0.134	0.103	0.133	0.102	0.145	0.125
	阴影区	0.203	0.368	0.264	0.180	0.484	0.320
$DSM_{\rm \oplus}$	非阴影区	0.118	0.096	0.072	0.066	0.142	0.103
	阴影区	0.159	0.487	0.184	0.210	0.238	0.282
$\mathrm{DSM}_{\mathrm{F}}$	非阴影区	0.165	0.102	0.109	0.084	0.121	0.119
	阴影区	0.366	0.249	0.223	0.153	0.277	0.263





#### 图 5 SfM-DSM 与 TLS-DEM 的高差空间分布

表 3 SfM-DSM 在整个侵蚀沟阴影区和非阴影区的 高程均方根误差
单位:m

项目	非阴影区	阴影区	总误差
DSM <sub>阴</sub>	_	_	0.155
$\mathrm{DSM}_{\pm}$	0.535	0.785	0.656
$\mathrm{DSM}_{\oplus}$	0.488	0.770	0.566
$\mathrm{DSM}_{\mathrm{F}}$	0.550	0.896	0.698

晴天 3 期模型的阴影区和非阴影区的高程精度

在沟壑不同坡向上存在差异(图 8)。总体来看,不同 时段的模型在不同坡向上,阴影区高程均方根误差均 高于非阴影区,二者差值范围为 0.01~0.53 m。对于 阴影区,3 期 DSM 的高程均方根误差在不同坡向上 的分布并无显著规律,这表明除阴影面积外,高程误 差还可能受其他因素影响。对于非阴影区,3 期 DSM 的高程均方根误差在不同坡向上的变化规律与 图 7 基本一致。



图 6 不同时段不同坡向的阴影面积分布

## 3 讨论

基于无人机摄影照片的三维地形重建已经在侵 蚀沟监测领域得到广泛应用<sup>[18-19]</sup>。由于野外天气条 件的复杂性和不可控性,光照和沟坡地形造成的阴影 是无人机三维重建侵蚀沟地貌过程中不可避免的现 象。尽量选择多云或者正午时刻进行无人机航测已 成为共识,但目前关于阴影对无人机三维重建精度的 影响特别是高程精度的影响还缺乏定量评估。本研究结果表明,基于 RTK 验证的剖面阴影区高程误差 比非阴影区增加 0.138~0.217 m,基于三维激光扫描 仪验证的整个侵蚀沟阴影区高程误差比非阴影区增 加 0.250~0.346 m,整体上看阴影导致无人机三维模 型的高程精度降低 0.138~0.346 m,相比 SfM -DSM 控制点垂直误差的厘米级水平,阴影对高程精

0.9

0.8

Ξ

□/¥0.7 10.7 0.6

元 招 0.5

0.4

度的影响是显著的。易桂全等<sup>[17]</sup>研究发现,在沟头 小区上光照条件对 DEM 的精度影响非常小,与本研 究结论不一致,主要是由于其样地面积不足6 m<sup>2</sup>,而 本研究以典型流域中的侵蚀沟系统为监测对象,包含不 同发展阶段的侵蚀沟,更具有代表性和现实性。另外, 本研究选择在临近 11 月,即冬季进行无人机航空摄影 测量,该季节太阳高度角相对较低,由太阳光照产 生的阴影面积相对更大,更易体现阴影降低三维重建精 度的效果。此外,在每次进行图像采集时,设置无人机 每次飞行用时为 30 min,尽量减少采集图像过程中太阳 高度角发生变化而导致阴影面积的改变。已有学者<sup>[20]</sup> 研究表明,在部分区域,高程误差受水平错位的影响很



图 8 不同时段的模型在不同坡向上阴影区和非阴影区的高程误差

遥感影像中的阴影由于亮度值较低,易丢失影像 部分相关的光谱信息,影响图像匹配的精度和绝对三 维定位<sup>[12]</sup>。但同时,影像中的阴影也携带遮挡物的 线性特征和形状信息,利用这一点可优化侵蚀沟的三 维模型,以及勾绘侵蚀沟的二维边界<sup>[21]</sup>。田新光 等<sup>[22]</sup>利用遥感影像中阴影与建筑物实际高度的关 系,设计了一种快速提取建筑物高程信息的技术方 法。由于建筑物通常是规则的立体形态,利用这种技 术方法可取得良好的效果,但该方法并不适用于形态 结构复杂的沟谷地区。因此,如何利用阴影与侵蚀沟 形态特征的关系优化侵蚀沟正射影像和模型精度还 有待进一步研究和探讨。

晴天条件下,影像中阴影区域的亮度值小于周围 非阴影区域的亮度值<sup>[20]</sup>,且光照越强烈,二者亮度值 的差异越明显,阴影区的图像相对更为阴暗,对建模 结果的精度影响更大。同时,阴影按照遮挡物体的类 别又可以分为自身阴影和投射阴影<sup>[23]</sup>,二者的亮度 值又有差异。但在本研究中,并未量化分析阴影亮度 值的大小以及自身阴影和投射阴影对于建模结果的 影响差异,部分原因在于受地表环境条件和周围地物 的影响,晴天获得的正射影像中,投射阴影占绝大多 数,而自身阴影面积较少。此外,侵蚀沟沟壁坡度的 差异也影响模型的高程精度,有学者<sup>[22]</sup>研究表明,无 人机三维重建模型的高程误差随坡度增大呈逐渐增 长的趋势。本研究中,不同时段构建的三维模型在不 同坡向上阴影区的分布规律并不明显,其可能还同时 受到沟壁坡度、亮度差异的影响,后期可选择更为合 适的研究区,深入探讨坡度、阴影亮度值以及阴影类 型对无人机制图精度的影响。

大。本研究中,4期 SfM-DSM 的控制点水平误差均小 于3 cm,低于影像的空间分辨率 3 cm,因此,可以认为

高程误差主要为2期高程模型在垂直方向的差值。

NE

N

Е

SE

坡 向

S

阴天

晴天

晴天,

晴天⊾

SW

w

### 4 结论

(1)不同光照条件三维建模成果的地面控制点在 各方向上的误差均达到厘米级的精度。

(2)从5个典型剖面尺度来看,阴天构建的模型 高程精度相较于晴天的精度更高,晴天中午的高程 模型精度相较于上午和下午的更高。此外基于 RTK 验证的剖面阴影区高程误差比非阴影区增加0.138~ 0.217 m。从整个侵蚀沟尺度来看,对于晴天的不同 时段,中午航测构建的 DSM 高程误差达到最低,为 0.566 m。不同天气条件下,阴天航测的高程模型的 均方根误差达到最小,仅为0.155 m,比晴天中午的 DSM 高程误差低0.411 m。综合晴天构建的3 期高程 模型,阴影区高程误差比非阴影区增加0.250~0.346 m。由此可见,光照产生的阴影显著降低模型精度。

(3)从不同坡向上看,阳坡的高程误差最低,而其

他坡向由于阴影面积的增加导致误差进一步加大。

#### 参考文献:

- [1] 李镇,秦伟,齐志国,等.东北漫川漫岗和山地丘陵黑土
   区侵蚀沟形态特征遥感分析[J].农业工程学报,2019,35
   (14):133-140.
- [2] Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V, et al. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy[J].Catena,2013,101: 226-234.
- [3] Yang S T, Guan Y B, Zhao C S, et al. Determining the influence of catchment area on intensity of gully erosion using high-resolution aerial imagery: A 40-year case study from the Loess Plateau, northern China[J].Geoderma,2019,347:90-102.
- [4] Azareh A, Rahmati O, Rafiei-Sardooi E, et al. Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models[J].Science of the Total Environment, 2019, 655:684-696.
- [5] Pourghasemi H R, Yousefi S, Kornejady A, et al. Performance assessment of individual and ensemble datamining techniques for gully erosion modeling[J].Science of the Total Environment, 2017, 609:764-775.
- [6] Gudino-Elizondo N, Biggs T W, Castillo C, et al. Measuring ephemeral gully erosion rates and topographical thresholds in an urban watershed using unmanned aerial systems and structure from motion photogrammetric techniques[J].Land Degradation and Development, 2018, 29 (6):1896-1905.
- [7] Gomez-Gutierrez A, Schnabel S, Berenguer-Sempere F, et al. Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion[J].Catena,2014,120(1):91-101.
- [8] 夏晨真,张月.基于厘米级无人机影像的水土保持措施 精准识别[J].水土保持学报,2020,34(5):111-118.
- [9] Doleire-Oltmanns S, Marzolff I, Peter K, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco [J].Remote Sensing,2012,4(11):3390-3416.
- [10] Šiljeg A, Domazetović F, Marić I, et al. New method for automated quantification of vertical spatio-temporal changes within gully cross-sections based on very-high-resolution models[J].Remote Sensing,2021,13(2):321-348.
- [11] 甄怀才,张兴义,杨薇,等.沟壁坡度对侵蚀沟三维重建

误差的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):61-66.

- [12] 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.
- [13] 李文达,闫启明,张尚弘,等.基于无人机和 SfM 的地貌 数据采集精度影响研究[J].应用基础与工程科学学 报,2019,27(6):1225-1234.
- [14] Dandois J P, Olano M, Ellis E C. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure[J].Remote Sensing,2015, 7(10):13895-13920.
- [15] Stocker 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.
- [16] 吴淑芳,刘勃洋,雷琪,等.基于三维重建技术的坡面细 沟侵蚀演变过程研究[J].农业工程学报,2019,35(9): 114-120.
- [17] 易桂全,董一帆.不同光照条件对沟头小区不同部位的 无人机影像 DEM 的影响[C]//中国水土保持学会,台 湾中华水土保持学会.2017 年海峡两岸水土保持学术 研讨会论文集.成都,2017:108-114.
- [18] 周小荃,余宏亮,魏玉杰,等.无人机倾斜航空摄影监测 崩岗侵蚀量变化的方法[J].农业工程学报,2019,35 (21):51-59.
- [19] Wang R H, Sun H, Yang J C, et al. Quantitative evaluation of gully erosion using multitemporal UAV data in the southern black soil region of Northeast China: A case study [J].Remote Sensing,2022,14(6):1479-1492.
- [20] 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.
- [21] Giménez R, Marzolff I, Campo M, et al. Accuracy of high-resolution photogrammetric measurements of gullies with contrasting morphology [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(14): 1915-1926.
- [22] 田新光,张继贤,张永红.利用 QuickBird 影像的阴影提 取建筑物高度[J].测绘科学,2008,33(2):88-89.
- [23] 梁永侦,潘斌,郭小明,等.基于 LAB 颜色空间的图像 阴影检测与去除方法[J].计算机与现代化,2019(10): 88-93.