

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.015

唐杰, 谢云, 刘川, 等. 无人机监测东北黑土区切沟形态的最优参数配置[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 49-58.

TANG Jie, XIE Yun, LIU Chuan, et al. Optimal parameter configuration of UAV for measuring gully morphology in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 49-58.

无人机监测东北黑土区切沟形态的最优参数配置

唐杰^{1,3}, 谢云^{2,3}, 刘川³, 张岩⁴

(1. 北京师范大学环境与生态前沿交叉研究院, 广东 珠海 519087; 2. 北京师范大学文理学院, 广东 珠海 519087;

3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 4. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 东北黑土区切沟侵蚀不断蚕食耕地资源, 威胁我国粮食安全。无人机技术的发展为沟蚀监测提供有效手段, 但获取数据分辨率越高耗时越长, 如何配置无人机参数, 使其既能满足精度要求又能提高航摄效率是当前需要解决的问题。[方法] 选择东北漫川漫岗区的鹤北流域为研究区, 以实地断面测量数据为验证值, 通过评估不同分辨率、不同飞行航向及不同无人机数据提取的切沟参数精度, 探究不同无人机参数配置的适用条件。[结果] (1) 与实测值相比, 分辨率 1 cm 数据提取的切沟参数精度最高, 所有参数的平均百分误差 $< 5.0\%$, 适用于典型切沟发展过程监测; 分辨率 3.5 cm 数据提取的切沟宽度平均误差百分比 $< 10.0\%$, 提取的切沟深度平均误差随切沟深度变小而增大, 切沟深度 > 1 m 时, 平均百分误差 $< 10.0\%$, 适用于区域范围快速抽样调查; 8, 10 cm 分辨率提取的切沟深度和截面积平均百分误差 $> 40.0\%$, 适用于切沟分布位置和平面参数提取; (2) 固定翼无人机垂直地面获取的正摄数据虽在提取切沟二维形态特征指标方面效果略好, 但在三维形态特征指标方面不如多旋翼无人机倾斜摄影测量获取的数据; (3) 单航向倾斜摄影测量数据提取的切沟平均深度和截面积平均百分误差是交叉双航向数据平均百分误差的 1.7, 1.9 倍。交叉航向获取的无人机数据提取切沟参数精度更高, 且细节更丰富。[结论] 倾斜摄影测量和交叉双航向航测能显著提高获取的切沟三维参数精度, 1~3, 3~5 cm 分辨率可分别用于典型切沟监测和大范围切沟侵蚀快速调查。单航向正摄摄影测量获取的 5 cm 以上分辨率数据适用于提取切沟位置和平面参数。

关键词: 切沟; 无人机; 飞行参数; 分辨率; 测量误差; 东北黑土区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0049-10

Optimal Parameter Configuration of UAV for Measuring Gully Morphology in Black Soil Region of Northeast China

TANG Jie^{1,3}, XIE Yun^{2,3}, LIU Chuan³, ZHANG Yan⁴

(1. Advanced Interdisciplinary Institute of Environment and Ecology, Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai,

Guangdong 519087, China; 2. Department of Geographic Science, Faculty of Arts and Sciences, Beijing

Normal University at Zhuhai, Zhuhai, Guangdong 519087, China; 3. Faculty of Geographical

Science, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China; 4. College of Soil and

Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Severe gully erosion in the black soil region of Northeast China is continuously eroding arable land resources, posing a threat to the country's food security. The development of unmanned aerial vehicle (UAV) technology provides an effective way for monitoring gully erosion, but the higher the resolution of data obtained, the longer it takes. The challenge lies in configuring UAV parameters to simultaneously meet accuracy requirements and enhance aerial photography efficiency. [Methods] The Hebei catchment in the rolling hills region of Northeast China was chosen as the study area. Using actual cross-

收稿日期: 2024-04-06

修回日期: 2024-05-09

录用日期: 2024-06-11

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-08-27

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (42307425); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500700); 中国博士后科学基金面上项目 (2023M740286)

第一作者: 唐杰 (1992—), 男, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: tangjie@bnu.edu.cn

通信作者: 谢云 (1964—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与土地生产力研究。E-mail: xieyun@bnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

section measurement data as a validation value, the accuracy of gully parameters extracted from UAV data at different resolutions, flight directions, and types was assessed to explore the suitable conditions for various UAV parameter configurations. [Results] (1) Compared with field measurement data, data at a 1 cm resolution extracted the gully parameters with the highest accuracy, the average percentage error for all parameters was less than 5.0%, suitable for monitoring typical gully development processes. Data extracted at 3 cm and 5 cm resolutions had an average percentage error of less than 10.0% for gully width, and the average error increased as gully depth decreased. For gullies deeper than 1 m, the average percentage error was less than 10.0%, suitable for rapid regional sampling surveys. Data extracted at resolutions of 8 cm and 10 cm had average percentage errors greater than 40.0% for gully depth and cross-sectional area, suitable for extracting gully distribution locations and planar parameters. (2) Although fixed-wing UAV obtaining data slightly outperformed in extracting two-dimensional gully features, multirotor UAV using oblique photogrammetry were better in extracting three-dimensional gully features. (3) The average percentage errors for gully depth and cross-sectional area extracted from single-direction oblique photogrammetry data were 1.7 and 1.9 times those from cross-direction data. UAV data obtained from cross-direction flights provided higher accuracy in gully parameter extraction and richer details. [Conclusion] Setting UAV parameters to a resolution of less than 5 cm and obtaining cross-direction oblique aerial photography data can meet the accuracy requirements for monitoring gully morphology in the black soil region of Northeast China. **Keywords:** gully; unmanned aerial vehicle (UAV); flight parameters; resolution; measurement error; black soil region

Received: 2024-04-06

Revised: 2024-05-09

Accepted: 2024-06-11

Online(www.cnki.net): 2024-08-27

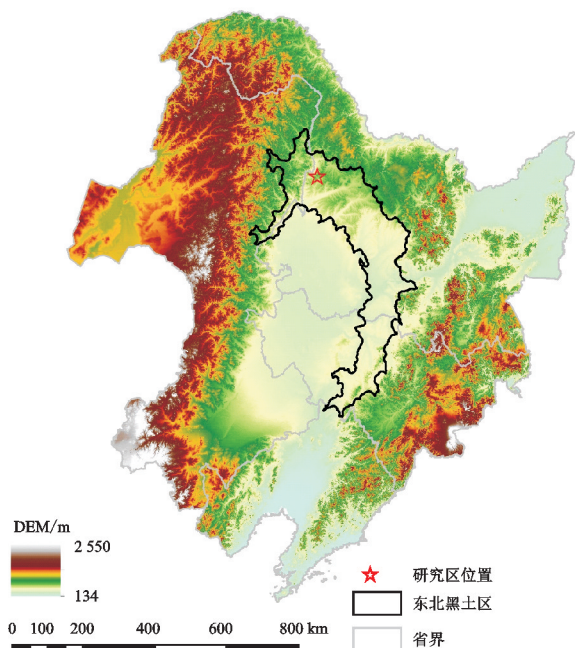
切沟侵蚀是土地退化最严重的表现形式^[1-2],活跃的切沟是流域泥沙主要来源^[3],其发生发展破坏土地完整性,减少粮食产量^[4],破坏生态环境^[5]。东北黑土区是我国重要的粮食生产基地,日趋严重的切沟侵蚀极大威胁我国粮食安全,不同时空尺度上监测切沟发育过程,对于研究沟蚀发展规律和机理、建立沟蚀预报模型有重要意义^[6-7]。

常用的沟蚀监测方法为传统地面测量法^[8-10]和非接触式遥感测量法^[11-17]。传统地面实测法耗时耗力,不适用于大范围沟蚀监测。非接触式遥感测量方法中的地面监测,如三维激光扫描仪测量,虽可获得切沟三维形态参数,但同样难以进行大范围监测,同时还受到地面环境限制,对于人难以到达区域无法进行测量;卫星遥感监测能快速获取大范围切沟平面形态参数,但无法获取沟深、体积等三维参数,即使高分立体像对能够提取切沟体积,但精度往往难以满足要求^[18]。无人机具有成本低、操作灵活及获取数据速度快等特点,且近年来随着摄影测量技术的发展,无人机获取数据的精度也在不断提高,越来越多的学者尝试将无人机技术运用到沟蚀的监测中^[19-21]。GOODWIN等^[22]利用激光雷达数据做参照,研究无人机监测浅沟相同部位的精度发现,在毫米级分辨率下无人机可满足浅沟监测需求,并提出增加控制点及在相同时间

点测量能减少测量误差;杨丽娟等^[23]基于无人机影像分析了陕北“7.26”暴雨后新成切沟的发展规律。虽然无人机技术在切沟侵蚀研究中已经被广泛应用,但目前大多数研究并没有考虑飞行参数设置差异带来的误差,即使已有学者在黄土高原验证了无人机数据提取切沟参数精度,也往往是在一个固定飞行高度(分辨率)下与实际测量值进行对比。面对不同的地形条件,切沟形态特征有明显差异,黄土高原地区切沟平均长度和宽度分别为8.5,5.0 m,平均沟深4.6 m,东北黑土区平均长度和宽度则为435.0,2.4 m,平均沟深1.7 m,东北黑土区切沟以长窄型为主^[24]。长窄型切沟断面常呈深“U”形,普通正射数据难以精确获取沟壁和沟底信息,若飞行参数设置不当则造成较大的误差,适用于东北黑土区切沟监测的无人机飞行参数配置还需要深入研究。

切沟侵蚀测量多用于3种目的:第一是典型切沟发展过程的监测。为了精细监测切沟的形态变化,常常需要获取高精度的数据,胡刚等^[12]用差分GPS进行切沟发展过程监测,获取的数据精度可达1 cm。第二是区域尺度的切沟侵蚀调查。刘宝元等^[10]利用抽样调查方法确定东北黑土区112个野外调查单元,并结合断面测量法弄清黑土区沟蚀分布特征和侵蚀强度差异。第三是切沟空间分布调查。水利部于2020

年利用遥感影像对东北黑土区切沟位置以及长度、面积等平面参数进行调查,确定黑土区当前切沟数量约66.67万条^[25]。使用无人机航测进行以上目的研究时所需要的数据精度要求不同,虽然无人机数据分辨率越高提取的切沟参数质量越好,但获取同一区域分辨率1 cm的数据与分辨率10 cm的数据耗时最高可相差几十倍,简单追求最高分辨率数据会限制其在大范围切沟调查中的应用。针对不同的研究目的,如何调整飞行参数,以快速获取满足精度要求的数据是当前还未解决的问题。本研究通过评估不同飞行高度,不同飞行航向及不同无人机摄影测量数据提取的切沟参数与实地测量参数间的差异,明晰不同飞行参数对提取切沟参数精度的影响,并以此为基础确定不同无人机参数配置的适用条件。



1 研究区概况

选取黑龙江省嫩江县鹤山农场东北部鹤北2号流域作为研究区(48°59′03″—49°02′36″N, 125°15′46″—125°20′47″E),面积约3.2 km²,处于大兴安岭向松嫩平原过渡的过渡区域,是典型的漫川漫岗地形,特征为坡长长、坡度缓,坡度为1°~6°,坡长为500.0~4 000.0 m。多年平均降水量为493.0 mm,其中年平均降水量为463.0 mm,年平均降雪量为30.0 mm。降雨主要集中在6—8月,占年降水量的70.0%~90.0%;降雪主要集中在11月到翌年的4月,占年降水量的5.0%~30.0%。土壤类型以黑土为主,黏土、粉砂、砂粒的质量分数分别为29.0%,44.0%,27.0%,有机质平均质量分数为4.9%^[26]。流域内耕地约占流域总面积的85.0%,主要轮作作物是大豆和玉米(图1)。

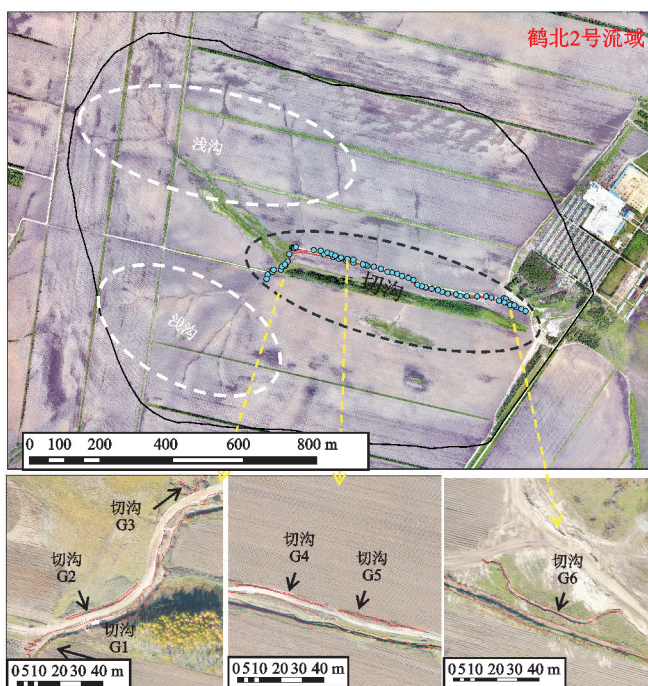


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

2 研究方法

选择鹤北2号流域6条大小不同的切沟(图1),从形态上看属于“长窄”形切沟,这类切沟宽长百分比远小于黄土高原地区切沟,断面多呈现深“U”形,能够代表东北黑土区切沟的形态特征^[24]。2021年5月分别用多旋翼无人和固定翼无人机对切沟进行航摄。其中多旋翼无人机飞行分辨率分别设置为1,3,5,8,10 cm;固定翼无人机飞行高度设置为8 cm。2种无人机在不同高度处的飞行航向分别设置平行沟道方向和垂直沟道方向的2个航向,且2个航向夹角等于90°。同时对6条切沟进行实地断面测量。实地测量

参数作为真值用以验证不同参数配置无人机数据提取切沟参数的精度。

2.1 断面测量法

参考刘宝元等^[10]的调查方法,从切沟沟尾开始,沿着沟道对切沟断面进行测量,断面间隔在10~50 m。通过厘米卷尺分别测量切沟断面的顶宽、底宽和3个深度,深度分别为最大深度和最大深度与2个沟沿线的中点深度。每个断面用GPS(Garmin eTrex209X GPS)记录测量位置。根据实测断面数据,计算切沟断面面积,计算公式为:

$$CA_i = \frac{1}{3} (H_1 + H_2 + H_3) \times \frac{1}{2} (TW_i + BW_i) \quad (1)$$

式中: CA_i 为第 i 个断面面积 (m^2); TW_i 为第 i 个断面顶宽 (m); BW_i 为第 i 个断面底宽 (m); $H1$ 、 $H2$ 、 $H3$ 为切沟深度 (m)。

2.2 无人机航摄

(1) 无人机类型

分别采用大疆御 2 专业版多旋翼无人机和 Ebee

plus RTK 固定翼无人机进行切沟测量, 2 种类型无人机参数对比见表 1。多旋翼与固定翼无人机飞行具有显著差异, 前者采用悬停拍摄, 拍照和定位更加稳定, 同时在高程变化大的区域可以进行仿地飞行, 以提高获取的地形数据精度; 而后者一般在固定高度采用等距离拍摄, 飞行速度更快, 但操作难度更大, 成本也更高。

表 1 无人机基本参数

Table 1 Basic parameters of UAV

无人机名称	大疆御 2 专业版	Ebee plus
无人机类型	多旋翼	固定翼
起飞方式	原地垂直	手抛
传感器	非制冷氧化钒微测辐射热计	消费级 senseFly S.O.D.A
相机类型	RGB 光学相机	RGB 光学相机
照片像素/W	2 000	2 000
飞行高度/m	≤ 500	≤ 800
飞行速度/($km \cdot h^{-1}$)	≤ 72	≤ 110
续航/min	31	59
水平精度/cm	10	5
垂直精度/cm	10	5

(2) 无人机飞行参数设置与数据处理

通过 DJI GS Pro 专业软件对多旋翼无人机进行航线规划和参数设置, 其中航向重叠率和旁向重叠率分别设置为 90% 和 80%, 固定翼无人机云台俯仰角度设置为 90° , 多旋翼无人机云台俯仰角度设置为 -80° 。通过 Ebee plus RTK 无人机自带航线规划系统进行固定翼无人机飞行参数设置, 参数与多旋翼无人机一致。

将无人机飞行获取的照片数据导入 Pix4Dmapper 软件, 获得相应空间分辨率的正射影像 DOM (Digital Orthophoto Map) 和数字表面模型 DSM (Digital Surface Model) 数据^[27]。参考杨丽娟等^[23]的预处理方法, 利用 Pix4Dmapper 软件对获得的无人机数据进行处理, 分别获得多旋翼无人机分辨率为 1, 3, 5, 8, 10 cm 的双航向影像和地形数据, 以及分辨率为 3 cm 的单航向影像和地形数据; 获得固定翼无人机分辨率为 8 cm 的双航向影像和地形数据。

利用 ArcGIS 10.6 的 Profile Graph 工具, 分别基于不同参数无人机获取的影像数据和 DSM 数据, 在实测断面位置提取相同切沟参数。

2.3 无人机数据精度验证

采用交叉验证方法, 通过多旋翼双航向下的不同分辨率数据与野外实测数据对比, 确定多旋翼无人机在双航向下监测切沟的最佳分辨率; 通过多旋翼无人机双航向数据和单航向数据分别与实测数据对比, 分析不同航向下无人机数据提取切沟参数的精度差异;

通过双航向下多旋翼无人机与固定翼无人机数据分别与实测数据对比, 分析不同类型无人机数据提取切沟参数的精度差异。除最常用的误差外, 选择 3 个误差评价指标:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - z_i)^2} \quad (2)$$

$$A_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - z_i) \quad (3)$$

$$\partial = \frac{|Z_i - z_i|}{Z_i} \times 100 \quad (4)$$

式中: RMSE 为标准误差; A_{mean} 为平均误差; ∂ 为百分误差; Z_i 为无人机提取的切沟断面参数; z_i 为实地测量获取的对应切沟断面参数; n 为切沟断面数。

3 结果与分析

3.1 切沟形态参数特征

测量切沟平均长度和平均宽度分别为 282.0, 2.6 m (表 2), 其中切沟 G1 长宽百分比最大, 长度为 1 367.6 m, 平均宽度为 4.1 m, 最大宽度可达 10.1 m; 切沟 G3 长宽百分比最小, 长度仅有 25.1 m, 平均宽度为 4.3 m; 其他 4 条切沟长度和宽度居中, 且形态特征相似, 平均长度和宽度分别为 75.0, 1.8 m。

6 条切沟共测量断面 61 个, 顶宽主要分布在 4.0~6.0 m, 占总断面数量的 71.7%; 截面积主要分布在 0~4.0 m^2 , 其中 0~2.0 m^2 占 46.7%, 2.0~4.0 m^2 占总样本数量的 26.7%。宽深比和顶底宽比值反映断面的形态特征, 可用于判断切沟断面为“V”形还是“U”形^[16]。本次测量的 61 个断面中, 宽深比主要分布在 4.0~6.0,

占总量的 70.0%，其中 >1 的比例达到98.3%；顶底宽比值主要分布在 1.0~2.0，占总量的 90.0%，因此，本次用于验证的切沟宽度增值都远大于深度，顶底宽比值分布可看出大多数断面为“U”形。

表 2 切沟形态参数

Table 2 The morphological parameters of gullies

切沟参数	长度/m	顶宽/m	底宽/m	截面积/m ²	深度/m	宽深比	顶底宽比
平均值±标准差	282.0±485.0	2.6±1.7	2.4±1.3	3.0±2.7	0.5±0.9	4.6±1.9	1.6±0.8

3.2 无人机数据测量切沟参数精度

3.2.1 多旋翼无人机不同分辨率数据测量参数差异

无人机分辨率是指能够区分地物的最小单元，与飞行高度呈负相关关系。多旋翼无人机双航向获取的不同分辨率 DSM 数据提取东北黑土区切沟形态参数值与实地断面测量参数值误差见表 3。在 5 种分辨率的无人机数据中，1 cm 分辨率数据提取切沟参数精度最高，顶宽和底宽平均百分误差仅有 1.2%和 2.0%，平均深度和截面积平均百分误差都仅有 4.3%，

所有参数的平均百分误差都 $<5\%$ ；其次是 3,5 cm 分辨率数据，顶宽和底宽平均百分误差都 $<10.0\%$ 。3 cm 无人机数据提取的平均深度和截面积平均百分误差 $<15.0\%$ ，其中平均百分误差 $<10.0\%$ 的比例分别为 61.7%和 56.7%。5 cm 分辨率无人机数据提取的平均深度和截面积平均百分误差都 $<25.0\%$ ，其中平均百分误差 $<15.0\%$ 的比例分别为 61.6%和 53.3%。8,10 cm 数据提取切沟参数误差较大，特别是平均深度和截面积，平均百分误差都在 40.0%以上。

表 3 不同分辨率无人机数据获取切沟形态参数精度

Table 3 Accuracy of gullies morphological parameter obtained from UAV data with different resolutions

切沟形态 参数	不同分辨率数据平均误差/m					不同分辨率数据标准误差/m					不同分辨率数据平均百分误差/%				
	1 cm	3 cm	5 cm	8 cm	10 cm	1 cm	3 cm	5 cm	8 cm	10 cm	1 cm	3 cm	5 cm	8 cm	10 cm
顶宽	-0.02	-0.06	-0.14	-0.11	-0.08	0.05	0.13	0.19	0.30	0.43	1.2	2.7	5.3	7.6	10.2
底宽	-0.03	-0.09	-0.16	-0.29	-0.37	0.06	0.09	0.16	0.39	0.60	2.0	4.8	8.6	13.8	16.5
平均深度	0.01	-0.06	-0.09	-0.27	-0.34	0.04	0.09	0.13	0.20	0.20	4.3	12.0	20.4	40.4	47.8
截面积	0.02	-0.19	-0.33	-0.87	-1.11	0.13	0.30	0.49	0.75	0.86	4.3	13.9	23.4	44.5	51.4
宽深比	-0.08	0.48	1.52	7.04	10.51	0.29	0.89	4.24	12.55	19.47	4.4	14.1	42.0	169.9	238.6
顶底宽比	0.002	0.03	0.06	0.11	0.14	0.06	0.12	0.21	0.30	0.43	2.3	4.7	8.5	14.2	21.5

注：统计样本数 $N=61$ 。

对于 3,5 cm 的无人机数据，提取切沟顶宽和底宽误差小，而提取的切沟深度，以及由深度计算的截面积误差较大，进一步对切沟平均深度进行分级，并分别求不同深度级别下无人机数据获取深度的精度，结果发现，无人机数据获取切沟深度的误差随着切沟截面平均深度的增大而减小(图 2)。

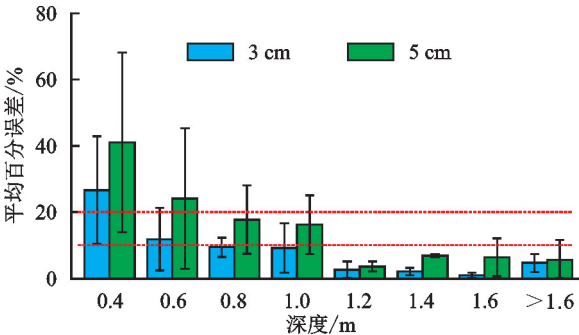


图 2 不同分辨率无人机数据提取不同深度等级的平均百分误差

Fig.2 Average percentage error of classification of gully depths extracted from UAV data with different resolutions

当深度在 0.4~0.6 m 时，3 cm 无人机数据获取深度的平均百分误差下降到 11.8%；深度在 0.6~0.8 m 时，3 cm 无人机数据获取深度的平均百分误差下降到 9.4%，因此，3 cm 分辨率的无人机适用于获取平均深度 >0.4 m 的切沟。当深度在 0.8~1.0 m 时，5 cm 无人机数据获取深度的平均百分误差为 16.2%；深度在 1.0~1.2 m 时，5 cm 无人机数据获取深度的平均百分误差下降到 3.6%，虽然深度 >1.2 时，平均百分误差有所上升，但都控制在 7.0%以内，因此，5 cm 分辨率的无人机数据适用于平均深度 >1.0 m 的切沟。无人机影像分辨率不同获取的切沟细节有较大差异(图 3a)，对于切沟边缘变化简单的区域，5 种分辨率的无人机影像都能满足切沟平面参数的提取，且差异不大，LI 等^[28] 也证明用分辨率为 0.5 m 的 QuickBird 影像提取黄土高原切沟长度、宽度和面积等平面参数误差较小，平均相对误差仅为 5%；但对于沟缘变化复杂的区域或者沟边长草区域，8,10 cm

分辨率影像沟边缘开始变得模糊,无法准确识别切沟边缘也是造成 8,10 cm 影像提取切沟平面参数误差增大的重要原因。

不同分辨率无人机数据提取切沟断面细节也有较大差异(图 3b),以 1 个面积约 7.0 m² 的断面为例,无人机数据分辨率越高,沟壁越平滑,损失的信息也越大

(图 4)。1 cm 数据能很好反映切沟截面形态特征;3, 5 cm 数据虽然在沟底和沟壁有所平滑,但差异不大;8, 10 cm 数据获取的切沟断面差异较大,特别是 10 cm 数据,与实际拍摄照片及 1 cm 数据提取的断面相比,底宽变小且沟壁过于平滑。因此,8,10 cm 分辨率的无人机数据获取的切沟三维参数误差大。

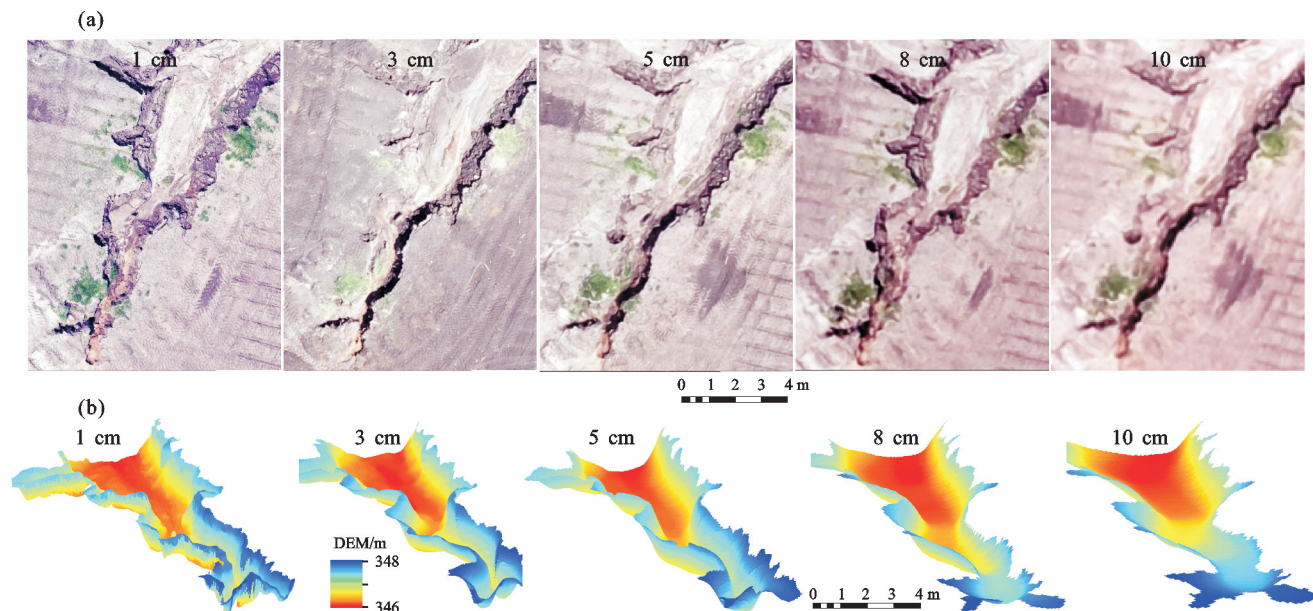


图 3 不同分辨率无人机数据提取切沟沟头形态特征差异

Fig.3 Morphological feature differences of gully head extracted from UAV data with different resolutions

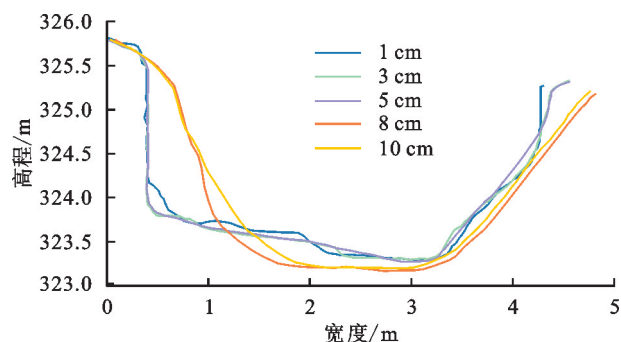


图 4 不同分辨率无人机数据提取同一断面形态特征差异

Fig.4 Morphological feature differences of same cross section extracted from UAV data with different resolutions

3.2.2 多旋翼无人机不同航向数据测量切沟参数差异 将分辨率都设置成 3 cm, 布设东西方向和南北方向 2 个交叉航向进行无人机航摄, 分别对单一航向(南北方向飞行)的无人机数据和交叉航向(东西和南北 2 个航向)数据进行处理, 获取影像和地形数据。分别用 2 种航向数据提取切沟参数, 与实测切沟参数进行对比, 百分误差结果见图 5。单航向提取的切沟顶宽和底宽平均百分误差为 7.8% 和 11.8%, 是交叉航向提取参数平均百分误差的 2.9, 2.5 倍, 其中百分误差 < 10.0% 的比例为 81.7% 和 63.3%, 比交叉航向比例减少 13.3% 和 25.0%。单航向提取的切沟平

均深度和截面积平均误差百分比分别为 20.5% 和 26.0%, 是交叉航向平均百分误差的 1.7, 1.9 倍, 其中百分误差 < 10% 的比例都为 29.9%, 都比交叉航向比例减少 21.8%。布设交叉航向获取无人机数据既可以保证无人机拍摄过程中数据无缺失, 又可获得更多细节信息, 因此交叉航向无人机数据提取的切沟参数比单航向无人机数据精度更高。

3.2.3 多旋翼与固定翼无人机数据测量切沟参数差异 分别使用大疆御 2 的多旋翼无人机和 Ebee plus RTK 型固定翼无人机进行航测, 其中飞行分辨率固定为 8 cm, 飞行航向为单一航向(南北方向), 对 2 种不同类型无人机数据进行处理并提取切沟断面参数, 同时用实测结果对其进行精度验证(图 6)。多旋翼无人机数据提取的切沟顶宽百分误差在 5.0% 以内的比例占 46.7%, 百分误差在 10% 以内的比例占 75.0%; 固定翼无人机数据提取的切沟顶宽误差在 5% 以内的占 56.7%, 比多旋翼无人机高 10.0%, 切沟顶宽百分误差在 10.0% 以内的比例为 81.7%, 比多旋翼无人机高 6.7%。多旋翼无人机数据提取的切沟底宽百分误差在 15% 以内的比例为 60.0%, 是固定翼无人机的 3.3 倍; 多旋翼无人机数据提取的切沟平均深度和截面积百分误差 < 50% 的比例分别为 65.0% 和 63.3%, 固定翼无人机数据提取的切沟平

均深度百分误差 $<50.0\%$ 的比例仅为 10.0% ,且提取的切沟截面积百分误差都在 50.0% 以上。

在提取切沟平面参数上,固定翼无人机数据精度略高于多旋翼无人机数据,但在提取切沟三维参数

上,固定翼无人机提取的切沟参数精度较差,特别是切沟深度和截面积等参数,百分误差 $>50.0\%$ 的比例在 90.0% 以上。整体来看,多旋翼无人机数据提取东北黑土区切沟参数的精度更高。

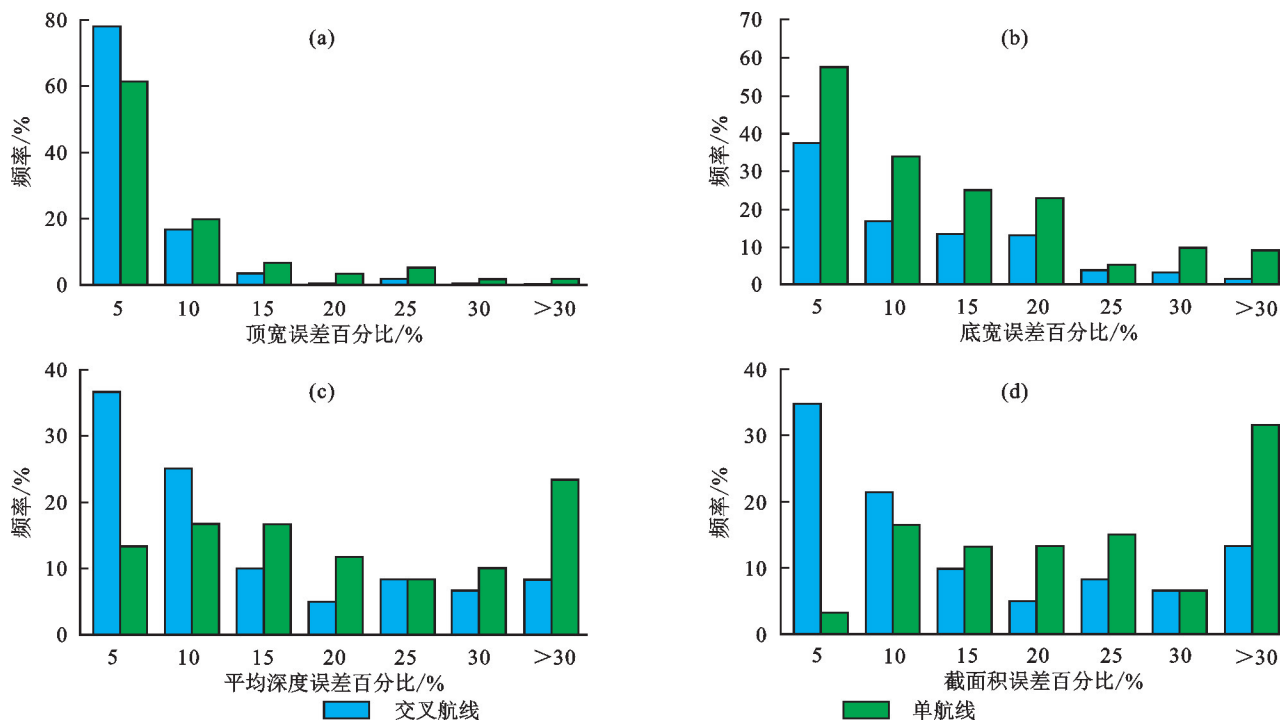


图5 多旋翼无人机不同航向时获取的3 cm分辨率数据提取切沟参数百分误差频率分布

Fig.5 Frequency of percentage error of gully parameters extracted from Multi-rotor UAV data with 3cm resolution and different course

4 讨论

无人机航测数据提取切沟参数误差随着数据分辨率降低而变大,分辨率1 cm的无人机数据精度最高,最能表达切沟三维形态实际情况,冯林等^[29]对大疆精灵无人机飞行精度进行验证表明,飞行高度在100 m以内(分辨率1.1 cm)时精度可达厘米级,满足基本地形测量要求,因此分辨率1 cm的无人机数据适用于小范围典型切沟侵蚀监测。无人机航测分辨率设置为3~5 cm时显著提高获取数据的效率,但对于深度 <1 m的切沟误差较大。TANG等^[24]对东北不同地貌类型区切沟抽样调查结果表明,切沟平均深度超过1.7 m,因此在需要快速进行大范围切沟侵蚀调查时航测分辨率设置为3~5 cm最佳。当分辨率 >5 cm以后,切沟深度和截面积误差急剧增大,但平面参数误差在 5.0% 以内。宋晓鹏等^[30]通过将固定翼无人机数据提取的切沟参数与三维激光扫描仪数据对比发现,无人机测量数据分辨率为7 cm时,提取切沟的长度百分误差 $<10.0\%$ 的比例超过73.3%,研究结果与本文结果相似。只需要进行切沟发生位置调查和侵蚀强度评估可将无人机航测分辨率设置为5~10 cm。

Ebee plus RTK型固定翼无人机比大疆御2多

旋翼无人机具有更高的水平精度和垂直精度,但固定翼无人机数据提取切沟三维参数精度却小于多旋翼无人机数据,原因是多旋翼无人机可通过旋转云台俯仰角进行倾斜摄影测量,而固定翼无人机无法调整镜头俯仰角只能获取正射影像数据。东北黑土区切沟断面多呈深“U”形,宽深比大导致无人机正摄数据难以精确刻画切沟沟壁的形态,这将降低无人机数据提取切沟三维参数的精度^[31]。胡晋茹等^[32]对比正射摄影测量和倾斜摄影测量2种不同方式监测的弃土场精度发现,后者获取的数据精度可提高25.2%以上。大疆御2多旋翼无人机通过倾斜拍摄获取更多的沟壁细节,因此最终提取的切沟断面精度高于固定翼无人机。单航线的倾斜摄影只能刻画单侧的沟壁细节,当使用交叉航线设置多航线倾斜航拍时,获取的切沟沟壁细节更多,精度也更高,采用双航向无人机倾斜摄影测量数据提取的切沟参数精度高于单航线数据和正摄数据。

无人机数据精度受到外界环境的影响十分严重,本次研究选择的切沟位于农业耕作区,数据获取时间为5月底,在此条件下获取的切沟数据受到植被影响较小,在其他植被生长茂密的区域还需要考虑植被对数据精

度的影响。整体来看,无人机数据提取的黑土区切沟参数值偏小,且提取的切沟顶宽和底宽精度高于平均深度和截面积,是因为即使双航线倾斜测量数据也难以获取

陡峭沟壁的全部细节,导致生成的 DSM 数据有一定的平滑,因此降低精度,后续研究需要考虑不同倾斜角度的无人机数据对切沟参数精度的影响。

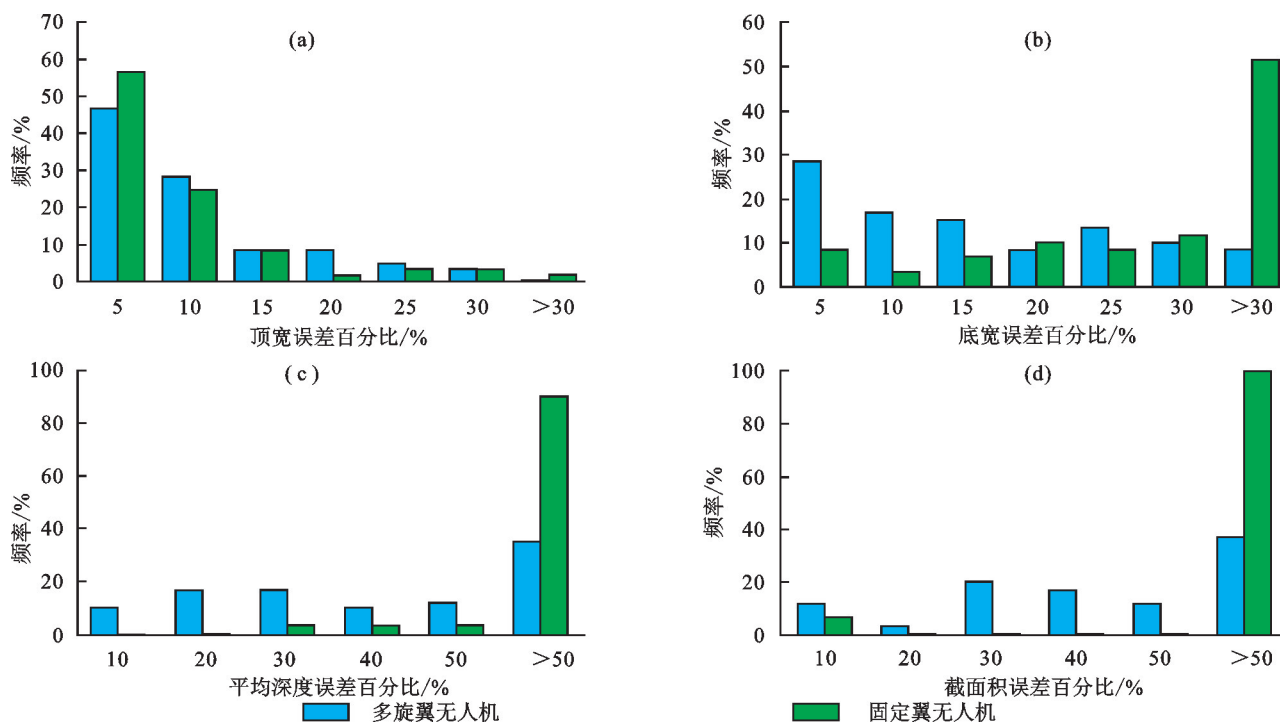


图 6 多旋翼无人机和固定翼无人机单航向时获取的 8 cm 分辨率数据提取切沟参数百分误差频率分布

Fig.6 Frequency of percentage error of gully parameters extracted from Multi-rotor UAV data and Fixed wing UAV data with single head course and 8 cm resolution

5 结论

(1)在提取切沟平面参数上,固定翼无人机数据精度略高于多旋翼无人机数据,但在提取切沟三维参数上,多旋翼无人机倾斜测量数据提取的切沟参数精度更高。

(2)无人机获取数据时布设 2 个相互交叉航向可以保证无人机拍摄过程中数据无缺失,又可获得更多细节信息。单航向数据提取切沟参数的平均百分误差在 10% 内的比例远小于交叉航向数据提取的参数。

(3)分辨率 1 cm 的多旋翼无人机数据提取切沟参数精度最高,切沟所有参数的平均百分误差都在 5.0% 以内。3,5 cm 无人机数据提取切沟宽度平均百分误差都在 10.0% 以内,但深度和截面积误差随断面大小差异变化较大,当平均深度 > 1.0 m 时,3,5 cm 无人机数据获取深度的平均百分误差下降到 10.0% 以内。8 cm 以上数据提取切沟参数误差较大,特别是平均深度和截面积,平均百分误差都在 40.0% 以上。

无人机监测东北黑土区切沟形态参数时,飞行参数设置为倾斜摄影测量和交叉双航向航测可显著提高获取的切沟三维参数精度。监测典型切沟发展过程时

应将分辨率设置在 1~3 cm,且分辨率越高获取的数据精度越好,需要快速进行大范围切沟侵蚀调查时航测分辨率设置为 3~5 cm 最佳。只需要进行切沟发生位置调查和侵蚀强度评估时可将无人机飞行参数可设置为单航线正摄影测量,分辨率可设置在 5 cm 以上。

参考文献:

- [1] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.
LIU B Y, YANG Y, LU S J. Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1): 9-16.
- [2] 伍永秋,刘宝元.切沟、切沟侵蚀与预报[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(2):134-142.
WU Y Q, LIU B Y. Gully, gully erosion and prediction [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2000, 8 (2): 134-142.
- [3] FRANKL A, DECKERS J, MOULAERT L, et al. Integrated solutions for combating gully erosion in areas prone to soil piping: Innovations from the drylands of northern Ethiopia [J]. Land Degradation and Development, 2016, 27(8): 1797-1804.

- [4] POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. *Catena*, 2003, 50(2/3/4):91-133.
- [5] HAREGEWEYN N, MELESSE B, TSUNEKAWA A, et al. Reservoir sedimentation and its mitigating strategies: A case study of Angereb Reservoir (NW Ethiopia)[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(2):291-305.
- [6] 王琼, 方怒放. 切沟形态特征无人机倾斜摄影测量[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8):107-114.
- WANG Q, FANG N F. Monitoring the morphological characteristics of gully using UAV oblique photogrammetry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(8):107-114.
- [7] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5):1-13.
- ZHANG G H. Advances and prospects for gully erosion researches[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5):1-13.
- [8] 李镇, 张岩, 尚国璠, 等. 西黄土区切沟断面特征及体积估算模型[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6):152-159.
- LI Z, ZHANG Y, SHANG G B, et al. Characterizing gully cross section and modelling gully volume in hilly loess region of western Shanxi Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6):152-159.
- [9] 刘刚, 谢云, 王大安, 等. 基于抽样调查的区域沟蚀强度评价: 以东北地区为例[J]. *中国水土保持*, 2020(1):56-59.
- LIU G, XIE Y, WANG D A, et al. Evaluation on regional gully erosion intensity based on sampling survey[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2020(1):56-59.
- [10] 刘宝元, 刘刚, 王大安, 等. 区域沟蚀野外调查方法: 以东北地区为例[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(4):34-40.
- LIU B Y, LIU G, WANG D A, et al. A field survey method for regional gully erosion: A case study in north-eastern China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(4):34-40.
- [11] 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*, 2011, 31(6):89-94.
- ZHANG J, ZHENG F L, WEN L L, et al. Methodology of dynamic monitoring gully erosion process using 3D laser scanning technology[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(6):89-94.
- [12] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探: 以东北漫川漫岗黑土区为例[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4):16-19.
- HU G, WU Y Q, LIU B Y, et al. Preliminary research on short-term channel erosion using GPS and GIS[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(4):16-19.
- [13] 李佳佳, 熊东红, 卢晓宁, 等. 基于 RTK-GPS 技术的干热河谷冲沟沟头形态特征[J]. *山地学报*, 2014, 32(6):706-716.
- LI J J, XIONG D H, LU X N, et al. Morphological characteristics of the gully head in dry-hot valley based on the RTK-GPS technology[J]. *Mountain Research*, 2014, 32(6):706-716.
- [14] GÓMEZ-GUTIÉRREZ Á, SCHNABEL S, BERENGUER-SEMPERE F, et al. Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion[J]. *Catena*, 2014, 120:91-101.
- [15] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文, 等. 东北典型黑土区侵蚀沟发育演化特征分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(4):105-110.
- WANG W J, DENG R X, ZHANG S W, et al. Development evolution characteristics of gully erosion in typical black soil region of Northeast China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(4):105-110.
- [16] 李镇, 张岩, 姚文俊, 等. 基于 QuickBird 影像估算晋西黄土区切沟发育速率[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22):141-148.
- LI Z, ZHANG Y, YAO W J, et al. Estimating gully development rates in Hilly Loess Region of Western Shanxi Province based on QuickBird images[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22):141-148.
- [17] 张岩, 高驰宇, 杨瑾, 等. 基于历史卫星影像估算黄土丘陵区冲沟发育速率[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1):109-116.
- ZHANG Y, GAO C Y, YANG J, et al. Estimating the gully growth rate in the hilly Loess Plateau using historical satellite images[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(1):109-116.
- [18] 唐杰, 张岩, 范聪慧, 等. 使用高分遥感立体影像提取黄土丘陵区切沟参数的精度分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18):111-117.
- TANG J, ZHANG Y, FAN C H, et al. Accuracy assessment of gully morphological parameters from high resolution remote sensing stereoscopic satellite images on hilly Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18):111-117.
- [19] 赵春敬, 焦菊英, 税军锋, 等. 西藏中南部侵蚀沟形态无人机航测与传统地面测量的对比分析[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5):120-127.
- ZHAO C J, JIAO J Y, SHUI J F, et al. Comparative

- analysis on morphological characteristics of erosion gullies measured by an unmanned aerial vehicle and traditional ground survey in south central Tibet[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5):120-127.
- [20] PETER K D, D'OLEIRE-OLTMANN S, RIES J B, et al. Soil erosion in gully catchments affected by land-leveling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data[J]. Catena, 2014, 113:24-40.
- [21] HOSSEINALIZADEH M, KARIMINEJAD N, CHEN W, et al. Spatial modelling of gully headcuts using UAV data and four best-first decision classifier ensembles (BFTree, Bag-BFTree, RS-BFTree, and RF-BFTree) [J]. Geomorphology, 2019, 329:184-193.
- [22] GOODWIN N R, ARMSTON J, STILLER I, et al. Assessing the repeatability of terrestrial laser scanning for monitoring gully topography: A case study from Aratula, Queensland, Australia [J]. Geomorphology, 2016, 262:24-36.
- [23] 杨丽娟,王春梅,张春妹,等.基于遥感影像研究极端暴雨条件下新成切沟发生发展规律[J].农业工程学报, 2022, 38(6):96-104.
- YANG L J, WANG C M, ZHANG C M, et al. Occurrence and development of newly formed gullies under extreme rainstorm conditions using remote sensing images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6):96-104.
- [24] TANG J, LIU G, XIE Y, et al. Effect of topographic variations and tillage methods on gully erosion in the black soil region: A case-study from Northeast China [J]. Land Degradation and Development, 2022, 33(18): 3786-3800.
- [25] 李珊.水利部组织完成东北黑土区侵蚀沟调查(节选) [J].水利科学与寒区工程, 2023, 6(8):e157.
- LI S. The Ministry of Water Resources organized the investigation of erosion gully in the black soil area of Northeast China (excerpt)[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2023, 6(8):e157.
- [26] ZHANG T Y, LIU G, DUAN X W, et al. Spatial distribution and morphologic characteristics of gullies in the Black Soil Region of Northeast China: Hebei watershed[J]. Physical Geography, 2016, 37(3/4):228-250.
- [27] 杨卫,刘晓阳.利用无人机获取林区 DSM 的方法[J].资源信息与工程, 2019, 34(6):66-68.
- YANG W, LIU X Y. Method of obtaining DSM in forest area by UAV[J]. Resource Information and Engineering, 2019, 34(6):66-68.
- [28] LI Z, ZHANG Y, ZHU Q K, et al. Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau [J]. Geomorphology, 2015, 228: 462-469.
- [29] 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.
- FENG L, LI B B. Establishment of high precision terrain model of eroded gully with UAV oblique aerial photos and ground control points [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(3):88-95.
- [30] 宋晓鹏,张岩,王志强,等.无人机摄影测量提取黄土高原切沟参数精度分析[J].北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(5):606-612.
- SONG X P, ZHANG Y, WANG Z Q, et al. Accuracy of gully morphological parameters extracted by UAV photogrammetry in the Loess Plateau [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(5):606-612.
- [31] 孙杰,谢文寒,白瑞杰.无人机倾斜摄影技术研究与应用 [J].测绘科学, 2019, 44(6):145-150.
- SUN J, XIE W H, BAI R J. UAV oblique photogrammetric system and its application[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(6):145-150.
- [32] 胡晋茹,赖林枫,芦治源,等.消费级无人机倾斜摄影测量监测弃土场的精度评估[J].测绘通报, 2023(11):36-41.
- HU J R, LAI L F, LU Z Y, et al. Accuracy evaluation of consumer UAV tilt photogrammetry for spoil area monitoring[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(11):36-41.