

# 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

赵春敬<sup>1</sup>, 焦菊英<sup>1,2</sup>, 税军锋<sup>1,2</sup>, 王颢霖<sup>1</sup>,  
陈同德<sup>1</sup>, 陈一先<sup>2</sup>, 安韶山<sup>1,2</sup>, 郭明航<sup>1,2</sup>, 杨力华<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所 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 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 分析无人机和传统地面方法测量侵蚀沟形态的差异, 研究无人机影像提取西藏地区侵蚀沟形态的适宜性, 以期准确、快速获取西藏地区沟蚀参数, 为该地侵蚀沟快速调查与防治提供基础资料。[方法] 选取 6 个研究地点 20 条侵蚀沟, 对实地测量与无人机正射影像提取的沟长、沟宽进行对比分析。[结果] 与实地测量相比, 影像提取侵蚀沟沟长的平均偏差集中在 2%~5%; 沟宽的平均偏差集中在 0~40%, 其中实测沟宽范围在 400~1 000 cm 时, 提取值和实测值的偏离程度最低。在 6 个研究地点中, 影像提取值的偏离程度和侵蚀沟所处位置没有明显的关系。沟缘土质、沟缘线附近的植被及放牧对沟缘的踩踏是影响侵蚀沟形态提取的主要因素。[结论] 无人机遥感可为西藏地区沟蚀监测提供便捷、可靠的数据源。

**关键词:** 沟蚀; 侵蚀沟形态参数; 无人机影像; 西藏地区

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2019)05-0120-08

**中图分类号:** S157.1, V279+.2

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbetb.2019.05.017; Zhao Chunjing, Jiao Juying, Shui Junfeng, 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.

## Comparative Analysis on Morphological Characteristics of Erosion Gullies Measured by an Unmanned Aerial Vehicle and Traditional Ground Survey in South Central Tibet

Zhao Chunjing<sup>1</sup>, Jiao Juying<sup>1,2</sup>, Shui Junfeng<sup>1,2</sup>, Wang Haolin<sup>1</sup>,  
Chen Tongde<sup>1</sup>, Chen Yixian<sup>2</sup>, An Shaoshan<sup>1,2</sup>, Guo Minghang<sup>1,2</sup>, Yang Lihua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712000, China; 2. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy Sciences, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712000, China)

**Abstract:** [Objective] The measurement differences between an unmanned aerial vehicle (UAV) and traditional ground methods were analyzed, and the suitability of extracting the morphological characteristics of erosion gullies by UAV orthophotos in Tibet was studied in order to obtain the parameters of erosion gullies accurately and quickly, with the aim to provide basic information for the prevention and control of gully erosion in the area. [Methods] A total of 20 erosion gullies were selected from 6 research sites, to compare the lengths and widths of erosion gullies measured through field measurements and extraction from UAV orthophotos.

收稿日期: 2019-05-13

修回日期: 2019-07-06

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”子课题“土壤侵蚀定量评价与分区防控对策(XDA20040202)”

第一作者: 赵春敬(1996—), 女(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: 18341842621@163.com。

通讯作者: 焦菊英(1965—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 研究员, 主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn。

[Results] Compared to the results from the field measurements, the mean deviation extent of the erosion gullies' length and width extracted by orthophotos was concentrated between 2%~5% and 0~40%, respectively. Additionally, when the measured width was in the range 400~1 000 cm, the deviation between the extracted and measured values was the lowest. Across the 6 research sites, there was no obvious relationship between the deviation extent of the erosion gullies' morphological parameters extracted by orthophotos and the location. The soil and vegetation near the gully shoulder lines and the grazing damage to the gully shoulder lines were the main factors affecting the extraction of the erosion gullies' morphological characteristics.

[Conclusion] UAV remote sensing can provide a convenient and reliable data source for gully erosion monitoring in Tibet.

**Keywords: gully erosion; morphological parameters of erosion gullies; unmanned aerial vehicle orthophotos; Tibet**

西藏自治区位于中国西南边陲,地处青藏高原的西南部,素有亚洲“江河源”、“生态源”之称。区内地域辽阔,地貌及气候类型复杂多样,土壤侵蚀类型众多<sup>[1]</sup>。西藏水土流失面积  $1.03 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占自治区总面积的 85.43%<sup>[2]</sup>,严重的土壤侵蚀日益威胁着该区土地安全,制约着区域经济社会的可持续发展。从水土流失分布的地域来看,以拉萨、日喀则为代表的山地丘陵区水土流失最为严重,在该区植被差、土层厚的侵蚀沟中表现最为突出<sup>[3]</sup>。沟蚀作为一种最具破坏性的水蚀类型,导致了大量土壤的流失和退化,是土壤侵蚀剧烈发展的具体表现形式。中国对土壤侵蚀研究已有丰硕的成果,对侵蚀沟的研究多侧重于其形成机理<sup>[4-5]</sup>、分类<sup>[6-8]</sup>、动态监测<sup>[9-10]</sup>及治理对策<sup>[11]</sup>等。目前,西藏地区的土壤侵蚀研究相对薄弱,主要围绕土壤侵蚀类型和特点<sup>[1,12]</sup>、基于模型的土壤侵蚀分级与分布<sup>[13-16]</sup>、侵蚀分区及治理对策<sup>[17-18]</sup>进行,加之自然条件限制,侵蚀沟的相关研究更加不足。准确测量侵蚀沟的形态是沟蚀研究的基础。传统测量方法利用皮卷尺、微地形剖面仪等工具测量侵蚀沟横截面特征值<sup>[19-20]</sup>,操作简单,但耗时耗力,不适合大范围作业。而无人机航测技术以获取的影像地面分辨率高且实时传输、适于高危地区探测、机动灵活和操作技术难度低等优点,为侵蚀沟形态测量提供了一种新方法<sup>[21]</sup>。但在西藏这样的高海拔区域,无人机飞行受到自然条件的影响,很多时候仍然需要使用传统的地面测量方法。本文通过对比分析传统地面测量和无人机测量两种方法提取侵蚀沟特征的差异,探讨二者的适用性,以期在西藏地区进行侵蚀沟监测合理选择测量方法提供参考依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区拉萨及日喀则市,属于高

原温带半干旱大陆性季风气候区。区内人为活动频繁,平均海拔在 4 500 m 以上,是冻融侵蚀作用的主要地带<sup>[22]</sup>。土壤主要为高寒草原土、山地草原土和山地灌丛草原土。土地利用类型多为牧草地,以高寒草甸自然植被为主。拉萨和日喀则年均降水量分别为 426.5 mm 和 430.5 mm,年均蒸发量分别为 1 217 mm 和 1 875.3 mm,降水都主要集中在 6—9 月;年平均气温分别是 8.0 ℃ 和 6.5 ℃,太阳辐射强,年均日照时数分别为 2 992 h 和 3 205 h<sup>[23-25]</sup>。本次试验在研究区选取 6 个地点共 20 条侵蚀沟作为研究对象,6 个地点的地貌如图 1 所示。侵蚀沟的编号,实地测量的长度、宽度、深度等基本信息见表 1。

### 1.2 侵蚀沟地面测量

于 2018 年 8 月,在 6 个研究地点选择具有代表性的侵蚀沟,采用断面测量法对某段或整条侵蚀沟的形态进行测量。具体做法是:采用 GPS(GARMIN GPSmap 629sc,测定精度  $\pm 3 \text{ m}$ ) 在断面测量的起点、终点及明显转折处定位获取地理坐标,每隔 3 个测量断面再次记录地理坐标。同时,利用奥维地图在测点处添加定位点,在沟道分岔处用 GPS 再次标记经纬度,获取这些点位的地理坐标为后期在影像上确定所测量的侵蚀沟及对应测量断面位置做参考。在测点处,沟宽和沟深测量同时进行。两人在侵蚀沟的两侧拉直卷尺(钢尺量程 7.5 m,皮尺量程 50 m)测量垂直于径流方向、沟壁上沿左右间的距离作为沟宽(W);另一人在沟中持钢尺使其垂直于测量沟宽的卷尺,测从沟底最深处至侵蚀沟所在地表的距离为沟深(D)。一个断面的沟宽和沟深测量完成后,一人站在测点处(一侧沟缘或沟中心)不动,另一人拉直卷尺沿一侧沟缘线或沟中心线行走,根据侵蚀沟大小和形态,以 5,10,15,20 m 作为两个测量断面的间隔,长度较长时适当增加测量间隔。对于形态复杂的侵蚀沟,适当加密测量断面。



图 1 西藏中南部 6 个调查点地貌实景

表 1 实地测量的侵蚀沟基本信息

研究地点	经纬度	侵蚀沟编号	所处位置	平均海拔/m	测量长度/m	宽度范围/m	深度范围/m
叶巴村	29°41'35"N, 91°16'22"E	YB-1	洪积扇	3 900	320	2.8~14.6	0.4~4.1
		YB-2	洪积扇	3 840	73	0.3~2.4	0~0.7
		YB-3	洪积扇	3 870	75	0.4~2.6	0.1~1.2
茶巴朗村	29°24'6"N, 90°49'9"E	CBL-4	坡面	3 630	65	3.0~15.2	0.8~0.9
		CBL-5	坡面	3 690	20	0.4~0.6	0~0.3
		CBL-6	坡面	3 760	82	1.5~14.7	1.0~1.6
马乡	29°51'43"N, 90°44'29"E	MX-7	洪积扇	4 000	680	1.4~23.2	0.3~3.4
		MX-8	洪积扇	4 050	121	5.7~8.2	1.3~2.0
百林村	29°17'1"N, 89°48'51"E	BL-9	坡面	3 850	40	0.6~3.4	0.1~1.0
		BL-10	坡面	3 900	45	0.8~3.2	0.3~2.0
		BL-11	洪积扇	3 860	80	2.4~5.5	0.2~9.6
		BL-12	洪积扇	3 880	60	0.5~2.6	0~0.7
斯希	29°15'34"N, 88°55'58"E	SX-13	洪积扇	3 900	70	10.3~14.4	6.1~10.9
		SX-14	洪积扇	3 910	68	0.8~3.2	0~0.6
		SX-15	洪积扇	3 910	81.6	1.6~5.0	0.1~0.7
		SX-16	洪积扇	3 860	141	1.4~2.9	0.6~1.0
才乌	29°8'54"N, 88°8'7"E	CW-17	坡面	4 110	60.2	0.9~3.5	0.1~1.5
		CW-18	坡面	4 130	38.5	1.3~5.4	0.2~0.8
		CW-19	坡面	4 150	63.9	1.3~6.4	0~1.2
		CW-20	坡面	4 090	56.3	1.7~3.8	0.4~1.4

### 1.3 无人机遥感影像获取及处理

1.3.1 无人机野外航拍 采用四旋翼智能航拍无人机,型号为 DJI 大疆精灵 Phantom 4 Pro V 2.0,其相机与云台一体化集成,相机模型是 FC 6310,焦距为

8.8 mm,像素数为  $5\,472 \times 3\,648$ ,像元大小为  $2.41 \times 2.41 \mu\text{m}$ 。野外测量所用 GPS 和无人机相机的 POS 文件的地理坐标系统均为 WGS 84。航摄时选择晴朗无风或微风天气,以保证充足的日照采光条

件和飞行稳定性。在 DJI GS Pro 软件中画出无人机飞行区域,点击航线规划。该软件将控制无人机按照规划的航线执行飞行和拍摄任务。在综合考虑航拍范围、飞行高度、无人机电池续航能力、地形起伏及影像精度等情况下,将无人机实地航拍的相关参数设置如表 2 所示。

无人机 GPS 的定位精度为垂直 $\pm 0.5$  m,水平 $\pm$

1.5 m;航拍影像分辨率在 4.87~7.2 cm 之间;受研究点地形地貌等因素的影响,航拍高度控制在 196~255 m 范围内;航线间隔及旁向重叠度在 30%~40% 之间,航向重叠度在 65%~75% 之间;像片倾斜角小于 $2^{\circ}$ ,旋偏角小于 $7^{\circ}$ ,航线弯曲度小于 3%。以上航拍参数设置均符合《低空数字航空摄影规范》对航拍作业的要求<sup>[26]</sup>。

表 2 无人机航拍设置参数

地点	飞行日期	距离地面飞行高度/m	飞行覆盖面积/ km <sup>2</sup>	照片数量/ 张	地面分辨率/ (cm · pix <sup>-1</sup> )
叶巴村	20180818	255	0.29	66	6.48
茶巴朗村	20180820	270	1.71	730	6.89
马乡	20180822	288	1.39	323	7.20
百林村	20180823	196	0.47	175	4.87
斯希	20180824	234	4.06	1245	5.78
才乌	20180825	226	1.07	393	5.69

1.3.2 正射影像生成 航拍完成后,首先生成正射影像(DOM),进而基于正射影像提取侵蚀沟的沟长、沟宽值。制作高分辨率正射影像主要由图像预处理、空中三角测量、正射镶嵌三部分构成。针对本研究目的,在航摄影像质量检查合格后,将其导入 Agisoft PhotoScan 软件,进行特征点的检测与匹配、相机自标定、对齐照片、点云稀疏重建以及稠密重建工作,最

后输出正射影像(见图 2)。生成的正射影像要求色彩均匀清晰,颜色饱和无云影和划痕,层次丰富,反差适中,可充分展现侵蚀沟的细节信息。根据 Agisoft PhotoScan 软件生成的评价正射影像精度的质量报告,区域网空三误差的变动范围为 0.444~0.662 像素,符合 1:1000 地形图误差要求<sup>[27]</sup>;相机自检校误差在 2% 以内,符合相机焦距误差需小于 5% 的要求。

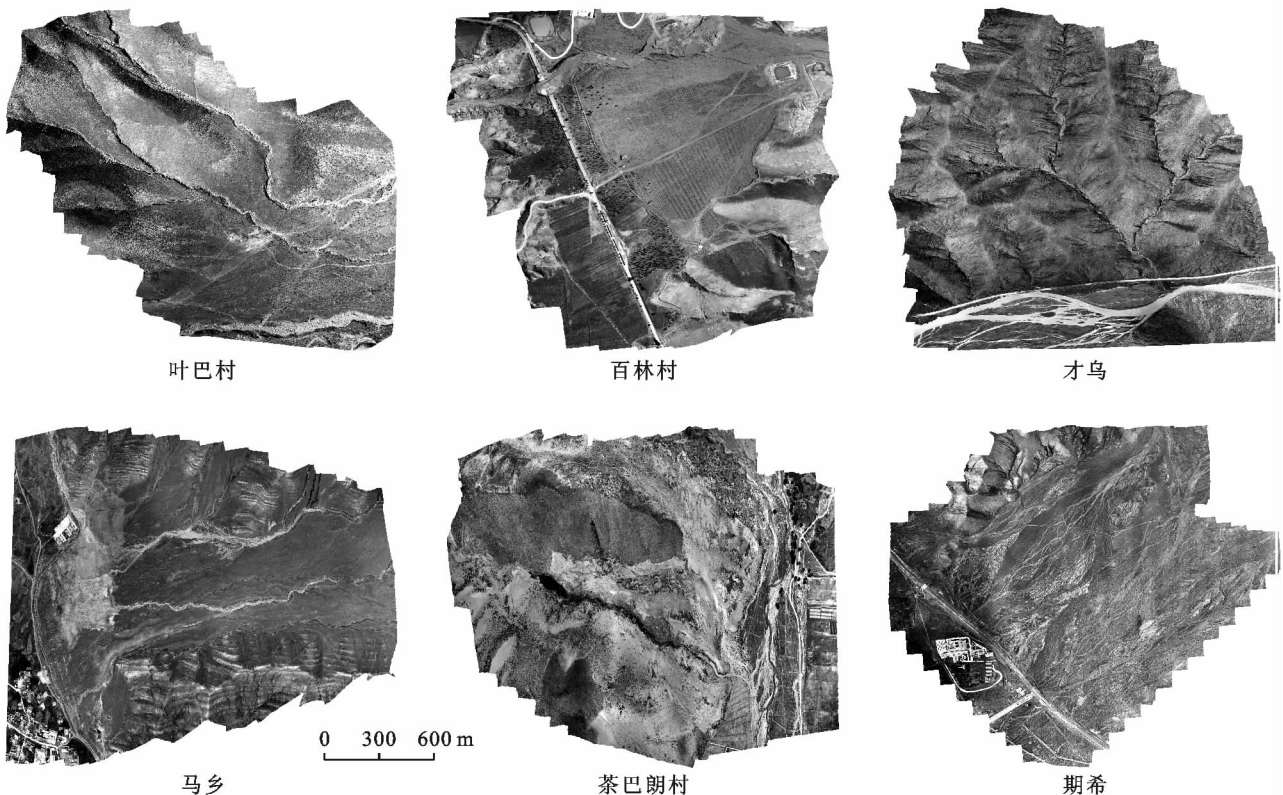


图 2 研究地点的正射影像

1.3.3 侵蚀沟形态参数提取 将输出的正射影像导入 ArcMap 10.2 软件中,在影像上找到特征点,即野外测量时放置的白色纸张或某个明显转折处的石块等,结合奥维影像和定位点确定测量起点、终点及其他测点位置。同时,以实地拍摄照片辅助判读正射影像,以获得基于影像的侵蚀沟沟长和沟宽。首先,建立线状矢量图层,利用目视解译方法手动描绘沟缘线。其次,在测点处画出垂直于沟底流水线、且和沟缘线相交的线段作为沟宽。根据沿沟缘或沟中心线的测量间隔确定下一个测量断面位置后,方法同上画出沟宽线段。连接相邻两个沟宽线段的中点作为两个测量断面的沟长,各断面间沟长的总和即为所测量某段或整条侵蚀沟的沟长。最后,为该线状图层添加“length”字段,利用 ArcMap 的“计算几何”功能计算各沟宽、沟长线段的值。

#### 1.4 无人机航测与地面测量结果对比分析

基于地面实际测量的沟宽、沟长值,对正射影像提取结果进行对比分析。以偏离度 DE(deviation extent)反映影像提取值偏离实测值的程度;平均偏离度 MDE(mean deviation extent)反映多次提取偏离结果的集中趋势。各指标的计算公式如下:

$$DE = \frac{|X - A|}{A} \times 100\% \quad (1)$$

$$MDE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - A_i|}{A_i} \times 100\% \quad (2)$$

即使传统地面测量方法存在诸多弊端,但通过对比和经验发现,在野外实地测量的沟长、沟宽值与真实值相比不会超过 1 m。而即使是利用精度较高的影像提取沟宽、沟长时,也会出提取偏差现超过 1 m 的现象。所以本研究选择地面测量值为目标数据。

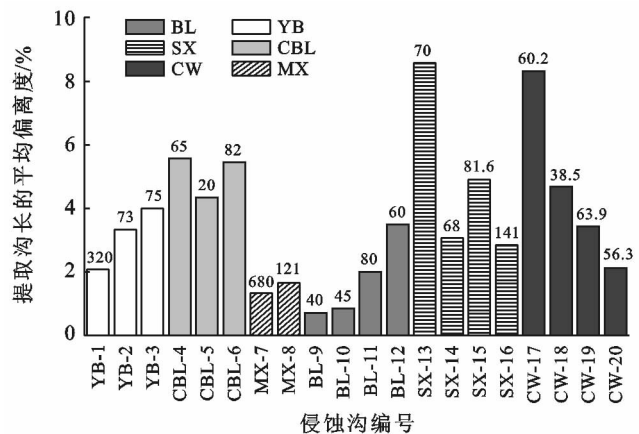
式中:  $X$ ——影像提取值即实际数据;  $A$ ——实地测量值即目标数据;  $n$ ——样本个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 沟长的对比分析

影像提取 20 条侵蚀沟沟长的绝对偏差在 0.3~9.1 m 之间,其中绝对偏差小于 5.0,4.0,3.0,2.0,1.0 m 的比例分别为 85.0%,75.0%,60.0%,40.0%,15.0%。沟长的 MDE 在 0.7%~8.57% 之间,集中于 2%~5%(见图 3)。这表明,就沟长而言,利用无人机影像提取和传统实地测量均能得到较好的测量结果。进一步分析侵蚀沟所处位置对沟长提取结果的影响,发现 BL-9 和 BL-10 的沟长提取值最接近实测值;MX-7 和 MX-8 提取沟长的 MDE 仅高于 BL-9, BL-10;而斯希和才乌研究点各侵蚀沟提取沟

长的 MDE 相差较大,分别在 2.84%~8.57% 和 2.13%~8.31% 之间,均值分别为 4.81% 和 4.64%;叶巴村和茶巴朗村研究点的侵蚀沟提取沟长的 MDE 相差较小,分别在 2.09%~4.00% 和 4.33%~5.58% 之间,均值分别为 3.22% 和 5.12%。出现以上结果的主要原因是,在野外条件下,地形高低起伏,侵蚀沟中心线并不总是处于同一个平面。实地测量得到的沟长是包含实际地形起伏的长度,而基于正射影像提取的沟长是投影后的水平长度。如沟长 MDE 最大的侵蚀沟出现在斯希洪积扇和才乌坡面,其中斯希的侵蚀沟形状不规则且拐点较多,地形破碎;才乌的侵蚀沟所处坡面坡度变化大,沟道浅且隆起多,这些因素导致了沟长测量结果出现较大偏差。位于百林村坡面上的侵蚀沟所处坡面的坡向单一,相对平坦,侵蚀沟形状规则且拐点少,因此野外测量和影像提取的沟长值更加接近,其 MDE 仅有 0.70% 和 0.85%。



注:柱状图上方数字为地面测量的侵蚀沟沟长(m);图中大写字母为采样地代号:YB为叶巴村;CBL为茶巴朗村;MX为马乡;BL为百林村;SX为斯希;CW为才乌。下同。

图 3 侵蚀沟提取沟长的平均偏离度

### 2.2 沟宽的对比分析

#### 2.2.1 不同范围沟宽提取的对比分析

(1) 依据 259 个侵蚀沟实测断面,统计分析各沟宽范围内实地测量与影像提取的宽度。实地测量和影像提取的沟宽范围分别在 20~2 320 cm 和 19~2 210 cm 之间,其中实测 0~200 cm 和 200~400 cm 沟宽范围内的测点占总数的 35.9%,23.6%,沟宽值集中分布在 0~400 cm 范围内。结果表明,提取沟宽的绝对偏差小于 2 m 的断面占 89.58%,其中小于 1 m 的部分占 73.75%;DE 范围为 0~92.1%,主要集中在 0~40%,其中沟宽的 DE<15%,<10% 和 <5% 的比例分别为 43.63%,28.57% 和 15.44%。实测沟宽

在 0~200 cm 和 200~400 cm 范围时, MDE 均高于 20%, 分别为 27.6% 和 23.9%; 沟宽在 400~1 200 cm 范围时, MDE 均低于 20%, 介于 14.9%~19.9%。

(2) 为了直观分析影像提取不同范围沟宽的偏离情况, 以探明影像提取不同沟宽的侵蚀沟的适宜性。本文对不同沟宽范围内, 提取沟宽的 MDE 在 < 5%, 5%~10% 和 10%~20% 范围内的测点数占该范围内测点总数的百分比进行了统计。除 0~100 cm (实测) 区间, 其余区间 MDE 小于 20% 的沟宽测点均占区间测点总数的一半以上, 其中 600~700 cm (实测) 区间达到 76.92%, 此区间内接近实地测量值的提取值所占比例最大。当实测沟宽在 200~300, 400~500, 700~800, 900~1000 cm 时, MDE 小于 10% 的沟宽测点分别占区间总测点的 37.50%, 37.50%, 42.10%, 50.00%, 高于其他区间所占比例; 当实测沟宽在 400~500 cm 和 900~1000 cm 时, MDE 小于 5% 的沟宽测点所占比例明显高于其余区间, 该区间内提取值接近真实值的概率更大。就 MDE 小于 20%, 10% 和 5% 的测点数所占比例来看, 沟宽在 400~1 000 cm 范围内, 影像提取值和实测值较接近, 偏离程度较小 (见图 4)。出现以上结果的原因是无人机航拍时未布设地面控制点, 导致影像上沟道断面位置和实地测量的沟道断面位置不完全一致, 沟宽提取的偏差总体较大。当沟宽小于 400 cm 时, 受分辨率影响, 在影像上不易识别出侵蚀沟的具体形状, 只能看到较模糊的轮廓。尤其当侵蚀沟宽度小于 100 cm 且较浅时, 影像放大后这类沟几乎与坡面或洪积扇融为一体, 提取的沟缘线往往包含裸地, 造成结果偏大; 沟宽大于 1 000 cm 的侵蚀沟内侧通常有灌木生长且长势良好, 导致在影像上看到的沟缘线往侵蚀沟内侧偏移, 此时提取的沟宽值偏小。

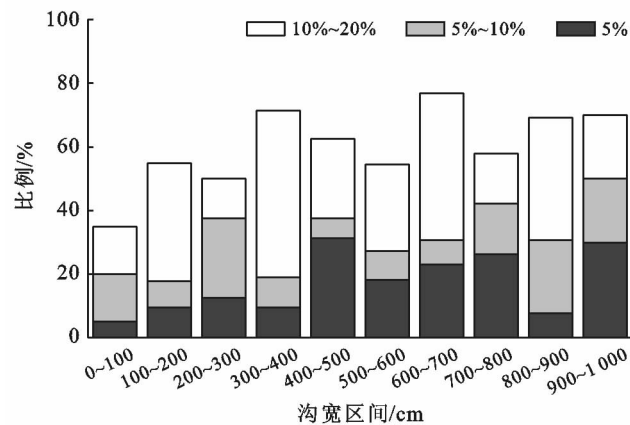
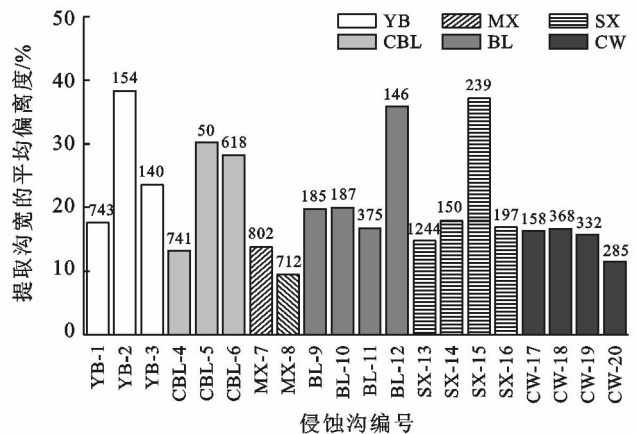


图 4 不同沟宽区间内 MDE 小于 5%, 10%, 20% 的测点比例分布

2.2.2 不同地貌上侵蚀沟沟宽提取的对比分析 影像提取 20 条侵蚀沟沟宽的 MDE 集中分布在 13%~20% 之间 (12 条), 其中 14 条侵蚀沟提取沟宽的 MDE < 20%。MX-8 沟宽的 MDE 最小为 9.5%, YB-2 最大为 38.34%。一般来说, 同一研究地点内, 侵蚀沟的平均宽度越大, 影像提取的 MDE 越小, 如 YB-1, YB-2 和 YB-3; CBL-4, CBL-5 和 CBL-6 (图 5)。6 个研究点中, 叶巴村、茶巴朗、百林和斯希研究点沟宽提取的 MDE 非常接近, 分别达到 22.90%, 24.97%, 24.22 和 23.62% (图 6)。不同于其他研究点所测侵蚀沟仅分布在一种地貌上, 百林村研究点所测侵蚀沟既有位于坡面的也有位于洪积扇的, 位于坡面和洪积扇的侵蚀沟提取沟宽 MDE 分别为 19.82% 和 27.66%。出现以上结果的原因是, 在叶巴村研究点, YB-2 的平均宽度为 154 cm, 在该沟测量断面最窄处, 地面测量沟宽仅 20 cm, 而提取值为 55 cm, 导致影像提取沟宽值的偏离程度最大。茶巴朗和斯希研究点的侵蚀沟下垫面为沙地, 在影像上边缘不清晰, 易受两侧流沙的影响, 导致对沟宽的判别偏大。调查发现百林村研究点植被 (盖度 30%) 沿着沟缘生长且存在放牧情况, 土质相对疏松, 沟缘线因动物踩踏受到破坏, 使沟宽的准确界定受到影响; 与坡面相比, 该研究点洪积扇上的侵蚀沟形状复杂且下垫面地形破碎, 故洪积扇上提取沟宽的偏离程度更大。马乡研究点地表土质坚硬, 侵蚀沟切割较宽且深, 在影像上容易识别, 其 MDE 最小。才乌研究点的侵蚀沟 CW-17 的平均沟宽为 158 cm, 但其沟中及沟两侧几乎无植被, 且在实地测量时经历一场降雨, 目睹侵蚀沟汇流, 有助于准确界定沟宽, 在此情况下, 实地测量沟宽值和影像提取值的接近程度更大。



注: 柱状图上方数字为地面测量的侵蚀沟平均沟宽 (cm)

图 5 侵蚀沟提取沟宽的平均偏离度

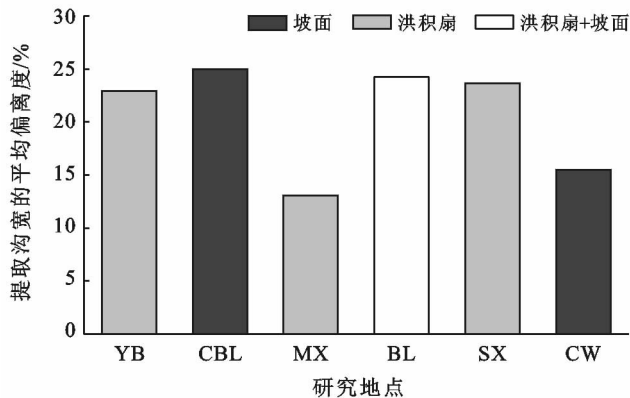


图 6 影像提取不同位置沟宽的偏离程度

### 3 讨论与结论

本研究利用无人机航空摄影测量技术,通过 Agisoft PhotoScan 软件对航拍影像进行处理。在 ArcGIS 软件中基于生成的正射影像对侵蚀沟形态进行测量,比较实地测量和影像提取侵蚀沟形态的差异。

(1) 和实地测量相比,基于无人机影像提取 20 条侵蚀沟沟长的平均偏离度集中分布在 2%~5% 范围内,这和李镇等<sup>[28]</sup>利用 QuickBird 影像提取切沟沟长的偏差结果一致。6 个研究点中侵蚀沟 BL-9 和 BL-10 沟长提取的偏离度最低,绝对偏差分别为 0.3 m 和 0.4 m,平均偏离度分别为 0.70% 和 0.85%。这可能是无人机在百林村研究点的飞行高度相对较低(196 m),侵蚀沟在影像上表现的更为清晰,易于准确识别沟缘线。这一结果也表明在合适的飞行参数条件下,如飞行高度较低时,影像提取的侵蚀沟沟长值与实地测量的沟长值相比偏差较小,能满足试验要求,无人机航测可取代地面测量方法。然而,在实际试验中,由于西藏地区山高坡陡且无人机的飞行时长有限,往往会设置较高的高度,以覆盖更大的飞行面积,这也是本次野外试验存在的弊端。此外,对比不同研究点沟长的测量偏差发现,沟长测量偏离度受地形起伏及测量拐点的影响较大,沟缘线随地形高低起伏的区域是产生测量偏差的主要位置,在实地测量沟长过程中应该特别注意。

(2) 就侵蚀沟宽度测量而言,在青藏高原地区,获取 0~400 cm 的沟宽值最好采用实地测量方法,获取 400~1 000 cm 的沟宽值可采用无人机航拍方法。侵蚀沟沟宽提取的平均偏离度较小的多为中、大型沟,其中当沟宽在 600~700 cm 和 900~1 000 cm 范围内时提取沟宽的平均偏离度最小,提取值最接近地面测量值。这和影像本身的分辨率有关,当沟宽小于

400 cm 和大于 1 000 cm 时,在影像上不易准确勾画出沟缘线,因此沟宽提取值和实测值的偏离程度较大。此外,当沟宽较小时,即使绝对偏差很小,也会出现影像提取值与实测值偏离程度较高的情况。这也说明即使遥感成像技术发展迅猛,但目前野外实地测量仍有其重要意义。在 6 个研究点中,坡面和洪积扇侵蚀沟提取沟宽的偏离度高低没有明显的规律。这是由于在西藏自治区新构造运动强烈,在不同地貌部位其地表物质有明显差异,导致各个研究点的下垫面情况不同。如洪水季节坡面冲刷的大量泥沙导致洪积扇上砂质洪积物广泛分布,位于洪积扇的侵蚀沟边缘不清晰,不易识别,如 YB-1 和 SX-13;而坡面地表大多为岩石,侵蚀沟切割明显,如 CW-17 和 CW-20。此外,位于洪积扇的侵蚀沟由于海拔相对较低且地势相对平坦,表层土壤是坡面水土流失的沉积物,养分含量及土壤质地条件较好,该环境下侵蚀沟覆盖着长势良好的植被,对影像反映侵蚀沟真实轮廓也造成一定影响,往往因为在影像上看到的侵蚀沟包含了裸土及荒草地导致提取沟宽数值偏大,如 SX-15。

(3) 本研究认为在采用适宜的无人机航拍参数条件下,生成正射影像并提取侵蚀沟形态参数的方法是可行的。该方法和传统地面测量相比,节省了大量人力和物力,特别是在海拔高、地形陡峭、地势险要的青藏高原地区,具有一定的实际借鉴意义。然而,航拍时未能布设地面控制点,这对在影像上准确提取侵蚀沟参数产生了一定影响;在今后的试验中应选用精度较高的仪器如 RTK、全站仪测量地面控制点,避免此类问题。分析 6 个研究地点中 20 条侵蚀沟的长度和 259 个侵蚀沟测量断面上的沟宽发现,影响侵蚀沟形态参数提取的主要原因是部分侵蚀沟的边缘不清晰。同时,在野外试验过程中,受测量人员视线及对沟缘线位置判断的主观影响,也会导致测量结果和在影像上勾画的沟缘线不一致。此外,一些形态较为复杂的侵蚀沟,下垫面破碎或拐点较多导致在影像上提取沟宽、沟长时偏差较大,从而影响了侵蚀沟形态的准确提取。如何准确界定侵蚀沟的边缘线,也是今后沟蚀研究的重点内容之一。本试验研究的侵蚀沟形态参数仅有沟长和沟宽,在未来的试验中,可考虑利用雷达测量沟深,以获得更多的侵蚀沟形态信息。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张建国,文安邦,柴宗新,等. 西藏自治区土壤侵蚀特点及现状[J]. 山地学报,2003,21(S1):148-152.
- [2] 中华人民共和国水利部. 第二次全国土壤侵蚀遥感调查报告[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2001.

- [3] 张鹏,格桑卓玛,范建容,等. 西藏“一江两河”地区土壤侵蚀现状及分布特征[J]. 水土保持研究,2017,24(1):49-53.
- [4] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报,1956,4(2):99-115.
- [5] 刘元保,朱显谟,周佩华,等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):9-18.
- [6] 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.
- [7] 刘秉正,吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安:陕西人民出版社,1997.
- [8] 石长金,温是,何成全. 侵蚀沟分类及防治与利用研究[J]. 水土保持科技情报,1995(1):33-37.
- [9] 张科利,钟德钰. 黄土坡面沟蚀发生机理的水动力学试验研究[J]. 泥沙研究,1998(3):74-80.
- [10] 闫业超,张树文,岳书平. 近40 a黑土典型区坡沟侵蚀动态变化[J]. 农业工程学报,2010,26(2):109-115.
- [11] 孟令钦. 东北黑土区沟蚀机理及防治模式的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.
- [12] 刘淑珍,张建国,辜世贤. 西藏自治区土壤侵蚀类型研究[J]. 山地学报,2006,24(5):592-596.
- [13] 方广玲,香宝,赵卫,等. 基于GIS和RUSLE的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报,2015,29(3):6-12.
- [14] 刘斌涛,陶和平,史展,等. 青藏高原土壤可蚀性K值的空间分布特征[J]. 水土保持通报,2014,34(4):11-16.
- [15] 康琳琦,周天财,干友民,等. 1984—2013年青藏高原土壤侵蚀时空变化特征[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(2):245-253.
- [16] Teng Hongfen, Liang Zongzheng, Chen Songchao, et al. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models[J]. Science of the Total Environment,2018,635:673-686.
- [17] 陶华,刘顺宗,范建荣,等. 西藏水土流失分区及治理对策[J]. 中国水土保持,1999(2):19-21.
- [18] 常春平. 拉萨河下游河谷区风沙源综合整治[J]. 水土保持研究,2007,14(6):219-222.
- [19] Casali J, Loizu J, Campo M A, et al. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion[J]. Catena, 2006,67(2):128-138.
- [20] 张洪江,李猛,江玉林,等. 高速公路边坡侵蚀沟特性初步研究:以银武高速公路同心至固原段为例[J]. 北京林业大学学报,2007,29(6):143-147.
- [21] Daba S, Rieger W, Strauss P. Assessment of gully erosion in Eastern Ethiopia using photogrammetric techniques[J]. Catena, 2003,50(2/3/4):273-291.
- [22] 张建国,刘淑珍. 西藏冻融侵蚀空间分布规律[J]. 水土保持研究,2008,15(5):1-6.
- [23] 韦泽秀,卓玛,曲航,等. 海拔与积温梯度对春青稞生长的影响[J]. 西藏农业科技,2018,40(S1):11-15.
- [24] 米玛次仁,格桑曲珍,旦增尼玛,等. 西藏拉萨半干旱地区气候条件下的桃树嫁接与管护技术[J]. 西藏科技,2018(4):68-70.
- [25] 格桑卓玛,巴桑次仁. 日喀则气候变化对青稞生产潜力和增产空间的影响分析[J]. 农业与技术,2018,38(11):140-142.
- [26] 国家测绘局. CH/Z 3004-2010 低空数字航空摄影测量外业规范[S]. 北京:测绘出版社,2010.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 7930-2008. 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,2008.
- [28] 李镇,张岩,杨松,等. QuickBird影像目视解译法提取切沟形态参数的精度分析[J]. 农业工程学报,2014,30(20):179-186.