

基于无人机倾斜摄影技术的黄土丘陵区典型 小流域淤地坝特征信息提取与分析

李博永^{1,2}, 冯青郁¹, 贺宏斌^{1,2}, 陈乐^{1,2}, 陈利顶¹

(1.中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085;

2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)

摘要:淤地坝现状特征信息的精准提取对于淤地坝运行现状评估十分重要,全面的淤地坝特征信息可为病险坝除险加固提供重要依据,当前淤地坝特征信息提取尚缺乏科学高效的技术。针对此问题,拟提出基于无人机倾斜摄影技术提取淤地坝运行现状特征的方法,以无人机航拍影像为基础数据,生成三维实景模型和高精度 DEM,用于淤地坝数目、位置、剩余库容、有效坝高等重要现状信息的提取和测量,进而分析小流域内淤地坝分布、组成结构、坝体信息、淤积程度、坝控流域面积等特征。将此技术应用于陕西省榆林市子洲县蛇家沟小流域,详细提取 1 座大型坝和 3 座中型坝的现状特征信息。经过同野外实测数据对比,提取的淤地坝坝体信息相对误差均 $<3.8\%$ 。所识别的大型坝剩余库容不足,处于基本淤满状态,且坝顶明显沉降,在极端降水条件下具有极大的漫顶溃坝风险。坝地耕作面积占小流域面积比例仅为 2.17%,仍有坝地尚未开垦利用。研究结果可为小流域淤地坝动态监测与科学管理提供新方法和新思路。

关键词:淤地坝;无人机;三维建模;蛇家沟小流域

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)06-0091-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.06.012

Extraction and Analysis of Feature Information of Typical Small Watershed Check Dams in the Loess Plateau Gully Region Based on UAV Tilt Photography Technology

LI Boyong^{1,2}, FENG Qingyu¹, HE Hongbin^{1,2}, CHEN Le^{1,2}, CHEN Liding¹

(1.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for

Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085;

2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Accurate extraction of the current characteristics of check dam is very important for the evaluation of check dam, and the comprehensive characteristic information of check dam can provide an important basis for the reinforcement of diseased and dangerous dam. However, the current check dam feature information extraction still lacks scientific and efficient technology. To address this problem, the proposed method was based on the unmanned aerial vehicle (UAV) tilt photography technology to extract the characteristics of the current status of check dam operation. UAV aerial images were used as the base data to generate a 3D real scene model and a high-precision DEM for the extraction and measurement of important current information such as the number, location, remaining storage capacity, and effective dam height of the check dam, and then analyze the distribution, composition structure, degree of siltation, dam-controlled watershed area and other characteristics of siltation dams in a small watershed. This technology was applied to the small watershed of Shejiagou in Zizhou County, Yulin City, Shaanxi Province, to extract detailed information on the current status characteristics of one large-scale dam and three medium-sized dams. After comparing with the measured data in the field, the relative error of the check dam body information was less than 3.8%. The

收稿日期:2023-04-14

资助项目:国家自然科学基金面上项目(4207070403)

第一作者:李博永(1997—),男,博士研究生,主要从事淤地坝安全及风险防控研究。E-mail:byli_st@rcees.ac.cn

通信作者:冯青郁(1986—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事区域复合生态系统模型和流域面源污染模型的开发与应用等方面研究。E-mail:qyfeng18@rcees.ac.cn

identified large dams had insufficient remaining capacity and were in a largely silt-filled state, and the crest has obvious subsidence, which has a significant risk of dam failure under extreme precipitation conditions. The proportion of the dam land cultivated area to the small watershed area was only 2.17%, there was still land uncultivated as farmland. The research results can provide a new method and idea for dynamic monitoring and scientific management of check dams in small watersheds.

Keywords: check dams; UAV; 3D modeling; Shejiagou small watershed

黄土高原区水土流失具有面积广、侵蚀强度大、时间分布集中等特点^[1]。严重的水土流失不仅造成黄土高原生态环境退化和农业发展受限^[2],而且导致地表破碎、沟道泥沙淤积,加剧洪水、滑坡崩塌等灾害的威胁^[3]。黄土高原人民经过长期水土流失治理实践,探索出既能拦沙削洪,又能治沟造地的淤地坝水土保持工程措施^[4-5]。但随着淤积年限增长,淤地坝逐渐出现老化失修、库容不足等现象,其拦沙和滞洪能力明显降低^[6],易成为病坝或险坝,当遭遇超标洪水时存在极大的溃坝致灾风险^[7],严重地威胁着下游人民生命财产安全^[8]。开展现有淤地坝的风险隐患排查、抗洪能力评估、定期动态监测等工作,须掌握其特征信息。淤地坝特征信息是淤地坝基本属性和运行现状的表征,包括淤地坝分布、组成结构、坝体信息、淤积程度和坝控流域面积 5 个方面特征信息。

鉴于淤地坝在黄土高原中的作用和地位,获取淤地坝特征信息的方法已有很多。传统获取淤地坝特征信息的方法是野外实测,多为淤地坝大规模普查^[9],为淤地坝减沙效益分析^[10]、坝系结构解析^[11]、土壤侵蚀估算^[12]等方面研究提供基础数据,但其存在工作效率较低、复杂的地形测量存在风险和成本较高等不足,获取次暴雨后或逐年淤地坝特征信息十分困难^[13]。其他用于淤地坝特征信息的获取方法还包括放射性核素示踪法^[14]、数学模型模拟^[15]、泥沙淤积体概化模型^[16]等,但已有方法多集中于淤地坝淤积量的估算。遥感技术的发展,为淤地坝大面积观测、淤地坝信息提取和动态变化监测等相关研究提供技术支撑。卫星遥感影像不仅被应用于淤地坝分布特征的解析^[17],还被应用于获取淤地坝的数目、位置、海拔、坝地面积等统计信息^[18]。但受遥感卫星高精度 DEM 数据获取成本高、复杂地形区域获取细节信息不具备灵活性等影响^[19],淤地坝单体组成结构的定性分析与淤积程度的定量分析方法十分有限,并且无法用于判断淤地坝的病险隐患^[20]。近年来,无人机遥感的普及、倾斜摄影技术的成熟,使得淤地坝信息的数字化、直观化、可视化逐渐成为可能^[21]。无人机倾斜摄影技术不仅可获取厘米级的 DEM 数据^[22],还可以获得三维实景模型。

针对小流域淤地坝现状监测与风险识别的需求,

现有淤地坝信息提取方法尚具有极大的提升空间,急需既能保证信息的全面性,又可广泛地推广使用的淤地坝特征信息提取方法。以蛇家沟小流域为例,将无人机倾斜摄影技术应用于淤地坝特征信息提取,为后续淤地坝关键特征的自动识别技术研发提供重要的技术参考,以期淤地坝的风险识别与科学管理提供关键技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

蛇家沟小流域(109°57′—109°59′E, 37°40′—37°42′N)位于陕西省榆林市子洲县(图 1),为岔巴沟流域的一级支沟。蛇家沟流域属典型黄土丘陵沟壑区,流域总面积为 4.38 km²,流域长度 4.5 km,平均宽度 1.05 km,海拔为 890~1 116 m^[23]。蛇家沟小流域属于半干旱大陆性季风气候,年降水量 450 mm,6—8 月降水量占全年 70%,且多为强度大、历时短的暴雨^[24]。2017 年“7·26”特大暴雨造成子洲县 40 余座大型淤地坝溃坝,使得下游房屋、车辆和桥梁等受到不同程度的损毁^[25]。蛇家沟既是子洲县水土保持重点治理和长期监测的小流域,也是“7·26”暴雨受灾严重的区域^[26]。

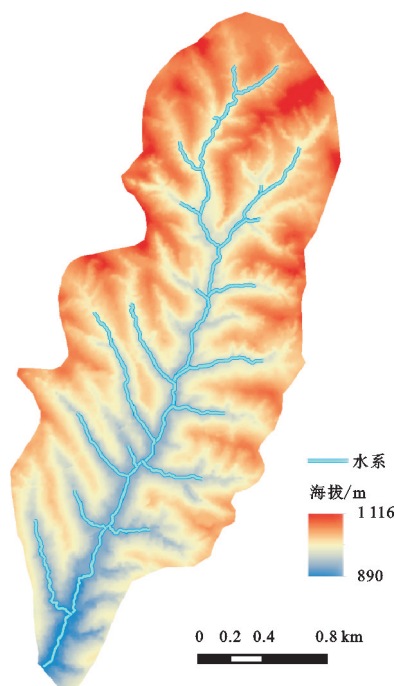


图 1 研究区海拔高程示意

1.2 无人机影像获取

根据无人机航拍摄影测量面积和流域的地形地貌规划飞行航线,采用设备为 CW-007 大鹏无人机,搭载的相机为 SONY ILCE-7RM2,传感器尺寸为 35.9 mm×24 mm(全画幅)。2022 年 9 月 11 日执行飞行任务,飞行相对高度保持在 350 m,航向与旁向重叠率均为 75%,共获得876 张倾斜航图,每张航图携带配套的 POS(position and orientation system)数据。同时在流域内均匀布设 15 个以 CGCS 2000 为坐标系的地理坐标已知的地面控制点(ground control points,GCPs),通过地面控制点信息纠正无人机影像出现的几何误差。野外采集无人机影像期间,人工调查淤地坝信息,用于对倾斜摄影技术所提取的淤地坝特征信息精度的验证。

1.3 高精度 DEM 和流域三维实景的生成

高精度 DEM 和三维实景数据的处理流程见图 2。首先,将航图与 POS 数据导入 Agisoft PhotoScan 软件,检查航图有无漏拍、变形拉花的现象等。其次,将照片进行对齐处理(即空间三角测量,简称“空三”)^[27]。之后根据预估的相机位置,把计算出来的目标点信息组合成稠密的点云。再次,根据密集的云数据生成三维网格模型并进行纹理构建,实现二维信息点转化为三维可视模型^[28],用于生成数字地表模型 DSM、数字高程模型 DEM 和数字正射影像图 DOM^[29]。最后,经过空中三角测量、多视影像密集匹配^[30]、TIN 模型构建、纹理映射^[31]等关键步骤(图 2)^[32]生成小流域实景三维模型(图 3)。

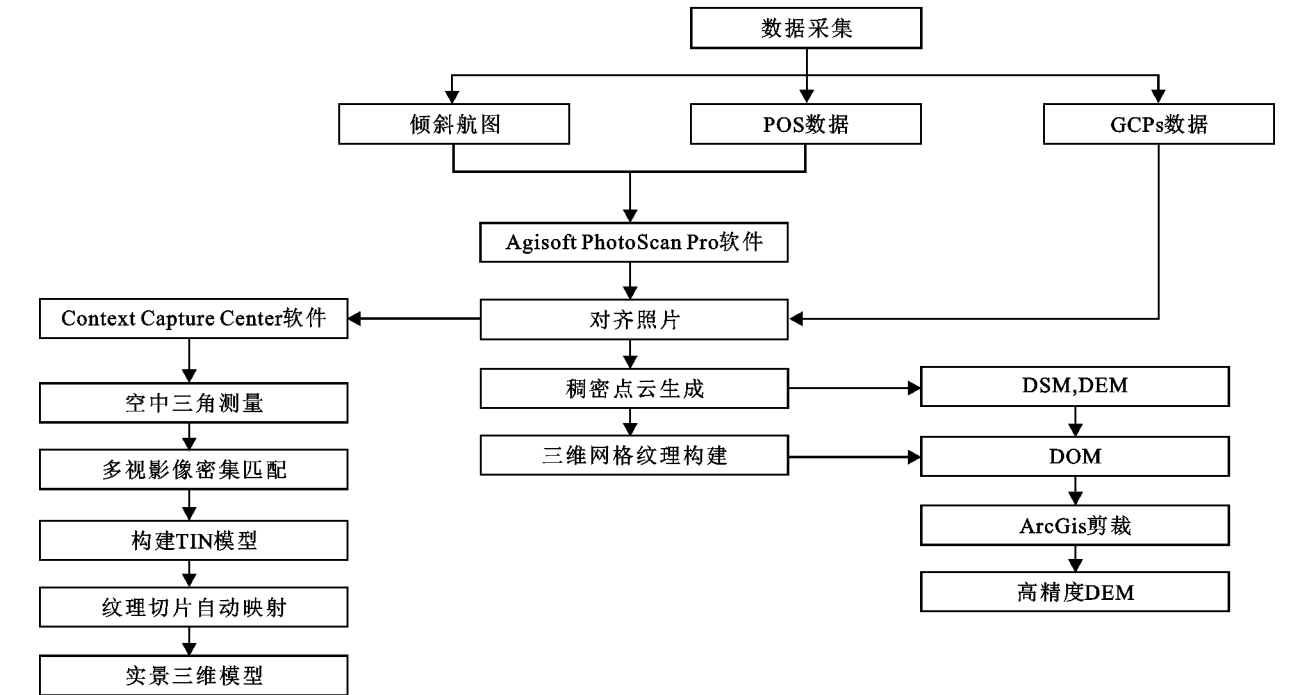


图 2 基于无人机倾斜摄影技术生成三维模型和高精度 DEM 数据流程



图 3 利用倾斜摄影技术生成的蛇家沟小流域实景三维模型

1.4 淤地坝特征信息提取与计算

淤地坝特征信息包括分布特征(数量、位置)、组成结构(坝体、溢洪道、放水建筑物的组成及是否完

好)、坝体特征(总坝高、有效坝高、坝顶长宽)、淤积程度(剩余库容、坝地耕作面积)以及坝控流域面积特征 5 个方面信息。

淤地坝位置、数量、组成结构以组成建筑物是否完好等信息的提取采用目视解译,淤地坝组成结构特征是坝体、溢洪道、放水建筑物三部分组成状况。根据淤地坝建筑物特征及沟道内土地利用变化确定淤地坝的位置,并对数量和组成结构进行统计。采用多角度立体观测淤地坝,判断坝体和溢洪道的外部形态是否完好。淤地坝坝体信息、坝地耕作面积利用南方 CASS 软件 3D 模块的测图功能进行测量(图 4),总坝高为坝顶和下游坝底部的高程差,有效坝高为坝顶和上游淤积面的高程差。淤地耕作面积测量是沿耕地边缘画线形成闭合不规则图形,闭合不规则图形面积即为淤地耕作面积。

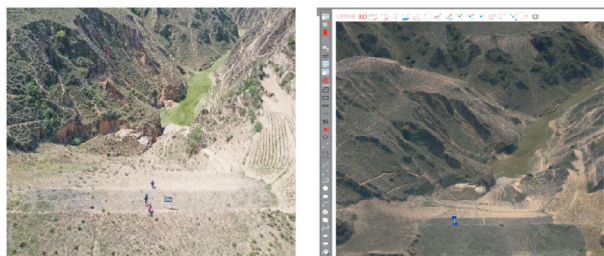


图 4 人工野外测量和软件室内测量

坝控流域面积通过中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室自主研发的源汇景观模型进行计算,基于 Arc Map 的 python toolbox 所开发,通过调用 TauDEM 的流域划分模块、自研的每个栅格到流域子流域出口模块,定义淤地坝为子流域出口,即可计算出坝控流域面积。剩余库容根据淤地坝的上游坝地和坝顶的高程值计算,使用 Arc GIS 软件空间分析中 Raster Calculator 工具来确定未淤积的范围,将未淤积的体积分成若干个小长方体,通过对每个小长方体的体积分求和来计算,所使用的数学模型的计算公式为:

$$V = \sum_{i=1}^n A(H - h_i)$$

式中: V 为剩余库容; A 为单个栅格的底面积值,即 9 m^2 (3 m 的 DEM); H 为淤地坝坝顶的高程值 (m); h_i 为高程小于坝顶的栅格高程值 (m); n 为高程值小于 H 的栅格个数。

2 结果与分析

2.1 淤地坝分布、组成结构特征

淤地坝一般根据库容、坝高、坝控流域面积等因素进行分级,根据《水土保持综合治理技术规范》^[33]和《水土保持治沟骨干工程技术规范》^[34],将淤地坝分为大型坝、中型坝、小型坝。在蛇家沟小流域共提取淤地坝 4 座,其中大型淤地坝 1 座、中型淤地坝 3 座(图 5)。从淤地坝的分布特征来看,4 座淤地坝均分布在流域沟道中。蛇家沟 1# 坝为大型淤地坝,位于主沟的下游,包括坝体和卧管;蛇家沟 2# 坝为中型淤地坝,由坝体和放水建筑物组成,放水建筑物为卧管;3# 坝和 4# 坝位于流域上游,均为中型淤地坝,由坝体和放水建筑物组成,放水建筑物均为竖井。淤地坝组成建筑物的受损状况,1# 坝坝体顶部部分受损,坝顶土地出现明显沉降现象,并被种植农作物,1# 坝的卧管完好,其余 3 座淤地坝坝体和放水建筑物均完好。

2.2 坝体信息的提取及精度分析

为验证提取淤地坝总坝高、有效坝高、坝顶长等特征信息方法的可行性,对比人工实测值并进行相对误差计算,表 1 为 4 座淤地坝坝体信息的基本统计量。蛇家沟 4 座淤地坝总坝高和坝顶长提取值均呈 1# 坝 > 2#

坝 > 3# 坝 > 4# 坝,而有效坝高提取值大小呈 3# 坝 > 2# 坝 > 4# 坝 > 1# 坝,其中 3# 坝有效坝高提取值为 9.9 m ,1# 坝虽是大型坝,其有效坝高提取值仅为 1.7 m 。4 座淤地坝提取总坝高与实测值的误差绝对值均低于 0.6 m ,其中最小值为 0,而相对误差为 $0 \sim 3.4\%$,平均为 1.6% 。4 座淤地坝提取有效坝高与实测值的误差绝对值为 $0 \sim 0.2 \text{ m}$,相对误差最大值为 3.8% 。坝顶长相对误差为 $0.6\% \sim 1.8\%$,坝顶宽提取值与实测值的误差绝对值均低于 0.1 m 。1# 坝的总坝高、有效坝高、坝顶宽 3 项指标的误差均为 0。

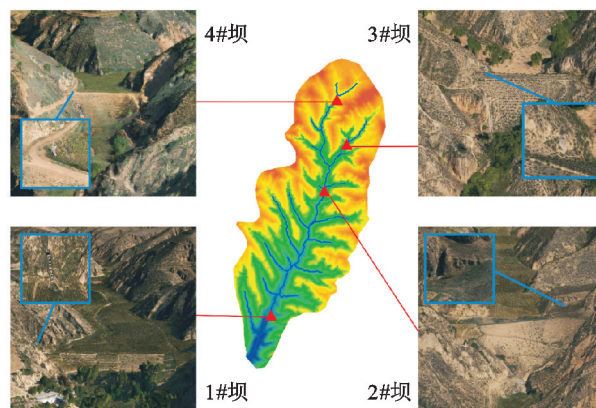


图 5 蛇家沟小流域淤地坝及放水建筑物分布

表 1 提取和实测淤地坝信息的基本统计量

数值 类型	淤地坝 编号	总坝高	有效 坝高	坝顶长	坝顶宽
提取值/ m	1#	27.7	1.7	136.6	7.5
	2#	24.1	5.5	60.4	4.6
	3#	19.5	9.9	57.4	6.8
	4#	16.9	4.3	53.2	4.6
实测值/ m	1#	27.7	1.7	137.5	7.5
	2#	23.8	5.3	60.9	4.5
	3#	19.7	9.9	56.5	6.8
	4#	17.5	4.2	52.5	4.5
相对误差/ $\%$	1#	0	0	0.6	0
	2#	1.3	3.8	0.8	2.2
	3#	1.0	0	1.6	0
	4#	3.4	2.4	1.3	2.2

2.3 淤地坝淤积现状和坝控流域面积

由图 6 可知,蛇家沟小流域 1#、2# 和 4# 坝地均进行农业生产,耕作面积分别为 $6.58, 2.23, 0.62 \text{ hm}^2$,3# 坝地处于自然淤积状态,尚未进行开垦造地。选取剩余库容、有效坝高与总坝高比值 2 个指标作为淤积现状评价的主要依据。蛇家沟 1# 坝未设立淤地坝防汛公示牌,总库容无法获取,作为小流域内唯一大型淤地坝,其总库容建设标准应为 $50 \sim 500 \text{ 万 m}^3$,剩余库容(表 2)仅为 7.89 万 m^3 ,剩余库容约占总库容的 $1.6\% \sim 15.8\%$,有效坝高占总坝高的 6.1% 。1# 坝剩余库容 < 20% ,有效坝高占总坝高 < 10% 。2# 坝、3# 坝和 4# 坝的淤

积状态判断,有效坝高占总坝高的百分比均 $>20\%$,剩余库容分别为 6.63 万,1.96 万,0.54 万 m^3 。蛇家沟 1# 坝控流域面积为 4.11 km^2 ,其余 3 座淤地坝坝控流域面积分别为 1.77,0.3,0.3 km^2 。

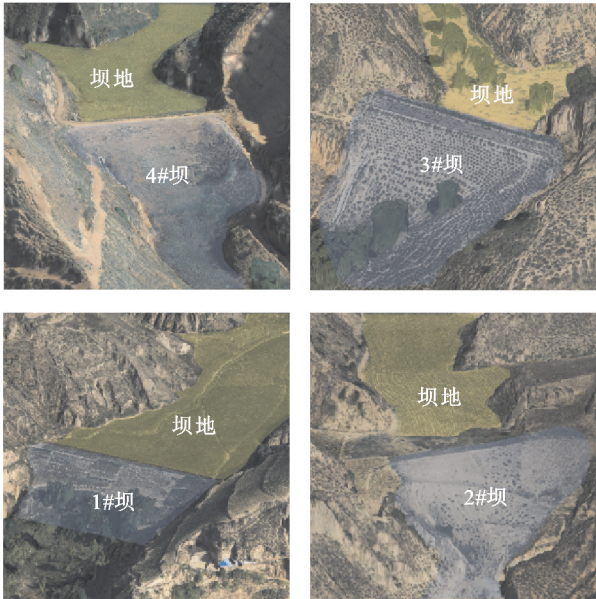


图 6 蛇家沟小流域淤地坝和坝地现状

表 2 蛇家沟淤地坝淤积现状和坝控流域面积

淤地坝 编号	剩余库容/ 万 m^3	有效坝高/ 总坝高/ $\%$	坝地耕作 面积/ hm^2	坝控流域 面积/ km^2
1#	7.89	6.1	6.58	4.11
2#	6.63	22.3	2.23	1.77
3#	1.96	50.8	0	0.30
4#	0.54	24.0	0.62	0.30

3 讨论

3.1 淤地坝特征信息提取的精度评价

利用无人机倾斜摄影技术对淤地坝特征信息提取与分析,影响提取结果的关键因素包括植被、地形、蓄水量等要素。王启宏^[20]采用的方法为 GIS 空间分析与机器学习相结合,基于高分辨率遥感影像对青海省民和县内淤地坝进行识别与分析发现,15 座中型坝仅能识别出 12 个影像,精确率约为 80%,结果准确率受限于影像质量和样本训练量。该研究方法也无法对淤地坝的病险特征样本进行标注,使得对于病险淤地坝的识别提取仍不能实现。三维模型对于淤地坝特征能够真实还原,蛇家沟小流域淤地坝数量和分布的识别准确率可达到 100%;张齐飞等^[18]利用多源遥感数据提取淤地坝坝地信息,结合 2015 年监测数据对比发现,坝地面积提取误差约为 15%。而本次淤地坝坝体特征信息提取的相对误差均 $<3.8\%$ 。存在一定偏差的原因主要是自然灾害造成淤地坝建筑形态不规整和不均一,加之淤地坝下游树木较多,难以分辨淤地坝

真正的底部。耕地长度(上百米)和淤地坝的坝顶长度(几十米)测量的绝对误差最大值仅为 0.9 m,所以,坝地耕作面积测量误差基本可以忽略不计。王虎^[35]利用无人机倾斜摄影进行校园测绘时,其结果表明面积误差约为 0.4 m^2 ,高程误差不超过 0.37 m,无人机倾斜摄影技术可有效地保证剩余库容、有效坝高、总坝高等指标的测量精度。

3.2 倾斜摄影提取淤地坝信息的优势

高标准淤地坝建设应强调推广新技术、新工艺、新材料,用于淤地坝建造与管理^[36],通过技术的突破与应用来确保淤地坝安全运行和可持续发挥效益。截至 2020 年,在黄河流域黄土高原地区已建成淤地坝 58 129 座,呈离散点状分布^[37]。相较于传统人工实地调查统计,开展大区域范围内淤地坝特征信息普查,本研究采用的方法可以有效地提高工作效率。相较于使用遥感卫星影像资料生高精度 DEM 的方式,无人机倾斜影像生成三维模型的方式,具有反应迅速、机动灵活、性价比高等优势。例如,地形复杂、植被类型复杂区域的淤地坝或是小型坝的监测,使用三维实景模型可以获取更为清晰的细节信息。相较前人^[17]利用高分二号卫星影像,进行淤地坝分布特征分析,未来可采用无人机倾斜摄影方法,根据淤地坝的位置、形状以及周围植被等信息制定不同的测绘方案。

3.3 淤地坝特征信息的潜在应用场景

选取剩余库容、有效坝高与总坝高比值 2 个指标作为淤积现状的评价依据,并结合实景三维模型和坝控流域面积进行淤地坝抗洪能力评估。蛇家沟 1# 坝的剩余库容约占总库容的百分比 $<20\%$,有效坝高占总坝高的百分比均 $<10\%$,可以判断 1# 坝已接近淤满。1# 坝位于下游,由图 5 可知,1# 坝坝顶明显沉降,坝顶部分区域种植作物,坝控流域为面积 4.11 km^2 (表 2),所以,防洪压力较大,存在发生漫顶溃坝的风险。2# 坝、3# 坝和 4# 坝的有效坝高占总坝高的百分比均 $>20\%$,3 座淤地坝的坝控流域面积小于 1# 坝,防洪压力远小于 1# 坝,2# 坝、3# 坝和 4# 坝,处于尚未达到淤满状态,仍具有一定的淤积潜力。同为中型坝,2# 坝在剩余库容、有效坝高与总坝高比值 2 项指标上,均优于 3# 坝和 4# 坝,2# 淤地坝在预期寿命和减水减沙性能等方面都存在优势。

3.4 研究不足与展望

本次采用 64 G 内存、英特尔 i7-10700 处理器的图形工作站进行无人机影像处理,生成小流域的高精度 DEM 和三维实景用时约 8 h。从淤地坝的目视解译到特征信息提取,整个过程共涉及 4 个软件,操

作相对繁琐且对处理设备配置有所要求,急需能够进行淤地坝特征信息完全自动化的提取方法来提高工作效率。在实际工作中,建议充分利用传统方法已经获取的淤地坝设计总库容信息,可直接计算单体淤地坝的淤积程度,对接近淤满的淤地坝和病险坝进行无人机遥感监测和除险加固,重点关注次暴雨后或逐年的淤地坝特征信息变化。

暴雨条件下的降雨量、径流和产沙量等过程数据无法通过无人机倾斜摄影的方法获取,后续可以利用无人机倾斜摄影技术对小流域淤地坝进行动态监测,将淤地坝特征数字化并结合降雨量、径流和产沙量等相关资料,评价淤地坝的安全性,为淤地坝溃坝成灾机理研究提供技术支撑。

4 结论

(1)从提取的效果来看,做到“定量”准确。淤地坝识别精度高达 100%,淤地坝有效坝高、总坝高、坝顶长宽等指标提取精度可达 96.2%,目标长度小于 10 m 时,测量结果绝对误差仅为 0.1 m。

(2)通过实景三维模型和高精度 DEM 能够充分挖掘淤地坝特征信息,做到“定性”恰当。实景三维模型能够真实反映运行现状和病险隐患,高精度 DEM 能够保证提取精度高,同时还具有监测指标全面、结果具有系统性等优势,对于小流域尺度的淤地坝关键特征信息获取具有巨大的潜力。

(3)无人机倾斜摄影技术可适用黄土丘陵区典型小流域淤地坝特征信息的提取,满足复杂地形区淤地坝监测实际应用需求。淤地坝工程的建设对于减少水土流失、防洪滞洪、提高农业生产、改善区域生态环境等方面已经产生重要影响,但淤地坝淤满使得拦沙、防洪能力明显减弱。淤地坝现状特征信息的获取,能够为小流域内淤地坝监测管理和高标准淤地坝建设规划提供重要参考。

参考文献:

- [1] 李永红,高照良.黄土高原地区水土流失的特点、危害及治理[J].生态经济,2011,27(8):148-153.
- [2] Leng Y Q, Peng J B, Wang Q Y, et al. A fluidized landslide occurred in the Loess Plateau: A study on loess landslide in South Jingyang tableland[J].Engineering Geology,2018,236:129-136.
- [3] 王有恒,谭丹,韩兰英,等.黄河流域气候变化研究综述[J].中国沙漠,2021,41(4):235-246.
- [4] 陕西省水土保持和移民工作中心.淤地坝:陕北黄土高原上的亮丽风景[J].中国水土保持,2019(10):3-4,71.
- [5] Wang Y F, Fu B J, Chen L D, et al. Check Dam in the Loess Plateau of China: Engineering for environmental services and food security[J].Environmental Science and Technology,2011,45(24):10298-10299.
- [6] 马建业,张扬,袁水龙.淤地坝系安全运行保障技术探析[J].中国水土保持,2019(5):6-8,31.
- [7] 惠波,惠露,郭玉梅.黄土高原地区淤地坝“淤满”情况及防治策略[J].人民黄河,2020,42(5):108-111,115.
- [8] 祖强,陈祖煜,于沐,等.极端降雨条件下小流域淤地坝系连溃风险分析[J].水土保持学报,2022,36(1):30-37.
- [9] 张建国,董亚维,李晶晶,等.黄土高原地区淤地坝拦沙淤积监测中存在的问题及方法探讨[J].水土保持通报,2022,42(6):387-392,399.
- [10] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J].Ecological Complexity,2011,8(4):284-293.
- [11] 宇涛,李占斌,陈怡婷,等.黄土丘陵第三副区典型淤地坝系结构特征分析[J].水土保持研究,2019,26(4):26-30,35.
- [12] Zhao G J, Klik A, Mu X M, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China[J].Geomorphology,2015,241:343-352.
- [13] 黎奕瑾,苏娟,张薇.荫子沟小流域监测实践[J].中国水土保持,2010(8):62-63.
- [14] 李勉,杨二,李平,等.淤地坝赋存信息在流域侵蚀产沙研究中的应用[J].水土保持研究,2017,24(3):357-362.
- [15] 李莉,史学建,杨吉山,等.次暴雨下小理河流域淤地坝拦沙能力分析[J].中国水土保持,2020(12):31-33,35.
- [16] 朱旭东,张维江,李娟.好水川流域小型水库及淤地坝泥沙淤积量估算[J].水土保持通报,2012,32(4):196-199.
- [17] 马煜栋,杨帅,韩静,等.陕西榆林地区无定河流域淤地坝遥感解译[J].干旱区地理,2022,45(3):786-791.
- [18] 张齐飞,孙从建,向燕芸,等.基于遥感信息的黄河中游水土流失敏感区淤地坝坝地资源特征研究[J].地球环境学报,2022,13(4):357-368,379.
- [19] 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.
- [20] 王启宏.民和县淤地坝遥感解译及其运行状况分析[J].中国水土保持,2023(2):54-58.
- [21] 李哲.基于无人机倾斜摄影测量技术的废弃矿山测量[D].河北 唐山:华北理工大学,2020.
- [22] 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):111-118,130.
- [23] 张乐涛,李占斌,肖俊波,等.黄土丘陵沟壑区典型小流域不同洪水类型侵蚀输沙效应[J].农业机械学报,2016,47(8):109-116.
- [24] 廖义善,卓慕宁,李定强,等.基于 GIS 黄土丘陵沟壑区分布式侵蚀产沙模型的构建:以蛇家沟小流域为例[J].泥沙研究,2012(1):7-13.

- 389(1/2):205-213.
- [15] Lei T W, Xia W S, Zhao J, et al. Method for measuring velocity of shallow water flow for soil erosion with an electrolyte tracer[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 301(1/2/3/4):139-145.
- [16] Shi X N, Zhang F, Lei T W, et al. Measuring shallow water flow velocity with virtual boundary condition signal in the electrolyte tracer method[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 452/453:172-179.
- [17] 王伟,陈杨,庄晓晖,等.极端降雨条件下秸秆覆盖坡面水流流速空间分布[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(2):149-156.
- [18] 董月群,庄晓晖,雷廷武,等.脉冲边界模型测量冻土坡面径流流速与距离优选[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2):146-152.
- [19] Lei T W, Yan Y, Shi X N, et al. Measuring velocity of water flow within a gravel layer using an electrolyte tracer method with a Pulse Boundary Model[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 500(8):37-44.
- [20] Abrantes J R C B, Moruzzi R B, de Lima J L M P, et al. Combining a thermal tracer with a transport model to estimate shallow flow velocities[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, 109:59-69.
- [21] Abrantes J R C B, Moruzzi R B, Silveira A, et al. Comparison of thermal, salt and dye tracing to estimate shallow flow velocities: Novel triple-tracer approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557:362-377.
- [22] de Lima J L M P, Abrantes J R C B. Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(10):1293-1300.
- [23] de Lima R L P, Abrantes J, Lima J, et al. Using thermal tracers to estimate flow velocities of shallow flows: Laboratory and field experiments[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2015, 63:255-262.
- [24] de Lima J L M P, Abrantes J R C B. Can infrared thermography be used to estimate soil surface microrelief and rill morphology? [J]. *Catena*, 2014, 113:314-322.
- [25] Zhuang X H, Wang W, Ma Y Y, et al. Spatial distribution of sheet flow velocity along slope under simulated rainfall conditions[J]. *Geoderma*, 2018, 321:1-7.
- [26] 谭文浩,陈晓燕,陶婷婷,等.重庆饱和紫色土坡面片流与细沟流水力学特性及临界条件试验研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3):66-72.
- [27] 王蒙,张宽地,王文娥等.用于梯形渠道的仿翼形便携式量水槽水力性能[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(3):76-83.
- [28] Di Stefano C, Nicosia A, Palmeri V, et al. Flume experiments for assessing the dye-tracing technique in rill flows [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 77:e101870.
- (上接第96页)
- [25] 党维勤,郝鲁东,高健健,等.基于“7·26”暴雨洪水灾害的淤地坝作用分析与思考[J]. *中国水利*, 2019(8):52-55.
- [26] 杨萌,宋晓鹏,张岩,等.黄土高原丘一区典型流域坡耕地分布及其侵蚀地形特征[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2020, 18(6):1-8.
- [27] 石硕.UAV航摄系统在水电工程大比例尺地形图测量中的应用[J]. *中国水能及电气化*, 2020(1):26-30.
- [28] 曹帅帅.无人机倾斜摄影测量三维建模的应用试验研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.
- [29] 王俊豪,魏云杰,梅傲霜,等.基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡信息多维提取与应用分析[J]. *中国地质*, 2021, 48(2):388-401.
- [30] 黄文诚.基于倾斜摄影的城市实景三维模型单体化及其组织管理研究[D].西安:长安大学,2017.
- [31] 孙丽红.基于倾斜摄影测量的废弃矿山生态修复应用研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
- [32] 杜磊.倾斜航空摄影技术在地质灾害集中分布区的应用研究:以三峡库区大宁河河口为例[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [33] 杨建辉.晋陕黄土高原沟壑型聚落场地雨洪管控适地性规划方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [34] Luo L H, Li F Y, Dai Z Y, et al. Terrace extraction based on remote sensing images and digital elevation model in the loess plateau, China[J]. *Earth Science Informatics* 2020(13):433-469.
- [35] 王虎.无人机倾斜摄影大比例尺地形图测绘及质量评价[D].安徽 淮南:安徽理工大学,2020.
- [36] 姚文艺,张攀.黄河流域高标准淤地坝内涵与科技问题[J]. *人民黄河*, 2023, 45(2):1-8.
- [37] 王逸男,孔祥兵,赵春敬,等.2000—2020年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3):130-137.