

# 无人机技术在生产建设项目水土保持监测中的应用

施明新

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

**摘要:** [目的] 对无人机低空遥感技术在水土保持监测中的应用进行探索, 为该技术应用于小流域综合治理、水土保持监督管理、施工监理和水土保持验收等方面奠定基础。[方法] 以浙江省长龙山抽水蓄能电站工程为例, 结合《生产建设项目水土保持监测规程(试行)》, 从背景资料分析、遥感数据获取、监测信息提取及应用 3 个方面, 开展无人机低空遥感技术在水土保持监测中的案例分析。[结果] 利用无人机低空遥感技术并结合传统定位观测手段, 能够精细化、量化地完成土地利用类型、扰动范围及流失量、弃渣场挖填方量、水土流失隐患及危害和水土保持措施等监测工作。[结论] 无人机低空遥感技术在水土保持监测中的应用可靠性高, 实用性强, 计算结果的精度满足《监测规程》要求, 有利于提高生产建设项目水土保持监测工作的技术水平, 可为防治水土流失提供技术支撑。

**关键词:** 无人机低空遥感技术; 水土保持监测; 生产建设项目; 抽水蓄能工程

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2018)02-0236-05

**中图分类号:** TV131.2

**文献参数:** 施明新. 无人机技术在生产建设项目水土保持监测中的应用[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 236-240. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.038. Shi Mingxin. Application of UAV remote sensing technology to monitoring of oil and water conservation for construction projects[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 236-240.

## Application of UAV Remote Sensing Technology to Monitoring of Soil and Water Conservation for Construction Projects

SHI Mingxin

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

**Abstract:** [Objective] The application of unmanned aerial vehicle(UAV) low altitude remote sensing technology in soil and water conservation monitoring is explored, which lays the foundation for the application of this technology to the comprehensive treatment of small watershed, supervision and management of soil and water conservation, construction supervision and acceptance of soil and water conservation. [Methods] Taking the Changlongshan pumped-water-storage power station project of Zhejiang Province as the study case, in reference to the regulation of soil and water conservation monitoring for construction projects(trial), we carried out the application of UAV remote sensing technology to the monitoring case analysis of soil and water conservation, including background data analysis, remote sensing data acquisition, monitoring information extraction and application. [Results] Low-altitude remote sensing technology of UAV, combined with traditional positioning observation method, can complete the monitoring work precisely and quantitatively. The works included the monitoring of land-use types, disturbed range and soil loss, cutting and filling volume, hidden dangers and harm of soil erosion, measures for soil and water conservation, etc. [Conclusion] Application of low altitude UAV remote sensing technology to monitoring of soil and water conservation has high reliability and practicability, and it can meet the requirements issued in the regulation of soil and water conservation monitoring for construction projects(trial). The more important things are that it can level up the technical skills if UAV remote sensing technology as applied in real work of soil and water conservation monitoring, and can give strong technical support for the prevention of soil and water loss in construction projects as well.

**Keywords:** UAV remote sensing technology; soil and water conservation monitoring; construction projects; pumped-water-storage power station project

随着工业化和城市化进程的深入,生产建设活动愈演愈烈,由此造成的人为水土流失不断增加。水土保持监测是开展水土流失防治工作的重要组成部分,是水土保持生态修复和综合治理的基础,是国家生态建设决策的有力保障<sup>[1]</sup>。近年来,生态文明建设被愈来愈重视,水土保持作为生态文明建设的重要组成部分,发挥着越来越重要的作用,同时对水土保持监测工作也提出了更为严苛的要求。传统监测手段存在受人为干扰强烈、精度较低、外业工作量大等缺点,难以适应水土保持监测快速化、自动化、精确化的发展要求;卫星遥感影像固定时空分辨率的特点无法满足对重点区域开展监测工作的需求。而无人机低空遥感技术具备全面性和高精度的特点,能有效弥补传统监测手段效率低、误差大和卫星遥感时效性差、机动性低的缺点<sup>[2-3]</sup>。结合现有的监测手段能显著提高工作效率、准确率和自动化程度,同时具备机动性强、便捷、成本低的优势<sup>[4-6]</sup>,已逐渐成为生产建设项目水土保持监测不可或缺的技术手段<sup>[7-9]</sup>。本文经充分调研分析,在浙江省长龙山抽水蓄能电站工程(以下简称“长龙山工程”)水土保持监测过程中,引入无人机低空遥感技术对该工程重点区域进行水土保持监测,对该技术在水土保持监测中的应用进行探索。同时,也为无人机技术应用于小流域综合治理、水土保持监督管理、施工监理和水土保持验收等奠定基础。

## 1 工程概况

长龙山工程位于浙江省安吉县境内,工程征、占地总面积为 225.55 hm<sup>2</sup>,其中永久征地 189.67 hm<sup>2</sup>,临时占地 35.88 hm<sup>2</sup>。计划施工总工期 99 个月,于 2016 年 1 月开工建设。工程区为浙西北天目山区中部中低山地貌,海拔 150~900 m;土壤类型主要为黄壤和红壤,属南方红壤丘陵区,现状土壤侵蚀强度为微度,土壤侵蚀模数 350 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主,侵蚀形态以面蚀和浅沟切沟为主;区内植被茂密,以马尾松、竹林、灌丛等为主,覆盖率 75%;属亚热带季风气候,雨量充沛,年均降水量 1 858.4 mm,年内分配不均,主要集中在 5—8 月。

## 2 无人机监测重点及航拍设备设施

### 2.1 监测重点

结合传统监测手段,以《生产建设项目水土保持监测规程(试行)》(以下简称《监测规程》)为依托,利用无人机技术对工程重点区域开展低空遥感监测,重点区域包括赤坞渣场、2<sup>#</sup>渣场、4<sup>#</sup>渣场、5<sup>#</sup>渣场和建设管理营地(紧邻潘村水库)。监测重点主要为扰动

土地面积变化情况,弃渣场废弃方量及变化情况,水土流失强度及程度,水土流失量变化情况,水土保持措施种类、数量、分布及实施效果、植被恢复率和植被覆盖率等。

### 2.2 航拍设备设施及参数设定

飞行器采用大疆“悟”Inspire 2,搭载禅思 X4S 镜头,配 1 英寸,2 000 万(5 472×3 548)像素传感器,等效焦距 24 mm;为增加野外操作可行性和工作效率,控制点设备采用校正后的 Garmin Etrex201 X 手持 GPS,精度达到亚米级(0.5~1 m),可满足《监测规程》中监测精度不小于 90%的要求;航拍参数设定软件采用瑞士 Pix4D 公司研发的航测数据智能采集软件 Pix4 Dcapture;航拍参数指标为航向重叠率 80%,旁向重叠率 70%,飞行高度 80~100 m,云台角度为 45°~80°;影像处理软件采用瑞士 Pix4D 公司开发的无人机专业数据处理软件 Pix4D Mapper,精度达 5 cm;数据提取软件采用地图绘制软件 Global Mapper 14.1, AcrGIS 10.2。

## 3 无人机航摄及数据处理

无人机低空遥感技术在水土保持监测中的应用主要分为 3 个阶段,包括背景资料分析、遥感数据获取、监测信息提取及应用。

### 3.1 背景资料分析

背景资料分析主要包括项目区自然因子(如地形地貌、土壤、植被、气象、水文等)、征地红线、施工工艺、施工进度,以及水土保持方案阶段设计的取土(石、料)、弃土(石、渣)场及临时堆放场地的数量、位置和方量等。通过分析基础资料,确定无人机重点监测的点位、范围和频次,同时为土(石)方量、土壤流失量等监测奠定基础。

### 3.2 遥感数据获取

首先需要在监测区内布设一定数量的地面控制点,控制点数量根据测区面积和地物类型的复杂程度确定,并用手持 GPS 进行控制点坐标的采集。控制点在测区内总体分布均匀,可作为整体精度的有力验证点位。无人机航拍前,运用 Pix4 Dcapture 软件对需要监测的区域进行航线规划,选用 Double Grid 模式(双 S 型航线)(图 1),设定参数后采取自动飞行的方式,飞行器在一个飞行架次内完成 2 个互相垂直的格网航线即完成数据采集工作。若监测区域面积较大或存在高空障碍物,可分为 2 个或多个飞行架次来完成数据采集工作。

### 3.3 水土保持监测信息的提取及应用

生产建设项目水土保持监测信息主要包括土地利

用类型及其变化情况、土石方量变化、水土流失情况和水土保持措施等。利用 Pix4D Mapper 软件对航拍照片进行拼接、调色及纠正处理,可生成精度为 5 cm 的 DOM 模型、精细的 DEM 模型和三维数字模型等成果,在该成果的基础上可进行相关信息的提取,将大量的外业工作转化为精细化测量的内业工作。



图 1 Double Grid 模式下的飞行路线

3.3.1 土地利用类型及其变化情况 土地利用类型主要通过人工目视识别,在计算机上直接勾绘出特定类型的地物。

3.3.2 扰动范围及流失量监测 扰动范围和流失面积的监测采用软件 Globalmapper 14.1 的多边形功能和数字化工具进行量取。土壤流失量监测主要有两种方法:一种是将无人机低空遥感技术与传统的地面观测相结合,利用项目区内已布设的定位观测点(如标准径流观测小区、测钎观测小区、侵蚀沟观测小区等),先计算出各类型区的侵蚀模数,再将各侵蚀模数乘以对应类型区的流失面积,即为该类型区的流失量,将各类型区流失量进行算术加和,计算出某一时段内该监测区的流失总量;另一种是基于 DOM 和 DEM 模型成果,提取出监测区内土地利用类型、流失面积、坡长、坡度、植被覆盖率、治理措施等因子,并结合土壤可蚀性、降雨量等资料,根据修正通用土壤流失方程(RUSLE)计算出土壤流失量<sup>[10]</sup>。最后,分析监测值是否满足《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》和《开发建设项目水土流失防治标准(GB50434-2008)》的要求。

3.3.3 取土(石、料)、弃土(石、渣)场挖填方量监测

挖填方量的监测需要在取(弃)土前对原地貌进行航拍,作为计算时的基准面,将施工期模型成果与原始地貌模型成果同时导入到 Globalmapper 14.1 中进行叠加分析,可测算出不同施工阶段取(弃)土场的挖填方量。另外,将不同施工期航拍成果导入到 Globalmapper 14.1 中叠加分析,可测算出不同施工阶段取(弃)土场挖填方量的变化情况。

3.3.4 水土流失隐患、危害监测 基于 DEM 和 DOM 模型,利用 Globalmapper 14.1 可生成三维数字模型,在 3D 效果下能够直观地发现监测区内水土流失隐患及危害,如是否存在开挖或回填坡比过大、不利于安全稳定的边坡和滑坡、崩塌、泥石流等水土流失危害。

3.3.5 水土保持措施监测 水土保持措施主要包括工程措施、植物措施和临时措施,因措施种类多样且分布零星,所以主要通过人工识别高精度的 DOM 模型进行统计分析,相比于传统的现场量测,极大提高了工作效率和准确性。

## 4 结果与分析

### 4.1 遥感数据获取

无人机航拍时间为 2017 年 6 月,为减小周边山体阴影及监测区内植被阴影的干扰,航拍作业时间选择太阳直射的正午前后或阴天,获得赤坞渣场、2<sup>#</sup>渣场、4<sup>#</sup>渣场、5<sup>#</sup>渣场和建设管理营地等 5 个重点监测区域的 DOM(精度 0.05 m)和 DEM(精度 0.20 m)成果(附图 5—9)。因监测区域面积均在 1 hm<sup>2</sup> 以上,所以 DOM 和 DEM 成果精度满足《监测规程》中扰动面积、土石方量、水保措施等监测精度不小于 90% 的要求。

### 4.2 信息提取及应用

4.2.1 土地利用类型 生产建设项目施工区内土地利用类型多样且不均匀分布,若采用计算机自动分类易造成明显误判,因此对重点监测区的土地利用类型主要采用人工识别的方法。土地利用类型划分以建设管理营地为例,总占地为 7.84 hm<sup>2</sup>(附图 10)。图中红色区域为有林地和灌木林地,约 1.06 hm<sup>2</sup>,蓝色区域为硬化路面,约 0.28 hm<sup>2</sup>,其余 6.50 hm<sup>2</sup> 为水工建筑用地和其他用地。

4.2.2 扰动范围及流失量监测 以 5<sup>#</sup>渣场为例,将 DOM 模型导入 Globalmapper 14.1 中可直接匡算出扰动面积为 6.56 hm<sup>2</sup>(图 2)。为进一步检验无人机遥感技术对扰动面积监测的精度,利用手持 GPS、皮尺对 5<sup>#</sup>渣场的扰动面积进行实地测量,实地测量的扰动面积为 6.71 hm<sup>2</sup>,满足《监测规程》中点型扰动面积监测精度不小于 95% 的要求。5<sup>#</sup>渣场占地范围内约有硬化面积(包括道路硬化和场地临时硬化)0.40 hm<sup>2</sup>,土壤流失面积共 6.16 hm<sup>2</sup>,其中含杂草坡面面积 1.41 hm<sup>2</sup>,平地及缓坡面积 0.66 hm<sup>2</sup>,堆渣边坡面积 4.09 hm<sup>2</sup>。通过对项目区内已布设定位观测点的泥沙监测,2017 年第 2 季度杂草坡面侵蚀模数约 600 t/(km<sup>2</sup>·a),平地及缓坡侵蚀模数约

1 000 t/(km<sup>2</sup>·a),堆渣边坡侵蚀模数约 2 400 t/(km<sup>2</sup>·a),采用算术加法计算 5<sup>#</sup>渣场 2 季度土壤流失总量为 28.31 t。另外,基于 DOM 和 DEM 模型成果和已收集的土壤、降雨等资料,提取出相应因子,取值分别为  $R=1347.68 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ,  $LS=0.19$ ,  $C=0.60$ ,  $K=0.26(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$  和  $p=0.45$ ,利用修正通用土壤流失方程(RUSLE)粗略计算 2017 年 2 季度土壤流失量约 30.12 t。

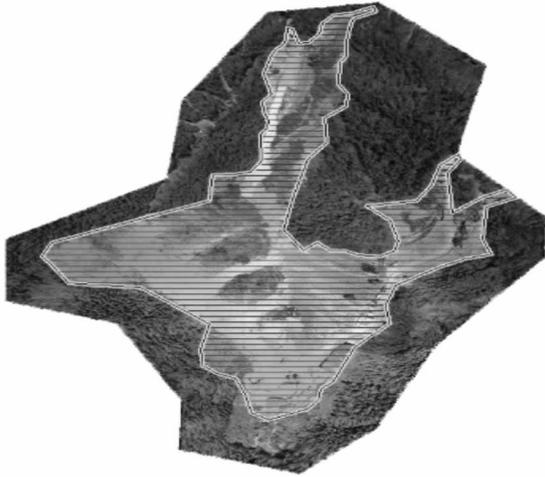


图 2 基于 DOM 模型匡算扰动面积(勾绘部分为扰动面积)

为检验以上两种方法对流失量监测的精度,在渣场拦渣坝下游出水口处设置一个 3 级沉淀池,对渣场流失量进行监测。监测结果表明,2017 年 2 季度沉淀池共沉淀泥沙 24.10 t,小于以上两种方法的计算结果,且两种方法的计算结果误差范围均不满足《监测规程》中精度不小于 90% 的要求。经分析,造成误差偏大的原因主要为利用传统监测手段测量侵蚀模数的干扰因素多,误差不易控制;另外,监测区地表微地形复杂多变,修正通用土壤流失方程中各因子的取值难以准确把握,导致误差偏大。另外,本工程所处区域属南方红壤丘陵区,容许土壤流失量为 500 t/(km<sup>2</sup>·a),对于建设类项目,施工期土壤流失控制比须达到 0.7 以上,因此施工期平均土壤流失强度容许值为 714 t/(km<sup>2</sup>·a),即 5<sup>#</sup>渣场容许流失量为 47.91 t/a。与容许流失量相比较,2017 年第 2 季度 5<sup>#</sup>渣场流失量偏大。因此,5<sup>#</sup>渣场需进一步开展水土保持防护措施以减少施工期的水土流失。

4.2.3 弃渣场挖填方量监测 本项目位于中低山区,取(弃)土场原地貌均为不规则坡面,因此采用前后两次航拍成果叠加分析的方式进行挖填方量监测。以赤坞渣场为例,分别于 2017 年 1 月和 6 月进行了两次航拍,6 月份 DOM 模型附图 5 所示,1 月份

DOM 模型如图 3 所示。将两次 DOM 模型导入 Globalmapper14.1 中进行叠加分析,计算出从 1—6 月赤坞渣场共挖方  $1.81 \times 10^5 \text{ m}^3$ (松方,下同),填方  $3.18 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,挖填总量为  $1.37 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。通过查阅前期资料,产生挖方的原因是赤坞渣场在施工阶段同时作为砂石料中转料场,对赤坞渣场 2017 年 1—6 月实际工程量计量结果分析发现赤坞渣场共运出砂石料  $1.67 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,小于叠加分析计算的结果。另外,根据实际工程量计量结果,赤坞渣场填方量为  $3.46 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,大于叠加分析的计算结果。经分析,造成误差的原因主要有两个:一是无人机遥感存在一定的垂直精度误差,进行体积测量时会出现偏差;二是渣场松散土石方长时间堆积造成的自然沉降,导致叠加分析计算的挖方量偏大、填方量偏小。但总体而言,与实际工程量计量结果相比,利用无人机航拍测算的渣场挖填方量精度基本满足《监测规程》中对方量监测精度不小于 90% 的要求。

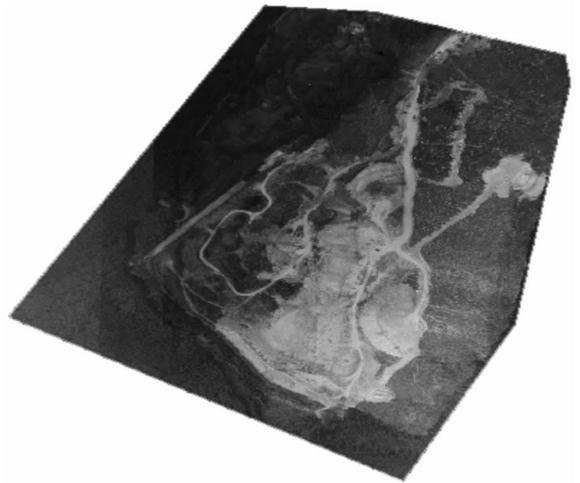


图 3 赤坞渣场 1 月份 DOM 模型

4.2.4 水土流失隐患、危害监测 以 4<sup>#</sup>渣场为例,通过无人机航拍影像和 DEM 模型(附图 11,红色代表高海拔、蓝绿色代表低海拔)能够直观地看出渣场东侧山坡陡峭,且汇水面积大,如遇强降雨,东侧坡面将有大量山坡洪水汇入渣场,不利于渣场的稳定与排水,存在水土流失及安全隐患。建议在渣场东侧沿渣场外边界布设永久截水沟,截水沟设计流量应满足 5 年一遇降雨强度标准,防止山洪进入渣场。同时,渣场西侧山高坡陡,应注意及时清理道路内侧排水沟,保持排水通畅,避免西侧山洪对渣场和道路造成威胁。另外,基于 DOM 和 DEM 模型成果构建三维数字模型(附图 11),在 3D 效果下真实地展现监测区的细节与全貌,能使建设单位、施工单位直观地认识到

水土流失隐患及危害,有助于提高其水土保持意识,加强水土流失的预防和治理。

4.2.5 水土保持措施监测 以 2# 渣场为例,基于 DOM 模型,对于零星的水土保持工程措施、临时措施,主要采用人工识别的方法进行统计分析,并量取措施的规格尺寸和数量等(图 4);而对于集中分布的工程措施(如大面积硬化)、临时措施(如苫盖)和林草覆盖度,可以利用 AcrGIS 直接提取。但是,计算机自动分类有时会有存在明显误判,因此需要进行人工矫正<sup>[11]</sup>。另外,通过 DOM 模型成果及三维数字模型可以直观的判断出拦挡、边坡防护等水土保持措施的防治效果和运行状况。

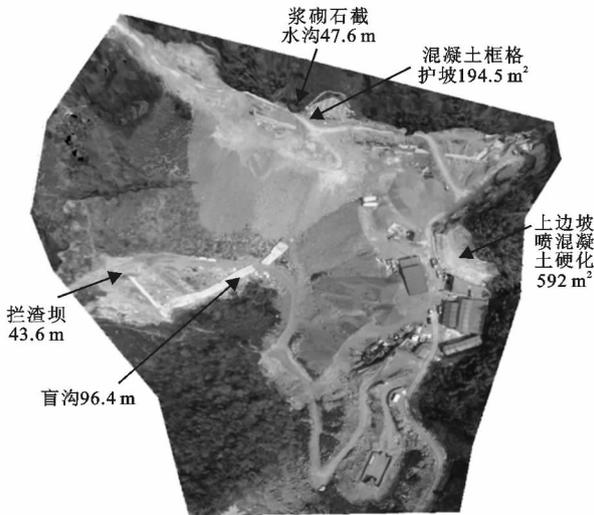


图 4 基于 DOM 模型统计水土保持措施

## 5 结论

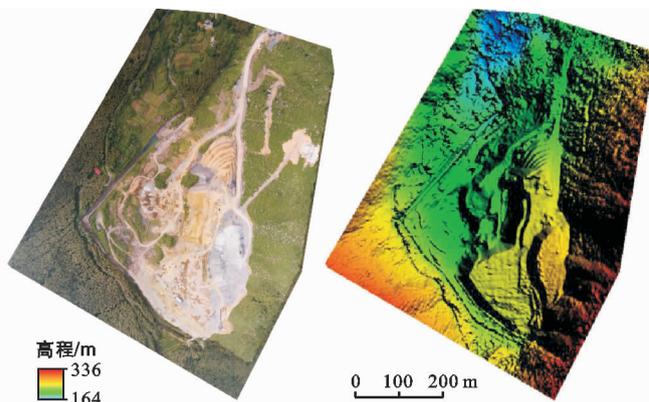
随着信息化的快速发展,水土保持监测技术在追求高效率的同时,也逐渐向高精度、低成本的方向发展,这使得无人机低空遥感技术在水土保持监测工作中逐渐发挥出不可替代的作用。本文以长龙山工程为例,根据《监测规程》的要求,从背景资料分析、遥感数据获取、监测信息提取及应用 3 个方面,对无人机技术在水土保持监测中应用的可靠性及效果进行分析论证。经分析,利用无人机低空遥感技术,基于 DOM 和 DEM 模型成果,能够准确提取出土地利用类型、扰动土地范围、水土流失面积和水土保持措施等监测数据,并及时掌握监测区内的水土流失隐患和危害;利用两次航拍的 DOM 模型成果进行叠加分析可计算出挖填方量的变化情况,计算结果的精度基本满足《监测规程》的要求。另外,结合传统定位观测手段,能够较准确的监测土壤流失量。

无人机低空遥感技术与传统监测手段相辅相成,

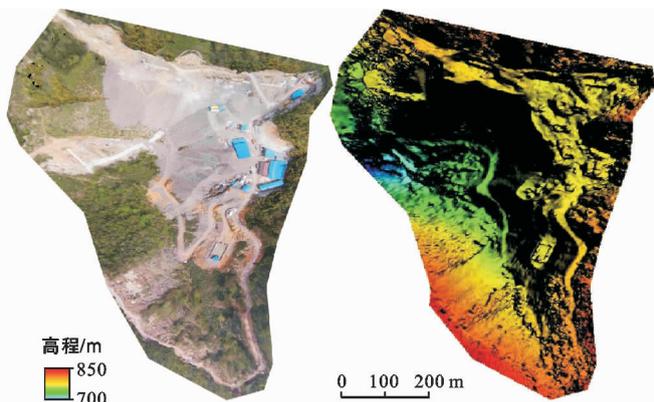
前者是后者的良好补充。无人机技术操作简便,将大量的外业工作转化为内业量测工作,在提高工作效率的同时,也提升了监测结果的精准性和可靠性,具有很强的实用价值。但是,无人机低空遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用仍然处于探索阶段,亟待进一步的研究和改进,主要有两方面:①利用叠加分析法对弃渣场体积进行计算时,因无人机低空遥感存在一定的垂直精度误差,同时受自然沉降影响,导致计算结果存在偏差。因此,对于弃渣场方量的监测还需要通过大量的科学实践,开展进一步的探讨与研究。②生产建设项目施工区内扰动强烈,山区地形复杂多变,对于土壤流失量的监测,因传统监测手段误差较大,而土壤可蚀性因子和水土保持措施因子又难以准确取值,导致上文中流失量监测的两种方法的精度均难以保证。因此,需进一步探索无人机技术在流失量监测方面的应用研究。

### [ 参 考 文 献 ]

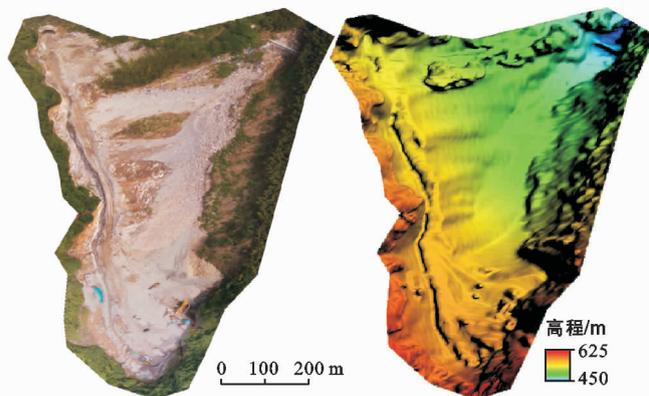
- [1] 郭索彦. 深入贯彻新水土保持法扎实推进水土保持监测与信息化工作[J]. 中国水利, 2011(12): 67-69, 84.
- [2] Watts A C, Vincent G, Hinkley E A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use [J]. Remote Sensing, 2012, 4(6): 1671.
- [3] D'Oleire-Oltmanns S, Marzolf I, Peter K D, et al. Unmanned aerial vehicle(UAV) for monitoring soil erosion in Morocco[J]. Remote Sensing, 2012, 4(11): 3390.
- [4] 林宗坚. UAV 低空航测技术研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(1): 5-9.
- [5] 洪宇, 龚建华, 胡社荣, 等. 无人机遥感影像获取及后续处理探讨[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(4): 462-466.
- [6] 林宗坚. 无人机航测系统的海岛礁测绘应用研究[J]. 海洋测绘, 2014, 34(4): 55-57.
- [7] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2014, 92(2): 79.
- [8] 王志良, 付贵增, 韦立伟, 等. 无人机低空遥感技术在线状工程水土保持监测中的应用探讨[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(4): 109-113.
- [9] 金伟, 葛宏立, 杜华强, 等. 无人机遥感发展与应用概况[J]. 遥感信息, 2009(1): 88-92.
- [10] 谢云, 林燕, 张岩. 通用土壤流失方程的发展与应用[J]. 地理科学进展, 2003, 22(3): 279-287.
- [11] 张雅文, 许文盛, 韩培, 等. 无人机遥感技术生产建设项目水土保持监测中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(2): 132-139.



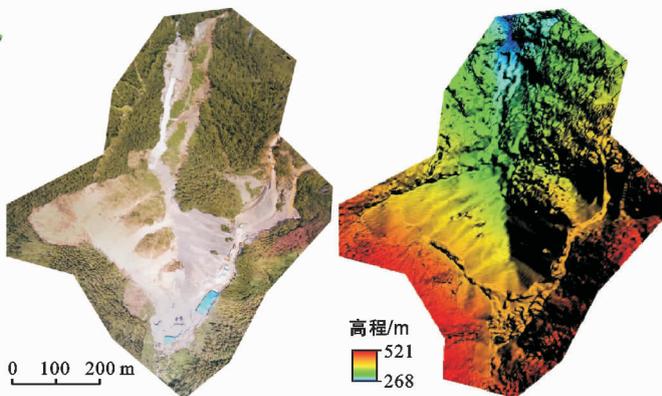
附图5 长龙山工程赤坞渣场DOM(左)和DEM(右)(第238页)



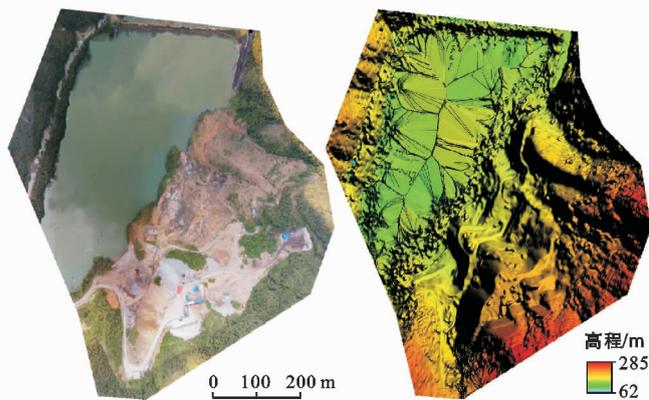
附图6 长龙山工程2<sup>#</sup>渣场DOM(左)和DEM(右)(第238页)



附图7 长龙山工程 4<sup>#</sup>渣场DOM(左)和DEM(右)(第238页)



附图8 长龙山工程5<sup>#</sup>渣场DOM(左)和DEM(右)(第238页)



附图9 长龙山工程建设管理营地DOM(左)和DEM(右)(第238页)

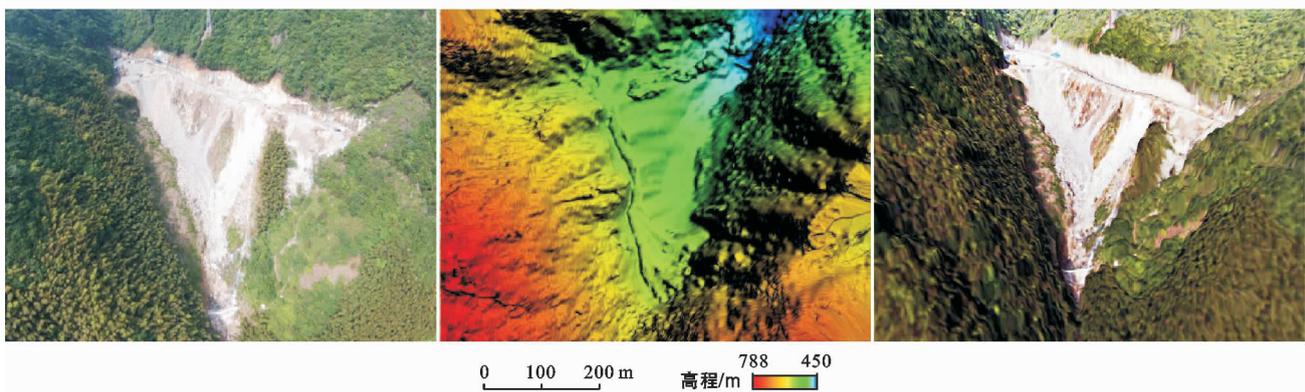


附图10 基于DOM模型识别长龙山工程土地利用类型(第238页)

航拍影像

DEM模型

三维数字模型



附图11 长龙山工程4<sup>#</sup>渣场航拍成果(高程图例仅表示DEM模型分图中的高程)(第239页)

