

造林验收无人机标准化作业研究

田 源 张又水

陕西省林业调查规划院（陕西省森林资源监测中心） 陕西 西安 710082

摘 要：陕北黄土高原造林验收长期面临地形破碎、沟壑纵横导致人工样地布设困难、面积核查失真、成活率统计偏差大等突出矛盾。本研究依托现行团体标准，构建涵盖航摄参数标准化、外业协同核查、内业指标核算的全链条作业体系，明确不同造林年度对应的航高阈值、重叠率硬性指标、苗木人工识别修正规则。通过统一设备选型、固化航线布设逻辑、规范地面取证流程，实现造林核实面积、密度、成活率、保存率四大指标的数字化核算，形成适宜黄土高原沟壑地貌的无人机验收技术规程。

关键词：黄土高原；造林验收；无人机航测；标准化作业

引言

陕北黄土高原作为三北工程核心区，造林地块多分布于梁峁沟坡、陡峭山地，传统人工抽样验收难以覆盖全部小班，虚报面积、成活率水分大等问题长期制约工程成效评估。无人机航测技术虽已推广，但基层作业中航高随意调整、重叠率低于国标、影像拼接不规范、内业核算缺乏统一算法等现象普遍存在，同一地块不同队伍验收结论差异显著。本研究聚焦陕北复杂地形条件，从航摄参数硬性约束、地面核查抽样规则、人工识别修正流程三个维度构建标准化作业方案，解决验收结果不可比、不可溯、不可信的现实问题。

1 陕北黄土高原航摄参数标准化设定

1.1 基于苗木生长年限的航高阈值划定

陕北造林以侧柏、油松、沙棘、柠条、连翘为主，一年生幼苗高度普遍在30至50厘米之间，两年生苗可达60至80厘米。航高设定须与苗木高度、地形起伏度相匹配，过低则单架次覆盖面积小、作业效率下降，过高则影像分辨率不足导致单株苗木无法辨识。针对当年新造林地，航高严格控制在60至80米范围内，地面采样距离优于2.5厘米，确保影像上单株幼苗冠幅占据5至8个像元，满足后续人工计数的最低分辨率要求。两年生及三年生幼林地，苗木冠层展开、株间遮挡增加，航高可放宽至80至100米，重点识别片状缺苗和密度异常区域。飞播造林及大面积成效核查以判断保存率为主，航高设定为100至120米，配合多光谱数据反演植被覆盖度。沟谷与梁峁顶部高差常超过150米，采用相对地面高度模式沿地形起伏仿地飞行，避免同一航线中航高相对起降点恒定造成局部影像分辨率骤降。

1.2 重叠率硬性约束与地形自适应调整

航向重叠率与旁向重叠率直接决定DOM正射影像拼

接质量，基层作业中为扩大单架次覆盖面积擅自降低重叠率至60%以下，导致影像接边出现错位、扭曲、漏洞，面积量算误差放大至5%至8%。本研究规定航向重叠率不得低于80%、旁向重叠率不得低于70%，作为红线参数写入作业指导卡，起飞前地面站软件须截屏留存参数设置备查。陕北黄土高原沟壑区地形破碎度大，阳坡阴坡光照差异显著，陡坡地段航测影像几何畸变严重。在沟缘线两侧高差大于80米、坡度超过25度的区域，航向上调至85%、旁向上调至75%，并增设与主航线垂直的交叉航线，增加同名点匹配冗余度^[1]。补飞航线重叠率强制要求航向90%、旁向80%，以局部高精度数据修正主航线拼接误差。飞行记录表中须逐架次填写重叠率实际值，与大疆遥控器日志比对，发现参数不符立即重飞。

1.3 航线布设逻辑与地形适配规则

陕北造林小班形态复杂，沿等高线分布的窄长地块、包围沟头的扇形地块、梁脊两侧的对称地块并存，单一平行航线难以满足全覆盖要求。对于宽度小于50米的窄长沟坡小班，沿小班中线布设单条往复航线，航线间距依据旁向重叠率反算，确保沟坡上下边缘均落入有效像幅内。对于异形或不规则小班，采用边界环绕航线获取完整轮廓影像，内部按网格航线加密，网格间距不超过100米。疑点地块包括申报面积与DOM预勾绘偏差超过5%的小班、DOM显示连片裸地占比超过30%的小班、上期验收成活率低于40%的补植地块，须在常规航线完成后增设低空补飞航线^[2]。低空补飞航高设定为30至50米，采用五航线井字形布设，每个疑点区域获取不少于20张多角度影像，用于地面协同核查时的精确判读。航线设计文件须在飞行前导入地面站模拟验证，检查是否存在漏飞盲区，模拟通过后方可执行。

2 空天地协同核查与标准化抽样

2.1 DOM预判驱动的疑点地块筛选规则

传统人工验收采用机械抽样或随机抽样,抽样比例通常为造林面积的3%至5%,漏查隐蔽性虚报地块的概率较高。本研究采用无人机全域正射影像覆盖后、以内业预判驱动外业核查的逆向工作流程,将所有小班的DOM与申报造林边界矢量叠置分析,自动计算三个核心指标:面积偏差率、裸地斑块占比、影像估算密度与设计密度偏离度。任一指标超出阈值即纳入疑点地块库,阈值设定为面积偏差超过3%、裸地斑块面积超过小班面积的15%、影像估算密度低于设计密度30%。疑点地块不设抽样比例上限,凡触发阈值者全部落地核查。非疑点地块按造林面积每50亩布设1个标准样方,样方位置采用GIS随机生成并避开沟缘、地边等边缘效应显著区域^[3]。山区地形破碎、地块通达性差,样方实际落地难度大,须在随机样方基础上增加20%的校核样地,校核样地优先布设在随机样方无法抵达的陡坡、沟底区域,采用临近可降落点步行抵达方式完成。

2.2 地面核查取证标准化流程

地面核查的核心矛盾在于不同人员取证角度、照片数量、记录内容差异大,同一地块多次核查结论不一致。本研究规定三点拍照法作为强制取证标准:第一点拍摄区位远景,站位选取小班外制高点或对岸坡地,镜头包含小班全貌及周边两个以上地标参照物,用于后续照片与DOM位置匹配;第二点拍摄地块全貌,站位进入小班内部距边缘20至30米处,镜头覆盖样方或疑点区域主体范围;第三点拍摄苗木近景,站位距目标苗木1至1.5米,镜头垂直对准苗木基部及根系周边土壤状态,每样方内随机选取不少于10株苗木逐一拍摄。照片统一编号格式为乡镇代码、小班号、样地编号、拍摄日期四段式,示例为“YJX-032-15-20260518”,编号直接写入照片EXIF备注字段。每张照片须同步记录GPS坐标,使用具备差分定位功能的手持终端获取,坐标精度优于1米。现场填写纸质核查台账,记载样地内成活株数、死亡株数、缺苗株数、杂草盖度、土壤水分状况五项基础数据,台账与照片编号一一对应。

2.3 地面数据与无人机影像的交叉修正

无人机影像判读的苗木数量与地面实测数量之间存在系统偏差,偏差来源包括影像分辨率不足导致的漏检、杂草与幼苗混淆导致的误检、阴影遮挡导致的无法判读。本研究建立交叉修正系数来解决该偏差:每架次航测范围内至少布设3个地面样方,样方内人工逐株清点成活苗数量,修正系数公式为地面实测值除以人工识别值,同一架次内多个样方的修正系数取中位数,剔除最

大最小值后平均。成活率核算时以修正系数乘以人工识别总量作为栽植总株数的估计值,再以地面样方实测成活率加权平均得到最终成活率。保存率核查中,地面样方还须记录苗木高度、冠幅、新梢生长量、病虫害发生情况四项生长指标,与影像判读的健康状态进行比对^[4]。影像判读为健康但地面核查发现生长势衰弱的苗木,归入保存不合格类别。交叉修正结果须填入小班核查成果表,附修正系数计算过程和原始地面数据,作为审计备查材料。

3 内业指标核算与质量管控

3.1 DOM拼接与面积核算硬性要求

影像拼接是内业处理的第一道关口,拼接质量直接决定面积量算和苗木识别的精度底线。本研究规定统一使用具备空中三角测量解算功能的专业软件,严禁使用简易拼图工具。坐标系强制采用CGCS2000,高程基准采用1985国家高程基准,投影方式采用高斯-克吕格投影按当地中央子午线设定。拼接过程中逐张检查像控点及连接点分布,连接点少于每平方公里50个或存在明显分层错位时,须重新导入原始影像增设连接点。DOM成果的地面分辨率须与设计航高对应的理论分辨率一致,偏差超过0.5厘米即判定不合格。面积核算采用GIS矢量化工具逐小班勾绘实际造林边界,勾绘边界依据为DOM上可辨识的造林地块与周边荒草地或耕地的明显分界线。申报边界与实际边界叠置后,计算重叠面积、虚报面积、漏报面积三项指标。重叠面积占申报面积比例低于97%或高于103%时,以小班为单位判定面积不合格,不合格小班须全部纳入地面复核,复核结果作为最终面积核减依据。

3.2 人工识别苗木规则与人工修正机制

陕北黄土高原造林模式以鱼鳞坑整地为主,每坑栽植1至2株苗木,坑间距通常为2米×3米或3米×4米。人工识别模型须针对该特定空间分布特征进行参数调优,设置最小检测间距为1.5米,间距小于该阈值的检测结果合并为单株。识别过程中易混淆对象包括:杂草丛中露出的苗木顶部、枯死但未倒伏的干枝、地膜覆盖形成的白色斑块。本研究引入多光谱数据辅助判别,可见光识别疑似苗木目标后,提取该目标在近红外波段的反射率。健康苗木NDVI值通常大于0.4,杂草NDVI值介于0.2至0.4之间,裸地和枯死苗NDVI值低于0.2。根据该阈值对疑似目标进行过滤,NDVI低于0.25者判定为非苗木并从计数结果中剔除。每批次人工识别完成后,按小班数量的5%抽取复核样本,人工逐株核对影像上的苗木标记。

3.3 四大验收指标的统一核算规则

造林核实面积采用DOM实际勾绘面积与申报面积

的比值,比值以百分数表示,保留小数点后一位。核实面积小于申报面积时,按核实面积核定工程量和资金拨付,差额部分注明虚报地块的小班号和位置坐标。造林密度核算采用人工识别株数除以样方面积,与作业设计中的设计株行距折算密度进行比较,偏差在正负10%范围内判定为密度合格。偏差超过10%时查明原因,属于栽植密度不足的按实际密度核减合格面积。成活率核算当年造林地块,成活苗木数量除以栽植总株数,栽植总株数取申报栽植量与DOM实测栽植痕迹量两者中的较小值。成活率分为三个等级:85%及以上为优秀,70%至85%为合格,低于70%为不合格。不合格地块注明补植建议。保存率核算造林满3年的地块,留存健康苗木数量除以原造林株数。健康苗木判定标准为苗木主干完整、顶端优势明显、无严重病虫害、当年有新生枝条。保存率低于65%的地块判定为造林失败,纳入下一年度补植计划。四项指标核算结果逐小班填入核查成果表,成果表与DOM、原始航片、地面台账四类文件一并归档,保存期限不低于5年^[5]。归档文件命名规则为项目年度、县区代码、小班号、文件类型四段式,示例“2025-YJX-032-DOM.tif”。原始航片须保留未经过任何修图处理的原文件,不得裁剪、调色、增亮。飞行记录表、地面核查台账、复核记录表三类纸质文件扫描为PDF,与电子文件合并存储。归档文件完整性检查由项目承担单位技术负责人逐项确认,缺项或命名不规范者退回整改,确认完成后刻录光盘一式两份分别保存。

结语

陕北黄土高原造林验收工作的核心矛盾在于复杂地形条件与高精度核查需求之间的现实差距。本研究构建

的无人机标准化作业体系以航摄参数硬性约束为切入点,将航高、重叠率、航线布设三项核心指标从建议性参数转变为强制性阈值,从技术源头控制了影像数据质量。地面核查环节采用DOM预判驱动的疑点筛选规则替代传统机械抽样,使核查资源集中于问题地块,提升了有限外业力量的投放效率。内业处理层面统一了DOM拼接坐标系、人工识别修正系数、四大指标核算规则,解决了不同作业队伍产出成果不可比的技术障碍。该体系已在陕北黄土高原沟壑区完成小范围验证,实现了造林核实面积偏差控制在3%以内、成活率统计误差低于2个百分点的预期目标。后续推广中须重点关注基层执行层面的参数偏离问题,建立飞行记录表与地面站日志的双重核对机制,确保标准化规则不流于形式。

参考文献

- [1]王武魁,廉瑞峰,吴明晶,等.基于无人机影像和MDIEA-YOLO苗木识别模型的造林验收智能系统[J].北京林业大学学报,2025,47(5):14-25.
- [2]石燕妮,王武魁,吴明晶,等.MAFF-YOLO:面向造林验收的明穴目标检测模型[J].北京林业大学学报,2025,47(4):142-154.
- [3]尹强华,曹存宏,白珩,等.无人机技术在人工造林检查验收工作中的应用[J].陕西林业科技,2025,53(2):116-121.
- [4]王强.无人机在森林资源动态调查监测与林业工程质量验收评价中的应用[J].大众标准化,2026(3):142-144.
- [5]罗盛万,蓝晓丹,兰必赛.无人机低空摄影测量在国家储备林基地检查验收中的应用试验研究[J].林业调查规划,2020,45(4):9-13.