

ICS 65.020.01

CCS B 64

CSF 团体标准

T/CSF ××××-2025

无人机激光雷达森林地上碳储量估测 技术规范

(报批稿)

Technical specification for estimating forest aboveground carbon stocks using
unmanned aerial vehicle (UAV) lidar

×××× -××-×× 发布

×××× -××-×× 实施

中国林学会 发布

目 录

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 激光雷达数据采集要求.....	2
5 地面样地数据采集要求.....	4
6 模型建立与检验评价要求.....	5
7 模型应用要求.....	7
8 成果归档要求.....	8
附录 A（资料性）无人机激光雷达森林地上碳储量估测流程图.....	9
附录 B（资料性）无人机估测日报记录	10
附录 C（资料性）地面样地调查和每木调查记录表.....	14
附录 D（资料性）机载激光雷达特征变量表	14
参考文献.....	16

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国林业科学研究院资源信息研究所提出。

本文件由中国林学会归口。

本文件起草单位：中国林业科学研究院资源信息研究所、河北农业大学、南京林业大学、航天科工（北京）空间信息应用股份有限公司、国家林业和草原局中南调查规划院、广西壮族自治区森林资源与生态环境监测中心、浙江省森林资源监测中心、广东省林业调查规划院。

本文件主要起草人：符利勇、陈巧、唐守正、许中旗、业巧林、张志东、刘强、谭靖、陆亚刚、许佳明、谢栋博、吴哲元、朱新胜、贺鹏、彭检贵、刘紫薇、蔡会德、卢峰、谢秉楼、姚鸿文、季碧勇、叶金盛、汪求来、杨志刚、冯新富、周健培、郭泽鑫。

无人机激光雷达森林地上碳储量估测技术规范

1 范围

本文件规定了利用无人机激光雷达进行森林地上乔木碳储量激光雷达数据采集、地面样地数据采集、模型建立与检验评价、模型应用、成果归档工作的技术要求。

本文件适用于利用无人机激光雷达开展中小尺度森林乔木地上碳储量估测工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 14950-2009 摄影测量与遥感术语
- GB/T 17626.3 电磁兼容 试验和测量技术 第3部分：射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 26424 森林资源规划设计调查技术规程
- GB/T 36100 机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法
- GB/T 38590 森林资源连续清查技术规程
- GB/T 43648-2024 主要树种立木生物量模型与碳计量参数
- CH/Z 3001 无人机航摄安全作业基本要求
- CH/T 8023-2011 机载激光雷达数据处理技术规范
- LY/T 2258-2014 立木生物量建模方法技术规程
- MH/T 1069 无人驾驶航空器系统作业飞行技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

无人机 unmanned aerial vehicle

由地面控制飞行的不载人飞行器，由动力驱动系统、功能系统和操控传输系统构成，具有手动、自动和半自动三种控制飞行方式。

3.2

激光雷达 lidar

基于激光测距原理，通过发射激光束并接收其回波，获取地表或森林等目标的高精度三维结构信息的系统。可搭载于无人机、航空器或地面平台。

[来源：GB/T 14950-2009，4.150，有修改]

3.3

点云密度 point cloud density

T/CSF ×××—××××

单位面积内激光雷达回波点的数量，通常以每平方米点数（pts/m²）表示，是衡量激光点云数据空间分辨率和数据精细程度的重要指标。

[来源：CH/T 8023-2011，3.5，有修改]

3.4

森林乔木地上碳储量 above-ground carbon stock of forest trees

森林中所有乔木地上部分的干物质总量，包括树干、树枝和树叶等。

4 激光雷达数据采集要求

4.1 无人机基本要求

4.1.1 任务环境

在无人机进行森林碳储量监测任务时，任务环境应满足以下条件：温度范围为-15° C~40° C，风速不超过6 m/s，能见度不低于 1 000 m，海拔低于 4 500 m。

4.1.2 起降场地环境要求

无人机起降区的电磁环境应符合 GB/T 17626.3 的要求，避免雷达、微波及无线通信设备干扰。

4.1.3 人员及安全要求

飞行安全管理应符合 GH/Z 3001 和 MH/T 1069 的相关规定。

4.1.4 飞行许可与参数设定

4.1.4.1 作业前按 MH/T 1069 申请空域并取得许可，记录于飞行日志。

4.1.4.2 起飞前依据 GH/Z 3001 完成整机、载荷与气象条件全项功能测试。

4.1.4.3 在飞控中设定最大飞行高度、速度与自动返航参数，依据任务与环境实时优化。

4.1.4.4 任务结束后即时下载航迹与全部参数文件并归档至飞行日志。

4.2 无人机系统要求

4.2.1 无人机平台

无人机平台可选用多旋翼或固定翼系统，并与机载传感器集成。多旋翼机型应具备不少于 3 个旋翼轴且能够悬停。平台应配置稳定的数据链路，采用合适的通信协议与设备，确保监测数据实时、可靠地传输。

4.2.2 飞行模式

执行测区任务时，无人机宜在自主程序下工作。通过控制台和目测，监控无人机状态和传感器数据记录情况。根据任务情况，可采用手动飞行模式，以补全遗漏调查区域。飞行完成后，应核对测区任务完成情况，确保任务满足项目要求。如有错误或遗漏，应及时重测或补测。

4.2.3 激光雷达

激光雷达采样应覆盖目标变量的低、中、高值区。具体关键技术参数及要求见表1。

表1 激光雷达的关键技术参数及要求

序号	关键技术参数	指标要求
1	测量范围	≥100 m
2	测量半径	0.2 m-16 m
3	采样频率	8 k-16 k
4	扫描频率	5 Hz-15 Hz
5	工作温度范围	-15℃~40℃
6	激光波长	1 064 nm 或 1 550 nm
7	测距分辨率	≤真实距离的 1% (测距≤12 m) ; ≤实际距离的 2% (测距 12 m~16 m)
8	储存能力要求	储存能力 256 GB SD 卡应支持循环覆盖存储, 并兼容扩展至 1 TB
9	定位误差	平面精度≤5 cm, 高程精度≤4 cm
10	卫星信号	接收卫星数 ≥12 颗, 且单星座可视卫星数 ≥8 颗

注: 激光波长应根据作业区植被类型选取, 波长差异直接影响冠层穿透深度与点云精度。

4.3 航线规划要求

为确保无人机激光雷达作业既安全合规又满足精度需求, 航线规划应遵循以下5项原则:

- a) 根据作业区地形地貌及控制点信息, 结合无人机参数, 利用地面站软件完成航线规划;
- b) 抽样观测时, 每个抽样单元划分为若干观测分区;
- c) 全覆盖观测时, 整个作业区划分为若干观测分区;
- d) 航线规划应满足作业精度与安全要求;
- e) 航向重叠率≥60%, 旁向重叠率≥30% (林冠起伏较大区域宜提高至 40%), 带距及航高按平均树高的 2 倍~3 倍确定, 航向两端应留≥50 m 缓冲段。

4.4 数据采集质量要求

4.4.1 数据获取技术指标

4.4.1.1 数字表面模型和林冠高度模型格网间距宜≤ 0.2 m, 可在满足小尺度树高反演精度的同时降低成图成本。

4.4.1.2 点云密度

4.4.1.2.1 无人机激光雷达获取的点云数据密度应能满足内插生成数字表面模型成果对格网间距的要求。点云密度按以下公式计算。

$$D = \frac{1}{D_f * D_s} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

D —— 点云密度, 单位为个每平方米 (pts/m²);

D_f —— 飞行方向点云间距, 单位为米 (m);

D_s —— 旁向点云间距, 单位为米 (m)。

4.4.1.2.2 平坦地区和反射率较低 (如水域、光滑表面等易形成镜面反射区域) 点云密度要求可适当放宽, 地貌破碎、植被覆盖密集等特殊困难区域应适当加密。不同地貌下点云密度要求见表2。

表2 不同地貌下点云密度要求

地形地貌	划分标准	点云密度 (pts/m ²)
平原	地表开阔, 相对高程<50 m	≥4
丘陵	海拔小于500 m, 相对高差<100 m	≥8
山地	海拔小于2000 m, 相对高差<150 m	≥16
高山	海拔大于2000 m	≥25

4.4.2 激光雷达数据预处理

对航空采集激光雷达点云数据进行坐标系统转换、去噪、高程模型生成等操作, 满足森林生物量模型构建数据要求。

4.4.3 飞行数据质检

检查飞行轨迹数据覆盖项目区域, 满足飞行方案设计要求。检查激光雷达点云密度达到要求, 点云数据高程中误差达到要求。

4.4.3.1 点云精度验证

预处理完成后, 应采用控制点检查的方式检查点云数据的高程和平面精度, 精度要求见表3。

表3 数字表面模型和林冠高度模型数据的高程和平面精度

格网间距 (m)	地形	点云控制误差 (m)	格网间距 (m)	地形	点云控制误差 (m)
0.1	平原	0.05	0.5	平原	0.15
	丘陵	0.10		丘陵	0.25
	低山	0.15		低山	0.35
	高山	0.20		高山	0.50
0.2	平原	0.10	1.0	平原	0.15
	丘陵	0.15		丘陵	0.35
	低山	0.20		低山	0.50
	高山	0.25		高山	1.00

4.4.3.2 补飞或重飞

当抽样或全覆盖作业中发现任一航带的覆盖面积或数据质量未达到表3所列指标时, 应对该航带实施补飞或重飞直至达标。

4.5 数据备份

激光雷达数据应于采集当日完成三重备份, 分别存储于现场硬盘、项目本地服务器和异地云平台。备份过程需记录数据时间、经手人及校验信息, 确保数据完整可追溯。

5 地面样地数据采集要求

5.1 样地大小与形状

样地面积为400 m²-1000 m², 形状为方形或圆形。同一调查区域应采用相同形状样地。

5.2 样地数量

样地数量的确定应考虑以下因素：

- a) 估计总体内每一森林类型或优势树种组应设置足够数量的样地，单一类型样地数量不应少于30块。
- b) 样地数量应满足85%的估测精度要求。若模型平均预估误差（MPE）超过15%，应增加样地数量。
- c) 在地形复杂、林分异质性高或变异系数大的区域，应适当增加样地设置密度。
- d) 若巡检或建模过程中发现样地数量不足或精度不达标，应及时补充样地；补充样地应以优化样本结构为基本原则。

5.3 样地布设

样地布设遵循如下原则：

- a) 代表性原则：样地应选取典型森林类型或优势树种组；
- b) 均衡性原则：样地数量分布应与目标变量和解释变量均衡；
- c) 一致性原则：样地调查时间尽可能与激光雷达数据获取时间保持一致。

5.4 样地调查

样地调查工作按照GB/T 26424、GB/T 38590要求进行。采用联合差分定位技术对样地中心、角点和样木进行精确定位。调查应记录每木树种、胸径、树高、冠幅等信息，并填写样地林分因子调查表和每木调查统计表（见附录C）。

6 模型建立与检验评价要求

6.1 数据处理

6.1.1 激光雷达数据处理

对激光雷达数据进行预处理、特征提取、数据分析、数据融合、数据拟合结果可视化等操作，实现森林生物量统计计算、数据管理。数据处理流程应符合GB/T 36100和CH/T 8023要求。数据处理前，应收集以下资料：

- a) 激光雷达点云和位置数据；
- b) 待处理区域的高程产品以及地表覆盖等信息；
- c) 测区控制测量成果，主要包括控制点成果及分布图、检查验收报告以及其他有关资料；

飞行资料，主要包括测区观测分区图、航线示意图、激光雷达传感器检定参数报告、资料审查报告等。

6.1.2 激光雷达林分参数提取

基于归一化点云划分林分单元，按样地大小设置格网，提取林分平均高度、高度标准差、冠层覆盖率、点云密度、冠幅直径、冠层体积密度、垂直结构复杂度指数等特征参数。坡度 $>30^\circ$ 区域可采用非地形归一化点云提取，以减少树顶识别误差。

6.1.3 地面实测样地数据生物量计算

生物量计算应优先参考 GB/T 43648-2024 中的胸径-树高二元生物量模型，并直接采用其模型形式及参数。若标准中无适用模型，可参考行业或地方标准中以胸径（D）和树高（H）为自变量的模型。推荐采用幂函数形式的二元模型，表达式如下：

$$W = aD^b H^c \dots\dots\dots (2)$$

W—— 单木地上生物量，单位为千克（kg）；

D—— 胸径，单位为厘米（cm）；

T/CSF ×××—××××

H —— 树高，单位为米（m）；

a 、 b 、 c —— 回归系数。

当样地数据中无法同步获得树高信息，导致不能采用二元模型时，可采用胸径单因子一元模型，形式如下：

$$W = aD^b \dots\dots\dots (3)$$

式中参数含义同（2）。

6.1.4 地面实测样地数据碳储量计算

碳储量计算应基于前面计算得到的生物量数据，按照GB/T 43648-2024中提供的生物量含碳系数进行换算：

$$C=W*CF \dots\dots\dots (4)$$

式中：

C ——地上碳储量，单位为吨（t）；

W ——地上生物量，单位为吨（t）；

CF ——生物量含碳系数，无量纲，由GB/T 43648-2024提供。

在不同林分类型或树种组别中，应优先选择标准中推荐的含碳系数。对于标准未涵盖的特殊树种，可依据相关文献或地方标准确定含碳系数，并在成果报告中注明数据来源与适用范围。

6.2 模型建立

6.2.1 无人机激光雷达特征变量筛选

将提取的平均高、郁闭度和垂直结构变量等激光雷达特征量（见附录D）与实地调查测定林分参数碳储量进行Pearson’s相关性分析，剔除相关性低的特征变量。采用特征筛选算法选出对森林碳储量敏感的点云特征变量。最终参与模型计算的点云特征变量一般不超过 3 个。变量筛选的标准流程参照LY/T 2258-2014相关要求执行。

6.2.2 基于无人机激光雷达特征变量和地面数据建模

在完成激光雷达特征变量筛选后，应将选定的特征变量作为自变量，以6.1.4计算的森林地上碳储量作为因变量，采用幂函数关系进行建模与拟合。当需同时建立生物量与碳储量两类方程时，可采用联立方程组方法（如似无关回归或同时方程）统一求解，确保参数估计的一致性与协方差处理的合理性。

模型的求解可采用 SPSS 或 R 等统计软件。

6.3 模型检验评价

6.3.1 评价指标

综合考虑各类误差来源，评价森林地上碳储量模型时应采用LY/T 2258—2014 中推荐的六项指标作为基本精度判定依据，即：确定系数（ R^2 ）、估计值标准差（ SEE ）、总相对误差（ TRE ）、平均系统误差（ ASE ）、平均预估误差（ MPE ）和平均百分标准误差（ $MPSE$ ）。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p)}} \dots\dots\dots (6)$$

$$TRE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{\sum \hat{y}_i} \times 100 \dots\dots\dots (7)$$

$$ASE = \sum (y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i / n \times 100 \dots\dots\dots (8)$$

$$MPE = t_\alpha \cdot (SEE / \bar{y}) / n \times 100 \dots\dots\dots (9)$$

$$MPSE = \sum |(y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i| / n \times 100 \dots\dots\dots (10)$$

式中：

- y_i ——实际观测值；
- \hat{y}_i ——模型预估值；
- \bar{y} ——样本平均值；
- n ——样本单元数；
- p ——参数个数；
- t_α ——置信水平 α 时的 t 值。

平均预估误差(MPE)是评价模型是否达到预定精度要求的重要统计指标,当MPE超出规定的误差限时,应分析原因,必要时应适当增加样本数量,以提高模型的预估精度。

6.3.2 模型检验

6.3.2.1 生物量和碳储量模型确定后,应采用5折或10折交叉检验方法验证模型效果。验证过程中,不宜在建模与验证中使用相同数据,以确保数据的独立性。

6.3.2.2 通过交叉检验计算平均预估误差,若总相对误差不超过平均预估误差,模型可认为有效。验证结果应通过相关系数和F值检验评估拟合效果。

6.3.2.3 对于模型不确定性,建使用Bootstrap重抽样法模拟模型参数,并计算95%置信区间。

6.3.2.4 如标准误差超过预测值均值的10%,则应优化模型结构或增加样地样本。

7 模型应用要求

完成模型检验后,将第6章数据处理得到的激光雷达特征量直接代入6.2.2建立并通过检验的幂函数模型,计算出各林分单位面积生物量 P_i 。随后按林分面积 A_i 进行加权汇总,得到监测区乔木地上总生物量:

$$W = \sum_{i=1}^n A_i * P_i \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- A_i ——第 i 种林分面积；
- P_i ——第 i 种林分单位面积生物量；
- W ——监测区林分乔木地上总生物量。

随后采用GB/T 43648—2024推荐的含碳系数 C_i 将各林分生物量换算为碳储量,并同样加权汇总得到监测区森林乔木地上碳储量 $B(t)$ 。

$$B = \sum_{i=1}^n W * C_i \dots\dots\dots (12)$$

式中：

- W ——监测区林分总生物量；
- C_i ——第 i 种生物量含碳系数；
- B ——监测区林分总碳储量。

8 成果归档要求

8.1 成果整理要求

监测工作完成后,应及时整理和归档监测数据、处理成果及相关文档材料,形成完整的成果资料集,包括但不限于:

- a) 无人机激光雷达原始数据及元数据;
- b) 地面调查记录表及原始观测数据;
- c) 点云数据预处理与处理结果;
- d) 碳储量估算模型及相关参数;
- e) 模型精度验证报告;
- f) 森林碳储量空间分布图件及相关矢量数据;
- g) 技术总结报告及相关技术文档。

8.2 归档格式与要求

- 8.2.1 数据资料应存储于统一规范的电子介质中,并确保数据格式的通用性和兼容性;
- 8.2.2 所有数据文件应建立规范的元数据文档,明确数据来源、精度、处理过程及版本信息;
- 8.2.3 文本型成果文档应采用可编辑、可检索的电子文档格式,并打印纸质件备存。

8.3 成果档案管理

- 8.3.1 监测项目成果由项目实施单位负责归档与保管;
- 8.3.2 应建立完整的成果档案目录索引体系,方便后续数据查询和管理;
- 8.3.3 成果资料应妥善保管,并定期进行备份,确保数据的安全性与长期可用性;
- 8.3.4 归档资料应按照国家 and 行业有关保密管理规定执行,明确数据使用权限和管理责任,涉及敏感数据应设专人管理。

附录 A

(资料性)

无人机激光雷达森林地上碳储量估测流程图

图A.1概述了从样地布设与多源数据采集，到模型构建-验证，再到碳储量推算与成果输出的完整技术链路，突出“先地面控制、后空中遥感，数据-模型-应用一体化”的作业逻辑。

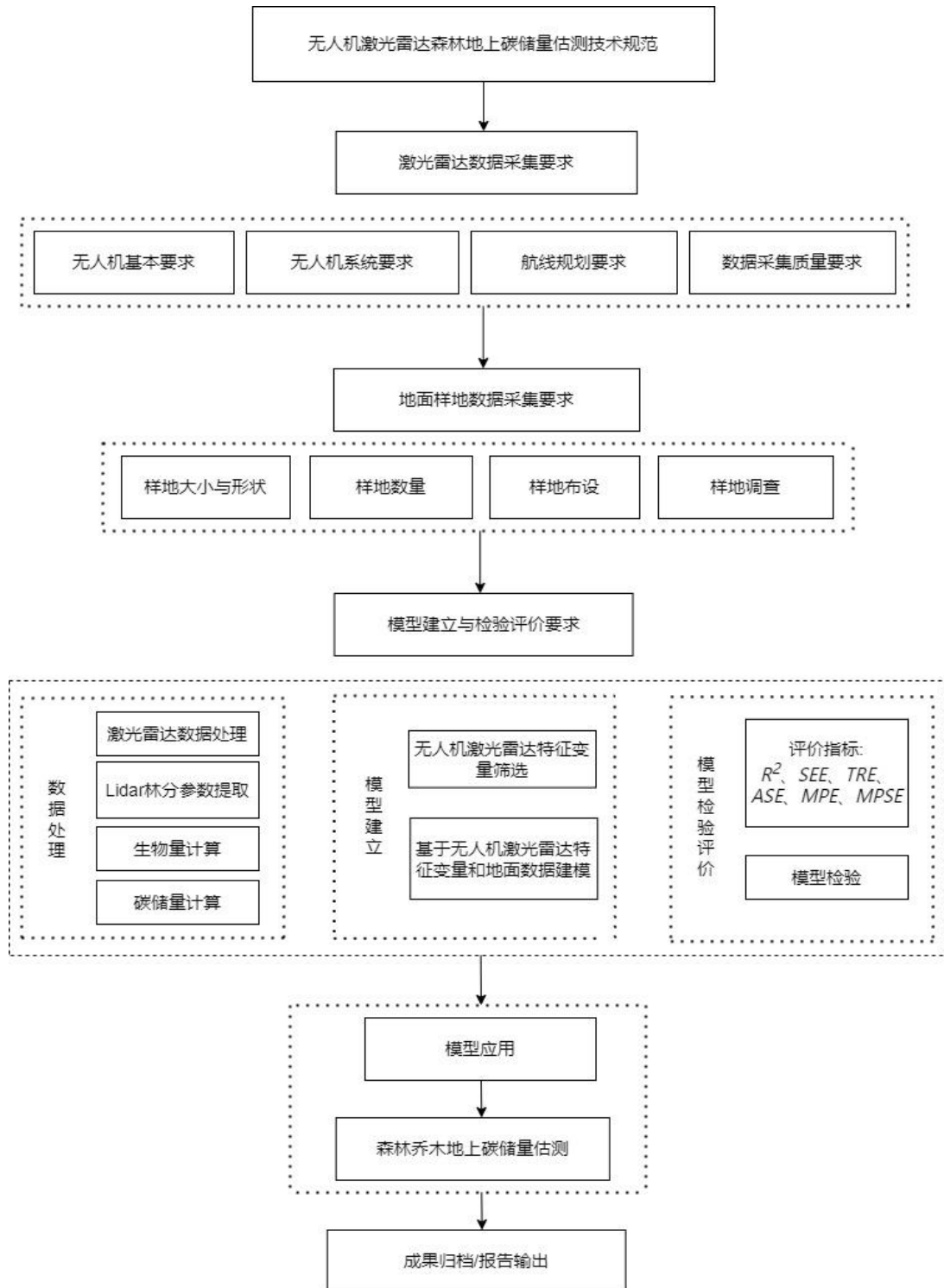


图 A.1 无人机激光雷达森林地上碳储量估测流程图

附录 B
(资料性)
无人机估测日报记录

B.1 无人机出发前检查

表 B.1 提供了无人机森林碳估测作业的每日记录模板，涵盖飞前检查、航线执行与数据备份等关键环节，可供现场填报并作为质量追溯依据。

B.1 无人机出发前检查记录表

飞行器、传感器设备名称：

检查项目	检查内容	是否合格
无人机检查	数量是否满足任务需要	
	外观有无损伤	
	构件连接是否牢固正常	
	线缆有无破损，接插件有无变形、短路	
	螺旋桨有无损伤	
	紧固螺旋是否拧紧	
	整流罩是否安装牢固	
飞控系统、遥控器	是否正常通电、通信	
零配件检查	零配件是否齐全	
	有无备品备件	
电源检查	机载电池数量是否满足，电量是否充满	
	电池与机身之间、电池接插件连接是否牢固	
	充电设备是否正常	
存储设备检查	数量是否充足	
	内存是否满足	
任务荷载检查	喊话器能否正常通电喊话	
	变焦镜头能否正常连接和聚焦	
	双光镜头能否正常连接和切换	
	抛投器能否正常连接和开合	
参数设置	参数是否合理	
航线规划	航线是否预先规划	
飞行功能测试	是否能正常起降	
	无人机的返航高度与限飞高度	
	视频流传输是否正常	
起飞气象确认	当日气象特征是否满足起飞要求	

检查人：

检查日期：

T/CSF xxxx—xxxx

B.2 当日气象特征记录

表 B.2 用于记录作业日内不同时间段的即时气象状况，为飞行安全与数据质量评估提供依据，并与航线日志一并归档。

B.2 当日气象特征记录表

序号	气象	气温	风向	风力	是否适宜起飞	记录人	记录日期
1							
2							
3							
4							
5							

B.3 航线飞行任务书

航线飞行任务书用于记录每条航线的起降信息、作业人员与实际飞行时长，作为飞行计划执行与安全责任追溯的依据，见表 B.3。

B.3 航线飞行任务书

作业区域/地点			作业人员		
出发时间			到达时间		
序号	起飞地点	起飞时间	降落时间	飞行时间	备注
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
飞行负责人			日期		
安全员			日期		
任务执行情况：					
执行人			日期		
审核人			日期		

B.4 数据备份与管理

表 B.4 用于跟踪当天采集数据的备份流程，详细登记存储介质、经手人员及拷贝时间，确保原始与备份数据完整、可追溯、符合“三副本+异地”安全要求。

B.4 数据备份表

序号	数据采集时间	存储设备	经手人	数据拷贝人	数据拷贝时间	数据情况描述 (数据格式)
1						
2						
3						
4						
5						

附录 C

(资料性)

地面样地调查和每木调查记录表

C.1 样地调查

表C.1用于记录每块地面样地的基础属性与环境特征,为激光雷达-地面联动建模提供精准空间定位和林分条件参考,是后续生物量/碳储量估算和模型检验的关键原始资料。

表 C.1 样地调查记录表

样地编号:		样地面积:	
横坐标:		纵坐标:	区域位置:
地形	坡度:	坡向:	坡位:
样地属性	树种组成: (蓄积比例法, 如 8 杉 2 栎)		
	平均树高: (算数平均高, 单位为 m)		
	龄组:		
调查人:		时间:	

C.2 每木调查

表 C.2 用于逐株记录样地内乔木的胸径、树高、冠幅等关键因子,为建立或验证胸径—树高生物量/碳储量模型提供高精度微观数据支撑,也是后期质量抽检与不确定度分析的重要依据。

表 C.2 每木调查记录表

样木号	树种	胸径 cm	树高 m	冠幅 m	备注

附录 D

(资料性)

机载激光雷达特征变量表

表D.1总结了无人机激光雷达点云常用的高度、水平结构与垂直结构特征变量，为后续林分参数提取、特征筛选和生物量/碳储量反演模型提供统一的指标名称、含义和计算依据。

表D.1 机载激光雷达特征变量表

变量	名称	定义
H	树高	单木归一化点云最高点与地面点的垂直距离
CWD	冠幅直径	单木冠层水平投影最大直径，通过树冠水平轮廓提取
CWA	冠面积	单木冠层水平投影面积，基于二维轮廓计算
CWV	冠体积	单木冠层三维体积，基于树冠范围内点云高度积分估算
C/H	树冠高宽比	冠幅直径与树高之比，衡量树形直立性与冠层扩展特性
MeanH	林分平均高度	样地内归一化点云高度的算术平均值，反映整体林分高度水平
StdH	林分高度标准差	样地内归一化点云高度的标准差，反映林分垂直结构差异
Cover	冠层覆盖率	归一化点云中，高于设定阈值（如 2 m）的点占全部点比例，衡量冠层密实程度
Gap Fraction	冠层间隙率	低于设定阈值（如 2 m）点的比例，反映林冠开敞程度
P90、P95	高度百分位数	点云高度累积分布中对应 90%、95%的高度值，表示顶层冠层高度特性
CVH	高度变异系数	林分点云高度标准差与平均值之比，反映林分结构异质性
MaxH	林分最大高度	样地内最高点的高度值，常用于冠层最高层的描述
Dens_stand	林分点云密度	样地范围内单位面积内的激光回波点数量
VSCI	垂直结构复杂度指数	根据点云高度分布计算的指数，描述林冠层的垂直异质性程度
CVD	冠层体积密度	单位面积内点云归一化冠体积量，衡量林冠的三维密实程度

参 考 文 献

- [1] GB 6962-2021 1:500、1:1000、1:2000 比例尺地形图航空摄影规范
- [2] GB/T 7931-2008 1:500、1:1000、1:2000 地形图航空摄影测量外业规范
- [3] GB/T 17941-2008 数字测绘成果质量要求
- [4] GB/T 19294-2003 航空摄影技术设计规范
- [5] GB/T 18314-2009 全球定位系统（GPS）测量规范
- [6] GB/T 23236-2009 数字航空摄影测量空中三角测量规范
- [7] GB/T 24356-2009 测绘成果质量检查与验收
- [8] GB/T 39612-2020 低空数字航摄与数据处理规范
- [9] CH/Z 3002-2010 无人机航摄系统技术要求
- [10] CH/Z 3003-2021 低空数字航空摄影测量内业规范
- [11] CH/T 3004-2021 低空数字航空摄影测量外业规范
- [12] CH/T 8021-2010 数字航摄仪检定规程
- [13] CH/T 9008.1-2010 基础地理信息数字成果规范
- [14] LY/T 2988-2018 森林生态系统碳储量计量指南
- [15] LY/T 3330-2022 森林土壤碳储量调查技术规程