

# T/GXDSL

## 团 体 标 准

T/GXDSL —2026

### 林业遥感在生态系统服务评估中的应用指南

Application Guide of Forestry Remote Sensing in Ecosystem Service Assessment

(工作组讨论稿)

(本草案完成时间：2026-4-15)

2026 - - 发布

2026 - - 实施

广西电子商务企业联合会 发布

# 目 次

前 言 .....	II
1 引言 .....	1
2 范围 .....	1
3 规范性引用文件 .....	1
4 术语和定义 .....	2
4.1 林业遥感 .....	2
4.2 生态系统服务 .....	2
4.3 参数反演 .....	2
4.4 像元尺度 .....	2
5 总则 .....	2
5.1 科学性原则 .....	3
5.2 尺度匹配原则 .....	3
5.3 可操作性原则 .....	3
5.4 精度可控原则 .....	3
6 技术流程 .....	3
7 数据获取与预处理 .....	3
7.1 遥感数据源选择 .....	3
7.2 数据时相要求 .....	4
7.3 预处理技术指标 .....	4
8 参数反演与指标计算 .....	5
8.1 生态系统类型遥感解译 .....	5
8.2 植被参数遥感反演 .....	5
8.3 生态系统服务评估 .....	6
9 精度验证 .....	6
9.1 地面验证数据要求 .....	6
9.2 验证指标 .....	7
10 成果归档与报告编制 .....	7
10.1 成果组成 .....	7
10.2 报告编制 .....	7

## 前 言

本文件依据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。

本文件由广西产学研科学研究院提出。

本文件由广西电子商务企业联合会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

# 林业遥感在生态系统服务评估中的应用指南

## 1 引言

林业生态系统服务评估是生态文明建设的核心基础性工作，传统地面样地调查方法存在效率低下、成本偏高、空间代表性不足等局限，难以满足精细化、业务化评估需求。遥感技术凭借宏观性、快速性、重复性观测的独特优势，可有效提升评估效率与精度，为林业生态系统服务评估工作提供有力技术支撑。我国遥感技术已形成完善的对地观测与数据支撑体系，但当前林业遥感在生态系统服务评估领域的应用缺乏统一技术标准，导致评估方法不统一、成果可比性差，难以满足业务化应用需求。为规范林业遥感评估技术流程、统一操作要求，提升评估成果的科学性与实用性，为生态管理决策提供权威技术依据，助力生态文明建设，特制定本文件。

## 2 范围

明确规定了基于遥感技术开展林业生态系统服务评估的总则、技术流程、遥感数据获取与预处理、关键参数反演、服务功能量与价值量核算、精度验证及成果归档等技术要求。适用于森林、林地及林业用地的生态系统服务评估工作，涵盖水源涵养、土壤保持、碳固定、生物多样性维持、森林游憩等主要服务类型；各类生态保护、自然资源调查、生态价值核算等相关工作中涉及林业生态系统服务遥感评估的，可参照本文件执行。

## 3 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中规范性引用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（含所有修改单）适用于本文件。

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

GB/T 14950—2009 摄影测量与遥感术语

GB/T 15968—2008 遥感影像平面图制作规范

GB/T 30115—2013 卫星遥感影像植被指数产品规范

GB/T 38582—2020 森林生态系统服务功能评估规范

GB/T 41282—2022 植被覆盖度遥感产品真实性检验方法

LY/T 2254—2014 森林生态系统服务功能评估规范——水量调节

HJ 1166—2021 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统遥感解译与野外核查

HJ 1173—2021 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估

HJ 1320—2023 生态遥感地面观测与验证技术导则

HJ 1340—2023 生物多样性（陆域生态系统）遥感调查技术指南

T/CCPEF 088—2024 卫星综合数据支撑下的生态价值核算标准

#### 4 术语和定义

GB/T 14950—2009、GB/T 38582—2020 和 T/CCPEF 088—2024 界定的术语和定义，以及下列术语和定义适用于本文件。

##### 4.1 林业遥感

利用卫星、无人机等遥感平台搭载的传感器，获取森林资源数量、质量、空间分布及生态环境相关信息，为林业生态系统服务评估、森林资源管理等工作提供数据支撑的探测技术。

##### 4.2 生态系统服务

人类从生态系统中获取的各类惠益，主要包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四大类，是人类生存与发展的重要基础。

##### 4.3 参数反演

基于遥感观测数据，结合物理模型、统计模型或机器学习算法，估算地表生物物理、生物化学等关键参数的过程，是遥感技术应用于生态系统服务评估的核心环节。

##### 4.4 像元尺度

遥感影像中单个像元对应的地面实际覆盖范围，其大小由遥感传感器空间分辨率决定，是遥感数据处理与生态系统服务评估的基本空间单元。

#### 5 总则

### 5.1 科学性原则

评估方法应具备明确的物理或生态学理论基础，参数反演算法需经充分地面验证与科学论证，确保评估过程及结果科学、合理、可信。

### 5.2 尺度匹配原则

遥感数据空间分辨率应与评估目标的空间尺度相匹配，生态系统服务评估的空间单元不宜小于遥感影像原始空间分辨率的 $3\times 3$ 像元窗口，规避尺度不匹配导致的评估误差。

### 5.3 可操作性原则

采用的数据源和技术方法应具备业务化运行可行性，优先选用免费或低成本中高分辨率遥感数据，简化冗余操作流程，确保不同技术水平使用者均可规范开展操作。

### 5.4 精度可控原则

评估全过程应建立完善的精度控制体系，明确各环节精度评价指标，各项关键参数的相对误差应控制在 $\pm 20\%$ 以内，确保评估成果可靠、可用。

## 6 技术流程

林业遥感在生态系统服务评估中的技术流程遵循标准化、规范化原则，主要包括评估目标确定、遥感数据获取、数据预处理、生态系统类型遥感解译、关键参数反演、服务功能量计算、价值量核算、精度验证及成果输出九大环节，具体步骤如下：结合评估区域、时段及目标要求，获取适用的光学或雷达遥感影像，优先选取生长季（6月—9月）影像，保障数据时效性与适用性；对遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何精校正等预处理，消除各类干扰因素，提升影像质量，为后续解译与反演提供可靠数据基础；采用监督分类或面向对象分类方法开展森林生态系统类型遥感解译，严格控制解译精度，总体分类精度不低于85%；基于遥感植被指数、纹理特征及时间序列数据，反演叶面积指数、植被覆盖度、净初级生产力等关键生态参数；将反演参数输入生态系统服务评估模型，计算各项服务功能量；结合社会公共数据，依据相关标准开展生态系统服务价值量核算；利用独立地面观测数据，对解译结果、参数反演结果及服务评估结果进行全面精度验证；整理各类数据成果与中间文件，输出专题图件及评估报告，完成成果归档。

## 7 数据获取与预处理

### 7.1 遥感数据源选择

7.1.1 光学卫星数据：根据评估尺度与精度要求，合理选择光学卫星数据，优先选用国产卫星数据，具体选型要求如下：Landsat 8/9 OLI/TIRS：空间分辨率 30 m，时间分辨率 16 d，适用于中等尺度区域林业生态系统服务评估；Sentinel-2 MSI：空间分辨率 10 m（可见光—近红外波段），时间分辨率 5 d，光谱分辨率高，优先用于植被参数反演；高分一号/六号（GF-1/6）WFV：空间分辨率 16 m，覆盖范围广、重访周期短，适用于我国区域业务化监测与大范围评估；高分二号（GF-2）PMS：空间分辨率 1 m（全色）/4 m（多光谱），适用于小尺度精细化林业生态系统服务评估；PlanetScope：空间分辨率 3 m，重访周期短，适用于高空间分辨率、高时效性评估场景。

7.1.2 雷达卫星数据：针对多云雨、高植被覆盖等光学影像难以穿透的区域，优先选择雷达卫星数据，具体选型要求如下：Sentinel-1 SAR：空间分辨率 10 m，具备全天候、全天时观测能力，适用于多云雨地区森林覆盖监测与土壤含水量反演；高分三号（GF-3）SAR：空间分辨率 1 m 至 500 m，多种成像模式可选，适用于我国区域森林结构参数提取与生态状况监测。

7.1.3 激光雷达数据：用于森林高度、生物量等关键参数精准反演，根据评估尺度选择星载或机载激光雷达数据，具体要求如下：星载激光雷达：ICESat-2/ATLAS（光子计数型），适用于大尺度森林高度反演与区域尺度生物量估算；机载激光雷达：点云密度不低于 2 点/m<sup>2</sup>，数据精度高，优先用于小尺度精细化森林地上生物量估算。

## 7.2 数据时相要求

遥感数据时相选择直接影响评估精度，需严格遵循以下要求：

7.2.1 用于植被参数反演的影像，优先选择生长季（6 月—9 月）数据，云覆盖率控制在 10% 以内，规避云影、雾霭对植被信息的干扰；

7.2.2 用于森林类型识别、植被覆盖度监测的非生长季影像，云覆盖率控制在 15% 以内，确保森林边界与类型特征清晰可辨；

7.2.3 开展多时相分析时，影像时间跨度不宜超过评估周期的±15 天，保障数据时序一致性；

7.2.4 开展年度变化监测时，需获取同季节（±30 天）逐年影像，降低季节差异对评估结果的影响。

## 7.3 预处理技术指标

7.3.1 辐射定标：将遥感影像数字量化值（DN 值）转换为表观反射率，消除传感器自身响应差异影响；定标系数采用传感器官方发布的最新参数，确保定标精度。

7.3.2 大气校正：所有光学遥感影像均需进行大气校正，消除大气散射、吸收等因素对影像反射率的干扰。推荐采用 MODTRAN 辐射传输模型（如 6S、FLAASH）或 Sen2Cor（Sentinel-2 专用）进行校正，校正后地表反射率与地面实测值的均方根误差应小于 0.05。

7.3.3 几何精校正：采用地面控制点法开展几何精校正，校正中误差（RMSE）控制在 0.5 个像元以内；山区地形复杂区域可放宽至 1 个像元。控制点数量满足：平原区每景不少于 15 个，山区每景不少于 25 个，且控制点均匀分布，避免集中于局部区域。

## 8 参数反演与指标计算

### 8.1 生态系统类型遥感解译

8.1.1 分类系统：采用二级分类系统，明确森林生态系统类型划分，保障解译结果统一、规范，具体分类如下：一级类：森林、灌丛、草地、湿地、农田、建设用地、其他；二级类：针叶林、阔叶林、针阔混交林、稀疏林。

8.1.2 分类方法：优先采用随机森林、支持向量机或深度学习等高精度分类算法，提升解译精度。训练样本需具有代表性，数量满足每类别不少于 100 个像元×波段数；分类完成后开展精度检验，总体分类精度不低于 85%，Kappa 系数不低于 0.80。

8.1.3 变化检测：采用多时相分类后比较法开展森林生态系统类型变化检测，明确变化区域、类型及强度。变化图斑最小提取单元为 3×3 像元，对应面积不小于 0.09 公顷（适配 30 m 分辨率数据），确保变化检测结果准确、实用。

### 8.2 植被参数遥感反演

8.2.1 叶面积指数（LAI）：采用植被指数法反演，优先选用归一化植被指数（NDVI），反演公式如下： $LAI = 3.618 \times NDVI - 0.118$ ；该公式适用于 NDVI 0.2—0.9 区间；其中 NDVI 为归一化植被指数，计算公式为： $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ 式中：NIR——近红外波段反射率；RED——红光波段反射率。当 NDVI<0.2 时，LAI 取 0；当 NDVI>0.9 时，LAI 取 3.5，确保反演结果符合植被实际生长状况。

8.2.2 植被覆盖度（FVC）：采用像元二分模型反演，公式如下： $FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$ ；式中：NDVI<sub>soil</sub>——纯裸土像元 NDVI 值，取值范围 0.05—0.15；NDVI<sub>veg</sub>——纯植被像元 NDVI 值，取值范围 0.85—0.95。

8.2.3 净初级生产力（NPP）：采用 CASA（Carnegie-Ames-Stanford Approach）模型计算，公式如下： $NPP = APAR \times \epsilon$ ； $APAR = SOL \times FPAR \times 0.5$  式中：NPP——净初级生产力，单位为克碳每平方米年（gC/m<sup>2</sup>·a）；APAR——光合有效辐射吸收量，单位为兆焦每平方米年（MJ/m<sup>2</sup>·a）；SOL——太阳总辐射量，单位为兆焦每平方米月（MJ/m<sup>2</sup>·月）；FPAR——光合有效辐射吸收比例，基于 NDVI 数据计算； $\epsilon$ ——光能转化率，单位为克碳每兆焦（gC/MJ），取值 0.389。

### 8.3 生态系统服务评估

8.3.1 水源涵养：采用水量平衡方程计算，量化森林生态系统水源涵养能力，公式如下： $Q_w = (P - ET - R) \times A$  式中： $Q_w$ ——水源涵养量，单位为立方米每年 ( $m^3/a$ )； $P$ ——年降水量，单位为毫米 ( $mm$ )，优先采用 CHIRPS 或 GPM 遥感降水数据； $ET$ ——年蒸散发量，单位为毫米 ( $mm$ )，采用 SEBS 模型或 MOD16 蒸散发产品； $R$ ——地表径流量，单位为毫米 ( $mm$ )； $A$ ——林分面积，单位为平方米 ( $m^2$ )。

8.3.2 土壤保持：采用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 计算，公式如下： $Q_s = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$ ；式中： $Q_s$ ——土壤保持量，单位为吨每公顷年 ( $t/ha \cdot a$ )； $R$ ——降雨侵蚀力因子，单位为兆焦毫米每公顷小时年 ( $MJ \cdot mm/ha \cdot h \cdot a$ )，基于逐日降雨量数据计算； $K$ ——土壤可蚀性因子，单位为吨公顷小时每公顷兆焦毫米 ( $t \cdot ha \cdot h/ha \cdot MJ \cdot mm$ )，基于土壤质地数据确定； $LS$ ——坡长坡度因子，基于 30 m 分辨率 DEM 数据提取计算； $C$ ——植被覆盖与经营管理因子，按公式  $C = \exp(-0.025 \times FVC \times 100)$  计算； $P$ ——水土保持措施因子，根据实际水土保持工程情况，取值范围 0.3—1.0。

8.3.3 碳固定：森林生态系统碳储量包括植被碳库与土壤碳库，总碳储量计算公式如下： $C_{total} = C_{biomass} + C_{soil}$  植被碳储量计算公式如下： $C_{biomass} = A \times B \times CF$  式中： $C_{total}$ ——总碳储量，单位为吨碳 ( $tC$ )； $C_{biomass}$ ——植被碳储量，单位为吨碳 ( $tC$ )； $C_{soil}$ ——土壤碳储量，单位为吨碳 ( $tC$ )，参考第二次全国土壤普查数据 (0—30 cm 土层)； $A$ ——林分面积，单位为公顷 ( $ha$ )； $B$ ——单位面积生物量，单位为吨每公顷 ( $t/ha$ )，通过遥感反演公式  $B = a \times (VI)^b + c$  估算 ( $VI$  为植被指数)； $CF$ ——含碳系数，针叶林取 0.51，阔叶林取 0.49。

8.3.4 生物多样性维持：采用 InVEST 模型生境质量模块评估，量化森林生态系统维持生物多样性的能力，公式如下： $Q_{xj} = H_j \times [1 - (D_{xj}^z) / (D_{xj}^z + k^z)]$  式中： $Q_{xj}$ ——生境质量指数，取值 0—1，数值越高，生境质量越好，生物多样性维持能力越强； $H_j$ ——生境适宜性，取值 0—1，森林生态系统取 0.8—1.0； $D_{xj}$ ——生境退化程度，基于人类活动强度 (道路密度、居民点密度、耕地密度) 计算； $z$ ——尺度常数，取值 2.5； $k$ ——半饱和常数，取值 0.5。

## 9 精度验证

### 9.1 地面验证数据要求

地面验证样地布设需具有代表性，覆盖评估区域内不同森林类型、地形条件及植被生长状况，样地数量满足以下要求：评估区域面积  $< 100 km^2$  时，样地数  $\geq 30$  个； $100 km^2 \leq$  评估区域面积  $\leq 1000 km^2$  时，样地数  $\geq 50$  个；评估区域面积  $> 1000 km^2$  时，样地数  $\geq 50 + \text{面积}/100 km^2$ ，最多不超过 200 个。样地大小统一为  $30 m \times 30 m$ ，与 Landsat 卫星影像像元尺度一致，确保验证数据与遥感数据匹配。

## 9.2 验证指标

9.2.1 分类精度：通过计算混淆矩阵评估森林生态系统类型遥感解译精度，要求总体分类精度 $\geq 85\%$ ，Kappa 系数 $\geq 0.80$ ，确保解译结果可靠。

9.2.2 参数反演精度：采用决定系数（ $R^2$ ）和均方根误差（RMSE）作为参数反演精度评价指标，要求  $R^2 \geq 0.60$ ， $RMSE \leq$  参数均值的 20%，确保反演参数准确。

9.2.3 生态系统服务评估精度：以地面实测数据、权威统计数据为参考，评估生态系统服务功能量与价值量精度，要求评估结果相对误差控制在 $\pm 30\%$ 以内，满足业务化应用需求。

## 10 成果归档与报告编制

### 10.1 成果组成

林业遥感生态系统服务评估成果需完整、规范，主要包括以下内容：

10.1.1 基础数据：原始遥感影像、辅助数据（DEM、土壤、降水等）及预处理后的数据产品；

10.1.2 中间成果：生态系统类型解译数据、关键参数反演结果、模型输入输出文件、精度验证数据；

10.1.3 最终成果：生态系统服务功能量及价值量栅格数据集，空间分辨率统一为 30 m，投影采用 Albers 等面积投影（中央经线 105°E），坐标系为 CGCS2000；

10.1.4 专题图件：生态系统类型分布图、NPP 分布图、碳储量分布图、水源涵养量分布图等，比例尺 1:50000—1:100000；

10.1.5 评估报告：完整的林业生态系统服务遥感评估报告。

### 10.2 报告编制

评估报告需规范、详实，立足国家生态建设与绿色发展战略高度，全面反映评估工作全过程及结果，主要包含以下内容：

10.2.1 评估区域概况：包括区域地理位置、自然环境、森林资源现状等；

10.2.2 数据源与技术方法：明确遥感数据、辅助数据来源及预处理方法，详细说明参数反演、服务评估的模型与流程；

10.2.3 关键参数反演过程：包括反演方法、参数设置、结果分析等；

10.2.4 评估结果与分析：量化呈现各项生态系统服务功能量、价值量，分析其空间分布特征与时间变化规律；

10.2.5 精度验证：详细说明验证方法、验证数据、验证结果及误差分析；

10.2.6 结论与不确定性讨论：总结评估结论，分析评估过程中存在的不确定性及改进建议，为后续评估工作与生态管理决策提供参考。

---