

团 体 标 准

T/GDDL 16—2024

红树林生态质量空天地一体化监测指标 体系及技术规范

Integrated monitoring index system and technical specifications for the
ecological quality of mangrove forests trinity of space, sky and earth

2024-05-18 发布

2024-05-20 实施

广东省地理学会 发 布

目 次

前 言 II

引 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 评估原则 3

5 评估指标体系构建 3

6 技术要求 5

7 综合评估方法 9

附录 A（资料性）部分红树林树种适用的异速生长方程 12

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。

本文件由广东省科学院广州地理研究所提出。

本文件由广东省地理学会归口。

本文件起草单位：广东省科学院广州地理研究所、广东工业大学、广东省生态环境监测中心、广东省海洋发展规划研究中心、广西壮族自治区海洋环境监测中心站、南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)、广州中科云图智能科技有限公司、广东省广州生态环境监测中心站、广东省深圳生态环境监测中心站、中科珠江(广州)技术有限公司、广东省林业调查规划院。

本文件主要起草人：尹小玲、杨骥、周文能、谢志宜、邓丽明、蓝文陆、陈鸿展、王伟民、王成荣、杨传训、刘花、舒思京、邓应彬、荆文龙、胡泓达、贾凯、杨阳、张洒洒、李勇、潘屹峰、沈丽冉、黄吴蒙、赵晓丹、屈明、张春霞、刘锡辉。

引 言

本标准充分利用空天地一体化监测技术建立一套准确反映红树林生态健康状况和功能的评估指标体系，确定红树林的生态环境状况及其受人类活动影响的程度，实现红树林生态质量及其时空动态变化的常态化监测与评价，为红树林资源的规划管理、保护修复和可持续利用提供科学依据。

红树林生态质量空天地一体化监测指标体系及技术规范

1 范围

本文件规定了红树林生态质量空天地一体化监测的评估原则、评估指标体系构建、技术要求、综合评估方法。

本文件适用于红树林生态环境调查、监测及质量评估工作。

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 12763.1 海洋调查规范 第1部分：总则
- GB/T 12763.9 海洋调查规范 第9部分：海洋生态调查指南
- GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）
- GB 17378（所有部分） 海洋监测规范
- GB/T 30363 森林植被状况监测技术规范
- GB/T 33027 森林生态系统长期定位观测方法
- HY/T 081 红树林生态监测技术规程
- TD/T 1055 第三次全国国土调查技术规程
- T/CAOE 20.3 海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第3部分：红树林

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

红树 mangrove

生长于热带、亚热带地区潮间带的木本植物。

3.2

红树林 mangroves; mangrove forest

热带、亚热带海岸以红树植物为主体的生物群落。

3.3

红树林生态质量 mangrove ecosystem quality

一定时空范围内红树林生态系统结构、功能和抗胁迫的综合特征，具体表现为红树林生态系统结构

特征的稳定性、生产能力、提供服务功能的能力和抗胁迫能力。

3.4

空天地一体化监测 space-air-ground integrated monitoring

指从空、天、地三个角度对生态环境进行监测的技术，综合运用卫星遥感、无人机遥感和地面调查等环境监测与调查手段，基于数据挖掘、数据融合、数据协同等关键技术，实现对生态环境更加准确的感知。

3.5

植被覆盖度 fractional vegetation cover

植被（包括叶、茎、枝）在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比，主要表征了植被水平结构状况。

3.6

归一化植被指数 normalized difference vegetation index

根据植被光谱特性，基于卫星可见光与红外波段的波段归一化差构造的指数，可以反映植物群落地表覆盖、绿度、健康与否等生长状况。

3.7

叶面积指数 leaf area index

单位土地面积上植物叶片总面积与土地面积的比值，是反映植物群落冠层结构的指标。

3.8

郁闭度 canopy density

红树林树冠的垂直投影面积与此林分总面积之比。

3.9

多样性指数 diversity index

用来度量区域红树林生态系统组成丰富程度的指数，是判断红树林生态系统稳定性的指标。

3.10

红树林蓄积年增长率 annual growth of mangrove stock

红树林在整个年龄期间每年的蓄积平均生长量。

3.11

净生态系统生产力 net ecosystem productivity

单位时间、单位空间内，土壤、凋落物及植物量等整个生态系统的有机物或能量的变化，亦即生态系统净初级生产力与异养呼吸（土壤有机质及凋落物呼吸）之差。

3.12

红树林生态系统抗胁迫特征 resistance characteristics of mangrove ecosystem

红树林植被抵抗由人类干扰而引起的土壤环境、水环境和大气环境变化的能力。

3.13

土壤环境胁迫 soil environmental stress

由于工农业活动向红树林湿地排放大量的重金属污染物从而胁迫红树林的生长发育。

3.14

水环境胁迫 water environment stress

由于工农业活动及入海口的聚集特性，红树林生长发育受水质变化的胁迫。

3.15

大气环境胁迫 atmospheric environmental stress

由于风暴潮、极端降雨和海平面上升等气候灾害频发，红树林的生长发育受到大气环境的胁迫。

4 评估原则

4.1 生态功能优先原则

红树林生态质量评估中的指标选择、指标权重设置和评价方法等，均以保护红树林自然生态功能为主要目标。

4.2 科学性原则

评估指标体系的构建以生态学理论为基础，并结合国内外相关评估实践和研究成果，从“状态-功能-胁迫”三个维度选择对红树林生态环境具有重要影响的指标；评估指标权重设置结合客观的熵权法与主观的专家评分法。

4.3 定量优先，定性为辅原则

对易于量化的要素，应优先采用量化指标进行评估；对于不可定量或者难以量化的要素，建议采用半定量或定性指标进行评估。

4.4 与国内相关标准协调一致原则

应符合 GB/T 12763.1、GB/T 12763.9、GB 15618、GB 17378（所有部分）、GB/T 30363、GB/T 33027、HY/T 081、TD/T 1055、T/CAOE 20.3 的相关标准的规定。

4.5 可操作性原则

在各个评估环节中注重鼓励生态保护和生态修复，宜选择通过生态保护或生态修复能有效提高红树林生态质量的指标进行评估；指标权重设置突出人类活动影响相关指标的作用。同时，指标权重设定、评估等级的划分亦依据红树林生态系统服务功能的需求、红树林保护区级别和湿地分级管理体系进行弹性调整。

5 评估指标体系构建

5.1 指标体系设置包括生态质量空天地一体化监测指标要素层、生态质量评估附加权重层。

5.2 生态质量空天地一体化监测指标要素层

第一层为生态质量空天地一体化监测指标要素层（见表1）。其中，一级指标包括状态特征、功能特征和胁迫特征，旨在揭示红树林生态稳定性和功能持续性，并量化人类活动对红树林生长发育的胁迫性特征。

表1 红树林生态质量空天地一体化监测指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	空天地一体化监测
状态特征	红树林结构	优势种占比	无人机遥感、地面调查
		平均胸径	无人机遥感、地面调查
		平均树高	无人机遥感、地面调查
		植被覆盖度	卫星遥感
		叶面积指数	卫星遥感
		郁闭度	卫星遥感
	多样性指标	丰富度	卫星遥感、地面调查
		Shannon Wiener 指数	卫星遥感、地面调查
		均匀度指数	卫星遥感、地面调查
功能特征	生产力	红树林蓄积年增长量	无人机遥感、地面调查
		净生态系统生产力	卫星遥感
	服务功能	固碳服务功能	无人机遥感
		消浪护功能	无人机遥感、地面调查
胁迫特征	土壤环境胁迫	土壤重金属含量污染	无人机遥感、地面调查
	水环境胁迫	水质参数	无人机遥感、地面调查
	大气环境胁迫	气候灾害	无人机遥感

5.3 生态质量评估附加权重层

第二层为生态质量评估附加权重层（见表2），目的在于根据红树林管理保护措施对第一层指标以附加权重的方式进行修订，附加指标类型主要包括湿地保护区体系、湿地分级管理体系和其他湿地。

表2 红树林生态质量评估附加权重层

附加指标类型	指标要素	指标含义
湿地保护区体系	国家公园	湿地保护区体系通过划定专门的保护区域、加强监测和管理、推动生态恢复和修复等措施，维护红树林生态系统的完整性和稳定性，确保其能够发挥重要的生态功能。湿地保护区体系级别越高，其红树林生态质量越能够得到保证。
	湿地自然保护区	
	湿地公园	
湿地分级管理体系	国际重要湿地	湿地分级管理体系通过制定法律法规、政策措施和标准规范来指导红树林湿地保护工作，确保各级湿地得
	国家重要湿地	

	省级重要湿地	到与其重要性相匹配的保护。红树林湿地管理级别越高，其生态质量也相应较高。
	一般重要湿地	
其他	其他红树林湿地	一些面积较小的红树林既不属于湿地保护区体系也不属于湿地分级管理体系，但同样能够发挥较大的生态功能，其生态质量受人类影响程度较大。

6 技术要求

6.1 状态特征指标监测

6.1.1 树种组成、平均胸径和平均树高

以无人机搭载多光谱或激光雷达定期测定并提取红树林树种、树高、胸径等结构参数，与地面实测数据对比校正后，利用机器学习中随机森林算法对红树林树种进行精细分类，确定红树林优势种和伴生种的数量和分布，并建立树高胸径曲线模型。

6.1.2 植被覆盖度

红树林植被覆盖度信息可利用卫星遥感图像进行反演估算获取。卫星遥感估算法分为植被指数法和混合像元分解法。众多植被指数中归一化植被指数（NDVI）被广泛运用与植被生长状况的监测，且与植被覆盖度具有很好的相关关系。采用 ERDAS 的 ModelMaker 模块将归一化植被指数代入计算，进行植被覆盖度的反演。

其中通过遥感影像红光波段和近红外波段计算归一化植被指数（NDVI），具体计算公式如下：

$$NDVI_0 = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$NDVI_0$ ——原始的 NDVI 值；

ρ_{nir} ——近红外波段的反射率；

ρ_{red} ——红光波段的反射率；

注：采用 TIMESAT 软件对原始 NDVI 数据进行平滑重构处理，得到重构后的 NDVI。

6.1.3 叶面积指数

运用四尺度几何光学模型和切比雪夫多项式，并考虑二向反射分布（BRDF）效应，明确在不同地表覆盖类型、反射率、方位角条件下 LAI 与 SR 以及 RSR 之间的关系，计算红树林有效的叶面积指数。计算公式如下：

$$L_E = f_{LE_SR}(SR \cdot f_{BRDF}(\theta_v, \theta_s, \phi)) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$SR = \rho_{RED} / \rho_{NIR} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$LAI = LE / \Omega_b \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

L_E ——有效叶面积指数；

f_{LE_SR} ——在特定视角和太阳高度角组合 $(\theta_v, \theta_s, \phi)$ 条件下， LE 和 LAI 之间关系；

SR ——简单比值指数；

ρ_{RED} ——MODIS 红波段；

ρ_{NIR} ——MODIS 近红外波段；

θ_s ——太阳天顶角；

θ_v ——传感器天顶；

ϕ ——太阳和传感器之间的相对方位角；

LAI ——真实的叶面积指数；

Ω_b ——植物群落 b 的植被冠层聚集度系数。

6.1.4 郁闭度

卫星遥感方法评估红树林郁闭度，需要根据归一化植被指数（ $NDVI$ ），并结合土地覆盖数据进行计算，公式如下：

$$FCD = \frac{NDVI - NDVI_{non-crown}}{NDVI_{crown} - NDVI_{non-crown}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

FCD ——郁闭度；

$NDVI$ ——红树林的 $NDVI$ ，计算公式见 6.1.2；

$NDVI_{non-crown}$ ——非林冠覆盖地表的 $NDVI$ ；

$NDVI_{crown}$ ——全林冠覆盖地表的 $NDVI$ 。

6.1.5 多样性指数

利用卫星遥感识别样地内自然生态系统类型，并基于地面调查进行精度验证。运用多样性指数表征生态系统类型丰富程度，计算公式如下：

$$DI = N \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

DI ——多样性指数；

N ——评价单元内生态系统类型的数量。

6.2 功能特征指标监测

6.2.1 红树林蓄积年增长量

使用无人机搭载激光雷达，获取点云数据，利用多元线性回归反演模型对红树林蓄积量进行反演，并结合地面调查数据进行精度验证。

6.2.2 净生态系统生产力

监测技术方法应符合 GB/T33027 的规定，植被净初级生产力扣除土壤异养呼吸 R_h 后的剩余部分，其中土壤呼吸 R_h 的计算采用各土壤分碳库分解速率及在各碳库间的转移速率方程求解：

$$R_h = \sum_{j=1}^9 \tau_j k_j C_j \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$NEP = NPP - R_h \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

NPP ——净初级生产力， $gC/m^2 \cdot yr$ ；

NEP ——净生态系统生产力， $gC/m^2 \cdot yr$ ；

R_h ——异养呼吸；

τ_j ——碳库 j 定义的呼吸系数；

k_j ——碳库 j 的分解速率；

C_j ——碳库 j 的大小。

6.2.3 固碳服务功能

以红树林碳储量时间动态变化作为固碳服务功能量。红树林碳储量包括植物碳储量和土壤碳储量两大部分，其中植物碳储量包括地上、和凋落物碳储量。

通过无人机挂载激光雷达传感器调查样方内每棵树的胸径、株高等指标，运用异速生长方程计算样方内每棵树木的地上和地下生物量。其次，基于地面调查获取凋落枝、叶、花果的现存量，采用元素分析仪测定碳含量值，相加得凋落物碳储量。

基于地面调查，设置沉积物（土壤）取样点并取样，测定有机碳含量、容重和土壤厚度等土壤密度测算指标，并通过土壤碳密度与面积之积量化土壤碳储量。因此，红树林固碳服务功能量计算公式如下：

$$C_t = C_{ti} - C_{ti-1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$C_{ti} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

C_t ——红树林固碳服务功能量；

C_{ti} ——第 i 年红树林碳储量；

C_{ti-1} ——第 $i-1$ 年红树林碳储量；

C_{above} ——红树林的地上部分碳储量；

C_{below} ——红树林的地下部分碳储量；

C_{soil} ——红树林湿地土壤碳储量；

C_{dead} ——红树林凋落物碳储量。

6.2.4 消浪护岸功能

基于无人机搭载 CMOS 传感器，结合实地调查，获取红树林区范围、树种、林分结构、地形地貌、林前裸滩、海浪来水方向、海浪穿越红树林方向、地区水位和潮位等数据，设计海浪监测位点和采样线，利用压力式波潮仪采集海浪数据。并采用消波率或波高降低率反映红树林的消浪护岸功能。

$$r = \frac{H_0 - H_d}{H_0} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

r ——红树林消波效率；

H_d ——海浪穿越红树林距离为 d 时的波高；

H_0 ——海浪在林缘处或待测样方前未穿越红树林时的初始波高。

6.3 胁迫特征指标监测

6.3.1 土壤重金属污染

通过无人机搭载多光谱遥感相机，采集红树林区域影像，拼接处理，得到包含细节特征的影像。运用像元二分模型提取土壤光谱信息，结合地面采样数据构建随机森林的遥感反演回归模型，确定污染元素含量。利用单因子和综合指数法，获取土壤重金属污染指数监测结果。

$$PI = C_i / S_i \dots\dots\dots (12)$$

$$NIP I = \sqrt{\frac{PI_{ave}^2 + PI_{max}^2}{2}} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

PI ——单一重金属污染指数；

C_i ——第 i 种重金属元素的实际测量值；

S_i ——第 i 种重金属元素的评价标准值，符合 GB 15618-2018；

$NIP I$ ——红树林土壤重金属综合污染指数；

PI_{max} ——单一污染指数的最大值；

PI_{ave} ——单一污染指数的平均值。

6.3.2 水质参数

采用多光谱遥感影像和实测水质检测数据，建立水质参数遥感反演模型，获得水质参数的浓度估算结果及空间分布情况，通过水体综合营养指数法对水体富营养化状态进行评价。

宜采用综合营养指数法构建富营养评价指数，该方法以叶绿素 a (Chl-a) 的状态指数为基准，在其余水质参数：总氮、总磷、透明度、悬浮物、化学需氧量中选择与叶绿素 a 具有较强相关性的水质状态因子，并与 TLI (Chl-a) 进行加权综合。

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m w_j \times TLI(j) \dots\dots\dots (14)$$

$$w_i = \frac{R_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m R_{ij}^2} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

$TLI(\Sigma)$ ——综合营养状态指数;

w_j ——第 j 种参数的营养状态指数相关权重;

$TLI(j)$ ——第 j 种参数营养状态指数, 且所有参数都以叶绿素 a 作为基准的参数;

R_{ij}^2 ——第 j 种参数与叶绿素 a 的相关系数;

m ——水质参数个数。

6.3.3 气候灾害

通过无人机遥感和卫星遥感相结合的方法了解红树林受风暴潮、极端降雨等气候灾害情况, 查清灾害过后红树林受害立木株数的占比。

7 综合评估方法

7.1 指标数据无量纲化处理

为避免各指标量纲和量级差异过大影响聚类过程的准确性, 对原始数据进行无量纲化标准化处理, 以提高评估的准确性效率。

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \text{ (正向指标)} \dots\dots\dots (16)$$

$$X'_{ij} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \text{ (负向指标)} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

X'_{ij} ——标准化后的指标值, 其取值范围为[0,1];

X_{ij} ——红树林 i 的第 j 个生态质量指标的原始值, $\max(X_{ij})$ 、 $\min(X_{ij})$ 分别为指标 j 的最大值和最小值。

7.2 指标权重确定

7.2.1 红树林生态质量空天地监测指标权重确定

通过熵权法得到红树林生态质量体系各个指标的权重, 计算公式如下:

$$\varpi_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \dots\dots\dots (18)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m \varpi_{ij} \cdot \ln \varpi_{ij} \dots\dots\dots (19)$$

$$d_j = 1 - e_j \dots\dots\dots (20)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \dots\dots\dots (21)$$

式中:

ω_{ij} ——红树林*i*的第*j*项指标值所占的比重；
 e_j ——红树林*i*的第*j*项指标的熵值；
 d_j ——红树林*i*的第*j*项指标的熵冗余度；
 w_j ——红树林*i*的第*j*项指标的权重。

7.2.2 附加指标权重确定

附加指标权重确定主要依据湿地保护体系及分级管理体系级别的高低进行权重确定。

表 3 红树林生态质量附加指标权重

附加指标类型	指标要素	指标权重
湿地保护区体系	国家公园	1.0
	湿地自然保护区	国家级（0.8）、省级（0.6）、市级及区县级（0.4）
	湿地公园	国家级（0.8）、省级（0.6）、市级及区县级（0.4）
湿地分级管理体系	国际重要湿地	1.0
	国家重要湿地	0.8
	省级重要湿地	0.6
	一般重要湿地	0.4
其他	其他红树林湿地	0.2

7.3 红树林生态质量综合指数计算

从红树林状态特征、功能特征和胁迫特征等 3 方面，选取 15 个指标。并从湿地保护区体系、湿地分级管理体系和其他等 3 方面选取了 8 个附加权重指标。对这些指标进行数量化和标准化后，根据每个评价指标因子的权重值与附加指标权重进行加权计算求和，得到红树林生态质量指数（MEQ，0-1），计算公式为：

$$MEQ = \alpha \cdot \sum X'_{ij} \cdot W_i / 15 \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中：

MEQ——红树林生态质量指数；
 X'_{ij} ——标准化后的指标值；
 W_i ——各指标权重；
 α ——附加权重。

7.4 红树林生态质量分级

红树林生态质量综合指数评价结果分级采用等距法进行分级，依据评价结果依次划分为优秀、良好、一般、较差和极差，见表 4。

表 4 红树林生态质量分级

等级	评估得分	红树林生态质量状态
I	0.8~1.0	优秀
II	0.6~0.8	良好
III	0.4~0.6	一般
IV	0.2~0.4	较差
V	0~0.2	极差

附录 A

(资料性)

部分红树林树种适用的异速生长方程

部分红树林树种适用的异速生长方程参考见表 A.1。

表 A.1 部分红树林树种适用的异速生长方程

红树林树种	异速生长方程	相关系数
秋茄	$W_T = 0.0341(D_{0.3H}^2H)^{1.03}$	0.98
	$W_R = 0.0483(D_{0.3H}^2H)^{0.834}$	0.97
白骨壤	$\lg W_T = 2.113 \lg(D_{1.3}) - 0.511$	0.97
	$\lg W_R = 1.171 \lg(D_{1.3}) + 0.106$	0.80
桐花树	$\lg W_T = 1.496 + 0.465 \lg(D_{0.3H}^2H)$	0.88
	$\lg W_R = 0.967 + 0.303 \lg(D_{0.3H}^2H)$	0.86
无瓣海桑	$W_T = 0.280(D_{1.3H}^2H)^{0.693}$	0.99
	$W_R = 0.038(D_{1.3H}^2H)^{0.759}$	0.99

注： $D_{1.3}$ ：胸径， $D_{0.3}$ ：地径， H ：树高， W_T ：地上生物量， W_R ：地下生物量。