

实验设计

一、选题的目的和意义

红树林是生长在全球热带和亚热带潮间带地区的一组耐盐木本植物群落，红树林湿地生态系统对自然生态平衡起到了重要的作用。研究表明，红树林湿地生态系统具有很高的服务功能价值。红树林全球海洋动物重要的栖息地和中转站，拥有丰富的物种资源，是许多海洋动物栖息、育苗和觅食的理想生境。作为独特的海陆过渡生态系统，红树林生态系统在防止水土流失、保护耕地、防风固堤等具有重要作用。红树林本身拥有的大量自然资源可以为人类提供生产生活所需原材料或作为环境教育资源及旅游资源。

中国的红树林主要分布于海南、广东、广西、福建、浙江、台湾、香港及澳门等地。过去 50 年间，无序开发、围海造田、围塘养殖、非法捕捞狩猎等行为导致我国红树林面积锐减。在政府与民间的共同努力下，我国红树林面积呈现先下降后上升的趋势。随着人们对红树林生态重视程度的提高及有关研究的推进，我国大部分红树林已被纳入保护区，对红树林的直接破坏如今已经鲜见。虽然我国在红树林面积恢复工作上的努力卓有成效，但我国的红树林生态依旧面临着生物多样性锐减、树种矮化稀疏化及外来物种入侵等诸多问题，自 2020 年起，国家红树林保护战略已由以面积为导向的红树林种植，转向以物种多样性、生态系统健康为导向的红树林湿地生态系统恢复，红树林生态系统功能及服务能力的恢复已成为当今红树林保育的工作重点。

红树林湿地生态系统是一个动态发展的生态系统。对红树林湿地进行生态系统健康精准评价可有效地掌握红树林生态系统的健康水平，有助于及时调整相关管理及保护措施，使红树林的监管更具有针对性，从而更好地从质量和数量上实现红树林的恢复，为蓝碳存储做出贡献，助力我国 2030 年和 2060 年的碳达峰和碳中和。此外，把握红树林生态系统的健康水平对合理开发红树林资源，在良性地发挥红树林的经济效应等方面也有着至关重要的作用，为我国未来红树林生态系统的开发利用提供依据及指导。

随着无人机技术在生态学中的应用，无人机遥感技术能够获取的红树林生态信息越来越多，例如物种多样性、红树林的覆盖率、群落层高、斑块面积、净初级生产力等。而目前国内对红树林生态系统健康评价的研究大多基于传统方法获取生态信息，而利用无人机对生态信息进行精准获取的技术还很少与红树林生态系统健康评价相结合。本研究将探索无人机在红树林数据获取工作上的更多可能性及应用场景，并结合无人机遥感数据建立一套红树林生态系统健康评价模型，继而针对红树林生态系统制定一套科学精准的保护策略。

二、研究内容

本研究将以深圳市及其周边红树林为例，探讨红树林湿地生态系统健康的概念，并结合无人机遥感技术对其生态信息进行获取及定量处理，从而定量评价所研究红树林生态系统的健康水平。主要研究内容如下：

- (1) 根据生态学理论及实地野外调查，构建红树林生态系统健康精准评价指标体系与评价模型。
- (2) 基于无人机低空遥感的生态系统健康精准评价指标获取。
- (3) 红树林生态系统健康精准评价模型的应用与优化。
- (4) 分析红树林生态系统健康的主要胁迫因子，并有针对性地提出一套提升红树林生态系统健康状况的保护方案。

三、实验方案

3.1 红树林生态系统健康评价指标体系的筛选与建立

生态系统健康是生态系统的综合特性，这种特性可以解释为在人类活动的干扰下生态系统本身结构和功能的完整性。而本研究认为，所谓健康的生态系统是指该生态系统是活跃的、可维持组织结构的和在压力下能自我恢复的，体现了该生态系统是稳定和可持续的。基于这一界定，作为一种典型的生态系统健康评价模型，VOR(Vigor-Organization-Resilience)模型便是从“活力-组织力-弹性”三个准则出发，对生态系统进行健康评价。

由于红树林生态系统复杂的生境，很多地方研究人员难以进入，因此在以往的研究中往往难以获取精确的数据信息。为解决这一问题，本实验计划基于可获取性和精确性原则，基于无人机技术，对部分评价指标进行精确获取，通过传统指标和精确指标相结合的指标体系构建模式，提高健康评价的精确度。

3.1.1 传统指标筛选

根据对已有研究的总结汇总,目前在红树林生态系统健康评价的研究中,经常采用如下指标进行评价:红树林覆盖率、植物初级净生产力、归一化植被指数、底栖动物均匀度、斑块破坏度、湿地退化指数、水体综合污染指数、生物体内重金属污染系数、生物多样性指数、群落层高比、平均斑块面积、景观破碎度、病虫害、生物多样性结构、物种密度、林地损失百分比、围塘养殖百分比、互花米草干扰强度、蔓延度指数、景观多样性、物种多样性、土壤盐度、营养状态质量指数、外来种入侵面积、生态弹性度。

在此基础上,本实验基于可获取性和精确性的原则,计划采用土壤盐度、营养状态质量指数、水体综合污染指数、植物初级净生产力、归一化植被指数、平均斑块面积、景观破碎度、景观多样性、植物多样性、动物多样性、生态弹性度等指标构建红树林生态系统健康评价指标体系。其中,土壤盐度、营养状态质量指数、水体综合污染指数三个指标采用实地调查的方法获取;动物多样性可以采用文献调查法获得;植物初级净生产力、归一化植被指数、平均斑块面积、景观破碎度、景观多样性、植物多样性等指标可通过无人机技术进行精确获取。

3.1.2 基于无人机的精准评价指标获取

红树林生态信息提取主要研究内容包括:图像信息预处理、红树林分布范围识别、红树植物种类识别及红树林生态环境信息获取。

(1) 图像信息预处理

在选定研究区域后,将使用无人机对研究区域进行多次往返扫描,获取该区域可见光光谱信息、多光谱光谱信息等信息,由于研究区域较无人机来说过大,为了保证数据获取精度,无人机一次拍摄无法直接获取整个研究区域图,只能多次拍摄。故在拿到数据后,首先将图像进行拼接、镶嵌与裁剪,再对处理好的图像进行几何校正、大气校正、影像融合等一系列图像预处理过程。

(2) 红树林分布范围识别

使用经(1)处理过后的含有光谱信息的图像,由于是使用无人机低空遥感对海岸带的红树林分布进行识别,我们需要将红树区域与背景区域(潮水、沙石等)分离,提取出红树林分布范围,我们利用无人机获得到的光谱信息分割和检测红树的大致分布区域,应用基于对象的图像分析方法(OBIA),使用可见光波段植被差异指数(VDVI)作为分类阈值,分离出红树林分布范围。

(3) 红树植物种类识别

红树的种类可以通过分析红树的冠层类型来识别。我们可以采用基于像素的极大似然法(MLC)分类的方法来分离不同的冠层类型,在假设红树冠层类型光谱均为高斯分布的情况下,我们选择 Bhattacharya 距离(BD)来衡量不同冠层类型光谱之间的可分性,使用均值和协方差矩阵计算不同类型之间的 BD。(若出现高 BD 值意味着不同类别在光谱上是可分离的),那么我们就可以将这两个类型的红树的冠层类型分离开,也就完成了红树植物种类的识别。

我们也可以采用基于对象的分类方法来分离不同的红树冠层类型,首先我们先要将整个场景分割为多个闭合对象,采用局部同质性准则执行合并决策,将一对相邻的图像对象将合并为一个对象,以不同红树冠层类型光谱之间的最大 BD 为合并过程的中断值,来实现了不同红树的冠层类型的分类,即完成了红树植物种类的识别。

(4) 红树林生态环境信息获取

红树林生态环境信息包括可见光波段差异性植被指数(VDVI)、红树林生物量、红树植物物理特征(冠层高度、树高、树冠直径等)、物种多样性等,我们将使用经过(1)处理后的图像获得这些信息:

a. 植被指数的获取:

使用经过步骤(1)处理后的无人机 RGB 图片,从中得到 RED(红光波段反射值), GREEN(绿光波段反射值), BLUE(蓝光波段反射值)等数据。经过如下变换可获得相应植被指数:

- 可见光波段差异性植被指数(VDVI)获取:

$$VDVI = \frac{2 \times GREEN - (RED + BLUE)}{2 \times GREEN + (RED + BLUE)} \quad (1)$$

- 过绿植被指数(EXG)获取:

$$EXG = 2 \times GREEN - RED - BLUE \quad (2)$$

- 归一化绿红差异指数(NGRDI):

$$NGRDI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED} \quad (3)$$

使用经过步骤(1)处理后的无人机多光谱信息,从中可以得到 NIR(近红外波段反射值),SWIR(短波红外波段反射值)等数据。经过如下变换可获得相应植被指数:

- NDVI 指数获取:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

- 增强植被指数(EVI)获取:

$$EVI = \frac{2.5 \times (NIR - RED)}{NIR + 6 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1} \quad (5)$$

b. 红树物理特征数据获取:

红树物理特征包括冠层高度、红树高度、树冠开度等信息。获取红树高度特征我们首先可以使用经过(1)处理后的无人机图像数据,使用 SFM 技术基于 2D 重叠照片创建 3D 点云。再经由影像对齐处理后,进行插值,将 3D 数据转换为栅格。通过点云驱动获得等高线、地形坡度、数字表面模型(DSM)和数字地形模型(DTM)。然后将两个模型做减法(DSM-DTM)得到一个新的模型,这个模型提供了地面以上物体之间的高度差,通过这个模型我们可以分析得到冠层高度模型(CHM)和植被高度。

在这些数据的基础上使用插值和调制方法,可进一步提高这些数据的精度和质量,并生成最佳拟合曲面,从而获取更多冠层结构参数,如整个垂直剖面上的森林高度、冠层开度和叶面积密度、树冠直径等。

c. 红树林生物量数据获取:

我们可以使用模型预测法来获取红树林生物量数据。我们先选定了多个植被指数(如比率植被指数(RVI),可见光波段差异性植被指数(VDVI),增强植被指数-2(EVI-2),土壤调整植被指数(SAVI)和改良土壤调整植被指数(MSAVI)等)作为模型的预测变量运用机器学习算法(如支持向量回归(SVM),分类回归树(CART),随机森林(RF),迭代自组织数据分析技术算法(SODATA)等)实现对红树林生物量数据的估算。

我们还可以使用异速生长方程法,使用野外调查的生物量和无人机获取到的树高建立异速生长方程,再由所得平均高度和冠幅估算红树林平均生物量。

d. 物种多样性:

由(3)获取到的数据,可以获得红树林植物多样性数据,而红树林的最大特点是以极低的植物多样性承载了极高的动物多样性。但由于无人机并不是全能的,现阶段无人机的采集技术应用在动物多样性的采样上工作量会十分庞大,故这块数据我们通过查找文献的方式进行补全,由此我们可以综合植物多样性与动物多样性,获取物种多样性这一红树林生态环境信息。

e. 景观生态学指标获取:

景观生态学指标包括景观多样性、平均斑块面积、景观破碎程度等生态学指标。要获取景观多样性数据,我们可以使用分类与回归树方法(CART)把(1)处理后的无人机影像数据进行分类解译,然后把分类结果、VDVI 指数、红树林群落纹理特征和原始图片进行层状堆积形成景观格局图,由此图可得到景观多样性指标、平均斑块面积、景观破碎程度等景观生态学指标,从而实现了景观生态学指标的获取。

f. 植物净初级生产力(NPP)获取:

我们使用模型法获取,选择使用一种光能利用率模型(CASA)来估算植物净初级生产力(NPP)。我们将采集到的植被指数(如,VDVI,EXG 等)和景观格局信息及研究区域附近的降水、气温以及太阳辐射等气象数据代入光能利用率模型(CASA)来估计植物净初级生产力(NPP)信息。

3.1.3 组合赋权法确定指标权重

主观赋权法和客观赋权法均有各自的优缺点。主观赋权法确定的权重反映了决策者的意向,受评价主体的主观影响大,具有一定的主观性。客观赋权法主要依靠完备的数学理论和方法,从客观数据出发,忽略了决策者的主观信息,不考虑指标本身的差异,而忽视了其真实状况。本文选取层次分析法与熵值法分别作为主观赋权法与客观赋权法的代表方法计算指标权重,尽可能吸收资深专家的理论和经验,判断各指标的重要程度,同时结合客观赋权法,以规避两种方法各自的缺陷。

(1) 数据的归一化处理

本研究中，我们选择对原始数据进行正向化和归一化处理。正向化操作可以解决所选取指标与红树林健康之间正负相关性不统一的问题。而归一化操作可以将所选取的指标之间存在的量纲差异消除。

(2) 层次分析法确定指标权重

层次分析法是指将一个复杂的多目标决策问题作为一个系统，将目标分解为多个目标或准则，进而分解为多指标的若干层次，算出层次单排序(权数)和总排序，以作为指标的系统方法。

层次分析法一般包括构造层次模型、建立判断矩阵、计算权重向量、一致性检验等步骤。我们基于层次分析法对 VOR 模型中各评价指标的权重值进行计算。通过对前人相关研究中各指标重要性的了解，将同一评价子系统下各指标之间的相对重要性关系输入至计算机，自动生成各评价指标的一组权重值 w_1 。

(3) 熵权法确定指标权重

在信息论中，熵值是系统无序程度或混乱程度的度量，信息被解释为系统无序程度的减少，同时表示了系统某项属性的变异度。系统的熵值越大，则它所蕴涵的信息量越小，系统某项属性的变异程度越小；反之，系统的熵值越小，则它所蕴涵的信息量越大，系统某项属性的变异程度越大。熵值法确定客观权重的基本思想是：若某项属性的数据序列的变异程度越大，则它相对应的权系数就越大。我们基于熵权法对 VOR 模型中各评价指标的权重值进行计算，得到一组权重值 w_2 。

(4) 基于博弈论的组合赋权法

对于一个基本权重向量集 $W = \{w_1, w_2\}$ ，这两个向量任意线性组合成一个可能的权重集：

$$W = \alpha_1 w_1 + \alpha_2 w_2 \quad (6)$$

式中： α_1 、 α_2 分别是层次分析法所得权重向量和熵权法所得权重向量的权重系数。

我们再采用博弈论的方法可以在可能的向量集中找到最满意的 w^* 。其基本思想是在不同的权重之间寻找一致或妥协。寻找最满意的权重向量可转化对线性组合权重系数 α_1 、 α_2 进行优化，优化的目标是使 w^* 与 w_1 、 w_2 的离差极小化。即

$$\min \left\| \sum_{j=1}^2 \alpha_j \times w_j^T - w_j^T \right\|_2 \quad (i = 1, 2) \quad (7)$$

基于博弈论的组合赋权思想是不同层次评价指标体系赋权方法的集成，其集成过程不是简单的物理过程，而是相互比较、相互协调的过程，故适宜于用博弈论合理组合主观赋权法和客观赋权法。

3.2 红树林生态健康评价模型的建立

本实验计划借助无人机遥感技术，以 VOR 模型（VOR 综合指数评估法）为基础建立评价体系，对红树林生态系统的健康情况进行精确评价。

VOR (Vigor-Organization-Resilience)模型是一种典型的生态系统健康评价模型。在这一模型中，生态系统健康可以被定义成三个特征——活力、组织力和弹性。以此为基础，我们可建立生态系统健康指数（EHI）方程：

$$EHI = \sqrt[3]{V \times O \times R} \quad (8)$$

其中，EHI 代表生态系统健康指数，V (Vigor) 是指区域生态系统的活力；O (Organization) 代表区域生态系统的组织力；R (Resilience) 代表区域生态系统的恢复力。由于此处应考虑 V、O、R 这三个因素的可比性，因此 EHI 的值属于 $[0, 1]$ ，该值越大，生态系统就越健康。

在获取完 VOR 模型所需的数据后，本实验拟组合赋权法得出各指标在评价体系中的权重，进而求得红树林生态系统的健康指数，并对生态系统健康进行评价。

3.2.1 红树林生态系统的活力

红树林生态系统的活力可以体现在土壤盐度、营养状态质量指数、NPP（植物初级净生产力）、VDVI（可见光波段差异性植被指数）的指标。NPP 为植被所固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分，这一

部分用于植被的生长和生殖，也是植被状态的直接体现，与植物状态呈正相关；VDVI 可以直观地反映出植被的长势状态，与植物状态呈正相关。它们可由如下公式取得：

$$NPP = PAR \times FPAR \times \epsilon - Ra \quad (9)$$

$$VDVI = \frac{2 \times GREEN - (RED + BLUE)}{2 \times GREEN + (RED + BLUE)} \quad (10)$$

式中， NIR 为近红外波段反射值； R 为红外波段反射值； PAR 为光合有效辐射； $FPAR$ 为植被吸收光合有效辐射比率； ϵ 为现实光能利用率； Ra 为植被自养呼吸。

综上，红树林生态系统的活力指数 V 可由公式得出：

$$V = w_1 \times NPP + w_2 \times VDVI + w_3 \times Q_1 + w_4 \times Q_2 + \dots + w_i \times Q_i \quad (11)$$

式中， Q_1 为土壤盐度的值， Q_2 为营养状态质量指数的值， Q_i 为待确定指标， w_i 为各项指标的权重。

3.2.2 红树林生态系统的组织力

本实验拟采用水体综合污染指数、景观破碎度、平均斑块面积、景观多样性、物种多样性作为组织力系统的评价指标。景观多样性为区域内景观类型和景物品类的数量。在生态系统中，可以认为一个区域的景观类型越多，该地区的生态稳定性越高，当一个物种受到破坏时，由于生态系统中景观类型较高，某一单一类型的破坏并不足以影响整个生态系统，因此该评价指标呈正相关。景观破碎度为同一景观类型包含斑块的离散程度，离散程度越高，生态系统越容易被破坏，即该参数与生态系统组织力呈负相关。平均斑块面积越大，生态系统越稳定，该参数与生态系统组织力呈正相关。公式如下：

$$\text{景观破碎度: } B_3 = \frac{N_i}{A_i} \quad (12)$$

$$\text{平均斑块面积: } B_4 = \frac{N}{A} \times 10^6 \quad (13)$$

$$\text{景观多样性: } B_5 = \sum_{i=1}^n P_i (\ln P_i) \quad (14)$$

其中 P_i 为景观类型 i 所占面积比； n 为景观类型总数； N_i 为景观类型 i 的斑块数； A_i 为景观 i 的总面积； A 为斑块总面积， N 为斑块总数。

$$O = w_5 \times B_1 + w_6 \times B_2 + w_7 \times B_3 + w_8 \times B_4 + w_9 \times B_5 + \dots + w_i B_i \quad (15)$$

式中， B_1 指水体综合污染指数， B_2 为景观破碎度， B_3 为平均斑块面积， B_4 为景观多样性，

B_5 为物种多样性， B_i 为待确定指标。 w_i 分别为以上六个指标的权重。

3.2.3 红树林生态系统的弹性

生态系统的弹性，即生态系统的恢复力。我们可以通过生态弹性度来作为红树林生态系统恢复力等评价指标，生态弹性度越高则表示该生态系统恢复力越强，即生态弹性度与生态系统恢复力呈正相关，并由此得出恢复力指数 R ：

$$R = \sum_{i=1}^n P_i R_i \quad (16)$$

其中 P_i 为景观类型 i 所占面积比； R_i 为景观 i 的生态弹性度分值。

综上，本实验的评价指标体系可归纳为：①准则层：包括活力、组织结构和恢复力；②指标层：包括土壤盐度、营养状态质量指数、NPP、NDVI、水体综合污染指数、物种多样性、景观多样性、景观破碎度、平均斑块面积、生态弹性度等指标。在已构建的评价体系的基础上，通过简单线性加权求和我们求得 V、O、R 三个数值，从而计算出 EHI 指数。通过 EHI 指数，我们可以科学地评估深圳市及其周边红树林湿地生态系统的健康状况。

3.3 模型优化

3.3.1 模型调优的内容

模型的调优主要包括评价指标的筛选优化及指标权重的优化

a. 评价指标的筛选优化

为避免所有红树林在某一指标上的表现趋同，分析各指标对模型贡献度，剔除贡献度较小的指标。为满足模型对红树林湿地生态系统的普适性，补充相关缺失指标。

b. 评价指标权重的优化

层次分析法中专家意见主观性强，为减小相关误差，提出专家意见的异常值、并增加调研的样本量来优化权重。在指标赋权中我们采用了熵权法，熵权法本身依赖于真实性不完全的样本，分析中熵权结果因样本数量的变化而发生变化，对此我们将增加样本量以优化权重。在具体实践过程中，我们也需要根据具体红树林状态进行权重的调节。

3.3.2 模型优化的原则：

- a. 在原有方法的基础上，控制模型的改动幅度。
- b. 考虑具体数据的可获取性。
- c. 考虑模型结果的科学性与可解释性。

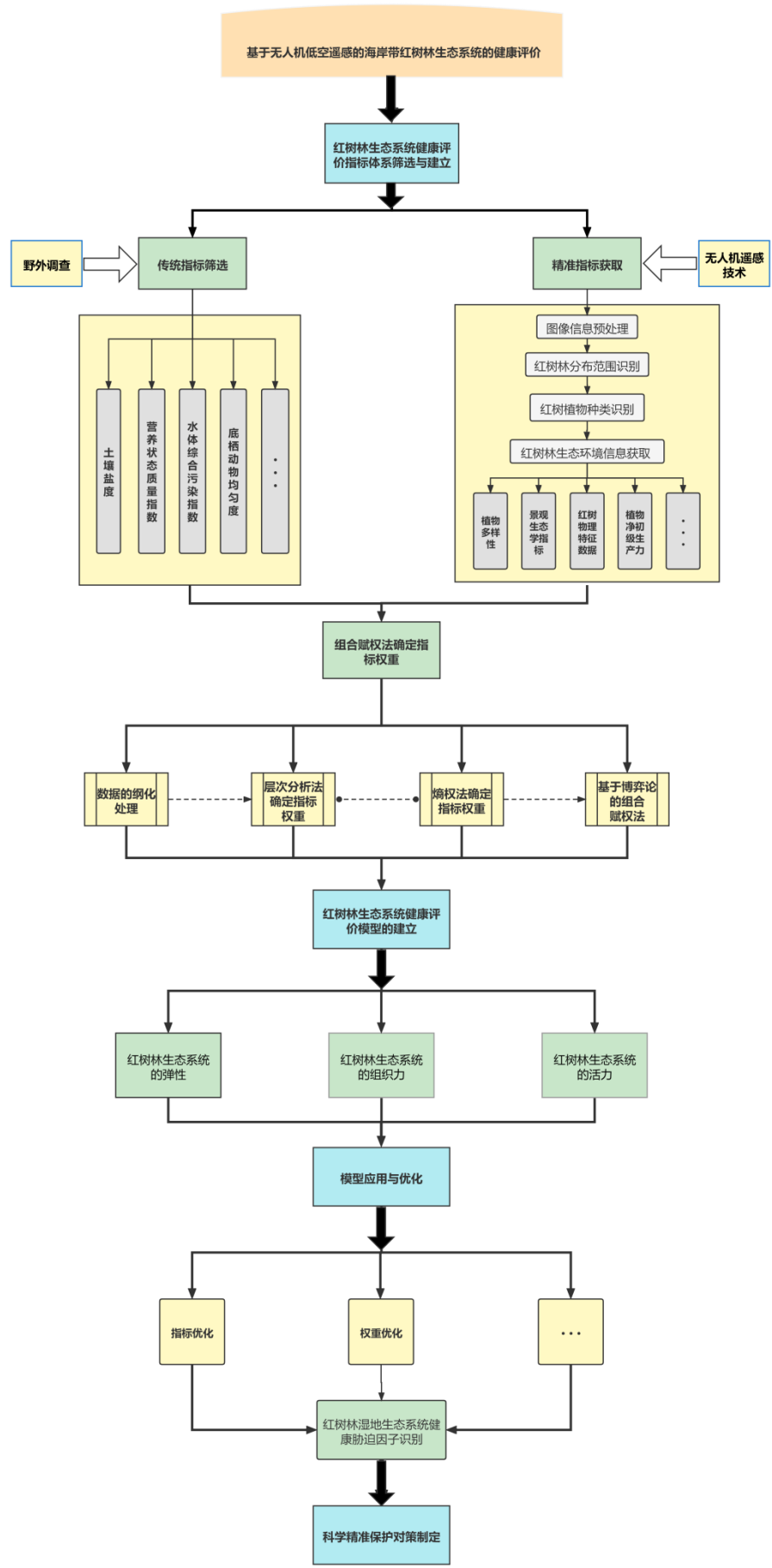
3.3.3 模型优化的目标：

通过模型调优，我们希望所建立的红树林湿地生态系统健康评价模型数据易获取、模型精度高、可体现红树林的特性，能精准地反映出红树林的健康状况，对红树林生态系统的各种健康评价具有普适性。

3.4 科学精准保护对策制定

基于所建立的红树林生态健康评价模型，为了找出红树林湿地生态系统修复和改善策略，我们对研究所涉及到的红树林湿地生态胁迫因子进行总结整理，指出红树林生态受损的主要原因。然后，我们针对所指出的主要胁迫因子提出相应的保护措施以及红树林湿地生态系统健康的调控方案。

四、技术路线图



五、研究进度

本研究分为 5 个阶段：前期工作阶段、信息收集阶段、模型应用与优化阶段、保护对策制定阶段、后期工作阶段。

5.1 前期工作阶段（2021 年 11 月）：

- （1）查阅相关文献资料掌握现有研究进展，撰写研究综述。
- （2）确定研究方向及研究方法，设计实验。

5.2 评价体系建立阶段（2021 年 11 月至 2021 年 1 月）：

- （1）参考相关参考文献，构建评价体系。

5.3 信息收集阶段（2022 年 1 月至 2022 年 3 月）：

- （1）根据评价体系需要，实地调查红树林，并利用无人机遥感技术对其生态信息进行收集。
- （2）基于 Paython 等手段，采用大数据处理方法对所获信息进行量化处理并计算出量化数据。

5.4 模型应用与优化阶段（2022 年 3 月至 2022 年 4 月）：

- （1）构模型，研究模型的可行性。
- （2）利用不同红树林的数据信息进行模型优化，研究模型的普适性，补充模型不足。

5.5 保护对策制定阶段（2022 年 4 月至 2022 年 5 月）：

- （1）实地调查，总结分析红树林生态系统的主要胁迫因子。
- （2）总结归纳，撰写一份红树林保护方案。

5.6 后期工作阶段（2022 年 5 月以后）：

- （1）整理相关成果。
- （2）撰写论文，形成初稿。
- （3）修改论文，形成成稿。

六、预期成果

构建一套红树林生态系统健康精准评价指标体系，并以此建立红树林精准评价的 VOR 模型，并结合研究结果提出一套因地制宜的红树林生态系统健康保护方案。