

# 万宁市小海红树林生境适宜性评价及修复分析

薛飞<sup>1,2</sup>, 王高丹<sup>3</sup>, 杨帆<sup>1,2\*</sup>, 王琰<sup>1,2</sup>, 黄毅<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310; <sup>2</sup>国家海洋局南海规划与环境研究院, 广东 广州 510310; <sup>3</sup>珠江水利委员会珠江水利科学研究所, 广东 广州 510610

**摘要:**【目的】定量分析评估复杂环境条件与红树林分布特征之间的交互作用,探索一定区域尺度上红树林生境适宜性及适生区空间分布格局。【方法】以万宁市小海为研究区,选取水文动力、水质底质、地形高程3个大类环境变量,通过层次分析法搭建评价结构模型,结合德尔菲法获得各指标权重,并将各环境指标经归一化处理后基于GIS技术获取小海红树林适生区的空间分布。【结果】影响小海红树林生长分布的主要环境变量为水深高程、潮位、潮差、盐度等因子;研究区港北口门附近区域红树林生境适宜性较高,面积约121.6 hm<sup>2</sup>;西南侧及东南侧区域适宜性适中,面积约328.5 hm<sup>2</sup>;南侧及中间部分区域适宜性较低,面积约137.2 hm<sup>2</sup>。【结论】小海区域的气候、水质和水文动力条件均较适宜红树林存活、生长,相当一部分清退的养殖塘具备红树林种植修复的基本生态条件,但需进行生境改造,并依据生态位原理合理搭配红树物种,以期达到修复效果。

**关键词:** 红树林; 层次分析法; 生境适宜性; 生态保护修复



开放科学标识码  
(OSID 码)

## Evaluation of habitat suitability for restoration of a mangrove forest in Xiaohai, Wanning

XUE Fei<sup>1,2</sup>, WANG Gaodan<sup>3</sup>, YANG Fan<sup>1,2\*</sup>, WANG Yan<sup>1,2</sup>, HUANG Yi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou, Guangdong 510310, China; <sup>2</sup>South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, SOA, Guangzhou, Guangdong 510310, China; <sup>3</sup>Pearl River Water Resources Research Institute of PRWRC, Guangzhou, Guangdong 510610, China

**Abstract:**【Aim】To analyze and evaluate the interactive effects between complex environmental conditions and the distribution characteristics of mangrove forest, researchers explored habitat suitability of a mangrove forest and the spatial distribution pattern of suitable areas at a specific regional scale.【Method】A mangrove forest in Xiaohai, Wanning was chosen as the study site. The hydrodynamics, water quality and sediment, and terrain elevation were considered as environmental variables, and an evaluation structure model was developed through analytic hierarchy process (AHP). The value of each indicator was determined using the Delphi method, and the spatial distribution of suitable areas in Xiaohai were obtained based on GIS technology after normalized treatment of the environmental indicators.【Result】The results indicate that the main environmental variables affecting the growth and survival of mangroves in Xiaohai are water depth, tide level, tide range, and salinity. The area with high habitat suitability for mangrove forests is located approximately 121.6 hm<sup>2</sup> from the north entrance of the study area; the area with moderate suitability is located approximately 328.5 hm<sup>2</sup> from the southwest and southeast sides of the study area; and the area with low suitability is located approximately 137.2 hm<sup>2</sup> from the south and middle parts of the study area.【Conclusion】The climate, water quality, and hydrodynamic conditions are suitable for the survival and growth of mangroves in Xiaohai. The large number of cleared aquaculture ponds provided the basic ecological conditions for mangrove cultivation and restoration. However, habitat transformation, and a strategic selection of mangrove according to the principle of ecological niche are essential for successful restoration.

**Key words:** mangrove forest; analytic hierarchy process; habitat suitability; ecological protection and restoration

收稿日期(Received): 2023-07-17 接受日期(Accepted): 2024-01-18

基金项目: 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室自主设立课题资助项目(MESTA-2021-D005); 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(GDNRC[2022]51); 中国海洋发展研究会资助项目(CAMA201909)

作者简介: 薛飞, 男, 工程师。研究方向: 海洋生态保护与修复。E-mail: xue\_fei198983@163.com

\* 通信作者(Author for correspondence), 杨帆, E-mail: 943096800@qq.com

红树林是生长在热带、亚热带潮间带的木本植物群落,是一种典型独特的海陆边缘生态系统,在改善水体环境、防灾减灾、储碳固碳、维护生物多样性、休憩观光、海产品供给等方面具有极为重要的作用,具备巨大的生态、经济和社会价值(陈光程等,2013;郑德璋等,1994;Alongid,2008;Chen *et al.*,2018;Duarte *et al.*,2005)。近几十年来,随着我国沿海地区的快速发展,海洋开发力度不断加大,红树林面积不断缩减、生态系统严重退化、生态功能急剧衰退(张晓龙等,2005)。历史上我国红树林面积曾达25万 $\text{hm}^2$ ,20世纪50年代尚有约5万 $\text{hm}^2$ ,2000年降至2.2万 $\text{hm}^2$ (韩维栋等,2000;贾明明,2014)。近年来,红树林面积骤减趋势已得到扭转,根据第二次全国湿地资源调查结果,2013年我国红树林面积约为2.5万 $\text{hm}^2$ ,但总体上仍面临资源量小、岸线侵蚀、生境丧失、病虫害以及生物入侵等严峻形势(陈志云等,2020;倪平等,2014;Hu *et al.*,2018)。

大量研究表明,红树林生态系统易受外界因素条件影响干扰而失衡,适宜的生境条件和合适的造林物种是决定修复种植效果较为关键的影响因素(黄丽等,2010;胡文佳等,2020;张乔民等,1997,2001;张典等,2021;Abd-ei *et al.*,2017;Marcus *et al.*,2000;Record *et al.*,2013)。提前对红树林种植的生境适宜性及适生区空间分布格局进行科学论证,是有效保障区域尺度上红树林保护修复工程效果的基础。在各种“退塘还林”“退养还滩”工程所形成的滩涂或浅滩上进行红树林修复补种,通常还需要进行起垄改造或者回填平整,并疏通潮汐涨落通道,确保修复区域海水通畅,创造适宜的红树林种植生境(范航清等,2017)。彭逸生等(2008)研究发现,影响红树林造林成活率的主要因素为宜林地选择、树种的选引、栽培技术和植后管护监测,且贯穿于整个红树林恢复过程。陈顺洋等(2021)研究指出,水文条件、滩涂高程、底质条件、物种、种植密度和种苗来源等是决定红树林生态修复效果的关键因素,而红树物种和种植措施等也决定了修复后生态系统结构和功能的发展。

目前,国内外已有关于红树林种植生境适应性评价的相关研究,但借助分析评价模型定量探索红树林分布特征与多种环境因子之间的交互作

用的研究仍较少。Carpenter *et al.*(1993)研究提出了DOMAIN模型利用点-点相似矩阵计算目标点上环境变量的适宜性,该适宜性体现了在环境变量空间中(而非现实分布空间中),目标点与离它最近的分布样本点之间的相似程度。最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)通过计算可能分布区域的最大熵来预测其分布范围,是预测准确度较高的生态位模型,当前已用于珍稀濒危或入侵物种的潜在分布预测,以及鸟类、海洋生物的适生区分布等方面(张路,2015;Phillips *et al.*,2006)。层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种定性分析与定量分析相结合的多属性决策方法,将与复杂问题相关的影响因素分层划分,具有框架清晰、结构严谨、判断客观、科学实用等特点,是一种简洁实用的建模方法(王高丹等,2017;王莉等,2023;Saaty,1980)。这使得通过建模途径定量探索分析生物分布与复杂环境因子之间的关系成为可能,为红树林生境适宜性评价和适生区分布预测提供了较为可行的技术路径与方法。

本研究以海南省万宁市小海为研究对象,选取水文动力、水质底质、地形高程3个大类的环境变量,通过AHP搭建评价结构模型,结合德尔菲法获得各指标权重,并将各环境指标经归一化处理后基于GIS技术获取小海红树林适生区分布区域,探索一定区域尺度上红树林生境适宜性及适生区空间分布格局,并提出具有针对性的修复对策建议。研究成果可为小海红树林生态系统保护修复研究及工程选址提供科学依据,并为其他区域及相似尺度范围内的修复工程提供借鉴参考和决策支持。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域概况

小海潟湖位于海南省万宁市东部沿海(110°29'39"E,18°53'19"N),是由第四纪更新世晚期海侵形成的一个发育良好的沙坝-潟湖地貌体系,东西宽3.5~7.5 km,南北长约10 km,呈葫芦状,腹大口小,东北部与外海联通,总面积约43.78 $\text{km}^2$ ,是我国较大的潟湖之一。小海内有太阳河、龙首河、龙尾河、东山河、白石河和溪狗河等6条主要河流径流汇入,经小海调蓄后从港北口门出海,小海流域总集水面积602 $\text{km}^2$ 。万宁市小海地处低纬度,北回归线以南,阳光充足,雨量丰富,温度偏高,年平均温度24.5 $^{\circ}\text{C}$ ,一般年平均降雨量在2000 mm

以上,年平均日照为 1500~2200 h,属于热带季风海洋性气候,地势西高东低,兼有多种地貌。

环小海周边沿岸原有大片红树林分布,但由于长期的人为活动影响,红树林的立地条件已受到严重破坏,原有的红树林分布区域已经变成浅滩和围垦鱼塘,红树林生态系统逐渐消亡。据全国红树林资源调查结果,万宁市约有红树林面积 18 hm<sup>2</sup>,主要物种有红海榄 *Rhizophora stylosa* Griff.、榄李 *Lumnitzera racemosa* Willd.、卤蕨 *Acrostichum aureum* L.、水椰 *Nypa fruticans* Wurmb. 和黄槿 *Hibiscus tiliaceus* Linn.。而目前小海内未有成片的红树林分布,仅见零星的海漆 *Excoecaria agallocha* Linn.、卤蕨、红海榄,数量稀少,且每个物种仅偶然见到,这与小海潟湖有利于红树林分布的优良自然资源条件不相称。

### 1.2 研究数据

1.2.1 环境数据资料 本研究依据红树林适宜生境的特征,结合小海小区域评价尺度上的关键因素影响,选取盐度、水深高程、表层水温、潮位、潮差、无机氮等 11 个较具代表性的因子用于模型建立与分析。其中,水文数据主要来自所属海洋站水文动力特征资料,生物、水质数据主要来自海南省海洋与渔业科学院 2020 年 6 月在小海海域附近开展的春季海洋环境现状调查资料,地形、高程等数

据主要来自中国南海近岸数字海图(1:150000),并通过建立数字高程模型(digital elevation model, DEM)进行特征提取获得。

1.2.2 养殖塘分布的获取与处理 小海周边养殖塘大多是历史上围垦红树林湿地而来,目前小海潟湖内以石斑鱼 *Epinephelus* sp.、对虾 *Penaeus orientalis* Kishinouye 养殖为主。据万宁市小海海域养殖池塘、渔排退出实施方案部分数据资料统计,小海周边共有 2400 余家养殖户,其中池塘养殖 1700 余户,养殖面积共约 2100 hm<sup>2</sup>;鱼排养殖 700 余户,网箱数量达 24000 多口。结合遥感影像对小海周边的养殖塘图斑进行初步目视解译,并结合外业现场补充调查进行验证。

### 1.3 研究方法

1.3.1 AHP 分析 利用 AHP 对各层级元素之间的权重关系进行定量分析,主要包括以下 3 个步骤:

(1)构建判断矩阵。判断矩阵主要反映每一层级各元素之间的相对重要程度,通过两两比较确定其相对重要性,使用 1~9 比率标度法(表 1)进行比较并赋值,形成判断矩阵  $A: A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。式中: $a_{ij}$ 表示相对于上一层元素  $X_i$  与  $X_j$  的相对重要性。

表 1 AHP 判断矩阵的标度与含义  
Table 1 Scale and meaning of AHP judgment matrix

标度 Scale	含义 Meaning
1	元素 $X_i$ 与 $X_j$ 相比,同等重要 Element $X_i$ is equally important to $X_j$
3	元素 $X_i$ 与 $X_j$ 相比,稍微重要 Element $X_i$ is slightly more important than $X_j$
5	元素 $X_i$ 与 $X_j$ 相比,明显重要 Element $X_i$ is obviously more important than $X_j$
7	元素 $X_i$ 与 $X_j$ 相比,强烈重要 Element $X_i$ is strongly more important than $X_j$
9	元素 $X_i$ 与 $X_j$ 相比,极端重要 Element $X_i$ is extremely more important than $X_j$
2,4,6,8	相对重要性位于以上相邻标度之间 The median of the above adjacent scales
$1/a_{ij}$	若元素 $X_i$ 与 $X_j$ 重要性相比为 $a_{ij}$ ,则 $X_j$ 与 $X_i$ 重要性相比为 $1/a_{ij}$ If the importance of element $X_i$ is $a_{ij}$ compared to $X_j$ , then $X_j$ is $1/a_{ij}$ compared to $X_i$

(2)计算指标权重。通过特征根法求得判断矩阵的最大特征根  $\lambda_{max}$  所对应的特征向量  $W$ ,对特征向量进行归一化处理获取各指标权重值,方程为  $A \times W = \lambda_{max} \times W$ 。

(3)一致性检验。在判断矩阵的构建过程中或多或少存在一定误差,判断矩阵的合理与否需要通过一致性检验进行验证。

首先,根据最大特征根  $\lambda_{max}$ ,求出判断矩阵的一致性指标(consistency index, CI):  $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ 。

式中, $n$  为该判断矩阵的阶数。

然后,求出一致性比率(consistency ratio, CR):  $CR = \frac{CI}{RI}$ 。式中,随机一致性指标(random index, RI)与  $n$  之间满足  $RI_1 = 0.00, RI_2 = 0.00, RI_3 = 0.58, RI_4 = 0.90, RI_5 = 1.12, RI_6 = 1.24, RI_7 = 1.32, RI_8 = 1.41, RI_9 = 1.45, RI_{10} = 1.49$ 。当  $CR < 0.1$ ,说明判断矩阵满足一致性检验要求,否则应对判断矩阵重新调整。

1.3.2 确定评价指标体系 红树林的存活分布与

生境条件密切相关,其中决定潮水浸淹程度的潮汐动力特征和滩面地形高程因素,以及河口、内湾区域的水质和底质条件等对于红树林种植修复成功与否至关重要。通过将红树林生境适宜性评价的问题条理化、层次化,综合考虑各因子影响构建层次分析模型。目标层为生境适宜性评价,准则层为水文动力、水质底质、地形高程等 3 个要素类别,指标层由潮位、潮差、pH 值、盐度、表层水温、溶解氧、无机氮、活性磷酸盐、底质类型、水深高程、离岸距离等 11 个评价因子构成。

1.3.3 评价因子处理及分析计算 由于选取的各评价因子类型不同,原始数据计量单位不同,且取值范围变幅较大,因此需对数据进行归一化标准处理。

首先利用 ArcGIS 10.5 软件的空间分析模块功能对各环境因子进行归一化处理,然后通过扩展分析模块将各环境因子处理后的数据填充至研究区域内的栅格属性信息表中进行计算分析。利用 GIS 空间分析模块中的栅格计算工具,将标准化处理后的评价因子的栅格图层数据与对应权重相乘计算得到每个栅格单元的生境适宜性(habitat suitability, S):  $S = \sum_{i=1}^n W_i X_i (n = 14)$ 。式中,  $X_i$  为各评价因子,  $W_i$  为各因子的权重值。S 值的大小代表该栅格单元内红树林生长分布存活概率或适宜性程度,取值在

0~1, S 值越大表示该栅格对应的区域空间内生境条件越适合红树林生长分布,适宜性越高。

1.3.4 确定指标权重 为尽可能地降低判断矩阵构建及评判过程中的人为主观性和片面性影响,本研究结合德尔非法综合确定各影响因子权重。

## 2 结果与分析

### 2.1 AHP 模型评判结果

通过两轮专家打分以及调查结果统计分析等步骤(田艳等, 2021), 构建出各层次判断矩阵(表 2~5), 并通过计算得到各层次各指标因子权重(表 6)。对判断矩阵计算结果进行一致性检验, 得到  $\lambda_{max}$  为 3.0537, 一致性比率 CR 值为 0.0516, 这表明, 判断矩阵具有很好的一致性, 各评价因子的层次权重值较为准确。

模型评价结果表明, 在小海区域尺度范围内地形高程因素对红树林生长分布的影响程度最大, 其次为水文动力因素, 最后是水质底质因素。从参与模型构建的各影响因子权重中可以看出, 水深高程、潮位、潮差和盐度是影响红树林生长分布的重要因子, 权重值最大; 离岸距离、表层水温和底质类型等因子对红树林生境适宜性及分布影响较大; 溶解氧、pH 值、无机氮和活性磷酸盐等因子产生的影响较小。

表 2 生境适宜性判断矩阵表

Table 2 The judgment matrix of habitat suitability

生境适宜性 Habitat suitability	水文动力 Hydrodynamic	水质底质 Water quality and sediment	地形高程 Terrain elevation
水文动力 Hydrodynamic	1.0	1.0	1.0
水质底质 Water quality and sediment	1.0	1.0	0.5
地形高程 Terrain elevation	1.0	2.0	1.0

表 3 水文动力判断矩阵表

Table.3 The judgment matrix of hydrodynamic

水文动力 Hydrodynamic	潮位 Tide level	潮差 Tide range
潮位 Tide level	1.0	2.0
潮差 Tide range	0.5	1.0

表 4 水质底质判断矩阵表

Table 4 The judgment matrix of water quality and sediment

水质底质 Water quality and sediment	pH 值 pH value	盐度 Salinity	表层水温 SST	溶解氧 DO	活性磷酸盐 Active phosphate	底质类型 Bottom sediment types	无机氮 TIN
pH 值 pH value	1	0.1429	0.25	0.5	1	0.3333	1
盐度 Salinity	7	1.0000	2.00	4.0	7	3.0000	7
表层水温 SST	4	0.5000	1.00	2.0	4	1.0000	4
溶解氧 DO	2	0.2500	0.50	1.0	2	0.5000	2
活性磷酸盐 Active phosphate	1	0.1429	0.25	0.5	1	0.3333	1
底质类型 Bottom sediment types	3	0.3333	1.00	2.0	3	1.0000	3
无机氮 TIN	1	0.1429	0.25	0.5	1	0.3333	1

表 5 地形高程判断矩阵表

Table 5 The judgment matrix of terrain elevation

地形高程 Terrain elevation	水深高程 Water depth elevation	离岸距离 Offshore distance
水深高程 Water depth elevation	1.00	4.00
离岸距离 Offshore distance	0.25	1.00

表 6 各层次影响因子权重表

Table 6 Weight table of influence factors at each level

影响因素(权重) Influence factor (weight)	评价因子 Evaluation factor	权重 Weight	
水文动力 Hydrodynamic (0.3278)	潮位 Tide level	0.2185	
	潮差 Tide range	0.1093	
	pH 值 pH value	0.0135	
水质底质 Water quality and sediment (0.2611)	表层水温 SST	0.0509	
	盐度 Salinity	0.1017	
	溶解氧 DO	0.0255	
	无机氮 TIN	0.0135	
	活性磷酸盐 Active phosphate	0.0135	
	底质类型 Bottom sediment types	0.0426	
	地形高程 Terrain elevation (0.4111)	水深高程 Water depth elevation	0.3289
		离岸距离 Offshore distance	0.0822

### 2.2 小海红树林适宜性分布区域

在 ArcGIS 10.5 中通过栅格计算工具对模型得到的结果进行可视化分析与表达(聂群海, 2017), 生成小海红树林生境适宜性分布图(图 1)。本研究采用自然断点分级法对栅格计算结果进行逐级划分, 获得生境适宜性分区评价的边界条件, 以每个栅格单元的  $S > 0.75$  作为高适宜区,  $0.35 \leq S \leq 0.75$  作为中适宜区,  $S < 0.35$  作为低适宜区进行划分, 并对各适宜性分布区域进行空间分析, 统计得出不同类型区域的面积。

总体上看, 小海港北口门附近区域红树林生境适宜性较高, 西南侧及东南侧区域适宜性适中, 南侧及中间部分区域适宜性较低。经统计, 小海周边区域红树林生长分布高适宜区面积约 121.6  $\text{hm}^2$ , 中适宜区面积约 328.5  $\text{hm}^2$ , 低适宜区面积约 137.2  $\text{hm}^2$ 。

## 3 讨论

### 3.1 小海红树林适生条件分析

红树林的生长分布与生存环境紧密相关, 多数研究认为, 地理高程和气候条件是影响红树林生长分布的最重要因素(陈鹭真等, 2017; 刘亮和范航清, 2010; 曾庆昌等, 2017; 郑德璋等, 1999)。本研究属于在小尺度地理范围内展开, 本次 AHP 模型评判结果显示, 水深高程、潮位、潮差和盐度对红树林生长分布的影响最大, 离岸距离、表层水温和底

质类型等因素次之。

小海区域盐度范围在 2.4~34.0, 均值为 25.3, 口门外海域盐度在 33.8 左右。受附近淡水河流注入影响, 潟湖内盐度值呈西南低东北高特征。需根据不同的海水盐度条件合理搭配红树物种, 总体上看小海口门区域和东侧沿岸的盐度条件较适宜红树林生长。

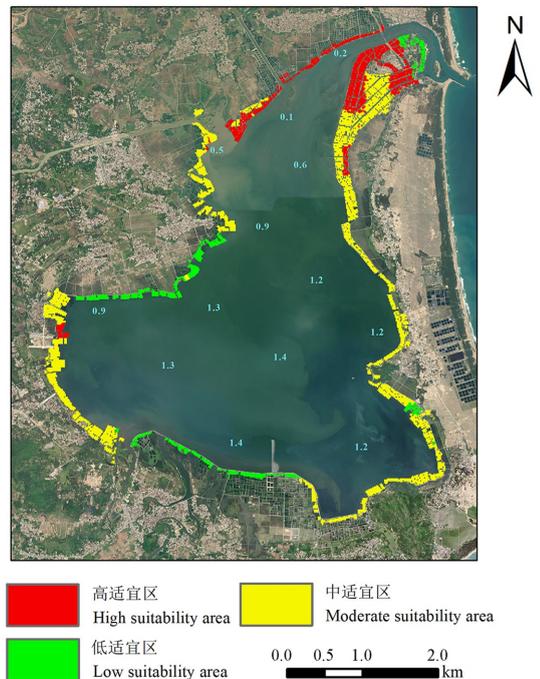


图 1 小海红树林生境适宜性分布图

Fig.1 Distribution of mangrove habitat suitability in Xiaohai

小海潟湖表层水温变化范围为 24.6~34.8 ℃, 春季均值为 27.8 ℃, 秋季均值为 25.2 ℃。潟湖水深差异、水动力交换条件、不同季节温度和日照影响是造成表层水温分布存在差异的主要原因, 海表水温整体位于红树林的适生范围。

小海潟湖除东北部港北水道水深在 2.0~4.0 m 外, 其他区域水深多在 0.1~2.0 m 之间, 整体平均水深约 1.0 m, 水深较浅。小海清退养殖塘的塘底滩涂高程总体上接近外围滩涂高程, 但高低不一, 给红树林种植修复带来了一定程度的困难, 需具体结合场地平整或起垄回填的方式来适当进行生境改造, 以满足红树林的生长存活需求。

据港北(外海)站实测资料统计(1985 高程基准起算), 最高潮位 1.75 m, 年最高潮位均值 1.17 m, 实测最低潮位-1.42 m。潮差较小, 平均涨、落潮差 0.75 m, 最大涨潮差 2.15 m, 最大落潮差 1.98 m。小海潟湖内潮汐曲线严重变形, 潮型、潮位与外海相距甚远。小海内最高潮位比口门、外海区域低 0.50~0.70 m, 最低潮位比口门、外海区域高 0.20~0.50m, 最大潮差比口门、外海区域低 0.90~1.20 m。

小海区域径流量、纳潮量较小, 潮差从口门由外向内急剧衰减, 潟湖内淤积严重, 水动力交换条件和能力不足, 滩涂淹水时间较长, 但淹水较浅, 周边区域有湿地植被分布, 也说明了水动力条件可满足植被生长。

### 3.2 小海“退塘还林”可行性分析

研究表明, 自 20 世纪 80 年代以来, 97.6% 的红树林损失是由围塘养殖造成的。由于此类养殖塘的前身均为红树林地, 天然具备红树林生态保护修复的基本生态条件, 在恢复红树林生态系统功能方面也更具优势, 红树林种植修复适宜性较好, 但目前仍存在着缺乏相关技术标准和典型案例, 以及养殖塘清退需要面临巨额赔偿和养殖户转岗就业等诸多问题(保尔森基金会等, 2020; Balke & Friess, 2016; Wang *et al.*, 2018)。

小海滩涂附近沿岸原来分布着大片红树林, 红树林生态系统为该区域海洋生物的生长繁殖提供了良好的栖息环境, 生物多样性非常丰富。经过多年的人为活动影响, 尤其是超大规模的围塘养殖开发利用活动, 造成原有红树林生长分布区域生境严重受损, 基本变成养殖围塘, 环小海周边繁茂的红树林植被群落已消失。目前, 通过小海“退养还滩”

与红树林生态保护修复工程的实施, 环小海周边区域已基本完成“退塘还林”计划的养殖清退工作。

《海南省人民政府办公厅关于印发海南省加强红树林保护修复实施方案的通知》(琼府办〔2019〕33 号)显示, 万宁市宜林养殖塘面积为 723.52 hm<sup>2</sup>, 红树林种植难度为中难度。本研究发现, 一部分适宜性较高的红树林适生区域位于清退的养殖塘内, 从一定角度反映了“退塘还林”计划的可行性。

### 3.3 小海红树林生态修复对策建议及效益分析

基于本研究 AHP 模型评判结果及小海周边气候、环境和水动力条件综合分析, 决定小海区域红树林分布和存活的关键因素为水深高程、潮位和盐度等因子。

由于红树植物的生长存活对盐度具有一定的适应范围, 结合小海区域盐度分布特征, 在小海西侧及西南侧等盐度偏低区域开展红树林种植时, 考虑选择海桑 *Sonneratia caseolaris* (Linn.) Engl.、海漆、桐花树 *Aegiceras corniculatum* (Linn.) Blanco、水椰、老鼠簕 *Acanthus ilicifolius* L. 等耐低盐的乡土物种; 在小海东侧及口门附近等盐度较高区域可选择秋茄 *Kandelia candel* (Linn.) Druce、白骨壤 *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.、红海榄、木榄 *Bruguiera gymnorhiza* (L.) Lam. 等耐盐性强的红树物种(冯建祥等, 2017; 廖宝文等, 1996; 钟才荣等, 2022)。

此外, 通过起垄、回填、平整等方式进行生境改造后, 依据生态位原理(Hirzel *et al.*, 2002), 按水深高程等不同的生境因子合理搭配所选的红树物种, 可为红树林生态系统的健康正向演替创造必要条件, 以达到预期修复效果。潮上带区域可种植海杧果 *Cerbera manghas* Linn.、水黄皮 *Pongamia pinnata* (L.) Merr.、黄槿、假茉莉 *Clerodendrum fragrans* (Vent.) Willd. 等半红树及红树伴生种; 潮间带中-高潮位区域种植海桑、木榄、海漆、老鼠簕、卤蕨、海莲 *Bruguiera sexangula* (Lour.) Poir. 等; 潮间带中-低潮位区域种植秋茄、红海榄、桐花树、白骨壤、水椰等。

综上所述, 在小海小区域尺度研究范围内, 水深高程、潮位、潮差和盐度对红树林生长分布的影响最大, 离岸距离、表层水温和底质类型等因素次之, 溶解氧、pH 值、无机氮和活性磷酸盐等因素影响较小。小海区域气候、水质和水文动力条件较适宜进行红树林种植, 通过科学实施红树林生态修

复,可逐步恢复小海红树林生态系统的结构和功能,改善该区域的生态环境和生物多样性,提升红树林固碳增汇能力,提高小海潟湖生态系统尤其是红树林生态系统的生态效益和整体稳定性。

### 参考文献

- 保尔森基金会,老牛基金会,红树林基金会,2020. 中国红树林保护及恢复战略研究报告. 深圳:保尔森基金会.
- 陈顺洋,安文硕,陈彬,陈光程,2021. 红树林生态修复固碳效果的主要影响因素分析. *应用海洋学学报*, 40(1): 34-42.
- 陈光程,余丹,叶勇,陈彬,2013. 红树林植被对大型底栖动物群落的影响. *生态学报*, 33(2): 327-336.
- 陈鹭真,郑文教,杨盛昌,王文卿,张宜辉,2017. 红树林耐寒性和向海性生态系列对气候变化响应的研究进展. *厦门大学学报(自然科学版)*, 56(3): 305-313.
- 陈志云,李东文,王玲,莫羨,孔达卿,陆建康,杨华,2020. 广东省中山市 2 种红树林有害生物风险分析及防控策略. *生物安全学报*, 29(2): 148-156.
- 范航清,阎冰,吴斌,兰国宝,周浩郎,2017. 虾塘还林及其海洋农牧化构想. *广西科学*, 24(2): 127-134.
- 冯建祥,朱小山,宁存鑫,林起辉,吴浩,李银心,林光辉,2017. 红树林种植-养殖耦合湿地生态修复效果评价. *中国环境科学*, 37(7): 2662-2673.
- 韩维栋,高秀梅,卢昌义,林鹏,2000. 中国红树林生态系统生态价值评估. *生态科学*, 19(1): 40-46.
- 黄丽,王瑁,王文卿,2010. 红树林名称与红树林湿地保护. *湿地科学与管理*, 6(1): 45-48.
- 胡文佳,晁碧霄,王玉玉,董鹏,张典,俞炜炜,陈光程,陈彬,2020. 基于最大熵模型的福建省红树林潜在适生区评估. *中国环境科学*, 40(9): 4029-4038.
- 贾明明,2014. 1973~2013 年中国红树林动态变化遥感分析. 博士学位论文. 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所).
- 刘亮,范航清,2010. 红树林宜林因子研究. *湿地科学与管理*, 6(2): 57-60.
- 廖宝文,郑德璋,郑松发,李云,陈相如,陈正桃,1996. 红树植物秋茄造林技术的研究. *林业科学研究*, 9(6): 29-35.
- 聂群海,2017. 基于 GIS 技术和主成分分析的苏州土地适宜性评价与应用. 硕士学位论文. 苏州:苏州大学.
- 倪平,董燕红,朱艾嘉,李海涛,熊薇,浦传亮,战爱斌,2014. 人工拔除五花米草对红树林大型底栖动物群落的影响. *生物安全学报*, 23(3): 165-173.
- 彭逸生,周炎武,陈桂珠,2008. 红树林湿地恢复研究进展. *生态学报*, 28(2): 336-347.
- 田艳,曾春华,李志强,张会领,2021. 青岛近岸海域开发利用生态适宜性评价. *广东海洋大学学报*, 41(4): 17-22.
- 王高丹,张建平,赵旭升,范光伟,邓长涛,2017. 基于多源数据的村镇山洪风险分析和评价研究. *人民珠江*, 38(4): 35-42, 81.
- 王莉,马衍青,王涛,王云坡,2023. 基于 IAHP-熵权法和模糊综合评价法的市政有限空间气体安全风险评价. *科学技术与工程*, 23(3): 1319-1325.
- 张晓龙,李培英,李萍,2005. 中国滨海湿地研究现状与展望. *海洋科学进展*, 23(1): 87-95.
- 张乔民,隋淑珍,张叶春,于红兵,孙宗勋,温孝胜,2001. 红树林宜林海洋环境指标研究. *生态学报*, 21(9): 1427-1437.
- 张乔民,于红兵,陈欣树,郑德璋,1997. 红树林生长带与潮汐水位关系的研究. *生态学报*, 17(3): 258-265.
- 张路,2015. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用. *生物学通报*, 50(11): 9-12.
- 张典,王玉玉,俞炜炜,马志远,晁碧霄,陈光程,陈彬,胡文佳,2021. 厦门湾红树林生境适宜性评估及修复潜力分析. *应用海洋学学报*, 40(1): 43-55.
- 曾庆昌,黄敏华,缪绅裕,陶文琴,龙连娣,陈伟霖,2017. 广州南沙湿地 4 种红树植物底泥特性的差异. *华南农业大学学报*, 38(1): 103-108.
- 郑德璋,李云,廖宝文,1999. 红树树种适宜温度条件的研究. 北京:科学出版社.
- 郑德璋,郑松发,廖宝文,1994. 红树林生态系统研究方法. 广州:广东科技出版社.
- 钟才荣,方赞山,吕晓波,程成,张孟文,2022. 极小种群野生植物海南海桑的生境特征及保育策略. *林业资源管理* (5): 145-152.
- ABD-EI MONSEF H, HASSAN M A A, SHATA S, 2017. Using spatial data analysis for delineating existing mangroves stands and siting suitable locations for mangroves plantation. *Computers & Electronics in Agriculture*, 141: 310-326.
- ALONGID M, 2008. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1): 1-13.
- BALKET, FRIESS D A, 2016. Geomorphic knowledge for mangrove restoration: a pan-tropical categorization. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(2): 231-239.
- CARPENTER G, GILLISON A N, WINTER J, 1993. Domain: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation*, 2(6): 667-680.

## 参考文献

- 蔡普默, 赵梦婷, 宋蕴哲, 孟李涛, 季清娥, 林嘉, 李焰焰, 聂传朋, 2022. 基于历史数据探究气候变暖对我国瓜实蝇物候的影响. *中国瓜菜*, 35(9): 64-72.
- 崔金富, 曹凤勤, 程立生, 符悦冠, 万方浩, 张桂芬, 2016. 温度、光照强度对瓜实蝇成虫飞行行为的影响. *生物安全学报*, 25(1): 31-34.
- 邓金奇, 朱小明, 韩鹏, 杨国萍, 李忠彩, 2021. 我国瓜实蝇研究进展. *植物检疫*, 35(4): 1-7.
- 李磊, 韩冬银, 牛黎明, 张方平, 陈俊谕, 符悦冠, 2019. 瓜实蝇对 39 种寄主适应度的评估. *环境昆虫学报*, 41(5): 1057-1064.
- 李亚辉, 吴伟坚, 2015. 瓜实蝇成虫在苦瓜田间的时空动态. *生物安全学报*, 24(1): 20-25.
- 王奕婷, 白强, 陈红松, 田震亚, 高旭渊, 周忠实, 2022. 瓜实蝇和南亚果实蝇在我国的分布差异. *环境昆虫学报*, 44(5): 1170-1175.
- 王在凌, 徐婧, 张润志, 2020. 中国重要检疫性实蝇的全球分布和入侵情况. *生物安全学报*, 29(3): 164-169.
- 孔令斌, 林伟, 李志红, 万方浩, 王之岭, 黄冠胜, 2008. 基于 CLIMEX 和 DIVA-GIS 的瓜实蝇潜在地理分布预测. *植物保护学报*, 35(2): 148-154.
- 毛红彦, 赵岩, 丁华锋, 焦永吉, 孙国强, 陆春显, 韩世平, 2019. 河南省重要实蝇的种群动态监测. *中国植保导刊*, 39(11): 77-83.
- 欧阳倩, 莫如江, 吴伟坚, 2014. 瓜实蝇卵巢的发育阶段及分级. *生物安全学报*, 23(1): 24-29.
- CHEN G C, GAO M, PANG B P, CHEN S Y, YE Y, 2018. Top-meter soil organic carbon stocks and sources in restored mangrove forests of different ages. *Forest Ecology and Management*, 422: 87-94.
- DUARTE C M, MIDDELBURG J J, CARACO N, 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2(1): 1-8.
- HU L J, LI W Y, XU B, 2018. Monitoring mangrove forest change in China from 1990 to 2015 using landsat-derived spectral-temporal variability metrics. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 73: 88-98.
- HIRZEL A H, HAUSSER J, CHESSEL D, PERRIN N, 2002. Ecological niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data. *Ecology*, 83(7): 2027-2036.
- MARCUS L, 2000. Restoring tidal wetlands at Sonoma Baylands, San Francisco Bay, California. *Ecological Engineering*, 15(3): 373-383.
- PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- RECORD S, CHARNEY N D, ZAKARIA R M, ELLISON A M, 2013. Projecting global mangrove species and community distributions under climate change. *Ecosphere*, 4(3): 1-23.
- SAATY T L, 1980. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw Hill.
- WANG M, CAO W, GUAN Q S, WU G J, WANG F F, 2018. Assessing changes of mangrove forest in a coastal region of southeast China using multitemporal satellite images. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 207(31): 283-292.
- 肖枢, 蒋小龙, 张朝良, 应雪松, 杨雁雄, 2001. 瑞丽桔小实蝇、瓜实蝇生物学特性的观察. *植物检疫*, 15(6): 332-336.
- 杨艳丽, 赵运杰, 2016. 2015 年内乡县实蝇类有害生物监测报告. *河南农业* (4): 31-32.
- 朱丽珊, 陈红松, 田震亚, 周忠实, 2023. 寄主对瓜实蝇老熟幼虫和蛹的低温耐受性的影响. *植物保护*. [2023-05-06]. <https://doi.org/10.16688/j.zwbh.20237377>.
- DHILLON M K, SINGH R, NARESH J S, SHARMA H C, 2005. The melon fruit fly, *Bactrocera cucurbitae*: a review of its biology and management. *Journal of Insect Science*, 5(1): 40.
- MWATAWALA M, MAERERE A P, MAKUNDI R, DE MEYER M, 2010. Incidence and host range of the melon fruit fly *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) (Diptera: Tephritidae) in Central Tanzania. *International Journal of Pest Management*, 56: 265-273.
- VARGAS R I, PINERO J C, MILLER N W, 2018. Effect of physiological state on female melon fly (Diptera: Tephritidae) attraction to host and food odor in the field. *Journal of Economic Entomology*, 111(3): 1318-1322.
- VIRGILIO M, JORDAENS K, VERWIMP C, WHITE I M, DE MEYER M, 2015. Higher phylogeny of frugivorous flies (Diptera, Tephritidae, Dacini): localised partition conflicts and a novel generic classification. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 85: 171-179.

(责任编辑:郭莹)

(上接第 160 页)

(责任编辑:郑珊珊)