

# 承诺书

赛区评阅编号（由赛区组委会评阅前进行编号）：

## 2015 深圳杯全国大学生数学建模竞赛

### 编 号 专 用 页

赛区评阅编号（由赛区组委会评阅前进行编号）：

赛区评阅记录（可供赛区评阅时使用）：

评 阅 人										
评 分										
备 注										

全国统一编号（由赛区组委会送交全国前编号）：

全国评阅编号（由全国组委会评阅前进行编号）：

# 基于 PSR-熵权综合法的深圳福田红树林湿地 生态系统健康评估体系

## 摘要

本文主要针对红树林保护区的监控、健康评价和保护问题,研究了红树林的面积变化、景观格局变动、城市污染和生物多样性等问题,构建了基于 3S 技术的红树林动态监测模型及基于 PSR 的红树林生态健康评价模型,并使用信息熵赋权法求出了各指标的权重,较好地解决了红树林的监控、评价和保护问题。

针对问题(1),利用 3S 技术构建模型对红树林进行动态监控,计算福田红树林的面积以及相关景观格局指标,为红树林健康评价体系提供数据支撑。首先,收集研究年份的 TM 影像信息,利用福田红树林的地理信息和收集 GPS 数据对图像进行进一步的完善。接着,对于预处理好的图像进行分类,计算红树林以及其他类型区域的面积。得到 1980 年、1980 年、2000 年、2010 年、2013 年福田红树林的面积分别为 113、63、27、81、104 ( $\text{hm}^2$ ),说明红树林的面积先大幅度地下降,然后再快速回升。最后,计算相关的空间特征指标,结果说明本区红树林和引进红树林的生长状况较好,但是生物多样性较低,各群落所占比例较为悬殊。

针对问题(2),通过构建 PSR 模型来评价福田红树林生态系统的健康状况。首先,考虑红树林群落的组成、结构、生态功能及生态学指标,我们选取 27 个指标,建立红树林湿地群落健康评价指标体系。接着,使用熵权法较为客观地确定了各个指标的权重。最后,搜集有关福田红树林的数据带入健康评价体系中计算,结果显示,2013 年福田红树林综合健康指数为 0.5145,处于亚健康状态。压力、状态、响应健康指数分别为 0.3326、0.7917、0.9594,说明当前福田红树林最主要的问题就是人为干扰和自然干扰严重。

针对问题(3),根据问题(2)中的红树林生态系统评价模型,红树林的人为干扰和自然干扰问题较为严重,其中水污染与人工引种植物问题比较突出,需对这两个指标进行进一步分析。首先,分别将水污染因素与人工引种植物因素分开预测,重新计算单独考虑该因素下的未来几年福田红树林生态系统健康评分。在水污染因素预测中,将数模官网提供的最新水质监测数据代入,利用灰色预测方法,将预测的数据代入 PSR 模型,得到未来几年福田红树林生态系统在水污染加剧条件下的健康状况和健康评分;在人工引种植物因素预测中,使用与水污染因素预测相同的方法,将海桑与无瓣海桑作为入侵物种的代表植物,利用 PSR 模型重新预测未来几年福田红树林生态系统在人工引种植物加剧条件下的健康状况和健康得分。最后,结合福田红树林周围的实际情况,给出一些保护、管理的建议。

最后,对模型进行了评价和改进,并分析了模型的优缺点。

**关键词:** PSR 模型,评价指标体系,3S 技术,熵权法,灰色预测

## 1. 问题的重述

与国内外其他大规模湿地生态系统相比，福田红树林自然保护区因其面积小，湿地生态系统的生态健康更加脆弱，迫切需要构建湿地动态监测、生态健康评估及预警系统来支撑其保护、管理工作。但目前的生态健康评价主要采用基于抽样监测数据和专家经验的静态方法，仅仅围绕主要生物因子开展调查而没有覆盖到噪声、大气等环境因子，而且监测点信息的时间、空间离散度较大（时间间隔较长、测点密度过于稀疏），致使难以完全满足福田红树林自然保护区科学管理的实际需要。因此，保护区准备用三至五年的时间完成保护管理数字化支撑平台建设，其中构建新型的生态系统动态监测和健康评估及预警科学管理支撑体系是重要工作内容。

生物有机体不是孤立生存的，在其生存环境中甚至其体内都有其他生物的存在，这些生物便构成了生物因子。生物与生物因子之间发生各种相互关系，这种相互关系既表现在种内个体之间，也存在于不同的种间。

鉴于上述情况，请查询相关资料，为福田红树林湿地构建一体化生态系统模型框架，为生态系统动态监测提供大数据管理支撑平台，为生态系统健康评估及预警提供动态模拟分析支撑平台。

例如，模型框架可由若干生态场景模型组成，生态场景模型以量化方式描述红树林湿地中各种生物、生境的空间结构和生态功能；模型框架应能通过刻画生态场景模型之间的关系实现对湿地生态系统能量流动、物质循环等物种依存竞争关系的动态描述；依托具体的生态场景模型可建设具体的保护、管理业务场景信息系统；全体保护、管理业务场景信息系统基于一体化生态系统模型框架，可以形成完整的生态系统动态监测和健康评估及预警科学管理支撑体系。

然后，基于所构建的模型框架完成下述工作：

1、如果福田红树林自然保护区采用本文设计的模型框架来构建湿地动态监测和健康评估预警系统，将如何根据模型框架的数据构成要求设计保护区未来的生态环境监测方案？对自己模型框架的后续完善工作有何建议？

2、请查阅相关资料、收集数据，选取一个当下福田红树林最迫切需要解决的生态系统问题，基于所构建的模型框架从健康预警的角度出发对其生态发展趋势进行预测分析，并给出具体的保护、管理建议。

## 2. 问题的分析

### 2.1 问题（1）的分析

对于问题（1），题目要求我们建立一个动态监测模型对红树林湿地进行检测。红树林湿地监测是一项复杂的综合环境监测，利用 3S 技术进行红树林湿地监测，可以大大增强监测的准确性和时效性，更好地反映红树林湿地生态的动态变化。首先，我们选取相关指标，研究红树林的面积变化、周围其他非生物所占面积的变化等；其次，建立动态监测模型，利用 3S 技术描述红树林面积的演变过程。最后，利用相关图像处理软件对遥感图像中的各种指标进行计算，得到红树林景观空间特征的相关指数。通过数据挖掘出生物的多样性、稳定性等评价指标，为红树林整体的健康评价体系提供支持，并且根据其动态变化规律预测出未来可能存在的问题，为红树林的保护和管理提供建议。

### 2.2 问题（2）的分析

对于问题（2），题目要求为福田红树林湿地构建一体化生态系统模型框架，为生态系统健康评估及预警提供动态模拟分析支撑平台。福田红树林生态系统是一个典型的自然-经济-社会复合系统，为此，我们引入 PSR 模型来评价福田红树林生态系统健康状况。首先，考虑红树林群落的组成、结构、生态系统及生态学指标，我们将指标体系分为 4 层，再借鉴文献选取 27 个指标，建立红树林湿地群落健康评价指标体系；再次，对于各指标的权重确定问题，可以采用的方法有层次分析法、专家评分法等，这里我们使用信息熵赋权法，熵权法是根据各指标的观测值所提供信息量的大小来确权重的方法。数据分布越分散，其不准确性也越大，它能尽量消除各指标权重计算的人为干扰。最后，建立健康评价等级来评价红树林的健康状况。

### 2.3 问题（3）的分析

题目要求寻找到福田红树林最迫切需要解决的生态系统问题，基于本文构建的模型框架从健康预警的角度出发对其生态发展趋势进行预测分析，并给出具体的保护、管理建议。首先通过问题二的 PSR 模型计算出了各个指标的数值并算出最终的分数，按分数高低排序找出最迫切需要解决的问题。可以发现最迫切需要解决的问题为水污染与人工引种植物。接着代入最新水质数据，分别预测 PSR 模型水污染条件下与人工引种条件下未来几年福田红树林生态系统的健康得分与各指标得分，从而得到该问题的严重程度与各方面发展情况。最后结合实际情况，对该问题的防治给出一些建议。

### 3. 模型的假设和符号的说明

#### 3.1 模型的假设

- (1) 假设在通过遥感图像分析红树林面积时, 忽略潮汐带来的影响;
- (2) 假设在 EWE 模型中, 假设划分的功能组能够代表红树林中的全部生物;
- (3) 假设福田红树林保护区中的水污染都由深圳河排污造成的, 不考虑其他因素;
- (4) 假设 PSR 模型中选取的 27 个指标具有较好的代表性;
- (5) 假设在 EWE 生态系统中的功能组全部是相对稳定的。

#### 3.2 符号的说明

$P_i$	功能组 $i$ 的总生产率
$Y_i$	功能组 $i$ 的总渔获捕捞率
$M_{2i}$	功能组 $i$ 总的被捕食死亡率
$E_i$	功能组 $i$ 的净迁移率(迁出率-迁入率)
$BA_i$	功能组 $i$ 的生物量累积率
$EE_i$	功能组 $i$ 的生态营养转化效率
$(P/B)_i$	功能组 $i$ 的生产量与生物量比值
$(Q/B)_j$	功能组 $i$ 的消耗量与生物量比值
$DC_{ji}$	捕食生物 $i$ 在捕食生物 $j$ 的食物组成中所占的比例
$N_i$	指标 $i$ 的归一化值
$X_i$	评价指标 $i$ 的实测值
$X_{max}$	该类指标中的极大值
$w_j$	第 $j$ 个指标的熵权

## 4. 模型的准备

### 4.1 PSR 模型

福田红树林生态系统是一个典型的自然-经济-社会复合系统，其健康评价必然要涉及自然、环境、生态、社会经济等众多评价指标。OECD 建立的压力-状态-响应（PSR）框架模型<sup>[1]</sup>具有清晰的因果关系，即人类活动对环境施加一定的压力，因为这个原因，环境状态发生了一定的变化，而人类社会应当对环境的变化作出反应，以恢复环境质量或防止环境退化。而这三个环节正是决策和制定对策措施的全过程。本文将 PSR 模型引入福田红树林生态系统健康评价中来，用其思想来组织评价指标体系，建立一个压力-状态-响应概念模型，如图 1 所示。

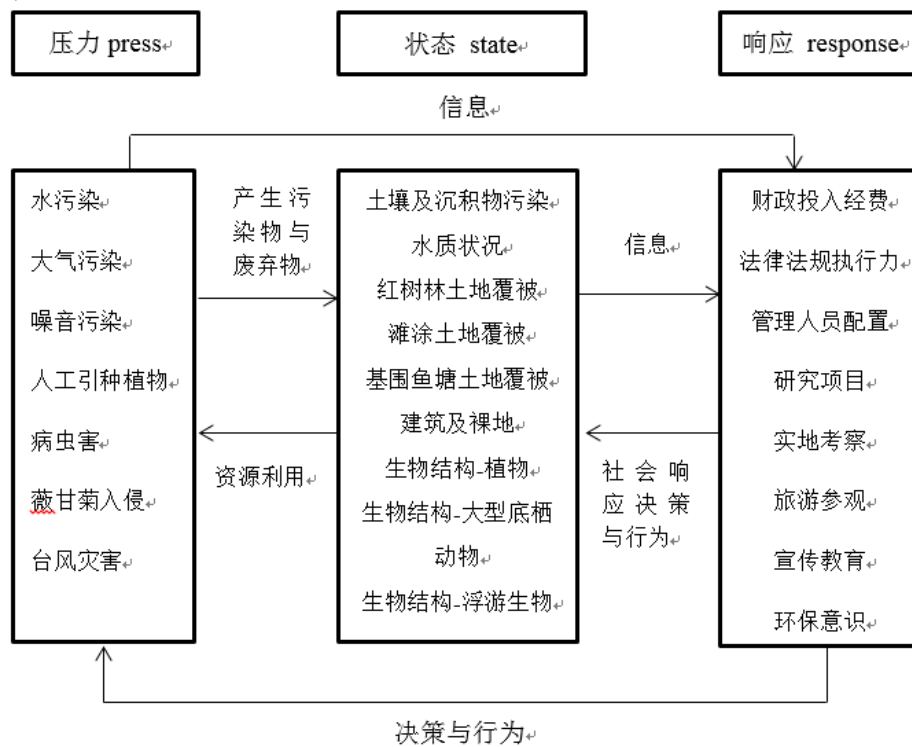


图 1 压力-状态-响应概念模型

### 4.2 信息熵法

在层次分析法中，专家打分等偏于主观的确定权重的方法，信息熵法是偏于客观的确定权重的方法，它借用信息论中熵的概念。所谓“熵”，是信息论中衡量不确定性的指标，信息量的(概率)分布越趋于一致，不确定性越大。

假定有  $n$  个属性  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，以及它们的属性值构成的决策矩阵

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}$$

先对决策矩阵  $D$  进行标准化处理得到决策矩阵  $R$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

其中矩阵  $R$  满足归一性:  $\sum_{i=1}^m r_{ij} = 1, j = 1, 2, 3, \dots, n$ , 即每列的元素之和为 1。

$A_j$  对属性  $X_j$  的熵  $E_j$  定义为:

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}, j = 1, 2, \dots, n$$

已知  $0 \leq E_j \leq 1$ , 若  $(r_{1j}, \dots, r_{mj}) = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots)$ , 则  $E_j = 0$ ; 总之  $r_{ij}$  越一致, 则  $E_j$  越接近 1, 这样就越不易区分方案的优劣。所以下面定义  $X_j$  对于方案的区分度:

$$F_j = 1 - E_j$$

而属性的权重计算公式为:

$$w_j = \frac{F_j}{\sum_{k=1}^n F_k}, j = 1, 2, \dots, n$$

其中  $w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; \sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。

#### 4.3 动态监测模型

3S 技术是遥感技术(Remote sensing, RS)、地理信息系统(Geography information systems, GIS)和全球定位系统(Global positioning systems, GPS)的统称, 是空间技术、传感器技术、卫星定位与导航技术和计算机技术、通讯技术相结合, 多学科高度集成的对空间信息进行采集、处理、管理、分析、表达、传播和应用的现代信息技术, 如图 2 所示。

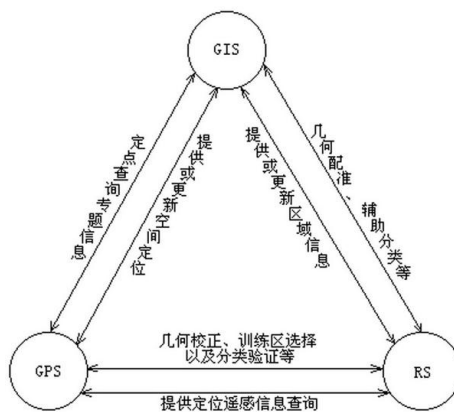


图 2 3S 技术图



## 5. 生态环境特点

红树林(mangrove)是生长于热带亚热带海岸潮间带,受到海水周期性浸淹的木本植物群落。红树林湿地是以红树植物群落为核心的一种特殊的海洋湿地类型,同时兼具陆地生态系统和海洋生态系统的特征,是热带亚热带海岸的生态关键区,具有独特的水文、生物地球化学和生态功能,在全球生态平衡中起着不可替代的重要作用。

深圳福田红树林自然保护区位于深圳湾北岸,区域范围在北纬 22° 30' - 22° 32', 东经 113° 56' - 114° 3' 之间,总面积 3.68 平方公里,是我国面积最小的红树林保护区,也是我国唯一处于城市腹地的国家级自然保护区。

福田红树林保护区是重要的鸟类栖息地,共有鸟类约 200 种,其中 23 种为国家重点保护鸟类,每年都有数十万只以上长途迁徙的候鸟在深圳湾停歇,是东半球国际候鸟南北迁徙通道上重要的“中转站”、“停歇地”和“加油站”。

### 5.1 红树林湿地生态系统现状

红树林湿地生态系统由红树植物、其它陆地植被、鸟类、两栖爬行动物、昆虫、底栖动物、浮游生物等生物以及其赖以生存的土壤、大气、海水等环境要素共同组成,通过物质循环和能量转换发挥生态功能。下面简要分析各个环境要素。

#### (1) 红树植物

截止 2011 年,自然保护区内植物有 51 科 127 属 140 种,其中自然分布生长的真红树植物有 4 科 5 属 5 种,半红树植物有 2 科 2 种,主要为秋茄、木榄、桐花树、白骨壤、海漆、老鼠簕等,此外还有从海南引种的真红树植物 2 科 4 属 8 种、半红树植物 1 科 1 属 1 种,从澳大利亚引进的 1 科 1 属 1 种。

受到填海、城市快速发展带来的污染、外来物种入侵以及病虫害的影响,自然分布生长的红树林正面临严重的威胁。

#### (2) 鸟类

鸟类共有 108 种,隶属 13 目 35 科。水鸟(包括翠鸟科)有 57 种,其余的 51 种陆生鸟类主要为各种生境广泛分布的广布种以及多数在湿地活动的湿地依赖种类。按照居留型划分,留鸟有 51 种,迁徙鸟有 57 种,其中以福田保护区作为越冬地的有 42 种。受保护和受胁鸟种共有 13 种。秋季鸟类种类较夏季稍多;数量由于迁徙候鸟集群迁徙,数量显著高于夏季。

#### (3) 两栖爬行动物及大型底栖动物

两栖爬行动物在生态系统中多处于营养级的中间层,是生态系统物质循环和能量流动的重要环节,因此,它们的种群数量和生态状况,往往是反映和描述生态系统生物量水平和食物链状况的重要标志,也是制定维护和改善生态系统环境状况各项措施的科学依据。根据近几年深圳福田自然保护区的观察记录、采集鉴定标本和香港方面的报道,深圳湾湿地共有两栖动物 8 种,隶属于 1 目 4 科,有爬行动物 23 种,隶属于 3 目(亚目) 20 科。

深圳湾湿地爬行动物种群数量变化受人类经济活动影响十分明显。该湿地经济价值较高的龟鳖目种类和蛇目中较大型的眼镜王蛇、眼镜蛇等数量大大减少,而经济价值较低的小型蜥蜴类,如壁虎、变色树蜥、石龙子等数量较多,成为显著的优势种群。体型较大的滑鼠蛇数量变化不大,可能一方面是人类捕杀使其数量减少,另一方面野外鼠类

数量增多，食物来源充足，有利于滑鼠蛇种群数量增加。

2012 年深圳福田潮间带大型底栖动物物种数为 46 种，较 2011 年的 48 种少，但超过了自 2005 年以来的平均值；密度为 1.198，仅高于 2011 年的 0.911、2009 年的 0.694 和 2008 年的 1.005，在 8 年监测数据中，处于较低水准；丰度指数为 1.617，低于 2011 年的 2.072，处于近年来的平均水准；物种多样性指数为 1.941，多样性较高，但低于 2011 年的 2.232，总体上看，夏秋两季的物种数高于春冬两季，而冬季的物种数比其他三季又有显著减少。

#### (4) 昆虫

最新的调查报告显示，红树林昆虫共有 113 种，隶属于 10 目 57 科，而鳞翅目种类最为丰富，包含 11 个科 31 个种，分别占 19.3% 和 27.4%；其中以海榄雌瘤斑螟 *Acrobasis* sp.、八点广翅蜡蝉 *Ricania speculum*、报喜斑粉蝶 *Delias pasithoe* (Linnaeus) 为优势种类，并造成了对红树植物的严重为害。

与 1994 年调查的数据对比发现，在目的总数没有什么变化，只增加了蜚蠊目；在科的组成上，由原来的 59 科减少到 57 科，其中有 36 科为两次调查都存在，15 个科为以前未有记录；在种的组成上由原来的 94 种变为现在的 113 种。

昆虫数量动态有三个高峰期，第一个高峰期出现在 7 月下旬，主要由广翅蜡蝉形成，第二个出现在 11 月上旬至 12 月中旬、主要由小绿叶蝉形成，第三次出现在次年 4 月上旬，主要由小绿叶蝉和广翅蜡蝉共同形成。

#### (5) 浮游植物

赤潮藻和耐污染特征的种类是福田红树林浮游植物的主要成分。赤潮藻如威氏海链藻、骨条藻等在多个季节成为绝对优势种，耐污染的藻类如小环藻、颤藻、裸藻等在浮游植物中大量存在。浮游植物的密度在每个季度均达到富营养化的水平，并且有继续增加的趋势。有毒的赤潮藻如裸甲藻等也偶然出现。

从 2008 至 2012 年福田红树林区水体浮游植物群落的细胞密度比较，可以发现相对于 2009 年和 2012 年浮游植物细胞密度形成 2 个峰值，而 2010 和 2011 年浮游植物细胞密度则较低，这从一定程度上说明了该红树林区水体富营养化程度具有反复变化的趋势。

#### (6) 土壤

深圳湾属淤积性的海湾，近百年间河床不断淤浅、纳潮量逐步减小，现状条件下，深圳湾持续淤积的趋势不会改变。深圳湾河床的淤积导致滩涂淤涨，滩涂淤积导致海床升高而填海造地则导致滩涂面积减小和红树林减少。若围海造地不加控制，红树林面积将逐步减小，失去了红树林庇护的水生生物，种群和数量都将急剧减少。

#### (7) 大气

城市大气中硫氧化物以及氮氧化物等污染物的浓度较高，一定程度上影响了红树林生态系统正常的生存和发展，对区内动植物构成危害。

#### (8) 海水

红树林区域的水温随气温变化，与气温变化成正相关，不同点间的温度有一定差异，但相差均小于 5℃。pH 值多为中性稍偏碱。高潮时由于受潮水的影响，水域的盐度较高。低潮时生活污水的排入，使得凤塘河口及三号岗亭水域的盐度较低。鱼塘由于受雨水影响及人工控制，盐度变化较大。观鸟屋一带无生活污水排入，故盐度稍高于同期其他站位。高潮时溶解氧含量高于低潮时的含量。低潮期溶解氧含量普遍较低。

深圳湾沿岸的部分城市排污口尚未纳入市政管网，水污染状况严重，而且河口明渠段穿越保护区的凤塘河仍然有部分城市污染源无法截流，干流的水体基本全部黑臭，这种情况导致了深圳湾红树林滩涂处于中度以上污染状态，而红树林内的铜、汞等重金属含量，均超出国家地表水Ⅴ类水质标准，水环境质量的下降严重影响到河口湿地的生长发育以及底栖生物和鸟类的生存，红树林生境已经受到威胁和破坏；

影响深圳湾的河流主要是深圳河，年径流丰富，约为 1000~9000m<sup>3</sup>。在深圳湾北岸注入的河流还有新洲河、布吉河、大沙河、凤塘河及深圳市政排水沟渠等。

南岸有香港的元朗河、锦田河、红河桥河和屏山河等，红树林生态系统的河流淡水较为充足。

## 5.2 深圳福田红树林面临的主要问题

### （1）城市污染

特区经济的高速发展造成了严重的城市污染，城市内各种特有污染物的排放给保护区的发展带来了巨大的压力。

水污染：深圳湾沿岸的部分城市排污口尚未纳入市政管网，水污染状况严重，而且河口明渠段穿越保护区的凤塘河仍然有部分城市污染源无法截流，干流的水体基本全部黑臭，这种情况导致了深圳湾红树林滩涂处于中度以上污染状态，而红树林内的铜、汞等重金属含量，均超出国家地表水Ⅴ类水质标准，水环境质量的下降严重影响到河口湿地的生长发育以及底栖生物和鸟类的生存，红树林生境已经受到威胁和破坏。

大气污染：城市大气中硫氧化物以及氮氧化物等污染物的浓度较高，一定程度上影响了红树林生态系统正常的生存和发展，对区内动植物构成危害。

噪声污染：滨海大道和广深高速等快速路上车辆行驶和人类活动所产生的城市噪声污染程度较强，鸟类的迁徙、觅食和栖息都受到干扰。

光污染：保护区周边的车辆、路灯以及建筑物等所排放的光污染也日趋严重，即将成为影响红树植物和鸟类正常生长活动的重要因素。

### （2）病虫害

近年来，红树林生态系统受到胁迫而导致食虫鸟类的种类和个体数目大大下降，使害虫特别是鳞翅目害虫缺少天敌。20 世纪 90 年代以来，福田红树林虫害日趋严重，红树林主要树种秋茄、白骨壤、桐花树等都受到不同程度的危害，特别是白骨壤受害情况更为显著。白骨壤出现大面积虫害，平均枯萎面积达到 26%，大于 18%，处于重警状态。

害虫以成、若虫群集在嫩枝、叶背和嫩芽上吸食汁液，使植株营养不良，树势衰弱，常导致落花落果，严重时枝条死亡其排泄物(蜜露)可诱发霉污病，影响叶片的光合作用。

### （3）外来物种入侵

随着外来引进物种海桑和无瓣海桑对深圳湾生境的适应，曾出现过大片幼苗的扩散和暴发的情况。海桑和无瓣海桑的爆发导致天然林和海桑林下的生物多样性有所降低，对本地红树种的生长造成了一定的威胁。

近来深圳湾红树林遭到原产中美洲的恶性杂草薇甘菊的生态入侵,红树林生态系统的健康和稳定受到极大威胁。

### （4）周边高楼对候鸟的阻碍

红树林周边高楼不断，而且楼层越来越高，影响鸟类飞行空间，特别是东半球国际

候鸟迁徙通道的完整。

## 6. 模型的建立、求解及结果分析

### 6.1 问题（1）的模型建立与求解

红树林湿地监测是一项复杂的综合环境监测，采用常规手段来监测不仅要耗费大量的人力、财力和物力，而且用时较长，往往需要几个月乃至几年，时效性差。利用 3S 技术进行红树林湿地监测，可以节省人力、财力、物力，并且大大增强监测的准确性和时效性<sup>[2,3]</sup>，能够更好地反映红树林湿地生态的动态变化。通过 3S 技术监测红树林湿地，可以在短时间内准确地掌握该地区红树林湿地的植物生长状况与生态环境，把握红树林湿地资源动态变化的情况和趋势，为区域的湿地保护、管理和利用提供一定的科学依据，从而推动该地区红树林湿地的有效保护与管理<sup>[4]</sup>。

因此，我们使用 3S 技术研究红树林湿地中的生境空间结构等问题，构建一个动态的生态场景描述模型，从生态系统的空间结构角度为完整的生态系统动态监测和健康评估及预警科学管理体系提供数据支撑。

#### 6.1.1 红树林湿地空间结构动态监测模型的建立

运用 3S 技术，选取相关指标，研究红树林的面积变化、周围其他非生物所占面积的变化等，通过数据挖掘出生物多样性、稳定性等评价指标，为红树林整体的健康评价体系提供支持，并且根据其动态变化规律预测出未来可能存在的问题，为红树林的保护和管理提供建议。

##### 6.1.1.1 遥感信息提取

##### （1）红树林信息提取

##### 遥感技术(RS)

对需要研究年份的 TM 影像信息进行提取。由于研究区内农田和植被的光谱值在一定范围内与红树林的光谱值重叠，因此通过屏蔽红树林分布范围外信息的方法，进行分布区内红树林信息的提取。

##### 地理信息系统(GIS)

根据红树林建设的背景资料以及实地调查，基本确定了红树林的分布范围以及周围土地的基本情况，然后用确定的大致范围对影像进行裁切。

##### 全球定位系统(GPS)

通过外业调查获取的 GPS 数据转换成矢量的点图层，然后将其和遥感影像进行叠加，根据像元的属性确定其是否为红树林，用以作为监督分类的训练样本。红树林在 TM 影像中的光谱色调呈红或暗红色，纹理特征表现为均匀无规则边界。

通过上述步骤，将遥感技术、地理信息系统和全球定位系统很好地融合成 3S 技术，实现了信息的共享，有助于准确地动态监测红树林面积变化的状况。

## (2) 景观类型信息提取

在相关图像处理软件支持下采用监督分类、目视判读、历史资料分析等多种手段对影像进行综合分类,将研究区域的景观类型划分为:红树林、水域、草地、滩涂、林地、建筑及交通用地 6 类。用实地调查获取的 GPS 样点数据作为监督分类的训练样本,结合辅助数据,如森林分布图、土地利用分析数据等,对预分类结果中存在疑问的分类进行修改和调整。

### 6.1.1.2 景观格局分析

景观指数是指能够高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间分布特征的定量指标。在研究红树林湿地景观格局时,应选择能够反映红树林湿地生态系统特征的景观格局指数,根据景观格局指数在不同时期的动态变化来反映景观要素的增减趋势、景观多样性的增减比例、各景观类型所占比例差异的变化以及景观在空间上的转移、扩张与收缩程度等,来体现红树林湿地景观格局变化或演变规律。

一般来讲,景观指数有三个类型,即:斑块水平、多样性,以及聚集性。参考以往学者对景观指数的评价<sup>[5]</sup>,本文采用 5 种景观指数,如表 1 所示。

表 1 景观格局特征指标及其生态涵义

类型(type)	指标(Index)	公式(formula)	生态涵义(ecological meaning)
	斑块类型面积 (CA)	$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij}(1/10000)$	CA 是计算其它指标的基础,其值大小制约着以此类型斑块作为栖息地的物种的丰度、数量、食物链及其次生种的繁殖等。
斑块形状 与密度	平均分维数 指数 (FRAC_MN)	$FRAC\_MN = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[ \frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{\ln(a_{ij})} \right]}{N}$	2 乘以景观中每一斑块的斑块周长的对数,0.25 为校正系数,除以斑块面积的对数,对所有斑块加和,再除以斑块总数。取值范围在 1 到 2 之间。
	密度指数(PD)	$PD = \frac{N}{A}$	每平方千米的斑块数。取值范围为大于 0,无上限。斑块密度反映景观被分割的破碎化程度,同时也反映景观空间异质性程度。在一定程度上反映人为因素对景观的干扰程度。PD 愈大,破碎化程度愈高,空间异质性程度也愈大。
多样性	香农多样性指数 (SHDI)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \times \ln P_i)$	反映景观异质性,对景观中各斑块类型非均衡分布状况较为敏感。反映景观组分的多少。
聚集性	聚集度指数 (AI)	$AI = \left[ \sum_{i=1}^m \left( \frac{g_{ij}}{\max \rightarrow g_{ij}} \right) P_i \right] \times (100)$	同类型间相邻斑块的数目除以其最大值,乘以其在类型中的比例,对所有斑块加和,取百分数。取值范围为 1 到 100。

### 6.1.2 技术路线

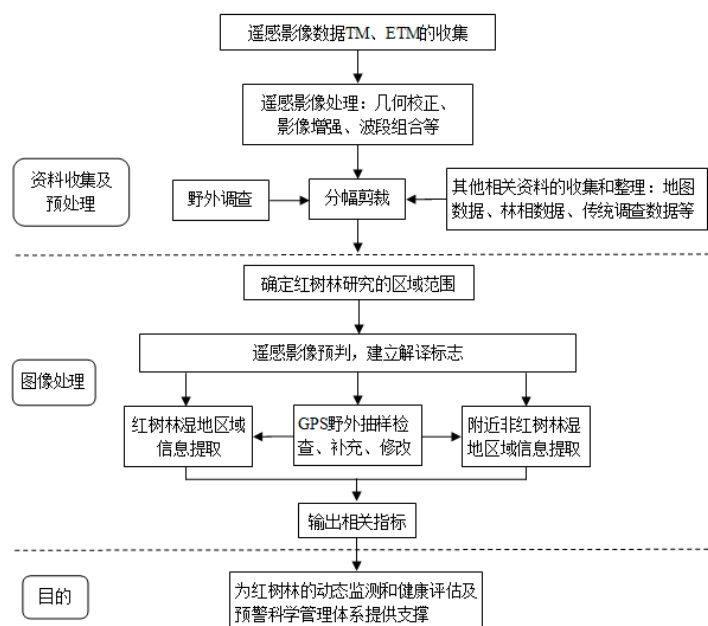
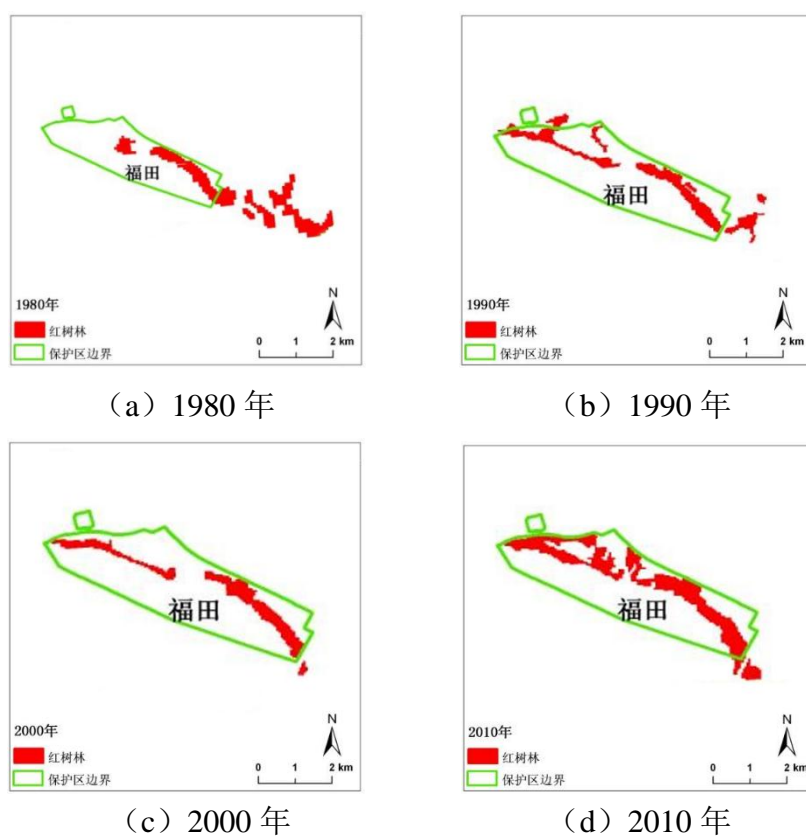
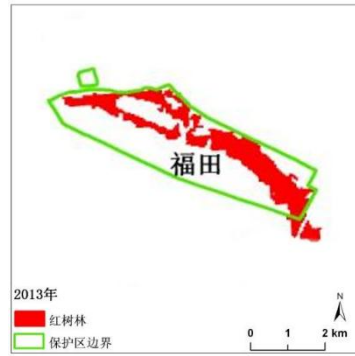


图 3 动态监测模型

### 6.1.3 深圳福田红树林湿地的动态监测

运用上述的方法对福田红树林的面积变化进行监测，得到 1980-2013 年红树林的面积变动情况，如图 4 所示。





(e) 2013 年

图 4 1980-2013 年深圳福田红树林分布变化<sup>[6]</sup>

表 2 深圳福田红树林面积的变动

时间（单位：年）	1980	1990	2000	2010	2013
面积（单位：hm <sup>2</sup> ）	113	63	27	81	104

由图 4 和表 2 可知，1980~1990 年，红树林面积减少 50hm<sup>2</sup>，保护区外侧的红树林斑块大面积消失，保护区内部的红树林斑块变窄，西部沿岸新增与岸边平行的带状红树林斑块。

1990~2000 年，福田红树林面积较少 36hm<sup>2</sup>，保护区外侧红树林消失殆尽，保护区内部仅余沿岸分布的红树林。

2000~2010 年，红树林面积增加了 54hm<sup>2</sup>，带状的红树林斑块明显变宽，保护区外侧红树林斑块增大。

2010~2013 年，福田红树林面积增加了 23hm<sup>2</sup>，保护区内红树林斑块向海纵深加宽，外侧红树林斑块继续增大。

通过对深圳福田红树林近 30 年来面积的监测，我们可以发现快速的城市化进程已经严重地破坏了福田红树林，使得其面积锐减，但近年来随着对红树林的保护加强，比如出台相关保护政策等措施，红树林面积得以回升。

#### 6.1.4 福田红树林景观动态结构的监测

红树林群落的空间配置特征反映的是红树林群落的空间排列、斑块形状、相邻斑块之间的对比度、相同类型斑块之间的连接度、各向异性等特征。

使用上文提出的技术，参考有关学者的研究成果<sup>[5]</sup>，我们可以得到福田红树林的相关景观指标，如表 3 所示。

表 3 福田红树林景观空间特征

指数	平均分维数指数 (FRAC_MN)	密度指数 (PD)	香农多样性指 数(SHDI)	聚集度指数 (AI)
计算结果	1.3253	74.6845	1.4006	95.3626

福田红树林的平均分维数指数 (FRAC\_MN) 较高, 表明本区红树林斑块形状复杂程度较高, 受人类活动的干扰较少, 基本上能自由生长, 另外人工引种扩种的红树林形状也相对规则。

由于研究对象仅针对红树林, 斑块密度 (PD) 的计算结果较高, 在一定程度上说明了本区内的红树林长势良好, 景观破碎化程度不高。

多样性指数 (SHDI) 表征景观在结构和功能方面的多样性。从数值上看, 本研究区的红树林多样性稍低, 表明福田红树林中各群落所占比例较为悬殊, 优势种群的主导地位明显。

聚集度指数 (AI) 描述景观的聚集度或离散度, 以百分数表示。福田红树林保护区内的红树林聚集程度很高, 景观离散度低。

### 6.1.5 总结

通过建立空间结构动态监测模型, 我们可以在短时间内监测到红树林生态系统中土地覆被状态, 通过计算景观空间指标可以分析出红树林的多样性、空间分布等情况, 这些指标都可以为下文健康评价指标体系的建立提供数据支撑。

对于其他方面的指标, 比如水污染、大气污染、噪音污染等, 可以在红树林附近建立动态监测点, 实时收集相关数据指标并发送信息, 同样为健康评价指标体系提供支持。综上所述, 结合基于 3S 技术的红树林空间结构动态监测模型, 和其他污染指标的动态监测方法, 建立全面的红树林动态监测模型。

## 6.2 问题 (2) 的模型建立与求解

问题二要求为福田红树林湿地构建一体化生态系统模型框架, 为生态系统健康评估及预警提供动态模拟分析支撑平台。首先, 我们利用 PSR 模型建立红树林湿地群落健康评价指标体系; 其次, 参考有关文献<sup>[7]</sup>确定各个评价指标的权重; 再者, 鉴于部分指标的数据较难获取, 我们求出了部分指标值及其得分; 最后将归一化后的评价指标值和权重值代入综合健康指数中, 最终得到红树林自然保护区湿地生态系统的健康状况。

### 6.2.1 健康评价指标体系的建立

红树林生态系统健康评价指标的建立应遵循整体性、可操作性、层次性和动态性等原则。选取的指标应该具有代表性, 能够推断出红树林的相关属性, 且易于操作控制, 容易监测, 计算简单, 具有技术和经济可行性。同时所选群落指标能够反映红树林的生态功能和生物多样性, 并具有早期预警和诊断性。

首先, 考虑红树林群落的组成、结构、生态功能及生态学指标; 其次, 结合红树林群落的外在压力及保护区管理的影响<sup>[8]</sup>将指标体系分为 4 层: 第一层是目标层, 即福田红树林生态健康综合指数; 第二层是项目层, 包括压力、状态、响应三个方面; 第三层是要素层, 由压力、状态、响应的要素组成; 第四层是指标层, 由可量化的指标要素构成, 借鉴文献指标的选取<sup>[7]</sup>, 我们建立红树林湿地群落健康评价指标体系, 如表 4 所示:



表 4 红树林湿地群落健康评价指标体系

目标层	项目层	要素层	指标层
福田红树林自然保护区生态系统健康评价	压力	人为干扰	水污染
			大气污染
			噪声污染
			人工引种植物
	自然干扰	自然干扰	病虫害
			薇甘菊入侵
			台风灾害
	环境状态	环境状态	土壤及沉积物污染
			水质状况
	土地覆被状态	土地覆被状态	红树林
			滩涂
			基围鱼塘
			海域
	生物多样性结构	生物多样性结构	陆地植被
			建筑及裸地
	保护区管理水平	保护区管理水平	植物
			大型底栖动物
			浮游动物
			鸟类动物
响应	科研旅游情况	科研旅游情况	财经投入经费
			法律法规执行力
			管理人员配置
			研究项目
民众认识	民众认识	民众认识	实地考察
			旅游参观
环保意识	环保意识	环保意识	宣传教育
			环保意识

### 6.2.2 评价指标归一化

鉴于福田红树林自然保护区湿地生态系统健康评价指标体系中各项指标间类型、单位及其趋向的差异，需要对各项进行归一化处理，计算公式如下：

$$N_i = \frac{X_i}{X_{max}} \quad (5)$$

或

$$N_i = 1 - \frac{X_i}{X_{max}} \quad (6)$$

其中，指标值越大、生态系统健康水平越高时用公式（5），反之用公式（6）， $N_i$ 为指标 $i$ 的归一化值， $X_i$ 为评价指标 $i$ 的实测值， $X_{max}$ 为该类指标中的极大值， $i=1,2,3,...,n$ 。

### 6.2.3 指标权重的确定

根据模型介绍中的熵值法，可代入数据计算权重，具体步骤如下：

Step1: 本文包含  $n$  个样本， $m$  个指标，所以建立指标的判断矩阵  $D = (x_{ji})_{n \times m}$ ；

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{m-1} & d_{m-2} & \cdots & d_{m-n} \end{bmatrix}$$

Step2: 将判断矩阵归一化处理,得到归一化判断矩阵  $R$ ， $R$  中元素的表达式为

$$r_{ji} = \frac{x_{ji} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

判断矩阵  $R$  为

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{m-1} & R_{m-2} & \cdots & R_{m-n} \end{bmatrix}$$

其中矩阵  $R$ , 满足归一性:  $\sum_{i=1}^m r_{ij} = 1, j = 1, 2, 3, \dots, m$ ，即每列的元素之和为 1。

其中  $w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, m$ ;  $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。

Step3: 根据熵的定义， $n$  个样本， $m$  个评价指标，可确定评价指标的熵为：

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}, j = 1, 2, \dots, m$$

式中，因为样本量过大，为使计算值符合实际，修正算式，定义  $r_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1 + r_{ij})}$ 。

于是第  $i$  个指标的评价值数据的分散程度可表示为  $1 - E_j$ ，给定的指标  $x_i, x_{ji}$  的差异越大，相应的  $1 - E_j$  值也越大，表明该指标所包含和传输的信息量越大，重要程度也越高；相反，表明该指标的重要性低；如果各样本的  $x_{ji}$  都相等，则该指标评价绝对集中，其对综合评价不起任何作用。

Step4: 计算指标的熵权

$$w_j = \frac{1 - E_j}{m - \sum_{j=1}^m E_j}, j = 1, 2, \dots, m$$

#### 6.2.4 综合健康指数及指标得分

##### (1) 综合健康指数

为了定量地评价福田红树林自然保护区湿地生态系统的健康状态，需要建立一个综合健康指数 (Comprehensive Health Index, CHI)。它在 0-1 之间取值，其值为 0 时代表健康状态最差，为 1 时代表健康状态最好。为了更清晰地描述健康状态，将 CHI 值划分为 5 个区间：0-0.2；0.2-0.4；0.4-0.6；0.6-0.8；0.8-1.0，如表 5 所示：

表 5 健康评价等级及其含义

等级	CHI	生态系统健康状态
I (健康)	(0.8,1.0]	自然状态良好，外界压力小，结构稳定，功能正常
II (较健康)	(0.6,0.8]	自然状态较好，外界压力较小，结构尚稳定，功能较正常
III (亚健康)	(0.4,0.6]	自然状态改变，外界压力较大，结构变化，功能稍有退化
IV (不健康)	(0.2,0.4]	自然状态破坏，外界压力大，结构破坏，功能退化
V (病态)	(0.0,0.2]	自然状态严重破坏，外界压力很大，结构严重破坏，功能严重退化

综合健康指数通过评价指标的归一化权重和归一化值反映生态系统健康状况，其计算公式如下：

$$CHI = \sum_{i=1}^n W_i \times N_i \quad (7)$$

其中，CHI 为综合健康指数； $n$  为评价指标的个数； $N_i$  为第  $i$  个评价指标的归一化值； $W_i$  为指标  $i$  的归一化权重， $i=1,2,3,\dots,n$ 。

红树林生态系统压力、状态、响应的健康指数则用以下公式计算：

$$PHI = \left( \sum_{i=1}^n W_i \times N_i \right) \div W_P \quad (8)$$

$$SHI = \left( \sum_{i=1}^n W_i \times N_i \right) \div W_S \quad (9)$$

$$RHI = \left( \sum_{i=1}^n W_i \times N_i \right) \div W_R \quad (10)$$

其中，PHI、SHI、RHI 分别代表压力、状态、响应的健康指数； $n$  为评价指标的个数； $N_i$  为第  $i$  个评价指标的归一化值； $W_i$  为指标  $i$  的归一化权重； $W_P$ 、 $W_S$ 、 $W_R$  分别代表压力、状态、响应指标的权重。

##### (2) 指标得分

为具体分析红树林各指标的作用程度，我们将每个指标的计算得分记为  $D_i$ ，将得分

公式定义为

$$D_i = W_i \times N_i$$

其中， $D_i$  为第  $i$  个评价指标的得分； $N_i$  为第  $i$  个评价指标的归一化值； $W_i$  为指标  $i$  的归一化权重。

## 6.2.5 评价指标值的求解

### （一）压力层的数据收集与处理

#### a) 水污染

人为干扰要素层中的水污染指的是福田红树林周围由于人为因素所造成的水体方面的污染，分析福田红树林周围的地理信息，发现主要的河流有新洲河、皇岗河、凤塘河。人们正是通过这些河流排放污水从而污染红树林的，因此分析这些河流的水质污染状况可以定量分析福田红树林的水污染。

通过查阅深圳市福田区统计年鉴可以得到新洲河河口、皇岗河河口、凤塘河河口的地表水污染综合指数，如表 5 所示。

表 5 主要河流河口地表水污染综合指数

年份	2009	2010	2011	2012	2013
新洲河河口	3.34	2.50	1.99	1.01	0.81
皇岗河河口	2.55	2.35	2.08	1.24	1.64
凤塘河河口	2.50	2.66	3.37	2.25	0.93

资料来源：深圳市福田区统计年鉴

为了得到一个总体的水污染分数，这里使用上文提及的信息熵赋权法对每个河流进行赋权，并计算出每年的水污染得分，分数越高说明水污染越严重，如表 6、表 7 所示。

表 6 3 条河流的权重

河流	新洲河河口	皇岗河河口	凤塘河河口
权重 $w$	0.558	0.139	0.303

表 7 2009-2013 年水污染得分

年份	2009	2010	2011	2012	2013
水污染得分	2.96	2.53	2.42	1.42	0.96

## b) 大气污染

大气污染主要的主要来源是空气中的二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、二氧化氮（NO<sub>2</sub>）和可吸入颗粒物（PM<sub>10</sub>），通过查阅深圳市福田区 2009-2013 年的统计年鉴，可以得到以下空气数据，见表 8。

表 8 2009-2013 年深圳福田空气污染物浓度

年份 指标	2009	2010	2011	2012	2013
SO <sub>2</sub> 年平均值(mg/m <sup>3</sup> )	0.011	0.009	0.009	0.007	0.009
NO <sub>2</sub> 年平均值 (mg/m <sup>3</sup> )	0.05	0.046	0.045	0.041	0.043
PM <sub>10</sub> 年平均值 (mg/m <sup>3</sup> )	0.054	0.056	0.056	0.046	0.054

资料来源：深圳市福田区统计年鉴

同上文水质污染的计算方法一样，首先使用熵权法求出 3 中污染气体的权重，然后将归一化处理后的指标值带入计算出每一年的大气污染得分，分数越高说明大气污染越严重，结果如表 9 所示。

表 9 2009-2013 年大气污染得分

年份	2009	2010	2011	2012	2013
大气污染得分	0.0243	0.0227	0.0225	0.0189	0.0219

## c) 噪音污染

考虑到福田红树林在城市腹地，受到的噪声污染主要来源于周围公路的汽车噪音以及周围的居民区、办公区发出的噪音，因此对噪音污染的量化可以参考福田区交通干线噪声平均值和区域环境噪声平均值，使用熵权法计算出每年的得分，见表 10：

表 10 2009-2013 福田区噪音污染的相关指标和年得分

年份	2009	2010	2011	2012	2013
交通干线噪声平均值 (dB)	70	69.9	69.9	69.8	69.8
区域环境噪声平均值 (dB)	56.8	56.7	56.7	56.5	56.5
民用车辆总计(万辆)	145	170	197	225	262
噪音污染得分	144.9	169.9	196.9	224.9	261.9

资料来源：深圳市福田区统计年鉴

d)其他指标

福田红树林的人工引进植物最主要的就是海桑和无瓣海桑，因此为简化模型，使用海桑-无瓣海桑的面积来定量描述人工引进植物的状况。对于病虫害，查阅有关资料，将害虫的数量作为衡量病虫害的指标。对于台风灾害，从深圳气象局查找相关资料，将每年对深圳有影响的台风个数定义为台风灾害，具体数据见表 11。

表 11 压力层其他指标的数据

年份	2009	2010	2011	2012	2013
海桑-无瓣海桑面积 (hm <sup>2</sup> )	13.5	16.7	17.5	19.3	18.2
害虫数量 (只)	383	418	433	445	458
台风灾害 (个/年)	4	4	2	3	5

(二) 状态层数据收集与处理

a) 土壤及沉积物污染和水质状况

由于数据的获得有限，而且水质污染与土壤中的沉积物污染关联性较高，这里使用水质情况来反映上文建立 PSR 模型中要素层的环境状态。

关于水污染的定量描述，本文使用中国数学建模官网提供的红树林各监测点的数据，对 4 个监测点测量的各个理化指标取平均值，暂不考虑潮汐对有关水质指标的影响，将高低潮的数值平均处理，得到 2011 年至 2013 年各月份主要污染物的平均值，见表 12。

表 12 2011-2013 年福田红树林主要污染物月度平均浓度

时间 指标	2011 年 1 月	2011 年 4 月	2011 年 7 月	2011 年 10 月	2012 年 1 月	2012 年 4 月	2012 年 7 月	2012 年 10 月	2013 年 1 月	2013 年 4 月	2013 年 7 月	2013 年 10 月
盐度(‰)	15.13	7.38	3.75	11.50	17.86	6.13	5.88	11.29	15.48	5.28	5.89	6.51
浊度(NTU)	40.38	61.94	80.86	76.73	26.25	23.96	27.84	27.91	25.91	26.87	40.25	30.80
电导率 (mS/cm)	5.46	12.49	2.92	4.94	23.64	6.34	4.56	16.99	22.63	13.81	4.38	17.08
pH	7.53	7.67	7.30	7.39	8.01	7.53	7.47	7.40	7.48	7.38	7.35	7.25
溶解氧 (mg/L)	3.98	3.59	2.49	3.06	1.90	3.37	2.67	3.19	2.41	2.80	2.67	2.43
总 N(mg/L)	6.46	6.93	2.29	6.16	10.36	4.25	6.17	6.16	12.26	5.56	6.17	6.66
氨氮(mg/L)	4.17	1.05	0.43	1.34	7.45	2.08	3.20	4.13	8.34	2.82	3.10	3.48
硝氮(mg/L)	1.03	0.34	1.02	0.86	0.89	0.28	1.10	1.24	1.40	0.87	1.07	1.50
总 P(mg/L)	0.95	1.21	0.75	0.83	0.83	0.97	1.08	0.80	1.13	0.97	1.07	0.74
可溶性 P(mg/L)	0.65	0.69	0.24	0.46	0.37	0.60	0.30	0.46	0.39	0.49	0.32	0.38
COD(mg/L)	51.17	106.12	50.29	53.46	53.40	48.63	56.13	59.60	54.98	50.39	55.42	51.57
BOD(mg/L)	5.29	10.61	4.65	10.06	11.44	10.35	18.18	12.56	13.05	11.40	11.99	12.51

为计算出一个总体的水质指数，这里采用熵权法赋权，使用 MATLAB 编程，计算出了 12 个理化指标的权重，如表 13 所示。

表 13 12 个理化指标的权重表

理化指标	盐度(%)	浊度(NTU)	电导率(mS/cm)	pH	溶解氧(mg/L)	总 N(mg/L)
权重 w	0.0773	0.1111	0.1313	0.1018	0.0599	0.0794
理化指标	氨氮(mg/L)	硝氮(mg/L)	总 P(mg/L)	可溶性 P(mg/L)	COD(mg/L)	BOD(mg/L)
权重 w	0.0809	0.0705	0.0569	0.0734	0.0869	0.0706

将 2011 年至 2013 年不同月份的数据带入可以得到不同时间段的水质得分，分数越高说明水质越差，如表 14 所示。

表 14 不同时间段的水质得分

时间	2011 年 1 月	2011 年 4 月	2011 年 7 月	2011 年 10 月	2012 年 1 月	2012 年 4 月
得分	13.2223	20.8384	15.5963	17.0926	15.3414	10.5186
时间	2012 年 7 月	2012 年 10 月	2013 年 1 月	2013 年 4 月	2013 年 7 月	2013 年 10 月
得分	12.1381	14.2054	15.4919	12.1324	12.9736	13.4029

#### b) 土地覆被状态

土地覆被状态包括红树林、滩涂、基围鱼塘、海域、陆地植被、建筑及裸地的面积变动情况，考虑到部分数据难以获取，本论文仅适用红树林的面积变动来描述土地覆被状态，该数据来源于论文第一部分红树林的动态监测。

表 15 2009-2013 年红树林面积的变动

年份	2009	2010	2011	2012	2013
红树林面积 (hm <sup>2</sup> )	80	81	86	97	104

#### c) 生物多样性结构

生物多样性结构与植物、大型底栖动物、浮游动物、鸟类动物的种类以及其他指标有关，本文将各类动植物的种类作为衡量生物多样性的指标，参考附件 2 和其他文献的数据，得到表 16。

表 16 2009-2013 年生物多样性结构相关指标

年份		2009	2010	2011	2012	2013
生物多样性结构	植物（种类）	145	133	140	125	128
	大型底栖动物（种类）	26	36	48	46	47
	浮游动物（种类）	135	147	90	92	96
	鸟类动物（种类）	174	188	189	191	194

### （三）响应层数据收集与处理

响应中包括保护区管理水平、科研旅游情况和民众认识要素，部分指标的数据难以获取，下面给出部分数据，见表 17、18 所示。

表 17 2009-2013 年深圳市环境保护投资数值

年份	2009	2010	2011	2012	2013
环境保护投资 （亿元）	233.73	272.96	298.65	327.36	359.78

数据来源：深圳统计年鉴 2014

表 18 2009-2013 年福田红树林管理人员

年份	2009	2010	2011	2012	2013
管理人员（人）	30	30	35	39	42

### （四）求解分析

将上述各个指标的数值进行汇总，计算各指标的归一化值，并使用信息熵赋权法计算出各个指标的权重，最后算出总分。



表 19 福田红树林生态系统各指标权重

项目层	指标	熵权	归一化指标值				
			2009	2010	2011	2012	2013
压力	水污染	0.3113	0.0000	0.1453	0.1824	0.5203	0.6757
	大气污染	0.0144	0.0000	0.0658	0.0741	0.2222	0.0988
	噪音污染	0.0922	0.4467	0.3513	0.2482	0.1413	0.0000
	海桑-无瓣海桑面积 (hm <sup>2</sup> )	0.0302	0.3005	0.1347	0.0933	0.0000	0.0570
	害虫数量 (只)	0.0081	0.1638	0.0873	0.0546	0.0284	0.0000
	台风灾害 (个/年)	0.1856	0.2000	0.2000	0.6000	0.4000	0.0000
状态	水质状况	0.0195	0.1497	0.0479	0.0000	0.2156	0.1916
	红树林面积 (hm <sup>2</sup> )	0.0238	0.7692	0.7788	0.8269	0.9327	1.0000
	植物 (种类)	0.0067	1.0000	0.9172	0.9655	0.8621	0.8828
	大型底栖动物 (种类)	0.1023	0.5417	0.7500	1.0000	0.9583	0.9792
	浮游动物 (种类)	0.0986	0.9184	1.0000	0.6122	0.6259	0.6531
	鸟类动物 (种类)	0.0030	0.8969	0.9691	0.9742	0.9845	1.0000
响应	环境保护投资 (亿元)	0.0469	0.6496	0.7587	0.8301	0.9099	1.0000
	管理人员 (人)	0.0405	0.7143	0.7143	0.8333	0.9286	1.0000
	环保意识	0.0169	0.6000	0.6000	0.6500	0.7000	0.7500

表 20 2009-2013 年福田红树林综合健康指数

年份	2009	2010	2011	2012	2013
健康综合指数	0.3348	0.3990	0.4707	0.5396	0.5145
等级	不健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康

根据上文的红树林生态系统压力、状态、响应的健康指数公式(8)、(9)、(10)，可以分别计算出每年福田红树林的压力、状态和响应的健康指数，从而对红树林的健康做出进一步的分析。计算结果见下表 21 所示。

表 21 2009-2013 年红树林压力、状态、响应健康指数

年份	2009	2010	2011	2012	2013
压力健康指数	0.1382	0.1877	0.3044	0.3937	0.3326
状态健康指数	0.6954	0.8028	0.7551	0.7675	0.7917
响应健康指数	0.6666	0.7157	0.8021	0.8831	0.9594

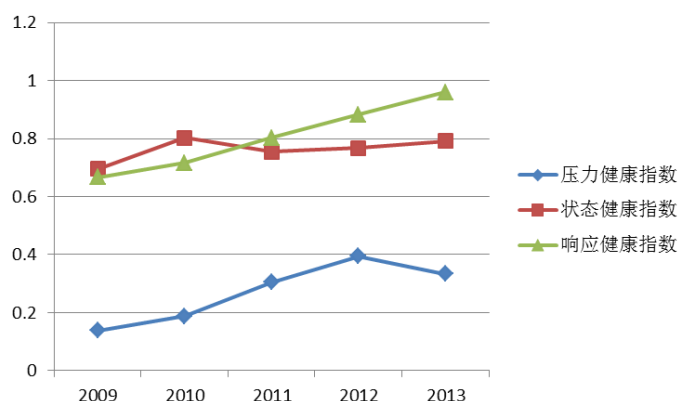


图 5 压力、状态、响应健康指数变化情况

表 21 和图 5 分析了 PSR 模型中压力、状态、响应三个项目层近年来的健康指数变化,可以看出,2012 年以前红树林的压力健康指数较小且增长较快,即红树林的压力层健康状态虽然有所改善,但是仍然处于亚健康水平,并且在 2013 年有所下降。而近年来响应指数与状态指数均较大,响应指数还在不停攀升,说明人们对红树林的重视和保护程度在不断提高,红树林体系的整体健康状况也较为稳定。

由表 20 可知,截止 2012 年,福田红树林的健康综合指数逐年递增,健康状况不断恶化,而在 2013 年红树林的健康状况才开始有所改善,但依然处于亚健康状态,尚未达到健康标准。与此同时,红树林的整体变化趋势也恰恰吻合了压力层的变化情况,这说明虽然人类对红树林的保护意识在逐年递增,但由于红树林本身遭受的破坏较大,短时间内依旧无法很大程度地改善健康状况。

综上所述,当前福田红树林最主要的问题就是人为干扰和自然干扰严重,具体的问题有城市污染、外来物种入侵、病虫害等。

### 6.3 问题 (3) 的模型建立与求解

题目要求寻找到福田红树林最迫切需要解决的生态系统问题,基于本文构建的模型框架,从健康预警的角度出发对其生态发展趋势进行预测分析,并给出具体的保护、管理建议。

经过上文对 PSR 模型的求解,我们得到了各个指标的得分,其中水污染和人工引种植物的情况较为严重。下文将具体分析水污染对红树林的影响,并基于本文构建的模型框架从健康预警的角度出发对其生态发展趋势进行预测分析,最终给出具体的保护、管理建议。

#### 6.3.1 福田红树林水污染分析

为详细了解水污染的成因及主要污染物,我们采用更加详细的数据—深圳河数据来

分析，数据来自保护区内的监测样带,分别为观鸟亭、基围鱼塘、凤塘河口和沙嘴码头，因为采样点均在保护区内，为了反映福田红树林的总体情况，对四个采样点的数据取平均值即可得到深圳河的平均水质情况。同时，为简化模型，暂不考虑潮汐带来的影响。



图 6 深圳湾观测点示意图

本处仅研究水质污染常用指标：盐度(‰)，浊度(NTU)，电导率(mS/cm)，pH，溶解氧(mg/L)，总氮(mg/L)，氨氮(mg/L)，硝氮(mg/L)，总磷(mg/L)，可溶性 P(mg/L)，COD(mg/L)，BOD(mg/L)，查找数学建模大赛官网的附件，可得历年数据如表 22 所示。（在此忽略高低潮的变化。）

表 22 2011-2013 年福田红树林主要污染物年度平均浓度

年份	2011	2012	2013
盐度(‰)	9.44	10.29	8.29
浊度(NTU)	64.98	26.49	30.96
电导率(mS/cm)	6.45	12.88	14.47
pH	7.47	7.60	7.36
溶解氧(mg/L)	3.28	2.78	2.58
总 N(mg/L)	5.46	6.73	7.66
氨氮(mg/L)	1.75	4.21	4.43
硝氮(mg/L)	0.81	0.88	1.21
总 P(mg/L)	0.93	0.92	0.98
可溶性 P(mg/L)	0.51	0.43	0.39
COD(mg/L)	65.26	54.44	53.09
BOD(mg/L)	7.65	13.13	12.24

资料来源：中国数学建模官网

（一）理化指标的相关性分析

题目给出 12 种与水质相关的理化指标，为找出其中某些指标间的关系，对数据进行预处理后使用 SPSS 软件进行相关性分析，得到表 23。

表 23 12 个理化指标的相关性分析

	盐度	浊度	电导率	pH	溶解氧	总 N	氨氮	硝氮	总 P	可溶性 P	COD	BOD
盐度	1											
浊度	-0.23	1										
电导率	0.56	-0.52	1									
pH	<b>0.62*</b>	-0.22	0.44	1								
溶解氧	-0.05	0.17	-0.45	-0.10	1							
总 N	<b>0.77*</b>	-0.44	<b>0.77*</b>	0.51	-0.35	1						
氨氮	<b>0.77*</b>	<b>-0.65*</b>	<b>0.76*</b>	0.46	-0.43	<b>0.89*</b>	1					
硝氮	0.20	-0.22	0.31	-0.42	-0.46	0.32	0.47	1				
总 P	0.20	-0.17	0.31	-0.42	0.28	0.33	0.10	-0.34	1			
可溶性 P	0.19	-0.05	0.31	0.28	<b>0.82*</b>	0.01	-0.15	<b>-0.61*</b>	0.34	1		
COD	-0.07	0.28	0.10	0.29	0.35	0.11	-0.25	-0.44	0.55	0.48	1	
BOD	-0.06	-0.57	0.30	0.05	-0.35	0.39	0.32	0.23	0.35	-0.26	0.07	1

注：\*表示显著相关

分析表 23，pH 值除了跟盐度有较大的相关性以外，跟其他理化指标关系不大，说明了福田红树林水体中影响 pH 值的主要因素是海水中盐离子的浓度；对比总 N 和氨氮，发现它们与盐度、电导率的相关性很大，而它们之间的相关性也极强，说明了福田红树林水体中 N 的绝大部分是氨氮，而氨氮多以离子的形式存在，比如铵离子(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)。溶解氧与可溶性 P 的相关性十分显著，查阅资料发现水体中的溶解氧和可溶性 P 都受到光合作用的影响，因此这两个指标能间接反映水体中相关植物光合作用；COD 即化学需氧量，是指在一定严格的条件下，水中的还原性物质在外加的强氧化剂的作用下，被氧化分解时所消耗氧化剂的数量。COD 与总 P 有一定的相关性，说明水体中 P 等元素过多的富营养化会导致氧气过分消耗，从而升高 COD；BOD 即生化需氧量或生化耗氧量，表示水中有机物等需氧污染物质含量的一个综合指示。其值越高说明水中有机污染物质越多，污染也就越严重。观察发现 BOD 与其他理化指标的相关性不大。

## （二）对未来水质的预测

考虑到数据量不是很大，且需要对短期内水质理化指标进行预测，这里使用灰色预测模型较为合适。通过对题目所给的 excel 表格进行数据处理，将同一月份的 4 个监测点和高低潮的数据取平均，得到一个 12\*12 的表格，其中行为 12 个指标的数值，列为 2011 年-2013 年的 12 个月份，见附录 1。使用灰色预测模型对接下来 2014 年的 4 个月数据进行预测，并取平均值，得到表 24。

表 24 基于灰色预测模型的数据预测结果

指标 \ 年份	2013	2014(预测)
盐度(‰)	8.29	8.0395
浊度(NTU)	30.96	14.9591
电导率(mS/cm)	14.47	16.5636
pH	7.36	7.2666
溶解氧(mg/L)	2.58	2.4512
总 N(mg/L)	7.66	7.8730
氨氮(mg/L)	4.43	5.4809
硝氮(mg/L)	1.21	1.6471
总 P(mg/L)	0.98	0.9288
可溶性 P(mg/L)	0.39	0.3474
COD(mg/L)	53.09	41.6461
BOD(mg/L)	12.24	14.9022

### 6.3.2 基于 PSR 模型的水污染分析

将所得数据代入 PSR 模型指标体系中,重新计算福田红树林湿地生态系统健康状况得分,可得 2014 年的水污染得分为 0.2247,2013 年的为 0.2103,比上一年稍微上升,处于较为严重的水平;2014 年压力综合健康指数为 0.3421,比去年稍微下降,处于亚健康水平。

在水污染问题日益突出,污染恶化的情况下,福田红树林湿地生态系统综合健康评分急剧下降。我们可以理解为,水体是湿地生态系统中最重要的一部分,水污染一旦超过自身可调节范围,就会进一步引发相关问题,而这些问题又反过来加快水污染扩大,造成恶性循环。水质状况间接影响着该系统中的各个组成部分,比如水体中的植物、动物、浮游生物,使整体免疫能力与生物多样性下降,使其抵抗病虫害、抵御台风、保护水土等能力下降,进而使综合健康评分全面急剧下降。

### 6.3.3 外来物种入侵分析

根据王伟衡等人<sup>[18]</sup>的研究资料,深圳福田红树林保护区的入侵物种为海桑、无瓣海桑,薇甘菊等。

海桑和原产于孟加拉国的无瓣海桑做为外来物种,是 1993 年 10 月下旬从海南引进到福田红树林保护区试验性种植,目的是为开展外来物种研究,增加生物多样性和红树植物品种,改善区内生态环境,在沿海推广红树林优良品种的种植。引种后经过多年的观察,海桑和无瓣海桑表现出与本地品种不同的一些特点,如耐适应、易成活、生长快、

树躯高、抗风浪等诸多生理生态学特性都有良好的表现。

随着海桑和无瓣海桑对深圳湾生境的适应，至 2006 年夏季以后，在保护区观鸟屋两侧均发现大片幼苗的扩散和爆发，超出  $1600 \text{ 株} / \text{hm}^2$ ，显示红灯处于重警状态。海桑和无瓣海桑的爆发导致天然林和海桑林下的生物多样性有所降低。目前，海桑和无瓣海桑已经成为西乡、宝安等区域的优势种，对本地红树种的生长造成了一定的威胁。

另外，红树林保护区内还受到五爪金龙、蟛蜞菊、银合欢等外来种的入侵。由于影响程度小，数据不齐，在此忽略。

由附件 2 可得福田红树林保护区内海桑和无瓣海桑的生长情况如图 7 及图 8 所示：

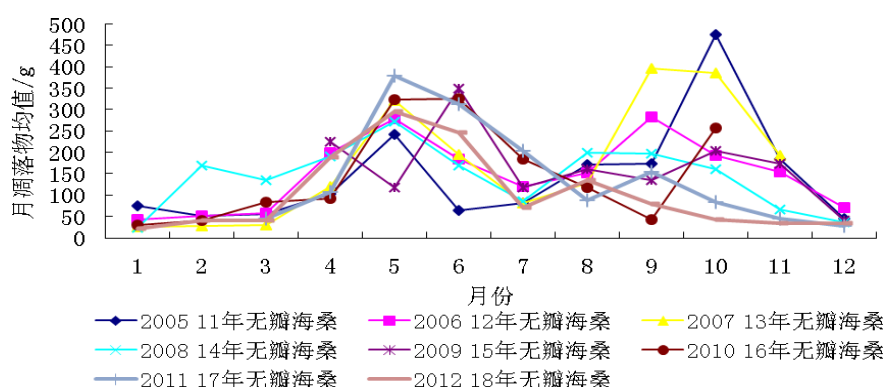


图 7 无瓣海桑生长情况

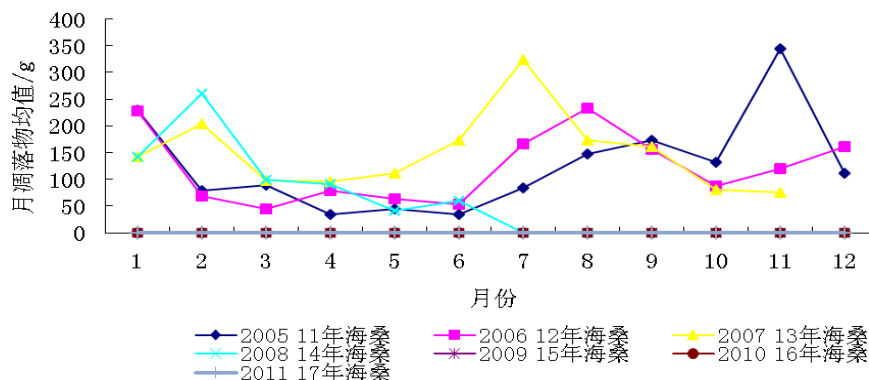


图 8 海桑生长情况

由月凋落物的均值可看出海桑和无瓣海桑的生长情况和生物量，并以此确定外来入侵物种的生长状况。

另外，我们选取本土物种中的秋茄作为本土物种的代表，观测秋茄的生长状况从而看出本土物种的平均生长情况。

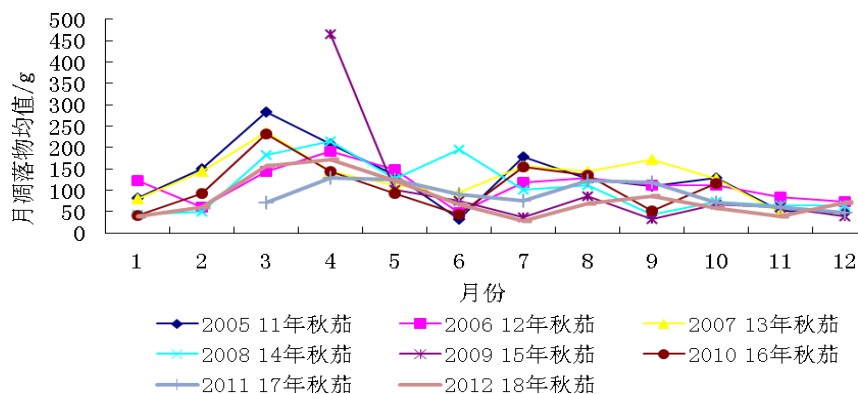


图 9 秋茄的生长情况

对比由秋茄代表的本土植物平均生长状况与由海桑和无瓣海桑代表的外来物种平均生长情况，可得外来物种入侵对本土植物生长危害的程度，从而得到外来物种入侵的严重程度。

$$\text{外来物种入侵危害程度} = \sum (\text{外来物种月凋落物均值} - \text{本土物种月凋落物均值})$$

根据上述公式可计算出 2007-2012 年人工引种植物指标得分分别为 (372,358,417,393,429,486)，与上文同样使用灰色预测模型对接下来的值进行预测，归一化处理后带入 PSR 模型中，计算出外来物种入侵的得分，以及压力层的得分，如表 25 所示。

表 25 2009-2014 年外来物种入侵得分及压力层健康指数

年份	2009	2010	2011	2012	2013 (预测)	2014 (预测)
指标值(g)	417	392	429	486	504	538
归一值	0.319	0.359	0.299	0.206	0.176	0.121
外来物种入侵得分	0.010	0.011	0.009	0.006	0.005	0.004
压力层健康综合指数	0.139	0.198	0.314	0.403	0.338	0.336

外来物种入侵得分，经历了先上升后下降的变化，从 2010 年以后便逐渐下降，使用数据预测出 2013 年和 2014 年的分数分别为 0.005 和 0.004，说明福田红树林的外来物种入侵情况可能会继续恶化。

对于压力层的健康综合综合指数，使用预测数据计算出 2013 年和 2014 年分别为 0.338 和 0.336，从 2012 年的亚健康等级下降为不健康等级，说明外来物种入侵对压力层的指标影响较大，即外来物种入侵对红树林生态系统的整体健康影响较大，应该引起重视。

#### 6.3.4 建议

##### (1) 水污染

根据有关文献<sup>[10]</sup>福田红树林内的主要污染源有3处，分别是凤塘河干流、凤塘河下沙支流及沙嘴村雨水渠排入。其中凤塘河及其支流从保护区中间横穿，是红树林湿地的最大污染源，淤积情况和污染比较严重。福田红树林湿地整体的水体交换动力不足，因此水污染情况较为严重。尽管红树林有一定的净化水体和容纳污水的能力，但是长时间地排放污水会破坏红树林生态系统。

福田红树林的水环境污染十分严重，因此我们建议对主要的3个污染源进行截流，去除污染源。将污水抽入市政水管网，对污水进行集中处理后再排放。同时，为了加强红树林湿地生态水与深圳湾海水的交换，以减少淤积的泥沙和减缓水环境污染状况，降低河道护岸标高，利用潮汐动力加强红树林湿地的水交换。

##### (2) 外来物种入侵

引进品种海桑和无瓣海桑，由于具有耐性好、易成活、生长快、树躯高、抗风浪等诸多优势而成为优势物种，其过度生长会影响到本地自然分布的红树植物。同时，近来福田红树林遭到原产中美洲的恶性杂草薇甘菊的生态入侵，红树林生态系统的健康和稳定受到极大威胁。

由于受自然条件限制和长期受到人类活动的影响，深圳市天然红树林群落结构简单，群落组成单一，群落的稳定性极差，生态功能下降。

薇甘菊入侵深圳湾后，受到了广泛的关注，但至今还没有根本的防除办法。对于尚未遭受入侵的红树林湿地，应加强防范措施，避免侵入；对已造成入侵的，应早发现早治理，并加大防治力度，采取人工防除、化学防除和生物防治等多种防治办法，综合治理。另外，无瓣海桑引入深圳福田红树林保护区后，出现疯长现象，且有一定扩散和竞争能力，对无瓣海桑的种植应慎重。

##### (3) 其他建议

###### ①加强自然保护区的建设和管理

加强对福田红树林的建设与管理，加大保护力度，争取被列入国际重要湿地名录，按照国际重要湿地的建设要求，尽快在软硬件方面达标。

同时加大国际合作，建立国际交流的机制，借鉴并吸收国际对红树林的保护和生态恢复的先进技术和成功经验，提高红树林保护管理的科研实力。

###### ②恢复和营造红树林

为恢复深圳原有的红树林面积以维护海岸生态安全和生物多样性，深圳有必要恢复和营造红树林。对于一些面积正在减少的零星分布的红树林，应采取封滩育林，适当引入一些树种，改善生态环境，通过自然恢复和人工促进自然恢复及人工营造等措施，恢复红树林湿地的自然特性和生态特征，促进这些红树林恢复。深圳市拥有较大面积的红树林宜林地面积，应充分利用这些土地，积极选择适生树种，开展大规模多树种的红树林人工造林工程，提高生物多样性，充分发挥红树林抵御台风海啸，净化海水，改善环境的作用。



### ③防治病虫害问题

对于红树林虫害防治问题,要加强研究,采用高效而对环境影响小的杀虫剂,主张采用生物防治办法。红树林虫害与红树林生态环境恶化有关,因此防治虫害,治理和改善红树林的生境,提高生物多样性,增强红树林生态系统的稳定性和复杂性,这是治理红树林虫害的根本所在。

## 7. 模型的评价和改进

问题(1)建立基于3S技术的红树林动态监测模型,将遥感技术、地理信息系统和全球定位系统很好地融合成3S技术,实现了信息的共享,利用相关的图像分析软件,有助于准确地动态监测红树林的状况。通过卫星可以快捷方便地获取红树林的相关影像资料,相比于人工调查,能节省时间和费用。但是,Landsat ET 遥感图像分辨率中等,仍存在着一定的误差,需使用高光谱和高分辨率等更多遥感数据源进行红树林监测研究。

问题(2)建立了红树林健康评价指标体系,利用PSR模型,能够全面地对深圳福田红树林进行评价。熵权法也能根据指标信息量的大小来赋权,使得结果更为客观。但在指标的定义和数据获取方面存在许多缺陷,许多指标应该被更加客观全面地定义,例如民众环保意识可以通过问卷调查得到,噪音污染可以加上周围建筑用地、周围空域飞机航班数等等,对每个指标的考虑越全面,得到的结果就越准确。

问题(3)分析了红树林水污染的状况,利用各监测点的污染物数据进行了预测,分析结果并给出了一些建议。但是没有分析监测点之间的联系与差异,只是简单地将其数值取平均。同时也没有考虑潮汐是否会对水污染造成影响,这些都是模型值得改进的地方。

接下来,给出对未来生态环境监测的一些建议。

### (1) 使用多个数据源

本文的红树林制图中采用单一的数据源,但是两种数据源甚至多种数据源的融合已成为一种必然趋势,通过多源遥感数据融合可提高影像的空间分解力和清晰度,增加空间信息,提高平面测图精度、分类精度与可靠性,增强动态监测能力,有效的提高了遥感数据的利用率。

比如国内学者李春干<sup>[11]</sup>、黎夏<sup>[12]</sup>等分别利用Landsat与SPOT、雷达SAR图像进行融合,经融合得到的图像地物轮廓清晰、色彩丰富、层次分明,红树林与滩涂、海域的区别十分明显。

### (2) 提高影像分辨率

在红树林群落分类中,光谱信息比空间信息作用更重要,因为高分辨率影像是同时提高了红树林与非红树林的解译能力,并由此增加了两者的易混淆程度;高光谱数据在红树林群落监测中具有巨大的发展潜力,使用高光谱数据进行红树林群落分类能获得较好的分类效果<sup>[13]</sup>。

### (3) 考虑潮汐的影响

应充分考虑潮汐对红树林解译结果的影响,同时使用高潮影像和低潮影像,带入潮位的数据,计算出淹没红树林指数,以提高红树林的提取精度。

#### （4）信息化

立红树林湿地保护监测机制，利用遥感与地理信息系统技术，建立湿地资源数据库和湿地生态系统监测、信息网络。将 3S 技术应用于洛阳江口红树林湿地资源调查、湿地编目、湿地功能评价、湿地监测和湿地保护研究，对红树林湿地生态特征动态变化进行监测，逐步实现定点全面监测，为红树林湿地保护与恢复提供必要的数据库。

## 参考文献

- [1] RAINER WALZ. Development of environmental indicator systems: experiences from Germany [J]. Environmental Management, 2000,25(6): 613-623.
- [2] ELLIS E. Remote sensing techniques for mangrove mapping [J]. International Journal of Remote Sensing,1998,19 (5): 935-956.
- [3] CUI Lijuan, Anna van Paddenburg, ZHANG Man-yin. Applications of RS, GIS and GPS technologies in research, inventory and management of wetlands in China[J]. Journal of Forestry Research, 2005,16 (4): 317-322.
- [4] Green E P, Mumby P J, Edwards A J, et al. 1998. The assessment of mangrove areas using high resolution multispectral airborne imagery. Journal of Coastal Research,14(2): 433-443.
- [5] 吴宇静. 基于 Contourlet 变换的红树林群落空间格局研究[D].广州大学,2012.
- [6] 贾明明. 1973~2013 年中国红树林动态变化遥感分析[D].中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2014.
- [7] 胡涛,丑庆川,徐华林,等. 深圳湾福田红树林保护区生态系统健康评价[J]. 湿地科学与管理,2015,01:16-20.
- [8] 王丽荣,李贞,蒲杨婕,等. 海南东寨港、三亚河和青梅港红树林群落健康评价[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(2):81-86.
- [9] 王伟衡,陈晶,温佳慧. 基于预警系统理论的福田红树林湿地生态系统实证分析[J]. 商,2015,13:79.
- [10] 刘莉娜,陈里娥,韦萍萍,李喻春,廖文波,咎启杰. 深圳福田红树林自然保护区的生态问题及修复对策研究[J]. 海洋技术,2013,02:125-132.
- [11]李春干,谭必增. 红树林资源调查的遥感图象处理方法研究[J]. 中南林业调查规划, 2003, 22 (2): 24-27.
- [12] 黎夏,叶嘉安,王树功,等. 红树林湿地植被生物量的雷达遥感估算[J]. 遥感学报, 2006, 10 (3): 387-396.
- [13] 吴宇静.基于 Contourlet 变换的红树林群落空间格局研究——以深圳福田红树林自然保护区为例.广州:广州大学, 2012.

## 附录

### 附录 1：问题 2 的代码

```
%信息熵法

%噪声污染中 3 条河流权重的确定

%水污染每年得分的计算

clc;

clear;

y=[3.34 2.50 1.99 1.01 0.81
2.55 2.35 2.08 1.24 1.64
2.50 2.66 3.37 2.25 0.93];

A=y'

[m,n]=size(A);      %判断输入矩阵大小

for i=1:n

    w(i)=sum(A(:,i));

    A(:,i)=A(:,i)./w(i);

end                %矩阵列向量归一化

E=ones(1,n);

for i=1:n

    E(i)=(-1/log(m))*sum(A(:,i).*log(A(:,i)));

end

disp('熵 E=');

disp(E);           % A 对属性 X 的熵 E

F=1-E;

disp('区分度 F=');

disp(F);           % 区分度 F

for i=1:n

    w(i)=F(i)/sum(F);

end

disp('权重 w=');
```

```

disp(w);          %3 个气体指标的权重 w
w
B=y';
p=B*w'           %带入权重和数值，计算每个时间段的得分

```

%大气污染物种中 3 个指标权重的确定

%信息熵法

```
clc;
```

```
clear;
```

```

A=[0.0110    0.0500    0.0540
    0.0090    0.0460    0.0560
    0.0090    0.0450    0.0560
    0.0070    0.0410    0.0460
    0.0090    0.0430    0.0540];

```

%行为 2009-2013 年的年平均数值

%列为 3 个大气污染物在不同时间段的数值

A

```
[m,n]=size(A);      %判断输入矩阵大小
```

```
for i=1:n
```

```
    w(i)=sum(A(:,i));
```

```
    A(:,i)=A(:,i)./w(i);
```

```
end                %矩阵列向量归一化
```

```
E=ones(1,n);
```

```
for i=1:n
```

```
    E(i)=(-1/log(m))*sum(A(:,i).*log(A(:,i)));
```

```
end
```

```
disp('熵 E=');
```

```
disp(E);          % A 对属性 X 的熵 E
```

```

F=1-E

disp('区分度 F=');

disp(F);          %区分度 F

for i=1:n

    w(i)=F(i)/sum(F);

end

disp('权重 w=');

disp(w);          %3 个气体指标的权重 w

w

B=[0.0110    0.0500    0.0540

    0.0090    0.0460    0.0560

    0.0090    0.0450    0.0560

    0.0070    0.0410    0.0460

    0.0090    0.0430    0.0540];

p=B*w'          %带入权重和数值，计算每个时间段的得分

```

%噪音污染中 2 个指标权重的确定

%信息熵法

```
clc;
```

```
clear;
```

```

A=[70.0    56.8   145

    69.9    56.7   170

    69.9    56.7   197

    69.8    56.5   225

    69.8    56.5   262]

```

%行为 2007-2013 年的年平均数值

%列为 2 个噪音指标在不同时间段的数值

```
[m,n]=size(A);          %判断输入矩阵大小
```

```

for i=1:n

    w(i)=sum(A(:,i));

    A(:,i)=A(:,i)./w(i);

end                %矩阵列向量归一化

E=ones(1,n);

for i=1:n

    E(i)=(-1/log(m))*sum(A(:,i).*log(A(:,i)));

end

disp('熵 E=');

disp(E);           % A 对属性 X 的熵 E

F=1-E;

disp('区分度 F=');

disp(F);           % 区分度 F

for i=1:n

    w(i)=F(i)/sum(F);

end

disp('权重 w=');

disp(w);           %3 个气体指标的权重 w

w

B=[70.0    56.8   145

    69.9    56.7   170

    69.9    56.7   197

    69.8    56.5   225

    69.8    56.5   262];

p=B*w'            %带入权重和数值，计算每个时间段的得分

```

%信息熵法

%水污染中 12 个指标权重的确定

clc;

clear;

```
A=[15.1300    40.3800    5.4600    7.5300    3.9800    6.4600    4.1700    1.0300    0.9500
0.6500
    7.3800    61.9400    12.4900    7.6700    3.5900    6.9300    1.0500    0.3400    1.2100
0.6900
    3.7500    80.8600    2.9200    7.3000    2.4900    2.2900    0.4300    1.0200    0.7500
0.2400
    11.5000    76.7300    4.9400    7.3900    3.0600    6.1600    1.3400    0.8600    0.8300
0.4600
    17.8600    26.2500    23.6400    8.0100    1.9000    10.3600    7.4500    0.8900    0.8300
0.3700
    6.1300    23.9600    6.3400    7.5300    3.3700    4.2500    2.0800    0.2800    0.9700
0.6000
    5.8800    27.8400    4.5600    7.4700    2.6700    6.1700    3.2000    1.1000    1.0800
0.3000
    11.2900    27.9100    16.9900    7.4000    3.1900    6.1600    4.1300    1.2400    0.8000
0.4600
    15.4800    25.9100    22.6300    7.4800    2.4100    12.2600    8.3400    1.4000    1.1300
0.3900
    5.2800    26.8700    13.8100    7.3800    2.8000    5.5600    2.8200    0.8700    0.9700
0.4900
    5.8900    40.2500    4.3800    7.3500    2.6700    6.1700    3.1000    1.0700    1.0700
0.3200
    6.5100    30.8000    17.0800    7.2500    2.4300    6.6600    3.4800    1.5000    0.7400
0.3800];
```

%行为 2011-2013 中 12 个月年的数值

%列为 12 个理化指标在不同时间段的数值

[m,n]=size(A); %判断输入矩阵大小

for i=1:n

    w(i)=sum(A(:,i));



```

A(:,i)=A(:,i)./w(i);
end %矩阵列向量归一化
E=ones(1,n);
for i=1:n
    E(i)=(-1/log(m))*sum(A(:,i).*log(A(:,i)));
end
disp('熵 E=');
disp(E); % A 对属性 X 的熵 E
F=1-E;
disp('区分度 F=');
disp(F); %区分度 F
for i=1:n
    w(i)=F(i)/sum(F);
end
disp('权重 w=');
disp(w); %12 个理化指标的权重 w
w
B=[15.1300 40.3800 5.4600 7.5300 3.9800 6.4600 4.1700 1.0300 0.9500
0.6500
7.3800 61.9400 12.4900 7.6700 3.5900 6.9300 1.0500 0.3400 1.2100
0.6900
3.7500 80.8600 2.9200 7.3000 2.4900 2.2900 0.4300 1.0200 0.7500
0.2400
11.5000 76.7300 4.9400 7.3900 3.0600 6.1600 1.3400 0.8600 0.8300
0.4600
17.8600 26.2500 23.6400 8.0100 1.9000 10.3600 7.4500 0.8900 0.8300
0.3700
6.1300 23.9600 6.3400 7.5300 3.3700 4.2500 2.0800 0.2800 0.9700
0.6000
5.8800 27.8400 4.5600 7.4700 2.6700 6.1700 3.2000 1.1000 1.0800
0.3000

```

11.2900	27.9100	16.9900	7.4000	3.1900	6.1600	4.1300	1.2400	0.8000
0.4600								
15.4800	25.9100	22.6300	7.4800	2.4100	12.2600	8.3400	1.4000	1.1300
0.3900								
5.2800	26.8700	13.8100	7.3800	2.8000	5.5600	2.8200	0.8700	0.9700
0.4900								
5.8900	40.2500	4.3800	7.3500	2.6700	6.1700	3.1000	1.0700	1.0700
0.3200								
6.5100	30.8000	17.0800	7.2500	2.4300	6.6600	3.4800	1.5000	0.7400
0.3800];								

$p=B*w'$  % 带入权重和数值，计算每个时间段的得分

% 问题二模型的求解主体部分

clc;

clear;

$y=[2.96 \ 2.53 \ 2.42 \ 1.42 \ 0.96$

$0.0243 \ 0.0227 \ 0.0225 \ 0.0189 \ 0.0219$

$144.9 \ 169.9 \ 196.9 \ 224.9 \ 261.9$

$13.5 \ 16.7 \ 17.5 \ 19.3 \ 18.2$

$383 \ 418 \ 433 \ 445 \ 458$

$4 \ 4 \ 2 \ 3 \ 5$

$14.2 \ 15.9 \ 16.7 \ 13.1 \ 13.5$

$80 \ 81 \ 86 \ 97 \ 104$

$145 \ 133 \ 140 \ 125 \ 128$

$26 \ 36 \ 48 \ 46 \ 47$

$135 \ 147 \ 90 \ 92 \ 96$

$174 \ 188 \ 189 \ 191 \ 194$

$233.73 \ 272.96 \ 298.65 \ 327.36 \ 359.78$

$30 \ 30 \ 35 \ 39 \ 42$

```

6    6    6.5  7    7.5];

A=y'

[m,n]=size(A);      %判断输入矩阵大小

for i=1:n

    w(i)=sum(A(:,i));

    A(:,i)=A(:,i)./w(i);

end                %矩阵列向量归一化

E=ones(1,n);

for i=1:n

    E(i)=(-1/log(m))*sum(A(:,i).*log(A(:,i)));

end

disp('熵 E=');

disp(E);           % A 对属性 X 的熵 E

F=1-E;

disp('区分度 F=');

disp(F);           %区分度 F

for i=1:n

    w(i)=F(i)/sum(F);

end

disp('权重 w=');

disp(w);           %3 个气体指标的权重 w

w

B=[0.0000    0.1453    0.1824    0.5203    0.6757

0.0000    0.0658    0.0741    0.2222    0.0988

0.4467    0.3513    0.2482    0.1413    0.0000

0.3005    0.1347    0.0933    0.0000    0.0570

0.1638    0.0873    0.0546    0.0284    0.0000

0.2000    0.2000    0.6000    0.4000    0.0000

0.1497    0.0479    0.0000    0.2156    0.1916

```

```

0.7692    0.7788    0.8269    0.9327    1.0000
1.0000    0.9172    0.9655    0.8621    0.8828
0.5417    0.7500    1.0000    0.9583    0.9792
0.9184    1.0000    0.6122    0.6259    0.6531
0.8969    0.9691    0.9742    0.9845    1.0000
0.6496    0.7587    0.8301    0.9099    1.0000
0.7143    0.7143    0.8333    0.9286    1.0000
0.6000    0.6000    0.6500    0.7000    0.7500 ]

```

%归一化数据

p=w\*B %带入权重和数值，计算出 2009-2013 年的健康综合指数

yali=B(1:6,:)

zhuangtai=B(7:12,:)

xiangying=B(13:15,:)

PHI=(w(1,1:6)\*yali)/sum(w(1,1:6))

SHI=(w(1,7:12)\*zhuangtai)/sum(w(1,7:12))

RHI=(w(1,13:15)\*xiangying)/sum(w(1,13:15)) %压力、状态、响应健康综合指数的计算

p2013=[]

for i=1:15

b=w(1,i)\*B(i,5)

p2013=[p2013;b]

end

## 附录 2：问题 3 的代码

%使用灰色预测对水质各污染物未来 1 年的预测

clear

syms a b;

c=[a b]';

Y=[15.13 7.38 3.75 11.50 17.86 6.13 5.88 11.29 15.48 5.28

5.89	6.51									
40.38	61.94	80.86	76.73	26.25	23.96	27.84	27.91	25.91	26.87	40.25
30.80										
5.46	12.49	2.92	4.94	23.64	6.34	4.56	16.99	22.63	13.81	4.38
17.08										
7.53	7.67	7.30	7.39	8.01	7.53	7.47	7.40	7.48	7.38	7.35
7.25										
3.98	3.59	2.49	3.06	1.90	3.37	2.67	3.19	2.41	2.80	2.67
2.43										
6.46	6.93	2.29	6.16	10.36	4.25	6.17	6.16	12.26	5.56	6.17
6.66										
4.17	1.05	0.43	1.34	7.45	2.08	3.20	4.13	8.34	2.82	3.10
3.48										
1.03	0.34	1.02	0.86	0.89	0.28	1.10	1.24	1.40	0.87	1.07
1.50										
0.95	1.21	0.75	0.83	0.83	0.97	1.08	0.80	1.13	0.97	1.07
0.74										
0.65	0.69	0.24	0.46	0.37	0.60	0.30	0.46	0.39	0.49	0.32
0.38										
51.17	106.12	50.29	53.46	53.40	48.63	56.13	59.60	54.98	50.39	55.42
51.57										
5.29	10.61	4.65	10.06	11.44	10.35	18.18	12.56	13.05	11.40	11.99
12.51										

%行为 2011 年-2013 年均等分的 12 个月

%列为 12 个理化指标的月均值

Z=[];

for i=1:12

A=Y(i,:)

B=cumsum(A); %原始数据累加

n=length(A);

for i=1:(n-1)

C(i)=(B(i)+B(i+1))/2; %生成累加矩阵

```

end

%计算待定参数的值

D=A;D(1)=[];

D=D';

E=[-C;ones(1,n-1)];

c=inv(E*E')*E*D;

c=c';

a=c(1);b=c(2);

%预测后续数据

F=[];F(1)=A(1);

for i=2:(n+10)

    F(i)=(A(1)-b/a)/exp(a*(i-1))+b/a ;

end

G=[];G(1)=A(1);

for i=2:(n+4) %往下预测 4 个

    G(i)=F(i)-F(i-1); %得到预测出来的数据

end

G

yuce=mean(G(1,13:16))

Z=[Z;yuce]%Z 为 2014 年各理化指标的年平均预测值

End

```

```

%外来物种入侵的灰色预测与评价

clc;

clear;

syms a b;

c=[a b]';

A=[372,358,417,393,429,486]%外来物种入侵指标

B=cumsum(A); %原始数据累加

n=length(A);

for i=1:(n-1)

    C(i)=(B(i)+B(i+1))/2; %生成累加矩阵

end

%计算待定参数的值

D=A;D(1)=[];

D=D';

E=[-C;ones(1,n-1)];

c=inv(E'*E)*E'*D;

c=c';

a=c(1);b=c(2);

%预测后续数据

F=[];F(1)=A(1);

for i=2:(n+10)

    F(i)=(A(1)-b/a)/exp(a*(i-1))+b/a ;

end

G=[];G(1)=A(1);

for i=2:(n+4) %往下预测 4 个

    G(i)=F(i)-F(i-1); %得到预测出来的数据

end

G

```

```

guiyi=[0.387  0.415    0.319    0.359    0.299    0.206    0.176    0.121 ];
p=0.0302*guiyi
w=[0.3113 0.0144 0.0922 0.0302 0.0081 0.1856];%压力层各指标的权重
zhi=[0.0000    0.1453    0.1824    0.5203    0.6757 0.6757
      0.0000  0.0658    0.0741    0.2222    0.0988 0.0988
      0.4467  0.3513    0.2482    0.1413    0.0000 0.0000
      0.319    0.359    0.299    0.206    0.176    0.121  %外来物种入侵用上面的归一值
      0.1638  0.0873    0.0546    0.0284    0.0000 0.0000
      0.2000  0.2000    0.6000    0.4000    0.0000 0.0000]

p1=w*zhi;
yali=p1/sum(w) %2009-2014 年压力层的综合健康指数

```