



华北电力大学  
NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY

# 基于福田红树林保护区的一体化 生态系统模型

学校信息:华北电力大学（北京）

指导老师:雍雪林

队员姓名: 陆锋 创新电 1301 1131180714

刘弈卿 实践电 1301 1131180713

董程程 实践电 1301 1131180405

## 摘要

针对福田红树林保护区构建一体化生态系统模型框架，我们建立了描述模型、预测模型、评价模型三大模型。基于这三大模型，我们构建了系统的生态系统动态监测、健康评估及预警科学管理支撑体系。

描述模型的数据构成分为四个部分：群落结构、食物链关系、物质循环关系和能量流动关系。我们从资料中提取了不同种群的数量随时间变化的相关数据，并用物种数、多样性指数、均匀度指数和丰富度指数对群落结构进行了量化描述。随后，描述模型又对生态系统的食物链关系、物质循环关系和能量流动关系进行了量化和分析。对食物链的描述采用微分方程组；对物质循环的研究基于生态系统碳循环；而对能量流动的分析则采用生态系统EWE模型。描述模型的建立为后面的预测模型和评价模型提供了依据。

预测模型的数据构成与描述模型一致，它能对数据构成的四个部分所涉及的相关指标进行预测。预测采用神经网络辅助灰色预测模型相结合方法。为了更好的展示该方法，我们对群落结构涉及的两个参数——物种多样性指数和丰富度指数进行了预测，并取得了较为准确的结果。

评价模型分为稳定性评价体系和健康状态评价体系两部分。

稳定性评价体系中的数据构成与前两个模型相同，其作用是对当前生态系统稳定性大小做出评价。根据数据构成的要求，对生态系统稳定性的评价也将从群落结构、食物链、物质循环和能量流动四个方面进行。接下来，本文给出了群落结构稳定性和能量流动稳定性评价的具体方法。

健康状态评价体系构建的依据是PSR评价模型。其数据构成分为压力、状态和响应三个部分，作用是对当前生态系统的健康状况做出评价，我们通过查阅相关资料，确立了各个指标的评分标准，并用层次分析法确定了各个指标的权重。随后，我们用yaaho软件对红树林生态系统进行了评分，其得分为73.24分，依据标准可将其划分为第二等级“健康”（第一等级为“很健康”）。

在三个子模型建立的基础之上，我们提出了一体化生态系统模型总框架，并就该框架对动态监测、健康评估以及预警分析进行了具体的说明。

随后，研究了外来物种入侵问题。以无瓣海桑作为外来物种的代表，以秋茄作为本地物种的代表，提取出附件中所给出的数据，统计整理得到了无瓣海桑和秋茄的数量随年份的变化。并运用预测模型预测了今后几年内的数量变化。将两个物种的变化进行对比和分析，得到了“无瓣海桑的引入对秋茄的生存并没有构成威胁”这一结论。根据变化关系图，我们给出了针对此问题的相关建议。

本文主要创新点如下：将神经网络与灰色预测模型结合了起来，弥补了单独使用一种方式进行预测带来的不足，很好的减小了误差；基于每年的种群数量的峰值分析无瓣海桑和秋茄的数量随年份的变化，较用每年的种群数量的均值随时间的变化而言能更好的反映实际情况；利用PSR评价模型和李亚普洛夫稳定性原理，分别从福田红树林生态系统目前的健康状况和稳定性两个方面对其进行了综合评价。

**关键词：**EWE模型 分室模型 李亚普洛夫稳定性原理 层次分析法 PSR模型 神经网络 灰色预测 归一化处理

目录

1	问题重述	3
2	问题分析	3
3	模型假设	4
4	一体化生态系统描述模型	4
4.1	研究区域的基本情况	4
4.2	物质循环关系	6
4.3	能量流动模型	8
5	基于BP神经网络的灰色预测模型	10
5.1	模型构建	10
5.2	求解过程	11
5.3	求解结果	11
5.4	对预测模型的准确性的进一步分析	12
6	生态系统稳定性评价体系	13
6.1	群落结构的稳定性	13
6.2	能量流动的稳定性	14
7	基于PSR模型的福田红树林生态系统评价体系	16
7.1	福田红树林生态系统健康评价指标的选取	16
7.2	各项指标权重的确定	23
7.3	基于PSR模型的福田红树林生态系统健康评价结果	23
8	一体化生态系统模型总框架	26
8.1	框架图	26
8.2	对于框架的几点说明	27
9	对外来物种入侵问题的分析	27
9.1	对象的选取与资料的搜集	27
9.2	数据分析	28
9.3	预测与结论	29
9.4	启示与建议	29
10	模型的优缺点分析	30
10.1	模型优点	30
10.2	模型缺点	30
11	参考文献	30

## 1 问题重述

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。针对题目要求，我们认为需要解决的问题有：

### 1. 构建一体化生态系统模型总框架

- 该框架要能够体现生态系统的监测机制。监测指标应该覆盖到生态系统的各个方面，并且监测频率要能随着监测结果实现动态调整。
- 该框架需要对生态系统的健康做出评估。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。这些都是框架需要完成的工作。
- 该框架要为健康预警提供一个合理的思路，即能够根据现有数据判断未来几年生态系统发生风险的可能性大小。

### 2. 根据建立的框架分析实际问题

选取一个当下福田红树林最迫切需要的生态系统问题，并运用应用模型框架进行生态发展预测分析，并给出实质性的建议。

## 2 问题分析

在问题重述中，我们已经将题目中的任务明确分成两个部分，即构建一体化生态系统模型总框架和根据建立的框架分析具体问题。

对于第一个任务，框架必须包含三个功能：监测、评价、预警。一个完整的监测机制需要有监测指标和监测流程；评价体系中需要有相应的评价指标和评价方法；预警系统离不开预警指标和预测系统。而且，这三个功能无论是在数据构成还是具体过程上都是存在某种联系的。综合以上分析，我们建立了三个子模型：描述模型、预测模型、评价模型，并在这三个子模型的基础之上搭建了集以上三大功能于一体的生态系统模型总框架。

三个子模型的数据构成如下图所示。

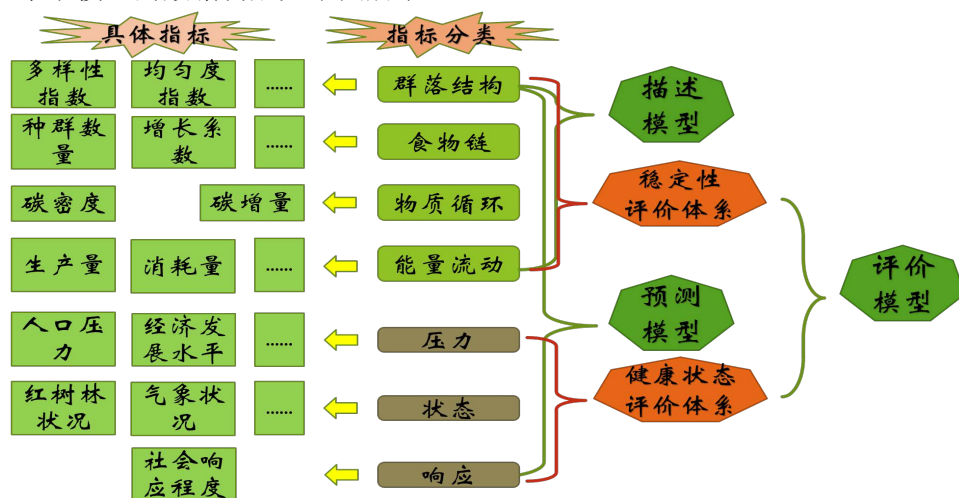


图 1: 子模型结构图

### 3 模型假设

- 假设近几年深圳市无罕见的特大自然灾害。
- 假设植物的种群数量与该种群月凋落物的均值成正比关系。
- 假设所统计的数据没有错误，且样本数据能很好地反映总体情况。
- 假设生态系统全部都是相对稳定的，系统的总输入与总输出相等。
- 假设外来物种的引入只可能对本地物种产生影响，而不会改变当地的生态环境。

### 4 一体化生态系统描述模型

本模型首先根据资料总结了红树林区域的基本情况，给出了红树林生态系统各生物种群的数量分布和生物种群间关系的量化标准，并通过物质循环模型描述了福田红树林的碳循环模式。通过EWE功能组模型描述了生态系统的能量流动，为后面的预测模型和评价模型提供了数据支撑。

#### 4.1 研究区域的基本情况

深圳福田红树林自然保护区是由红树林、基围鱼塘洼地、陆地林地和外海滩涂等几部分组成。这几部分相当于红树林湿地生态系统的几个子系统，其生态功能相互依存，共同完成湿地生态系统的物质循环和能量转换。

##### 4.1.1 区域划分

我们将区域划分为四部分：红树林带、内滩、中滩和外滩，见图2。

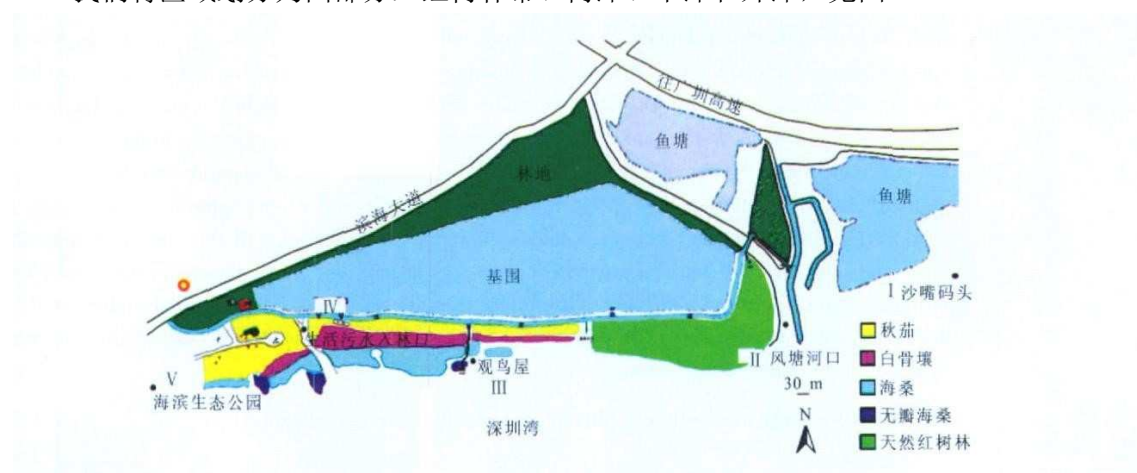


图 2: 红树林区域示意图

##### 4.1.2 福田红树林生态系统群落结构

基于2012/4-2013/4福田红树林保护区生物多样性监测报告和其他资料，并用下列公式量化调查统计数据。

- Shannon Wiener多样性指数:  $H = -\sum p_i \times \ln p_i$ ,  
式中 $p_i$ 表示在所采集到标本中的 $i$ 个物种所占的比例。

- Pielou均匀度指数:  $J = H / \ln S$ ,

式中 $S$ 为物种总数。

- Margalef丰富度模型:  $D = (S - 1) / \ln N$ ,

式中 $S$ 为物种数目;  $N$ 为所有物种的个体数之和。

为研究生物与生境的关系, 我们将分区域讨论主要群落的生态学状态<sup>[13,14]</sup>, 进而可以计算分析得出生态参数, 如表1所示。

表 1: 红树林生态系统主要群落的生态参数

类别	种类数 (种)	物种多样性指数H			物种丰富度指数D			物种均匀度指数P		
		内滩	中滩	外滩	内滩	中滩	外滩	内滩	中滩	外滩
鸟类	108	3.07	5.28	6.04	0.56	1.73	1.42	0.28	0.14	0.69
浮游植物	51	1.79	2.54	4.01	15.34	20.28	19.18	0.35	0.47	0.54
底栖动物	46	1.0	1.21	2.44	0.94	1.21	1.44	0.39	0.31	0.73
红树植物	20	2.54	1.30	3.28	27.35	13.32	30.28	0.84	0.75	0.87

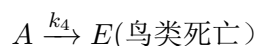
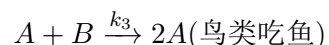
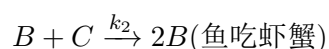
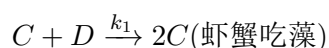
#### 4.1.3 红树林生态系统的食物链关系

红树林生态系统的食物链关系错综复杂, 生物种类繁多<sup>[7]</sup>, 具体的食物链框架关系如表2所示。

表 2: 红树林生态系统的食物链关系

生产者	红树植物、底栖硅藻、海藻、浮游植物以及能进行光合作用的植物
初级消费者	草食性杂食性动物 (浮游动物、小型底栖动物)
次级消费者	第一级肉食动物 (细螯寄居蟹、弹涂鱼、黑鲷、汤鲤等)
三级消费者	更高一级肉食动物 (青蟹、真蟹和鸟类)
分解者	异养的细菌、真菌及一些腐食性小动物

为简化模型, 我们选取一条食物链进行动力学分析<sup>[1]</sup>。如“藻类 $D \rightarrow$  虾蟹 $C \rightarrow$  小型食肉鱼 $B \rightarrow$  鸟类 $A$ ”是营养级按低到高排列的一条食物链, 捕食与被捕食者的关系如下:



式中 $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ 分别为鸟、小型食肉鱼、虾蟹和藻类的数量,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 分别为虾蟹、小型食肉鱼和鸟的增长系数,  $k_4$  为鸟类的死亡系数。由此关系式得到的动力学方程为:

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = k_1 CD - k_2 CB \\ \frac{dB}{dt} = k_2 CB - k_3 AB \\ \frac{dA}{dt} = k_3 AB - k_4 A \end{cases} \quad (1)$$

定态时,  $\frac{dC}{dt} = 0$ ,  $\frac{dB}{dt} = 0$ ,  $\frac{dA}{dt} = 0$ , 得出一组定态解:

$$A = \frac{k_2}{k_3}C, B = \frac{k_4}{k_3}, C = \frac{k_3}{k_2}A, D = \frac{k_2k_4}{k_1k_3} \quad (2)$$

这组定态解告诉我们, D的数量受A、B、C的增长的制约, 如 $k_2$  越大, 表示鱼吃虾蟹越多, 藻类得到保护, 利于D;  $k_3$ 越大表示鸟类吃鱼越多, 虾蟹增多, 藻类遭到破坏。在一定条件下,  $k_1, k_2, k_3, k_4$ 为常数, 也就是说D 最少要维持常量 $\frac{k_2k_4}{k_2k_1}$ 才能使C有足够的食物, 进而使B 有一个常量 $\frac{k_4}{k_3}$ , 保持提供A生存的食物。

如果一个生态系统受到外界干扰破坏, 超过系统本身自动调节能力, 即使开始仅造成某个物种的数量下降, 随着该物种不断衰减, 终将使系统的结构和功能失调, 物质循环和能量流动受阻。

## 4.2 物质循环关系

### 4.2.1 研究方法

为研究福田红树林物质循环关系, 我们需要在福田红树林自然保护区选择内滩、中滩和外滩3种不同滩位的红树林为研究对象。根据2011年的数据<sup>[2]</sup>, 其中内滩群落为天然林, 林龄30a; 中滩和外滩群落为人工林, 林龄18a。每个样地确定 $10m \times 10m$ 范围典型群落作为固定样方, 样方的基本情况见表3。

表 3: 研究样地基本概况

项目	内滩		中滩		外滩	
	2011-04	2012-04	2011-04	2012-04	2011-04	2012-04
植株密度(株/ $hm^2$ )	32400	32400	18800	18800	7200	7200
平均胸径(cm)	9.4047	9.8546	7.8969	8.4276	8.6532	9.1939
平均高度(m)	6.15	6.40	5.50	5.75	5.85	6.10
坐标位置	22° 31'42.97"N; 114° 00'08.80"E		22° 31'42.28"N; 114° 00'07.05"E		22° 31'41.50"N; 114° 00'06.83"E	

### 4.2.2 物质循环模型

本文将红树林生态系统碳储量分为植被碳储量C、凋落物碳储量 $C_v$ 、粗木质残体碳储量 $C_L$  和土壤碳储量 $C_W$  三部分, 则有

$$C = C_V + C_L + C_W + C_S \quad (3)$$

#### ● 生态系统碳储量净增量 $\Delta C$

生态系统碳储量净增量即碳汇量, 可以通过植被碳储量净增量 $\Delta C_V$ 、凋落物碳储量净增量 $\Delta C_L$ 、粗木质残体碳储量净增量 $\Delta C_W$ 和土壤碳储量净增量 $\Delta C_S$ 加和得到, 即

$$\Delta C = \Delta C_V + \Delta C_L + \Delta C_W + \Delta C_S \quad (4)$$

#### ● 总初级生产力GPP和净初级生产力NPP

初级生产力指自养生物通过光合作用或化学合成制造有机物的速率, 包括总初级生产力GPP和净初级生产力NPP。前者是指自养生物生产的有机总碳量, 为植被呼吸量、

凋落物生成量与生物量净增量加和得到。后者是总初级生产力扣除自养生物在测定阶段中呼吸消耗掉的量，为凋落物生成量 $L$ 和生物量净增量 $\Delta B$  加和得到

$$\begin{cases} GPP = R_a + L + \Delta C_V \\ NPP = L + \Delta B \end{cases} \quad (5)$$

式中，植被呼吸 $R_a$ 为植被叶呼吸、枝干呼吸和根系呼吸加和得到

$$R_a = R_l + R_s + R_r \sqrt{a^2 + b^2} \quad (6)$$

- 植被碳储量净增量 $\Delta C_V$

植被碳储量净增量为GPP减去植被呼吸量 $R_a$  和凋落物生成量 $L$

$$\Delta C_V = GPP - R_a - L \quad (7)$$

- 土壤碳储量净增量 $\Delta C_S$

土壤碳储量净增量为内源碳输入 $E_n$ 和外源碳输入 $E_x$ 与土壤微生物的异养呼吸量 $R_h$ 和甲烷排放 $M_e$ 的差值

$$\Delta C_S = E_n + E_x - R_h - M_e \quad (8)$$

- 凋落物碳储量净增量 $\Delta C_L$

我们定义碳输入为凋落物生成量 $L$ ，碳输出包括烂分解 $D$ 、食草动物消耗 $H$ 、冲入海洋 $I$ 和沉积物的内源碳输入 $E_n$ ，则有

$$\Delta C_L = L - D - H - I - E_n \quad (9)$$

根据公式(9)，我们初步建立了福田红树林的生态系统碳循环模式。

#### 4.2.3 模型的求解

我们采用2011-2012年深圳福田红树林的碳密度及其净增量（见表4）作为模型求解的原始数据。

表 4: 2011-2012年圳福田红树林的碳密度及其净增量

摊位	红树林					
	内滩		中滩		外滩	
	2011-4	2012-4	2011-4	2012-4	2011-4	2012-4
植被碳密度 $C_V$	226.2267	239.5115	94.7031	104.0658	40.233	44.5407
凋落物碳密度 $C_L$	19.2346	21.7452	0.5235	0.5243	0.1023	0.1140
粗木质碳密度 $C_W$	2.8093	2.8195	13.1558	13.0494	2.0065	1.9091
土壤碳密度 $C_N$	426.1060	430.3850	176.1760	176.8960	188.2110	188.0190
系统碳密度 $C$	674.3766	694.4612	284.5584	294.5355	230.5528	234.5828
植被净增量 $\Delta C_V$	13.2848		9.3627		4.3077	
凋落物增量 $\Delta C_L$	2.5106		0.0008		0.0117	
粗木质增量 $\Delta C_W$	0.0102		-0.1064		-0.0974	
土壤净增量 $\Delta C_S$	4.279		0.72		-0.192	
系统净增量 $\Delta C$	20.0846		9.9771		4.03	

将原始数据代入模型，通过SPSS统计分析可以得到表5，并据此画出福田红树林的碳循环模式（如图3）。



表 5: 福田红树林碳通量

项目		内滩	中滩	外滩
植被层	总初级生产力(GPP)	35.9242	19.9016	8.6771
	净初级生产力(NPP)	23.8382	14.7433	6.4751
	叶呼吸	4.8454	2.2594	0.9670
	植被呼吸( $R_a$ )	6.1578	2.7284	1.1677
	树干呼吸	1.0728	0.1705	0.0673
	根系呼吸	12.0760	5.1583	2.1674
	合计	10.5534	5.3806	2.1674
凋落物层	凋落物生成量(L)	10.5534	5.3806	2.1674
	植被碳储量净增量( $\Delta C_V$ )	13.2848	9.3627	4.3077
	凋落物生成量(L)	10.5534	5.3806	2.1674
	腐烂分解(D)+食草动物消耗(H)+冲入海洋(I)	5.2707	5.0332	2.0376
	凋落物残体向土壤的碳输入( $E_n$ )	2.7721	0.3466	0.1181
土壤层	凋落物碳储量净增量( $\Delta C_L$ )	2.5106	0.0008	0.0117
	内源碳输入( $E_n$ )	2.6544	0.2781	0.0619
	外源碳输入( $E_x$ )	3.3200	1.1522	0.2640
	土壤微生物异氧呼吸( $R_b$ )	1.6092	0.4025	0.2494
	甲烷排放( $M_c$ )	0.0862	0.3078	0.2685
土壤碳储量净增量( $\Delta C_s$ )		4.279	0.72	-0.192

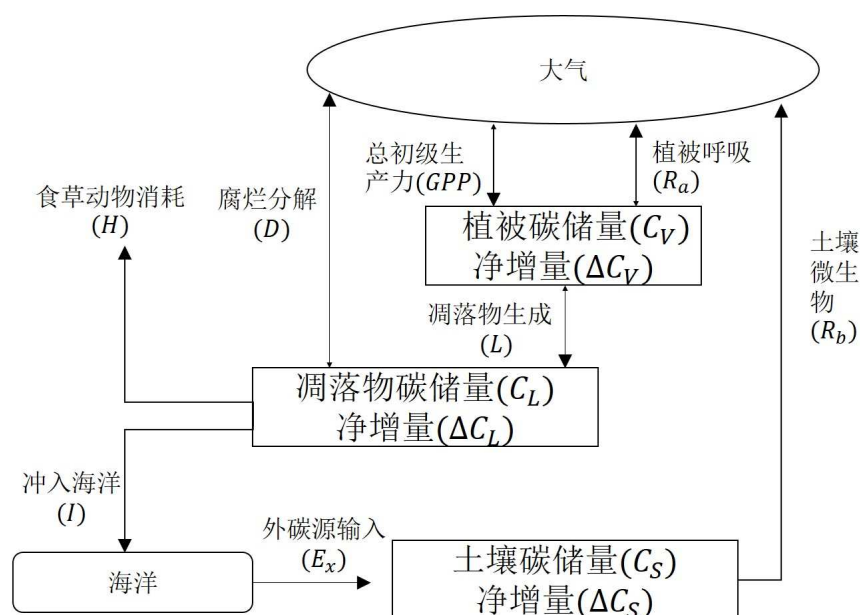


图 3: 福田红树林的碳循环模式

### 4.3 能量流动模型

#### 4.3.1 基于EWE模型的能量流动描述

##### • EWE模型

EWE模型<sup>[3]</sup>定义的生态系统是由一系列有生态关联的功能组（group 或box）组成，这些功能组包括有机碎屑、浮游生物、一种鱼类、一种鱼类的某一年龄组成或一类生态特性（如摄食）相同的鱼种、一种植物或一种植物的某一年龄组成等，所有功能组要能够覆盖该生态系统能量流动的全部过程。在建模过程中假设生态系统中的功能组全部是

相对稳定的，即表示该生态系统的总输入与总输出是相等的，可以用下式表示：

$$Q = P + R + U \quad (10)$$

式中Q为消耗量，P为生产量，R为呼吸量，U为未消化的食物量。

根据热动力学原理，对于每一个功能组输入输出也保持平衡：

$$P_i = Y_i + B_{2i}M_i + E_i + BA_i + P_i(1 - EE_i) \quad (11)$$

式中， $P_i$  为功能组*i*的总生产率， $Y_i$ 为功能组*i* 的总渔获捕捞率， $M_{2i}$  为功能组*i*总的被捕食死亡率， $E_i$  为功能组*i* 的净迁移率(迁出率- 迁入率)， $BA_i$ 为功能组的生物量累积率， $EE_i$ 为功能组*i*的生态营养转化效率，而 $M_{0i}$ 代表功能组*i*的其他死亡率。

通过引入功能组的生产量与生物量的比值，功能组消耗量与生产量的比值，被捕食生物在捕食生物M的食物组成中所占的比例，将上述方程进一步表示：

$$B_i \cdot \left(\frac{P}{B}\right)_i - \sum_{j=1}^n B_j \left(\frac{Q}{B}\right)_j \cdot DC_{ji} - \left(\frac{P}{B}\right)_i \cdot (1 - EE_i) - Y_i - E_i - BA_i = 0 \quad (12)$$

$$B_i \cdot \left(\frac{P}{B}\right)_i \cdot EE_i - \sum_{j=1}^n B_j \left(\frac{Q}{B}\right)_j \cdot DC_{ji} - Y_i - E_i - BA_i = 0 \quad (13)$$

建立EWE模型模型需输入的基本参数有 $B_i$ 、 $\left(\frac{P}{B}\right)_i$ 、 $Q\left(\frac{Q}{B}\right)_j$ 、 $EE_i$ 、 $DC_{ji}$  和 $E_i$ ，前4个参数中至少要有三个输入，其他未知项可通过已输入参数在模型中自行运算得出。

通过对上述线性方程求解，就能定量“能量在生态系统各个功能组之间的流动以及各个功能组的生物学参数”，进而对生物量在食物网中的流动进行定量描述，并对生态系统中各个营养级之间的相互作用进行分析。

#### 4.3.2 模型的调试与求解

模型求解之前，首先需要对福田红树林生态系统功能组进行具体划分，标准如下：

1. 在每个EWE模型功能组的划分过程中，至少需要一个碎屑组。
2. 从生态学的角度，将生态位相同或相似的种群划分到同一功能组，而不是用传统的生物分类学的方法来划分。
3. 所划分的功能组要能基本覆盖所研究生态系统中能量流动的全部过程，尤其是优势种和关键种所在功能组不能缺少。

根据以上原则，并考虑到数据的可获得性，将福田红树林湿地生态系统划分为15个功能组，即桐花树、秋茄（6年生）、秋茄（20年生）、海榄雌、无瓣海桑、海桑、甲壳动物、软体动物、弹涂鱼类、多毛类、其他底栖动物、浮游动物、浮游植物、鸟类和碎屑。

要使EWE模型达到平衡首先需要保证 $0 < EE < 1$ ，在任何生态系统内对生物利用都不可能大于生物体本身的能量。但在初次建立的EWE 模型中，一般都会出现一个或多个功能组的 $EE > 1$ ，这就需要通过模型的反复调试使所有的 $0 < EE < 1$ ，调试平衡后福田红树林湿地生态系统的EWE 模型输入和输出结果见表6。

表 6: 福田红树林湿地生态系统EWE模型基本参数

编号	功能组	B( $t/km^2$ )	P/B( $a^{-1}$ )	Q/B( $a^{-1}$ )	EE
1	桐花树	300.1	0.400	0.750	0.220
2	秋茄(6年生)	433.1	0.500	0.800	0.350
3	秋茄(20年生)	347.8	0.250	0.400	0.325
4	海榄雌	11.07	0.400	0.700	0.120
5	无瓣海桑	638.2	0.700	0.900	0.262
6	海桑	345.4	0.700	0.900	0.262
7	甲壳动物	7.834	4.000	5.200	0.601
8	软体动物	7.785	4.320	5.000	0.829
9	滩涂鱼类	1.238	9.265	12.71	0.818
10	多毛类	0.770	7.000	22.81	0.697
11	其他底栖动物	0.0493	143.0	150.0	0.499
12	浮游动物	0.682	40.00	192.0	0.214
13	浮游植物	2.059	252.0	400.0	0.270
14	鸟类	0.478	1.000	99.00	1.000
15	碎屑	2147	—	—	0.026

据此，我们可以得到福田红树林湿地生态系统总能流状况（见表7）。

表 7: 福田红树林湿地生态系统总能流( $t/(kg^2 \cdot a)$ )

营养级	摄食消耗	输出	流入碎屑	呼吸	总流量
VI	0.000083	0.000060	0.000665	0.00249	0.00329
V	0.00345	0.00184	0.0195	0.0714	0.0962
VI	0.1000	0.0513	0.532	1.943	2.627
III	2.798	1.402	10.98	34.95	50.14
II	55.63	17.38	112.1	68.42	253.5
I	101.9	3749	0.000	0.000	3851
合计	160.5	3768	123.6	105.4	4158

## 5 基于BP神经网络的灰色预测模型

### 5.1 模型构建

#### 5.1.1 灰色预测模型

灰色预测是指利用GM 模型对系统行为特征的发展变化规律进行估计预测，同时也可以对行为特征的异常情况发生的时刻进行估算，以及对在特定时区内发生事件的未来时间分布情况做出研究等等。这些工作实质上是将“随机过程”当作“灰色过程”，“随机变量”当作“灰变量”，并主要以灰色系统理论中的GM(1,1)模型来进行处理。

#### 5.1.2 BP神经网络补偿的灰色预测模型

灰色预测模型，可在小数据下对非线性、不确定系统数据序列进行预测。但是预测误差往往偏高，特别是当系统中出现了突变、切换、故障或大的扰动，对预测序列进行干扰，就会出现异常数据<sup>[9]</sup>。而神经网络具有强大的学习功能，能够对突变的数据进行学习，但需要大量的具有广泛代表性训练数据。红树林生态系统具有比较符合“整体平稳，偶有突变”的数据结构，因此，我们采用BP神经网络补偿的灰色预测模型,其流程见图4。



图 4: 神经网络修正的灰色残差预测模型流程图

## 5.2 求解过程

设数据序列 $x^{(0)}(i), i = 1, 2, \dots, n$ , 利用GM(1,1) 模型 $\frac{dx^{(1)}}{dt} = ax + b$ 对其进行拟合得 $\hat{x}^{(0)}, (i = 1, 2, \dots, n)$ , 则定义时刻L 的原始数据 $x^{(0)}(L)$  与GM(1,1)之差为时刻L的残差, 记为 $e^{(0)}(L) = x^{(0)}(L) - \hat{x}^{(0)}(L)$ 。

### (1) 建立残差序列 $e^{(0)}(L)$ 的BP网络模型

设 $e^{(0)}(L)$ 为残差序列, 若S为预测阶数, 则BP网络训练的输入样本为 $e^{(0)}(i-1), e^{(0)}(i-2), \dots, e^{(0)}(i-S)$ ,  $e^{(0)}(i)$ 为网络的对应输出样本, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

### (2) 确定BP神经网络修正残差的最终预测值 $\hat{x}^{(0)}(i, 1)$

用BP网络训练模型预测出残差序列为 $e^{(0)}(L)$ , 利用这一预测值构造所得预测值 $\hat{x}^{(0)}(i, 1) = \hat{x}^{(0)}(i) + \hat{e}^{(0)}(i)$ , 则 $\hat{x}^{(0)}(i, 1)$ 就是灰色BP神经网络组合模型的预测值。

## 5.3 求解结果

在本模型中, 鉴于生物多样性指数在PSR评价体系中占较大比重, 且历年数据均可计算 (计算结果见表8)。为此, 我们以大型底栖动物为例, 选取2002-2006年数据作为预测的参考序列, 对2007-2012年各指标进行预测, 并将结果与实际计算值进行比较。

表 8: 2005-2012年深圳福田潮带间大型底栖动物群落结构参数变化

年份	物种数	物种数密度指数	物种丰富度指数	生物多样性指数
2002	32	2.707	1.233	1.992
2003	30	2.065	1.649	1.538
2004	35	2.132	1.537	1.690
2005	39	2.802	1.124	1.372
2006	30	1.753	1.500	1.594
2007	32	1.250	1.623	1.998

2008	31	1.050	1.443	1.512
2009	26	0.790	1.500	1.549
2010	24	2.010	1.620	1.497
2011	47	0.930	2.000	2.012
2012	42	1.125	1.513	1.988

通过Matlab编程，我们得到了相应的预测值，将预测值与实际值进行绘图。

#### (1) 物种多样性指数（见图5）

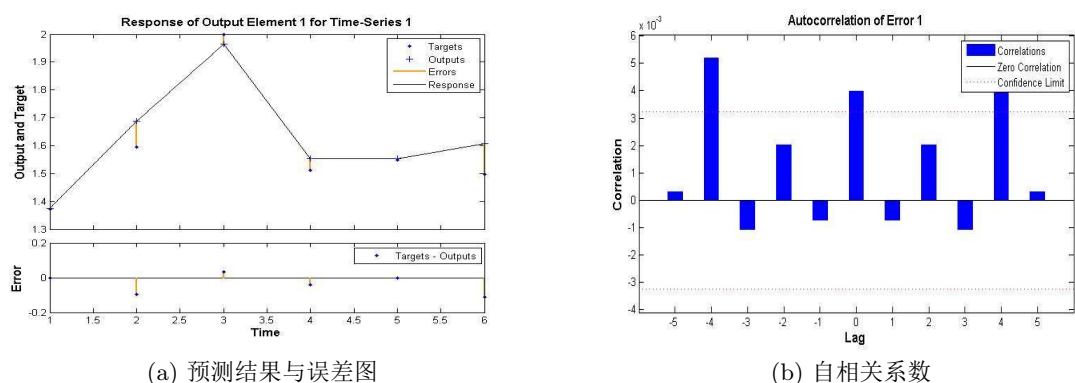


图 5: 物种多样性指数

我们发现自相关系数基本都处在置信区间内，预测结果比较准确。

#### (2) 丰富度指数（见图6）

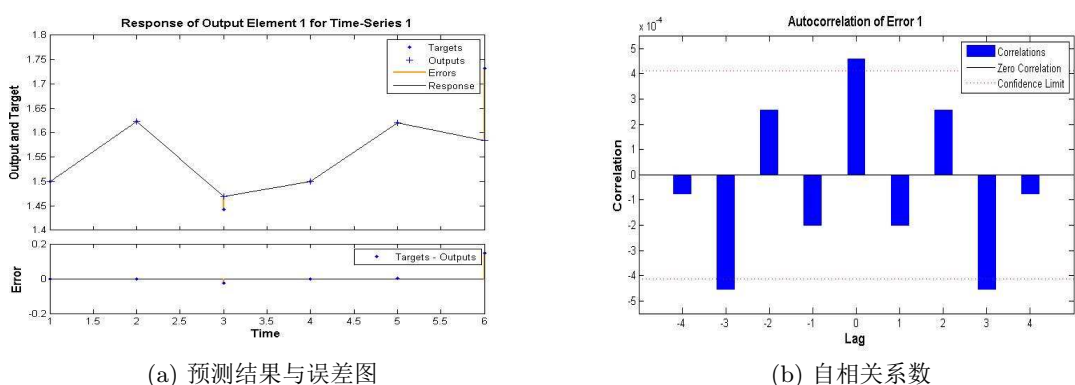


图 6: 丰富度指数

同样可以发现自相关系数基本处在置信区间内，表明预测结果较为准确。

### 5.4 对预测模型的准确性的进一步分析

根据灰色预测模型精度检验标准，本预测模型达到一级预测精度，预测结果具有较高的可信度，可为评估预警模型提供较为准确的数据基础。

表 9: 模型精度检验结果

$x(0)_{(L)}$ 方差 $S_1$	残差 $e_{(0)}$ 方差	后验差比值 $C$	小误差概率 $P$	绝对百分误差
32.1	27.54	0.0207	1	0.0250

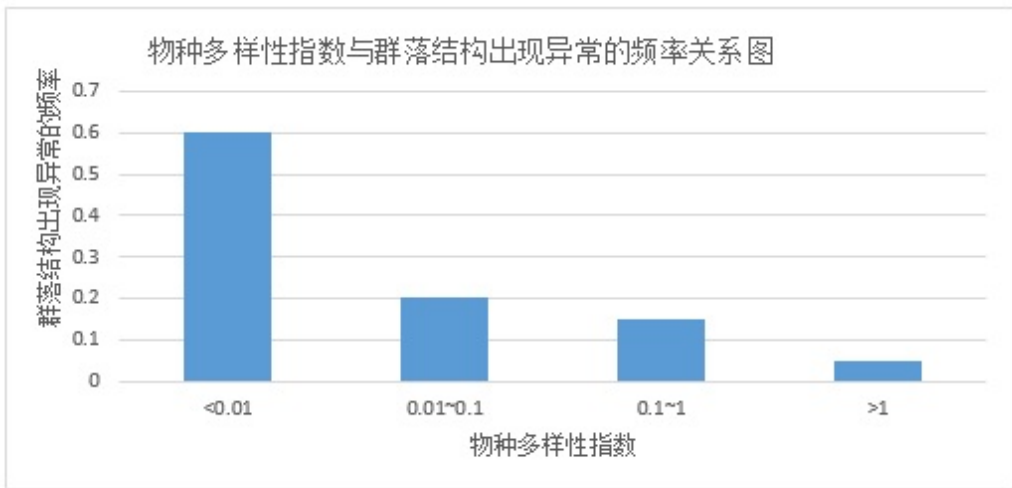
## 6 生态系统稳定性评价体系

PSR评价指标体系从生态系统健康的角度对红树林生态系统现状进行了评估。为了使预警评估的模型更加完善，我们另从生态系统稳定性的角度对红树林生态系统进行评估。在之前建立的描述子模型中，我们从生态系统群落结构、食物链关系、物质循环、能量流动四个方面对红树林生态系统进行了量化的描述。而生态系统稳定性评价体系则将对描述子模型中的数据做进一步分析，进而对生态系统的稳定性作出评价。下面我们将分别从生态系统的群落结构和能量流动两个方面分析生态系统的稳定性。

### 6.1 群落结构的稳定性

群落结构的稳定性与群落结构出现异常的概率密切相关。生态系统的群落结构越稳定，出现异常的概率就越小。因此，我们用群落结构出现异常的概率来衡量群落结构的稳定性。在描述模型中，群落结构采用了4个参数（物种数、物种多样性指数、物种丰富度指数、物种均匀度指数）来量化表示。因此，对群落结构的稳定性的判断也将在这4个参数入手。下面以物种多样性指数为例，对群落结构的稳定性的判定方法进行说明。由另外三个参数判定群落结构稳定性的判定方法与之相同。

- 第一步，建立数据库，把每年的物种多样性指数计入其中，并标注好每一年群落结构是否出现异常。
- 第二步，通过数据库，得到物种多样性指数与群落结构出现异常的频率关系图，如下图所示（该表格不是一成不变的，它将随着时间的增长而不断更新）。



注：以上图表仅仅是为了更好的说明模型，具体数值应根据实际情况确定。

图 7: 物种多样性指数

- 第三步，给定一个具体的物种多样性指数，根据以上表格，我们便能估计出该数值对应的生态系统出现异常状况的可能性大小。例如已知某年的物种多样性指数为0.08,则由以上表格可知该年群落结构出现异常的可能性为0.2。

## 6.2 能量流动的稳定性和

### 6.2.1 基于李雅普诺夫稳定性原理的生态系统稳定性评价体系

PSR评价指标体系从生态系统健康的角度对红树林生态系统现状进行了评估。为了使预警评估体系更加完善，我们另从生态系统稳定的角度来衡量红树林生态系统的现状。依托上文中大数据支撑平台模型的计算结果（碳循环通量和总能流状况），我们分别建立了能量流动与物质循环的分室模型和系统动力学方程。在此我们根据李雅普诺夫稳定性原理，对能量流动和物质循环的变化情况进行分析，并给出了能量流动和物质循环的趋稳能力的评价指标，从而确定了生态系统稳定性的评价指标。

**红树林生态系统能量流动的分室模型的建立** 将红树林生态系统的能量流动过程视作一个非线性系统，由于第四营养级及以上总能流过小，在本模型中予以忽略。基于EWE模型数据分析的结果，并根据系统分析学的原理<sup>[8]</sup>，将能量流动过程简化，形成福田红树林生态系统能量流动的分室模型（如图8所示）。

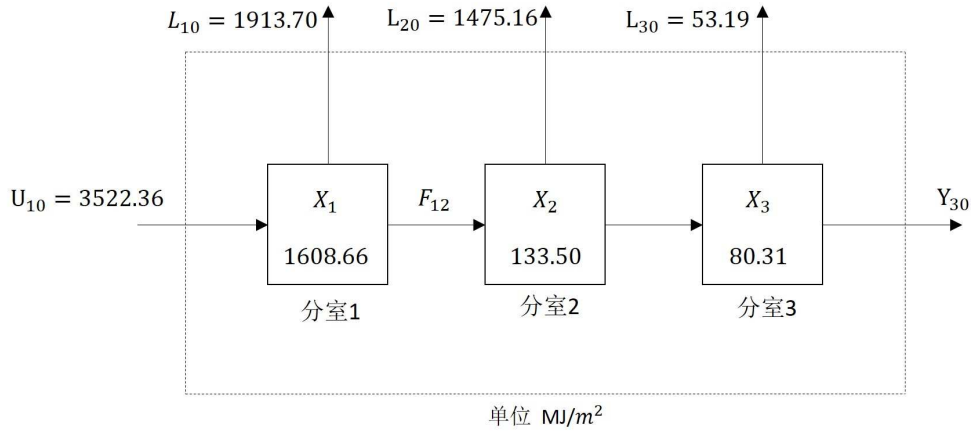


图 8: 生态系统的分室流动模型

其中：—→代表能量流动方向；……代表系统与环境之间的界线； $X_i$ 代表第*i*分室； $U_{0i}$ 为输入变量； $X_i$ 为状态变量； $Y_{0i}$ 为输出变量； $I_{0i}$ 为能量损耗量； $F_{ii}$ 为能量转移量；下标0表示外部环境；*i*代表第*i*营养级组分（ $i = 1, 2, 3, \dots$ ）。

根据图中的箭头方向，令第*i*个营养级定向流入下一个营养级的能量流动参数为 $a_i$ ，由第*i*个营养级流向环境的能量流动参数为 $b_i$ ，逐项计算参数：

$$a_1 = \frac{F_{12}}{X_1}; \quad a_2 = \frac{F_{23}}{X_2}; \quad a_3 = \frac{F_{30}}{X_3}$$

$$b_1 = \frac{L_{10}}{X_1}; \quad b_2 = \frac{L_{20}}{X_2}; \quad b_3 = \frac{L_{30}}{X_3}$$

引入矩阵表示的一阶常微分方程组，可得到一个连续时间定常的线性动态系统模型：

$$\begin{cases} \frac{dX(t)}{dt} = FX(t) + HU(t) \\ Y(t) = HX(t) \end{cases} \quad (14)$$

其中：输入向量 $U(t) = \begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ U_3(t) \end{bmatrix}$ ；状态向量 $X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}$ ；输出向量 $Y(t) = X(t)$ ；系数矩阵 $F = U(t) = \begin{bmatrix} -2.19 & 0 & 0 \\ 1 & -12.05 & 0 \\ 0 & 1 & -1.66 \end{bmatrix}$ ；单位矩阵 $H = U(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。将能量流动的参数值代入，即可构成福田红树林生态系统的一阶常微分方程组：

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \\ \frac{dx_3}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{01} - (a_1 + b_1)x_1 \\ a_1x_1 - (a_2 + b_2)x_2 \\ a_2x_2 - (a_3 + b_3)x_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

代入数据并化简得到：

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \\ \frac{dx_3}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3522.6 - 2.19x_1 \\ x_1 - 12.05x_2 \\ x_2 - 1.66x_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

**模型求解与指标建立** 红树林生态系统能量流动的平衡态，在数学上意味着变化率为0，即 $\frac{dx_i}{dt} = 0, (i = 1, 2, \dots, n)$ ，这表明系统的平衡态在一定时间内不依赖于时间t 的状态。若初始时刻 $t_0$ 的状态给定为 $X(t_0) = X_0$ ，则数学模型存在唯一解

$$X(t) = X(t)X^{-1}(0)(X_0 - X_e) + X_e \quad (17)$$

代入系统的初始值

$$X_0 = \begin{bmatrix} 1608.66 \\ 133.50 \\ 80.31 \end{bmatrix}$$

求得系统的平衡稳态解

$$X_{ei} = \begin{bmatrix} x_{e1} \\ x_{e2} \\ x_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1608.76 \\ 133.23 \\ 80.99 \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据系数矩阵F构造的特征方程为 $|F - \lambda H| = 0$ ，得到特征根

$$\lambda_i = \begin{bmatrix} -12.19 \\ -2.05 \\ -7.66 \end{bmatrix}$$

到此，我们可以看出方程的所有特征根均具有负实部。我们运用Matlab仿真给出了一段时间内 $X_i$ 的动态情况，如图9所示。



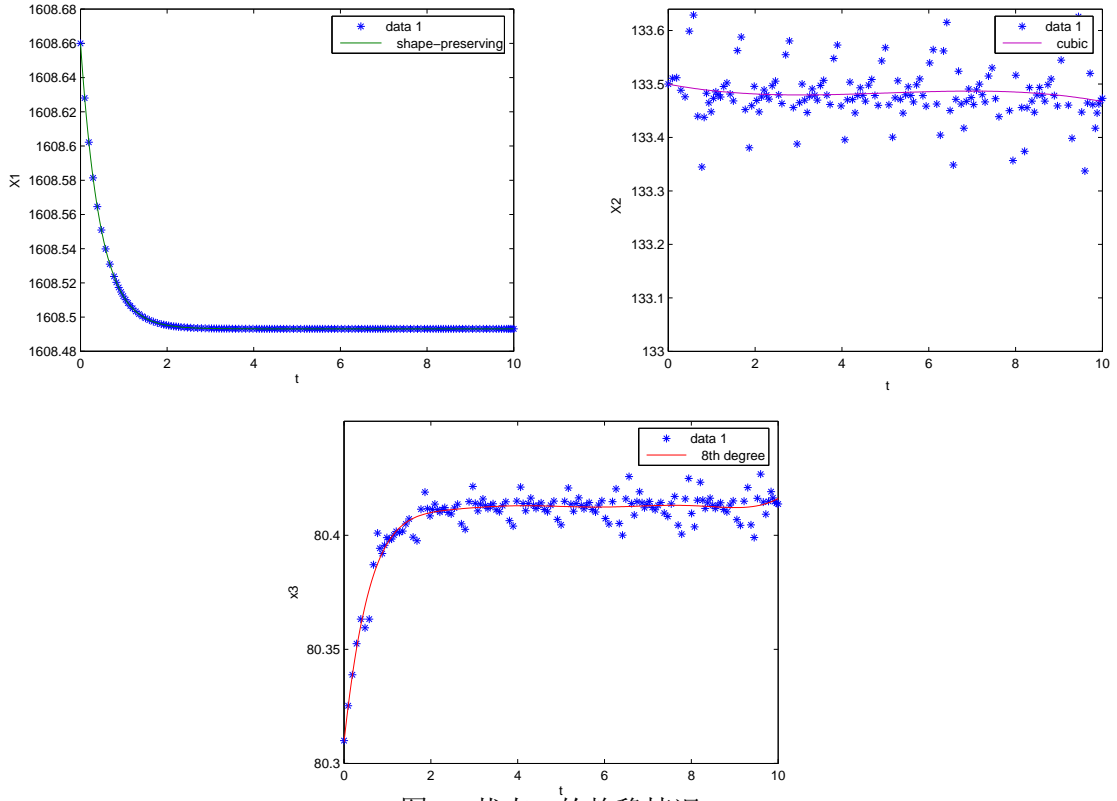


图 9: 状态 $x_i$ 的趋稳情况

通过观察可以发现，三个状态分量都正在逐渐收敛并趋于稳定，说明当前红树林正趋于平衡态发展。但明显可以看出，在收敛效果上 $X_1 > X_3 > X_2$ 。根据李亚普诺夫稳定性原理，该生态系统能量流动过程中的平衡态是渐近稳定的，这是由系统特征根的性质决定的。图中三个状态分量收敛效果与系数矩阵 $F$ 的特征根 $\lambda_1 > \lambda_3 > \lambda_2$  完全对应一致，理论与实际实现了高度统一。

据此，我们定义收敛系数 $\psi$ 作为衡量生态系统能量流动的趋稳能力，即

$$\psi = \sum_{i=1}^n \alpha_i |\lambda_i| \quad (19)$$

式中， $\alpha_i$ 代表第 $i$ 各状态分量所占的权重，即

$$\alpha_i = \frac{X_i}{\sum_{i=1}^n X_i}$$

这样，收敛系数的大小直接反映了系统趋稳能力的大小，所以可以作为生态系统的状态指标。从生态学意义角度来讲，福田湿地植被生态系统能量流动过程的平衡态受到了各种干扰因素的影响，但从曲线趋势和计算的结果来看，当前福田红树林系统具有抵抗干扰和保持系统平衡态的自我调节能力，确保了生物在系统内的正常活动。

## 7 基于PSR模型的福田红树林生态系统评价体系

### 7.1 福田红树林生态系统健康评价指标的选取

由于最终评价结果将分别就压力子系统、状态子系统、响应子系统分别得出 $DI_p$ 、

$DI_s$ 、 $DI_r$ ，并对三个子系统的结果进行合成，得出生态系统综合得分 $D$ ，因此需要使各子系统评价得分正向化，即得分越高，表明其状态越好<sup>[4]</sup>。每个子系统下又设置了若干个评价指标。健康指数、子系统与各个指标之间的关系如下图10所示。

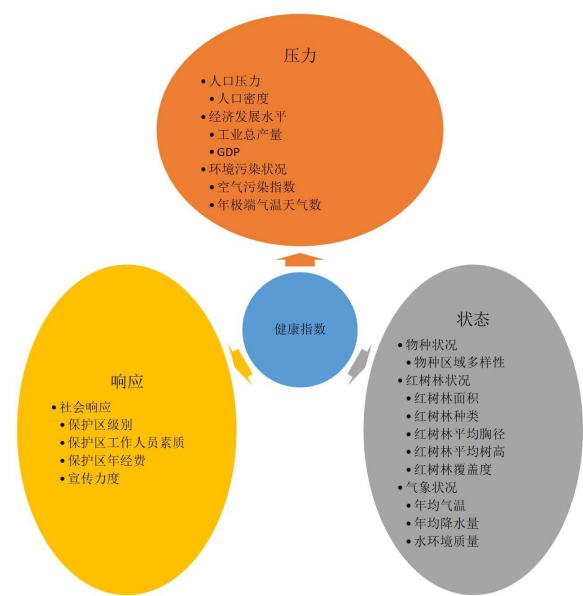


图 10: 健康指数、子系统与各个评价指标的关系

根据生态系统的综合得分 $D$ （百分制），将各红树林生态系统的健康状况划分为很健康、健康、亚健康以及不健康四个健康等级。等级的划分标准参考《中国红树林生态系统健康评价体系研究》<sup>[6]</sup>。

表 10: 红树林健康状况划分

得分	$D \geq 80$	$60 \leq D < 80$	$35 \leq D < 60$	$D < 35$
等级	很健康	健康	亚健康	不健康

由于指标体系中各指标的类型复杂，且不同指标的量纲不同，为使评价指标具有可比性和可度量性，需对各评价指标的原始数据进行标准化处理。处理后，每项指标对应着一个相应的评分值（0-1），评分值越高，说明红树林的健康状况越好。

### 7.1.1 压力子系统评价指标选取

**人口压力** 人口密度：根据《中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析》中的分级标准，可将中国划分为9个级别的人口密度类型区，见表11。

表 11: 人口密度类型区的划分标准

新级别	人口密度类型区	人口重心	人口密度值 (人/ $km^2$ )	人口 (万人)	人口比重 (%)	面积比重 (%)
1	集聚核心区	1,2	$> 1000$	23523	18.8	1.1
2	高度集聚区	3,4,5	501-1000	34143	27.3	5.4
3	中度集聚区	6	401-500	12457	10.0	3.0
4	低度集聚区	7,8	201-400	26102	20.9	9.7
5	一般过渡区	9,10	101-200	17751	14.2	13.0
6	相对稀疏区	11	51-100	6543	5.2	9.4

7	绝对稀疏区	12	26-50	2276	1.8	6.5
8	极端稀疏区	13,14,15	2-25	2099	1.7	30.9
9	无人区	16	0-1	93	0.1	21.0

显然，人口密度越高对生态系统的压力越大。据表11，人口密度与压力评价值的关系如下：

表 12: 人口密度与压力评价值

人口密度值 (人/ $km^2$ )	$\leq 1$	2- 25	26- 50	51- 100	101- 200	201- 400	401- 500	501- 1000	$> 1000$
评分	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1

## 经济发展水平

### • GDP

2014年上海市的GDP总量为23560.94亿元，均位居全国第一。在本文中，GDP 这项指标的评分计算方法为：

$$S_1 = 1 - \frac{0.4G}{G_0} \quad (20)$$

式中，G为2014年深圳市的GDP总量， $G_0$  为2014 年上海市的GDP 总量。

### • 工业总产值

据不完全统计，2014年1-10月深圳地区的工业总产值为5189.76 亿元，均位居全国第一。在本文中，工业总产值这项指标的评分计算方法为：

$$S_2 = 1 - \frac{0.4V}{V_0} \quad (21)$$

式中，V为深圳2014年1-10月的工业总产值， $V_0$  为上海2014 年1-10 月的工业总产值。

## 环境污染程度

### • 空气污染指数

空气污染指数（简称API）就是将常规监测的几种空气污染物浓度简化成为单一的概念性指数值形式，并分级表征空气污染程度和空气质量状况，适合于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势。空气污染的污染物有：烟尘、总悬浮颗粒物、可吸入悬浮颗粒物（浮尘）、二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳、臭氧、挥发性有机化合物等等。

空气污染指数关注的是吸入受到污染的空气以后几小时或几天内人体健康可能受到的影响。空气污染指数划分为0-50、51-100、101-150、151-200、201-300 和大于300六档，对应于空气质量的六个级别，指数越大，级别越高，说明污染越严重，对人体健康的影响也越明显。以下是空气污染指数与评分值对应表13：

表 13: 空气污染指数与评分值对应表

空气污染指数	$\leq 50$	51-100	101-150	151-200	201-300	$> 300$
评分	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0

### • 年极端温度天数

极端低温一般在-5℃以上。一般低温事件对于红树植物的生长和维护都会产生深远的影响，因此极端低温事件将会造成更大的危害。实验证实，红树植物幼苗阶段对低温特别敏感。海桑种子在30-35℃发芽最佳，幼苗在27.6-28.6℃时生长最好；红树胚轴在15℃中储藏2个月能种植成活和正常生长，在10℃中储藏1个月，顶芽开始变黑坏死；海莲胚轴在5℃中储藏15d全部死亡，在10℃中储藏1个月形态保持正常；秋茄胚轴在5-8℃中储藏1个月造林成活率为93.3%。

对气温阈值的确定可采用绝对值阈值法，即定义日最低气温低于5℃为极端温度日；并当年极端低温天数达到25天时，赋予其评分为0.2，没有发生极端温度事件时为1。

7.1.2 状态子系统评价指标选取

**红树林状况** 红树林的状况可以分为红树林面积、红树林覆盖度、红树林种类、红树林平均树高、红树林平均胸径五大指标。以特呈岛为例，下面是特呈岛红树林保护区相应的各项指标（见表14）。

表 14: 特呈岛红树林状态指标数值

指标	年均气温(℃)	盐度(psu)	溶解氧(mg/L)	PH	降水量(mL)
数值	23.2	17.9	6.76	7.88	1609
指标	红树面积(ha)	覆盖度(%)	红树种类	平均树高(m)	平均胸径(cm)
数值	44	87.3	7	2.87	10.34
指标	平均冠幅(m)	比例(%)	鱼类种数	鸟类种数	贝类种数
数值	8.73	18.3	127	110	192

表15是全国各个红树林保护区红树林状况各项指标的归一化值。对于待评价的红树林保护区的某项指标而言，选取其归一化值作为该项指标的评分。例如特呈岛的平均树高的评分为0.13。

表 15: 全国红树林评价状态指标归一化值

指标	年均	年均	红树林	覆盖	红树	平均	平均	鱼类	鸟类	贝类
地点	气温	降水量	面积	度	种类	树高	胸径	种数	种数	种数
东寨港	0.94	0.43	0.57	0.74	1.00	0.45	0.43	0.35	0.76	0.75
清澜港	0.97	0.61	1.00	0.68	0.69	0.49	0.59	0.41	0.00	0.00
北仑河	0.53	1.00	0.45	0.60	0.38	0.25	0.16	0.57	0.89	0.54
茅尾海	0.44	0.72	0.69	0.00	0.41	0.05	0.15	0.12	1.00	0.27
漳江口	0.22	0.44	0.47	0.28	0.09	0.01	0.01	1.00	0.96	0.72
九江口	0.17	0.20	0.14	0.33	0.19	0.02	0.03	0.42	0.907	0.57
泉州湾	0.00	0.00	0.31	0.38	0.00	0.00	0.00	0.26	0.88	0.39
福田	1.00	0.60	0.12	0.85	0.41	0.42	0.85	0.00	0.29	1.00
高桥	0.78	0.45	0.50	1.00	0.78	0.90	0.90	0.89	0.46	0.99
特呈	0.78	0.37	0.00	0.53	0.13	0.31	1.00	0.89	0.46	0.99
东南岛	0.78	0.37	0.21	0.68	0.53	0.28	0.19	0.89	0.46	0.99
太平	0.78	0.37	0.30	0.91	0.66	1.00	0.28	0.89	0.46	0.99
徐闻	0.81	0.19	0.25	0.27	0.47	0.37	0.16	0.89	0.46	0.99
惠东	0.44	0.22	0.14	0.18	0.44	0.20	0.11	0.58	0.25	0.16
香洲	0.53	0.67	0.24	0.85	0.66	0.87	0.43	0.61	0.41	0.33

**其他生物状况** 其他生物环境状况指保护区内除红树林植物以外其他生物的状况。在本文中，我们用物种多样性这一指标作为其衡量标准。

根据《区域生物多样性评价标准》中的分级标准，可将生物多样性划分为四个等级。如表16所示。

表 16: 生物多样性的分级标准

等级	指数	生物多样性状况
高	$BI \geq 60$	物种高度丰富，特有属种多，生态系统丰富多样
中	$30 \leq BI < 60$	物种较丰富，特有属种较多，局部地区生物多样性高度丰富
一般	$20 \leq BI < 30$	物种较少，特有属种不多，生物多样性总体水平一般
低	$BI < 20$	物种贫乏，特有属种多，生物多样性极低

其中，生物多样性指数由野生动物丰富度、野生维管束植物丰富度、物种特有性、受威胁物种的丰富度、外来物种入侵度五个值加权平均得到。具体计算方法如下。

### (一) 评价指标的计算

#### 1. 野生动物丰富度和野生维管束植物丰富度

野生动物丰富度和野生维管束植物丰富度分别用 $R_v$ 和 $R_p$ 表示，其值分别为野生动物的物种数和野生维管束植物的物种数。

#### 2. 物种特有性

物种特有性按下式计算：

$$E_D = \frac{\frac{N_{EV}}{635} + \frac{N_{EP}}{3662}}{2} \quad (22)$$

式中： $E_D$ 表示物种特有性；

$N_{EV}$ 表示被评价区域内中国特有的野生动物的种数；

$N_{EP}$ 表示被评价区域内中国特有的野生动物维管束植物的种数；

635表示一个县中野生动物种数的参考最大值；

3662表示一个县中野生维管束植物种数的参考最大值。

#### 3. 受威胁物种的丰富度

受威胁物种的丰富度按下式计算：

$$R_r = \frac{\frac{N_{rv}}{635} + \frac{N_{rp}}{3662}}{2} \quad (23)$$

式中： $R_r$ 表示受威胁物种的丰富度；

$N_{rv}$ 表示被评价区域内受威胁的野生动物的种数；

$N_{rp}$ 表示被评价区域内受威胁的野生维管束植物的种数。

#### 4. 外来入侵物种度

外来入侵物种包括外来入侵动物和外来入侵植物，外来入侵物种入侵度按下式计算：

$$E_i = \frac{N_i}{N_V + N_P} \quad (24)$$

式中： $E_i$ 表示外来物种入侵度；

$N_i$ 表示被评价区域内外来入侵物种数；

$N_V$ 表示被评价区域内野生动物的种数；

$N_P$ 表示被评价区域内野生维管束植物的种数。

(二) 评价指标的归一化处理 归一化后的评价指标=归一化前的评价指标×归一化系数。其中，归一化系数=  $\frac{100}{A_{max}}$ ， $A_{max}$  为被计算指标归一化处理前的最大值，各指标的参考最大值见表17。

表 17: 相关评价指标的参考最大值及权重

评价指标	参考最大值	权重
野生维管束植物丰富度	3662	0.25
野生动物丰富度	635	0.25
物种特有性	0.3070	0.25
受威胁物种的丰富度	0.1572	0.125
外来物种入侵度	0.1441	0.125

(三) 指标权重 各评价指标权重见表17。

(四) 生物多样性指数计算方法 生物多样性指数按下式计算

$$BI = R_v. \times 0.2 + R_P. \times 0.2 + D_E. \times 0.2 + E_D. \times 0.2 + R_r. \times 0.1 + (100 - E_I.) \times 0.1$$

式中：BI表示生物多样性指数；

$R_v.$  表示归一化后的野生动物丰富度；

$R_P.$  表示归一化后的野生维管束植物丰富度；

$D_E.$  表示归一化后的生态系统类型多样性；

$E_D.$  表示归一化后的物种特有性；

$R_r.$  表示归一化后的受威胁物种的丰富度；

$E_I.$  表示归一化后的外来物种入侵度。

### 环境状况

#### ● 水质质量

参考《基于T-S模糊神经网络的东滩湿地水域海水水质评价》中的分级标准<sup>[7]</sup>，可将生态区的水质分为5类，每一类的具体指标值如表18。

表 18: 海水水质评价标准

参数	I类	II类	III类	IV类
化学需氧量COD≤	2	3	4	5
无机氮N≤	0.2	0.3	0.4	0.5
汞Hg≤	0.00005	0.00005	0.0002	0.00005
镉Cd≤	0.001	0.005	0.01	0.01
铅Pd≤	0.001	0.005	0.01	0.05
砷As≤	0.02	0.03	0.05	0.05
铜Cu≤	0.005	0.01	0.05	0.05
锌Zn≤	0.02	0.05	0.1	0.5
挥发性酚≤	0.005	0.005	0.01	0.05
无机磷≤	0.015	0.03	0.03	0.045

#### ● 土壤质量

参考《上海市滩涂湿地土壤质量评价》中的评价标准，可以用养分质量这一指标来对土壤质量进行评估。

选取土壤pH 值、有机质、总氮、总磷、总碳5 个因子作为评价指标，模糊隶属度函数模型作为评价方法。为避免人为主观影响，采用相关系数法确定评价因子的权重。

由于评价指标之间缺乏可比性，因此利用隶属度函数进行归一化处理。结合前人研究成果，确定戒上型隶属度函数作为土壤有机质、总氮、总磷、总碳的隶属度函数，其函数为 $I(x)$ ：

$$I(x) = \begin{cases} 1.0, & X \geq X_2; \\ \frac{0.9(X - X_1)}{X_2 - X_1}, & X_1 \leq X < X_2; \\ 0.1, & X < X_1. \end{cases} \quad (25)$$

结合研究区实际情况，参照全国土壤养分分级标准<sup>[2]</sup>，确定土壤有机质、全氮、全磷、全碳的转折点 $X_1$ 、 $X_2$ 的值。各指标隶属度函数转折点 $X_1$ 、 $X_2$ 取值见表19。

表 19: 土壤养分各项指标值隶属度曲线转折点取值

评价指标	有机质(g/kg)	总氮(g/kg)	总磷(g/kg)	总碳(g/kg)
$X_1$	6	0.5	0.4	10
$X_2$	40	2.0	2.0	50

考虑到pH 指标值对土壤功能（如生产力）有一个最佳适宜范围。因此，选取抛物线型隶属函数作为深圳土壤pH 值的隶属度函数，其表达式为

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & b_1 \leq x \leq b_2 \\ \frac{x - a_1}{b_1 - b_2}, & a < x < b \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - b_2}, & b_2 < x < a_2 \\ 0, & x < a_1 \text{ 或 } x > a_2 \end{cases} \quad (26)$$

式中，pH 值评价模型中 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 取值参照上海市绿化土壤质量标准<sup>[3]</sup>，分别取值为4.5、8.5、6.5、7.8。土壤养分综合指标值运算表达式为

$$IFI = \sum W_i \times I_i \quad (27)$$

式中，IFI 为土壤养分综合指标值，取值为0 1 之间，其值越高，表明土壤养分质量越好； $W_i$ 、 $I_i$  分别表示评价指标权重值和隶属度值。

其中，各评价因子的权重系数 $W_i$ 由相关系数法确定，各评价因子之间的相关系数通过SPSS19.0分析得出，进一步计算各评价指标间相关系数的均值占有所有指标相关系数均值总和的比重，即得出各评价指标权重值，如表20所示。

表 20: 各评价指标的相关系数平均值和权重系数

评价指标	相关系数平均数 ( $r_{ea}$ )	权重系数 ( $r_{ea} / \sum r_{ea}$ )
pH值	0.6556	0.2355
总氮	0.6148	0.2208
总磷	0.5046	0.1813
总碳	0.6642	0.2385
有机质	0.3448	0.1239

由于土壤养分指数IFI为0到1之间的一个数，因此可以直接采用IFI 作为土壤质量的评分值。

### 7.1.3 响应子系统评价指标选取

- 保护区级别

根据国家自然保护区类型与级别划分原则，我们设置了三个等级：

表 21: 保护区级别评价标准

保护区级别	国家级	省级	市县级
分值	1	0.6	0.2

- 保护区人员素质

保护区人员素质反映了对重要生境资源的管理水平。将评价指标量化：

表 22: 保护区人员素质评价标准

人员学历	大学以上	高中	初中及以下
分值	1	0.7	0.3

- 保护区年经费

设保护区年经费为T，则 $T = M \times N$ ，式中M代表编制内人数，N 代表人均年补助标准。

表 23: 保护区年经费评价标准

保护区年补助标准（万元）	200以上	50-200	50以下
分值	1	0.65	0.2

- 宣传力度

1. 面向公众宣传保护区相关知识的书刊、声像、图片资料种类丰富，发放或使用面广；作为教学实习基地、爱国主义教育基地和社区环境教育、技术培训基地，社会影响很好。（隶属度：1）
2. 在宣传和社区教育培训上开展了相关工作，宣传教育活动具有一定的参与社会影响并得到有效的回应，能够改善当地居民对保护区工作的认识。（隶属度：0.7）
3. 未开展社区环境教育和技术培训，或宣传教育社会影响有限，未达到实际期望效果。（隶属度：0.4）
4. 仅有少部分宣传工作，无明显社会影响（隶属度：0.1）

## 7.2 各项指标权重的确定

本文采用层次分析法对各项指标的权重进行赋值。用yaahp 软件计算出各项指标权重的最终结果如表24所示。

## 7.3 基于PSR模型的福田红树林生态系统健康评价结果

### 7.3.1 压力子系统评价结果

**人口密度** 根据2013深圳统计年鉴，深圳人口密度为5282人/ $km^2$  为，远远超过评价标准中的人口密度最大阈值，故其评分为0.1。



表 24: 生态系统健康评价指标

准则层	因素层	指标层	权重
压力 0.2297	人口压力 0.0459	人口密度	0.0459
	经济发展水平 0.0460	工业总产量	0.0230
		GDP	0.0230
	环境污染状况 0.169	空气污染指数	0.1033
		年极端气温天数	0.0344
	物种状况 0.1616	区域物种多样性	0.1616
状态 0.6483	红树林状况 0.3882	红树林面积	0.0520
		红树林的种类	0.1489
		红树林的平均胸径	0.0487
		红树林的平均树高	0.0480
		红树林的覆盖度	0.0906
	气象状况 0.1050	年均气温	0.0204
年均降水量		0.0204	
水环境质量		0.0611	
响应 0.1220	社会响应 0.1220	保护区级别	0.0642
		保护区人员素质	0.0145
		保护区年经费	0.0312
		宣传力度	0.0122

### 经济发展水平

- GDP

根据新浪网新闻报道，2014年深圳市GDP总量为16001.98亿元，故其GDP 项的评分为 $S_1 = 1 - 0.4 \times 16001.98 \div 23560.94 = 0.7284$ 。

- 工业总产值

由于深圳市2014年1-10月的工业总产值为全国第一，故该项评分 $S_2 = 1 - 0.4 = 0.6$ 。

### 环境污染状况

- 空气污染指数

根据环保部发布的《2014年全国重点城市空气污染指数排行榜》，2014 年深圳市的空气污染指数的平均值为33，故其“空气污染指数”这一指标的评分为1。

- 年终极端气温天数

根据2013深圳市气候公报，深圳国家基本气象站观测到全年极端最高气温35.1℃，出现在8月12日；高温（最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ ）天数1 天；全年极端最低气温6.7℃，出现在12月19 日；低温（最低气温 $\leq 5^\circ\text{C}$ ）日数0 天。根据评价标准，该指标评分为1。

### 7.3.2 状态子系统评价结果

**红树林状况** 据表14，福田红树林的红树林面积、红树林种类、红树林平均高度、红树林平均胸径、红树林覆盖度归一化后的值分别为0.12、0.41、0.42、0.85、0.85。故其相应指标的评分为0.12、0.41、0.42、0.85、0.85。

**区域物种多样性** 根据题目中给定的资料，经计算得到野生维管束植物丰富度、野生动物丰富度、物种特有性、受威胁物种的丰富度、外来物种入侵度五项指标的值分别为83.41、85.21、89.93、97.04、90.31。故 $B_i$ 的值为：

$$B_i = 0.25 \times 83.41 + 0.25 \times 85.21 + 0.25 \times 89.93 + 0.125 \times 97.04 + 0.125 \times 90.31 = 88.07$$

因此区域物种多样性指标的评分为0.8807。

### 环境状况

#### ● 水质质量

附件二中提供的资料表明，2012年福田红树林湿地水域四个监测点铅、镍均未检出。铬除沙嘴码头低潮期含量属于Ⅱ类水质外，其余站位均属于Ⅰ类水质。镉除观鸟亭低潮期含量属于Ⅱ类水质外，其余站位均属于Ⅰ类水质。2011年和2010年福田红树林湿地水域各监测点重金属含量较低，数值大多低于检测限，符合地表水Ⅰ类水质标准。故该项指标评分为1。

#### ● 土壤质量

由文献《深圳福田自然保护区红树林土壤的化学特征》中的相关数据，得到深圳福田自然保护区红树林土壤的pH值、总N、总P、总有机质四个指标的平均值分别为7.26、2.11g/kg、1.26g/kg、46.72g/kg。由于土壤含碳量的资料未知，故暂时用一个较为合理的数值40g/kg带入相应的函数来计算其评分。因此，土壤质量的评分值为：

表 25: 各评价指标的相关系数平均值和权重系数

指标	权值	指标平均值	评分值	评分值× 权值
pH值	0.2355	7.26	1	0.2355
总氮(g/kg)	0.2208	2.11	1	0.2208
总磷(g/kg)	0.1813	1.26	0.4838	0.0877
总有机质(g/kg)	0.1239	46.72	1	0.1239
总碳(g/kg)	0.2385	40	0.675	0.1610

$$0.2355 + 0.2208 + 0.0877 + 0.1239 + 0.1610 = 0.8289。$$

### 7.3.3 响应子系统评价结果

**保护区级别** 福田红树林保护区的级别为国家级，根据评分标准该项指标评分为1。

**保护区人员素质、宣传力度** 由于目前这两项指标没有十分准确的数据资料供分析。参考文献《中国红树林生态系统健康评价体系研究》中的评价，福田红树林的保护区人员素质、宣传力度两项指标评分均为1。

**保护区年经费** 根据《中国红树林生态系统健康评价体系研究》中提供的资料，福田红树林的保护区年经费为1250万。根据评分标准，该项指标得分为1。

**综合评价** 将三个子系统里面的各项得分输入yaahp软件进行分析，结果如图11所示。

评分再计算				得分	
要素	权重	得分			
人口密度	0.0459	0.1			
区域物种多样性	0.1616	0.8807			
保护区级别	0.0642	1			
保护区人员素质	0.0145	1			
保护区年经费	0.0312	1			
宣传力度	0.0122	1			
G D P	0.0153	0.7284			
工业总产值	0.0306	0.6			
空气污染指数	0.1033	1			
年极端气温天数	0.0344	1			
红树林面积	0.0520	0.12			
红树林的种类	0.1489	0.41			
红树林平均树高	0.0480	0.42			
红树林平均胸径	0.0453	0.85			
红树林覆盖度	0.0906	0.85			
水质质量	0.0509	1			
土壤质量	0.0509	0.8289			

图 11: 评价结果

换算成百分制后，福田区红树林生态系统的最终得分为73.24。根据分类标准可将其划分到第二等级“健康”一类。

## 8 一体化生态系统模型总框架

### 8.1 框架图

在描述模型、预测模型、评价模型建立完成后，我们提出了生态系统模型的总体框架。生态系统动态监测、健康评估及预警科学管理支撑体系也将在此框架的基础上发展和完善。具体框架如下图所示。

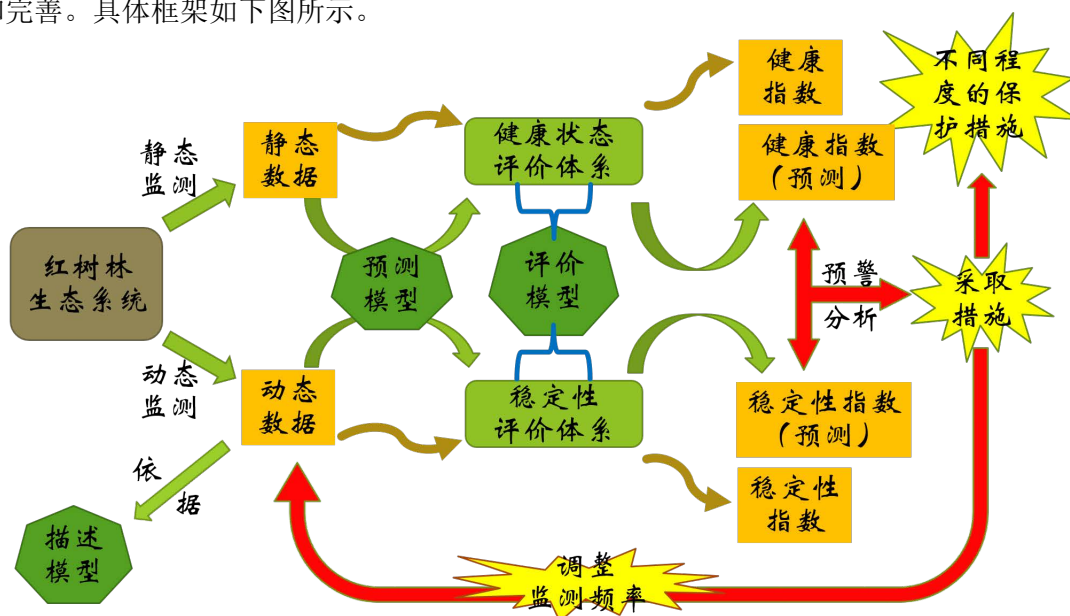


图 12: 框架图

## 8.2 对于框架的几点说明

- 关于监测方案

监测分为动态监测和静态监测。静态监测的指标为健康状态评价体系中的各项指标，如人口密度、保护区级别等。而动态监测的指标则为稳定性评价中的各项指标，如种群数量、能量流动量等。静态监测的频率是固定的，比如一年一次。而动态监测的频率则不是固定的，会根据预警分析的结果做出相应调整。

- 关于健康评价

评价模型由健康状态评价体系和稳定性评价体系组成。两种评价体系各具特色，互为补充。健康状态评价体系主要从当前人类对生态系统施加的压力、生态系统的状态、人类对环保的响应三个方面对生态系统目前的健康状况做出综合评价。而稳定性评价体系则与动态监测结合，评价结果更多的反映了生态系统的稳定性。

- 关于预警分析

预警分析在大数据分析平台上进行。该平台记录了不同时期生态系统的健康指数、稳定性指数以及生态系统出现异常状况的次数。而分析方法是采用神经网络建立生态系统的两类指数与生态系统出现异常状况的次数的相关关系。这样，当我们给定某一时期生态系统的静态数据和动态数据后，通过预测模型可以得到这两类数据的预测值。将预测值带入评价模型，便可得到健康指数和稳定性指数的预测值。于是，再利用大数据分析平台就可以估计出未来几年生态系统出现异常状况的次数。根据次数的多少采取相应的措施。

## 9 对外来物种入侵问题的分析

查阅相关资料发现，部分专家认为外来物种无瓣海桑的入侵对红树林物种的生存带来了极为不利的影响。为此，我们选取这一问题作为我们所研究的问题。

### 9.1 对象的选取与资料的搜集

选取11年无瓣海桑为外来物种无瓣海桑的代表，66年秋茄和11 年秋茄为红树林物种的代表，由附件二<sup>[10]</sup>中所给的三个物种2005 年-2012年的月凋落物均值变化趋势，可分别得出三个物种在这段时间的数量变化趋势。如图13-15所示。

年份\月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2005	145	97.5	107.5	197.5	472.5	122.5	162.5	337.5	345	935	370	90
2006	85	102.5	110	395	540	365	235	295	557.5	377.5	302.5	137.5
2007	42.5	50	55	222.5	627.5	382.5	162.5	257.5	777.5	757.5	375	95
2008	40	332.5	270	372.5	530	332.5	162.5	392.5	385	315	125	67.5
2009	82.5	92.5	107.5	440	235	690	235	317.5	262.5	397.5	340	77.5
2010	60	77.5	162.5	177.5	635	637.5	360	232.5	85	497.5	322.5	115
2011	55	72.5	87.5	205	745	610	400	180	297.5	162.5	87.5	55
2012	45	75	82.5	372.5	575	485	140	262.5	155	85	67.5	67.5

图 13: 11年无瓣海桑数量随时间变化趋势

年份\月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2005	60	172	262	426	206	70	82	70	86	60	34	34
2006	54	76	136	244	98	52	114	176	60	66	74	42
2007	54	62	264	350	164	124	82	54	84	90	36	40
2008	24	32	92	298	176	92	84	164	44	52	44	44
2009	0	0	0	724	238	68	216	62	176	44	32	28
2010	30	46	134	288	248	40	80	134	90	104	54	56
2011	36	44	100	370	370	82	120	104	120	52	40	34
2012	26	50	96	156	90	68	240	296	54	58	40	46

图 14: 66年秋茄数量随时间变化趋势

年份\月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2005	170	300	557.5	407.5	255	315	355	250	210	255	122.5	95
2006	247.5	120	285	372.5	295	97.5	232.5	252.5	222.5	217.5	167.5	142.5
2007	155	275	455	285	222.5	185	305	287.5	330	240	85	105
2008	87.5	92.5	82.5	420	247.5	387.5	200	220	90	142.5	122.5	127.5
2009	172.5	240	495	922.5	207.5	142.5	75	165	67.5	142.5	122.5	80
2010	90	182.5	455	295	182.5	87.5	302.5	275	100	225	125	100
2011	77.5	97.5	142.5	250	242.5	177.5	160	240	227.5	142.5	122.5	95
2012	82.5	122.5	312.5	340	250	137.5	60	135	170	122.5	82.5	142.5

图 15: 11年秋茄数量随时间变化趋势

图中的数字为该物种对应的年份和月份的月凋落物均值（单位:g）；而颜色则反映了其数量变化的趋势：绿色程度越深物种数量越多，红色程度越深物种数量越少。

## 9.2 数据分析

由以上数据可反映出，在一年中，三者数量的峰值分别出现在5月、4月、4月。而对应的物种数量可很好的反映该物种这一年的规模的大小。从而，我们可以得到三个物种的规模随年份的变化情况。如图15所示。图中纵坐标的数据经过了归一化处理，从而能更好地将三者的变化情况作一个对比。

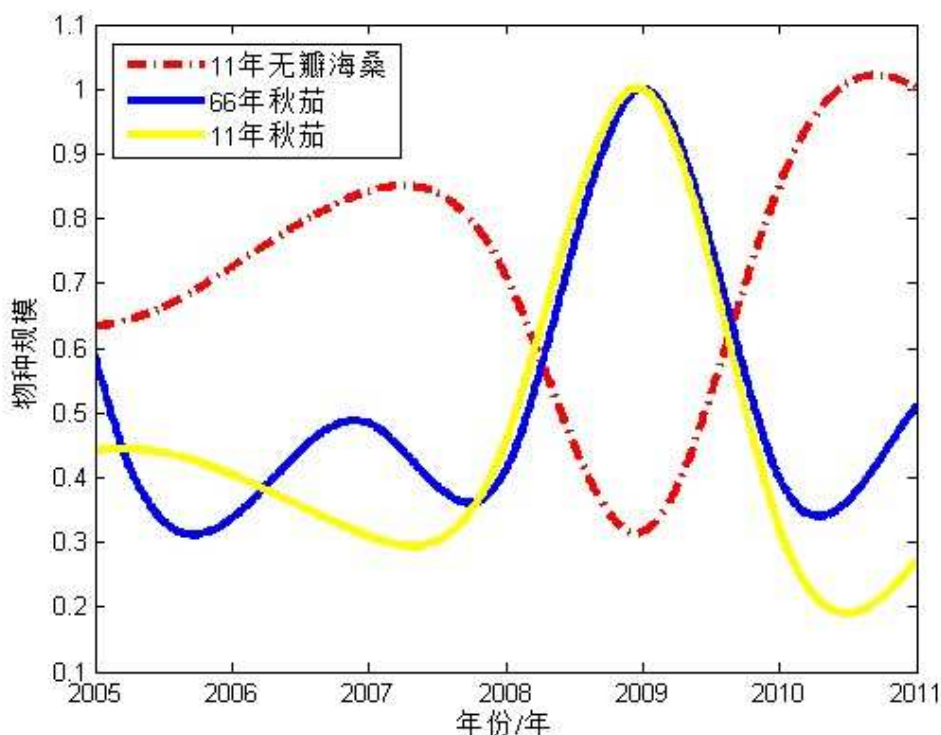


图 16: 11年无瓣海桑、66年秋茄、11年秋茄规模随年份的变化对比图

从图中可以明显看出无瓣海桑的与秋茄存在明显的竞争关系。并且三者的竞争可分为两个阶段。

- 初期：无瓣海桑刚刚引入红树林生态系统的时候，数量一直保持增长，而秋茄则在这个时期数量下降。
- 稳定期：2007年以后，无瓣海桑的数量不再是一直增加，而是随年份而波动，并且与秋茄的数量波动存在明显的关联。在这个阶段，当海桑数量增加的时候，秋茄的数量减少；当秋茄的数量增加时，海桑的数量减少。而从总的趋势来看，两个物种在数量上保持着一个动态平衡的关系。



### 9.3 预测与结论

基于历史数据，我们运用神经网络辅助灰色预测模型的方法对未来三年这三个物种的种群规模进行了预测。预测结果如图17所示。

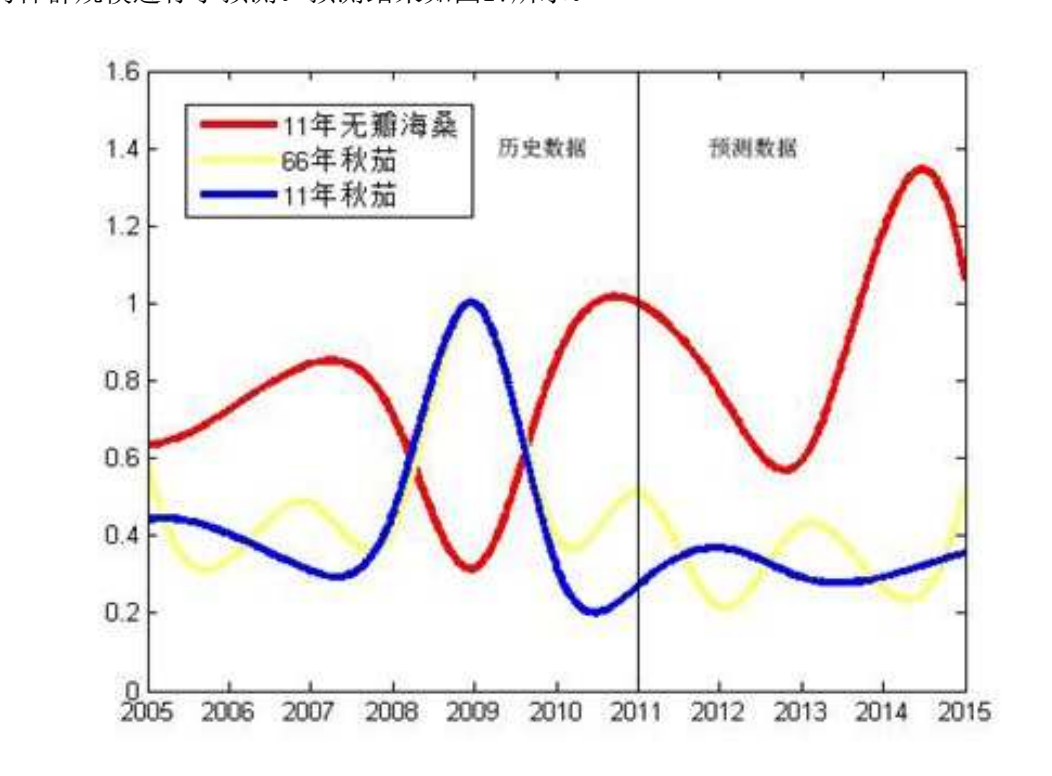


图 17: 11年无瓣海桑、66年秋茄、11年秋茄规模随年份的预测对比图

对比2011年和2015年的三个物种规模，我们不难发现，2015 年的物种规模较2011 年无明显变化。据此，我们可以得出结论：从数量变化的角度分析，就当下的环境条件而言，在无瓣海桑和秋茄的竞争中，不存在明显的优势方，即无瓣海桑的引入暂时没有对秋茄构成明显的威胁。因此，在今后的时间中，无瓣海桑和秋茄的数量将一直保持着动态平衡的关系。但我们不能排除当环境条件发生改变的时候，一方会成为优势方，二者的相对平衡被打破这一情况。

### 9.4 启示与建议

这一结论带给我们的启示是：在引入外来物种后，如果生长条件对外来物种有利，那么在初期外来物种规模会迅速扩大，从而导致本地物种数量现减少。如果扩大和减小的趋势在很长的一段时间内没有任何改变，反而愈演愈烈的话，则说明外来物种的引入对本地物种的生长构成了严重的威胁。此时应该采取必要的措施，比如改变环境条件、清除外来物种，以保护本地物种的生存。如果在某个阶段，扩大和减小的趋势得到了改变，两个物种的数量形成了动态平衡的关系，则说明外来物种与当前的生态环境相互协调。在环境条件不发生改变的前提下，这种外来物种的引入对本地生态系统是不会造成破坏的。

我们的建议是：当一个外来物种引入一个生态系统时，应当及时去统计该外来物种的数量和生态系统中其他物种的数量，并用神经网络辅助灰色预测模型的方法预测短期内物种数量的动态变化情况。将本地物种和外来物种的情况进行对比。如果二者的数量

关系形成了动态平衡,则不需要人工的干预来保护本地物种。但若外来物种的数量持续增长,本地物种数量持续减小的话,则应该采取必要的保护措施,如改变环境条件以抑制外来物种的生长或者促进本地物种的生长,或者直接清除外来物种。

## 10 模型的优缺点分析

### 10.1 模型优点

- 我们建立的预测模型将神经网络算法与灰色模型算法很好的结合了起来,弥补了单独用某一算法对数据进行预测时的不足,提高了预测精度。
- 根据分析问题的数据需求,建模过程中对附件2中的图进行了大量挖掘,用PS中的工具提取出了图中关键点的纵坐标值,并用这些数值得到了全新的结论
- 评价模型中各个指标的评判标准的选定均能够在相关文献中找到依据,而不是主观凭空判定,符合科学精神。

### 10.2 模型缺点

- 由于数据的搜集难度过高,部分模型求解所需要的数据无法获得,导致了某些理论模型无法求得具体的结果。
- 只考虑了外来物种的引入对本地物种产生影响,而没有考虑对当地的生态环境产生的影响。故结果与实际情况存在一定偏差。

## 11 参考文献

- [1]万峰. 食物链动力学分析[J]. 江西科学,2002,03:128-130.
- [2]张文菊,童成立,吴金水,徐明岗,宋长春. 典型湿地生态系统碳循环模拟与预测[J]. 环境科学,2007,09:1905-1911.
- [3]丑庆川,徐华林,刘军,史秀华. 福田红树林湿地生态系统EWE模型构建[J]. 生态学杂志,2014,05:1413-1419.
- [4]王玉图,王友绍,李楠,林立,宋晖,孙翠慈,吴梅林,崔海平. 基于PSR模型的红树林生态系统健康评价体系——以广东省为例[J]. 生态科学,2010,03:234-241.
- [5]吴春笃,石驰,张波,王万俊. 北固山湿地AHP方法生态评价[J]. 人民长江,2007,01:78-80.
- [6]谭娟,王卿,黄沈发,王敏,沙晨燕. 上海市滩涂湿地土壤质量评价[J]. 广东农业科学,2012,23:163-167.
- [7]王玉图.中国红树林生态系统健康评价体系研究[D]. 北京;中国科学院研究生院,2010.
- [8] 樊爱军,王开发. 生态网络中能量流动的分室模型分析[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版),1999,01:53-57.
- [9] 闫建波. 基于BP神经网络的灰色预测模型[D]. 西安;西安理工大学,2009.
- [10] 李玫,廖宝文. 无瓣海桑的引种及生态影响[J]. 防护林科技,2008,03:100-102.