

福田红树林自然保护区湿地生态系统模型框架的构建 及应用实例研究¹

葛皓月¹ 林艺璇¹ 刘一杉¹

指导教师：数模教练组^{1,2}

1. 复旦大学数学科学学院，上海 200433

2. 上海市现代应用数学重点实验室，上海 200433

摘要

本文研究了自然环境和人类社会活动对生态系统的影响，考虑了各种生物之间的相互关系，将生物量、生物分布的面积等作为主要指标来衡量生态系统是否稳定，建立了一系列常微分方程组，对生态系统的变化情况进行了描述。

对于每一个方程组，通过解析解进行理论分析，得到了方程组稳定的参数条件，借助于 MATLAB 作图直观地展现了生物系统的变化趋势，得到了对于保护区生物生产力方面的评价方式。在此基础上，利用 PSR 模型建立了评价体系，其中压力指标用以表征造成不可持续发展的人类活动和消费模式或经济系统，状态指标用以表征可持续发展过程中的系统状态，响应指标用以表征人类为促进可持续发展进程所采取的对策。同时，通过资料查阅找到部分参数，代入红树林面积变化模型进行数值模拟，结果表明在维持现有环境的条件下，福田红树林自然保护区内红树林有退化以及幼化的可能。

由于目前红树林面临的主要问题之一是严重的有机污染物污染，因而利用偏微分方程对红树林附近海域生活污水的传播情况进行了研究，提出了关于污水排放的建议。

最后，对福田红树林自然保护区未来的工作提出一些建议：增加对温度、大气、噪声等影响红树林生态的因素的定时监测，在深广高速靠近保护区一侧加装噪声隔离装置等。根据不同参数对模型的影响可看出，若要更好地发展保护区，不仅需要适当地人工造林，在增加现有红树林面积的同时，停止红树林周边的填海造陆活动，减缓深圳河河口的泥沙淤积速度，从而保障红树林自身的生存空间，而且需要在生活污水的治理上再接再厉，以保证保护区生态的健康发展。

关键词：红树林生态系统；常微分方程组；PSR 模型

¹本文得到国家基础科学人才培养基金的资助，项目号：J1103105

一、 问题的重述

湿地具有净化水源、蓄洪抗旱的作用。它兼有水域和陆地生态系统的特点，具有极其特殊的生态功能，是地球上最重要的生命支持系统。福田保护区因其面积小、湿地生态系统的生态健康更加脆弱等特点，迫切需要构建湿地动态监测、生态健康评估及预警系统，以此来完善保护和管理工作。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)，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，保护区准备用三到五年的时间完成保护管理数字化支撑平台建设，构建新型的生态系统动态监测、健康评估及预警科学管理支撑体系是重要的工作内容，为福田红树林湿地构建一体化生态系统模型框架、对生态发展趋势进行预测分析、为生态系统动态监测提供大数据管理支撑平台，以及为生态系统健康评估及预警提供动态模拟分析支撑平台，是本模型的重要目标。

二、 问题的分析

1. 一体化生态系统模型框架的建立

由于在红树林由动物和植物构成，我们考虑采用生物模型，主要依据生物之间的捕食和依存关系以及生物生存的一般规律建立微分方程组，构建一体化的生态系统模型框架。

2. 对生态发展趋势进行预测分析

根据所建立的微分方程组模型的结果，结合生物学中的相关定义，依靠已给出的数据得到监测量与被监测量之间的对应关系，并适当的给出一些预测。

通过监测数据确定参数的具体取值，为大数据管理支撑平台、生态系统健康评估及预警提供动态模拟分析。

3. 为生态系统的动态监测提供大数据管理支撑平台

通过微分方程组和 PSR 模型，找到红树林中各个种群的变化发展与人类活动、自然因素等方面的关系，从而根据这种关系给出需要重点监测的变量以及监测方案。

4. 为生态系统健康评估及预警提供动态模拟分析支撑平台

红树林由于内部物种不多，自身比较敏感，加上人类活动频繁，是一个很脆弱的体系，但是它又与海陆相连接，物质交换频繁。红树林作为湿地的同时它也算是森林的一种，我们从两方面来考虑。

根据资料看出，红树林的维持取决于水文、地形、地貌特征，而人类活动的影响主要有大面积的围垦、强度捕捞、严重的氮、磷污染。

我们主要选择从构成红树林湿地的红树植物群落和生境等生态要素，和人为扰动要素来做健康评价。同时结合 PSR 模型，给出一个初步的评价方案。

三、 基本假设与约定

基本假设：

1. 红树林不遭受低温、地震等大规模不可抗力的影响。
2. 不考虑同类型不同物种之间的竞争作用。
3. 红树林中各年龄段的树木分布均匀。
4. 在红树林及其周边的土壤滩涂环境中，植物所需的营养元素供应较为充足。

5. 滩涂植物利用碳氮的比例相同。

符号约定:

P : 浮游植物生物量;

N : 无机溶解氮;

μ_P : 浮游植物生长率;

μ : 比例系数;

K_N : 氮的浮游植物生长半饱和浓度;

I_m : 总的无机氮负荷;

f_m : 采食损失以 DIN 形式在水中循环的比例, 自然死亡损失的但全部落入泥沙之中;

m_P : 浮游植物自然死亡率;

Z : 捕食浮游生物的生物量;

e : 河口游泳生物总的生长效率;

m_Z : 河口游泳生物死亡参数;

f_g : 河口游泳生物死亡损失中以 DIN 形式在水体中循环的部分, 自然死亡损失的全部落入泥沙之中;

G : 单位生物量的河口游泳生物吃掉的浮游植物的生物量;

W : 滩涂植物的生物总量;

C : 植物中的碳的含量;

NP : 植物中氮含量;

r : 植物干组织中所含的碳的能量转化为植物能量的转换系数;

R_1 : 结合能在总能量中所占的比例;

R_2 : 单位时间内植物光合作用形成的碳与植物的表面积的比的比例系数;

R_3 : 植物吸收的氮与植物生物量的比例系数;

m_w : 植物被采食的比例;

λ : 转变能量消耗的氮与碳之间的比例系数;

ρ : 计算中得到的常数;

α, β : 碳和氮的消耗速率;

S : 红树林总面积;

S_1 : 红树林成熟林区面积;

S_2 : 红树林幼林林区面积;

S_3 : 红树林单位时间新增幼苗所占面积;

l_1 : 单位时间内成熟林产生幼林的比例;

l_2 : 单位时间幼林成为老林的比例;

l_3 : 幼苗过渡为幼林的比例;

d_{Si} ($i=1,2,3$): 不同年龄段的红树林死亡以及进入下一层的比例;

T : 滩涂动物总的生物量;

μ_T : 滩涂动物生长率, 主要与可以获得的总生物量相关, α 为比例系数;

m_T : 滩涂动物自然死亡率;

G_T : 滩涂动物被鸟类采食的比例, 与鸟类的生物量成正比;

P_B : 鸟类可以捕食的生物量;

μ_B : 鸟类的增长率, 其中 γ 、 δ 、 m 均为依赖于具体研究成果的参数;

B : 鸟类的生物量;

m_B : 死亡率;

K_B : 在考虑自然环境下, 群体可能达到的最大总数;

r_B : 开始时群体的自然增长率, 即生育率减去死亡率;

四、模型的建立

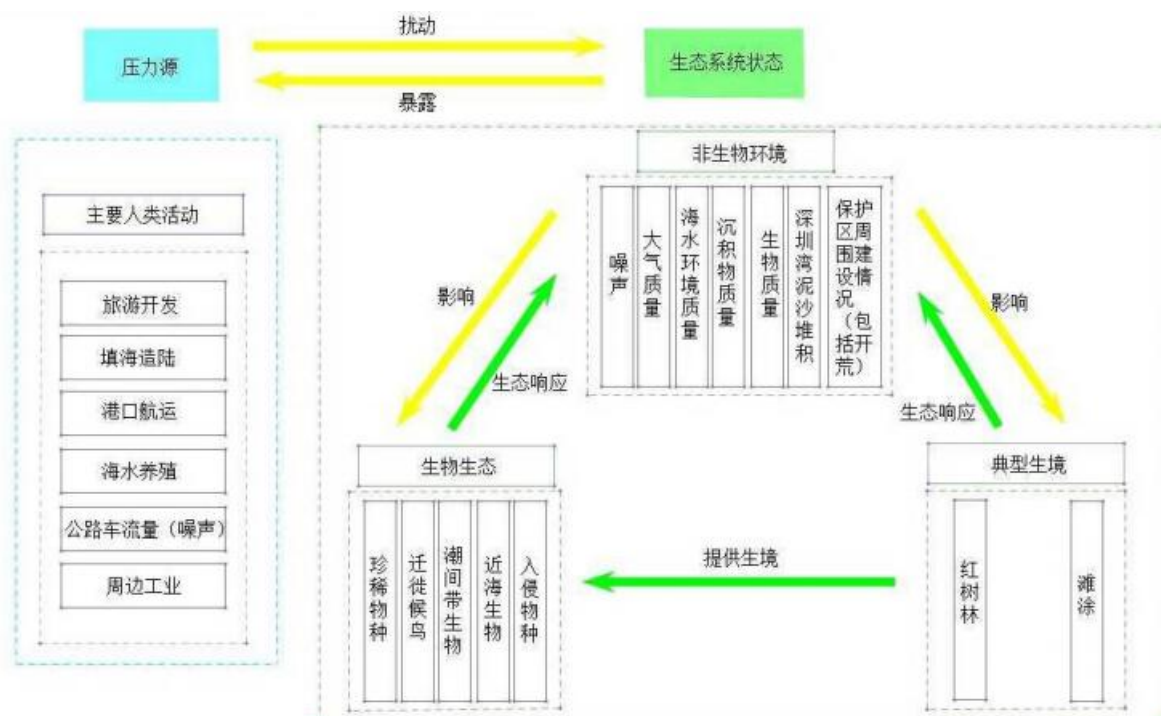


图1 红树林生态关系图(含人类影响)

先对红树林生态系统进行大致的分层,按照一般生态系统的划分,红树林主要包括生产者,消费者和分解者。但由于红树林生态系统的特殊性,在主要由红树林、大型底栖动物、鸟类等组成的红树林生态系统当中,红树林主要作为栖息场所存在,不是该系统中的大型动物尤其是鸟类的能量来源。但同时,红树林存在病虫害问题,这一部分的能量并不输入保护区的重点保护对象鸟类,那么我们在构建红树林生态系统的过程中,应该把红树林周边的河口及滩涂划归其中,考虑它们的对于红树林的影响。

在深圳福田红树林保护区中,对于该保护区稳态以及其所具有的对人而言的生态价值影响最大的两个种群为鸟类与红树林,那么这两个种群自身的稳定以及他们之间的关系是我们应该注意的。

下面我们一步一步地来建立模型。福田红树林自然保护区的主要的能量来源包括:红树林、滩涂上的植物的光合作用,保护区内、保护区周边水域中的浮游动植物。对此我们分开来考虑。而滩涂生物以及河口出的上层水生生物的主要营养来源为浮游生物以及滩涂之中的有机物、生物碎屑等。

4.1 福田红树林周边深圳河河口处上层生物模型^[1]

浮游植物通过光合作用制造有机物,并为其捕食者提供食物,其他浮游动物以及一

部分小型的河口上层生物也在食物链中。结合生物学原理，某种生物的生物量的变化率等于其获得的生物量与被捕时的生物量的差值。

借助参考资料，列出下列方程：

$$(M1) \begin{cases} \frac{dP}{dt} = \frac{\mu_P NP}{N + K_N} - m_P P - GZ & (4.1a) \\ \frac{dN}{dt} = I_m + f_g m_Z Z^n + f_m GZ - \frac{\mu NP}{N + K_N} & (4.1b) \\ \frac{dZ}{dt} = eZ - m_Z Z^n & (4.1c) \end{cases}$$

由现有的一般经验，不同的捕食者有不同的捕食习性，他们所能捕获的猎物的量与猎物本身的生物量（或猎物生物量的平方）成正比，因而 n 一般为 1 或 2。

该模型大致描绘出红树林附近水域中浮游生物生物量的变化。在该模型中，由参考文献[2]， μ_P 主要与磷的含量有关，二者之间在浓度不太高时有近似的线性关系。目前深圳福田周边水质有富营养化的趋势氮，磷的含量仍在可近似的范围之内。由于缺乏相关的真实数据，在本模型中，我们假设 μ_P 为一个常数，同时由参考资料， μ 可取与 μ_P 相同的数值。上述公式借鉴了《一个近岸海洋生态系统的简单模型的替代公式分析》中所给的模型以及部分相关假设，其中有关水中无机氮含量的假设与浮游植物的特点有关。

4.2 福田红树林以及周边植物的生长模型

周边滩涂植物由于生长的量较少，可认为他们的碳氮供应充足。假设植物中不同的部分中的碳氮比是相同的，均为 $1:\lambda$ ，从而建立模型如下：

$$(M2) \begin{cases} \frac{dW}{dt} = r \frac{R_1 W \alpha}{\rho \beta} & (4.2a) \\ \frac{d(WC)}{dt} = \rho R_2 W - W \frac{\alpha}{\beta} & (4.2b) \\ \frac{d(WNP)}{dt} = \rho R_3 W - \lambda W \frac{\alpha}{\beta} & (4.2c) \end{cases}$$

该模型主要是从植物对 C、NP 的需求来考虑并建立的，并且将植物视为一个整体，在不区分根叶的情况下看 C、NP 的变化量，此处主要参考复旦大学出版社出版的《数学模型（第二版）》。假设植物生长消耗的 C 不仅依赖于可以供给的 C 的总量，同时还取决于可以供给的 NP 的总量，我们可以得到生长方程（4.2a），再由 C、NP 的质量守恒可以得到（4.2b）、（4.2c）。由于在红树林地区 C、NP 是很丰富的，所以此处并没有选取关于 C、N 的函数，而是直接选取 $\frac{\alpha}{\beta}$ 。

4.3 红树林面积变化模型

将红树林的按照树龄进行分层， S_1, S_2, S_3 所表示的红树林的年龄段依次递减，假设 S_3 年龄段的红树林还未成熟不能进行繁衍。由于每个年龄段红树林的变化率等于单位时间内进入该年龄层的树木面积减去单位时间内长出该年龄层的面积以及死亡的面积，则红树林的面积有如下方程：

$$(M3) \begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = l_2 S_2 - d_1 S_1 & (4.3a) \\ \frac{dS_2}{dt} = l_3 S_3 - d_2 S_2 & (4.3b) \\ \frac{dS_3}{dt} = l_1 S_1 - d_3 S_3 & (4.3c) \end{cases}$$

下面来建立滩涂生物的模型。由于红树林的生态结构相对简单，食物链较短，系统中的能量来源相对单一，则对于消费者而言的能量输入的总量较为容易确定，因而现在我们来考虑能量模型。

4.4 滩涂中小型生物模型

可以获得的总生物量： $P_T = m_p P + m_z Z + m_w W$ ，方程如下：

$$(M4) \begin{cases} \frac{dT}{dt} = (\mu_T - m_T)T - G_T T^k & (4.4a) \\ \mu_T = \alpha P_T & (4.4b) \end{cases}$$

其中 n, k 为常数，与生态系统以及种群的特点有关，一般为 1 或 2。我们假设滩涂生物的生长率与 P_T 之间是线性关系。

滩涂动物生物量主要由自身的出生率和死亡率所决定，再加上外界的影响，即鸟类对其的采食量，便可以得到（4.1）式。

4.5 鸟类模型

由资料可得，深圳福田保护区鸟类的主要食物来源为滩涂生物以及河口上层生物（高于浮游动植物的那一级），设鸟类所能捕食的生物量为 P_B 。

红树林中的鸟类除一部分常驻物种外，红树林有接纳越冬鸟类的作用，因而红树林的接纳能力主要与鸟类能够得到的能量以及鸟类的有效栖息地有关。

则类似的建立方程：

$$(M5) \begin{cases} \mu_B = \gamma P_B^x + \delta + mS & (4.5a) \\ \frac{dB}{dt} = (\mu_B - m_B)B & (4.5b) \end{cases}$$

鸟类的生物量会影响上一层方程组中 G_T 的取值。

由于红树林内的鸟类多为候鸟和过境鸟，外界生态对其生物量的影响很小，可以忽略，所以只与其增长率和自然死亡率有关，即得到（4.5b）式。

4.5' 常驻鸟模型^[9]

上述模型五，主要基于深圳福田红树林保护区的过境鸟和候鸟较多，并没有过多的考虑常驻鸟，接下来，我们针对常驻鸟进行考虑。

参数表：

随着群体的增大增长率下降，且最大只能增长到 K ，之后增长率为 0，所以选取增长率用 $r_B \left(1 - \frac{B(t)}{K_B}\right)$ 来表示。

则得到模型：

$$\frac{dB}{dt} = r_B \left(1 - \frac{B}{K_B}\right) B \quad (4.5a')$$

这一部分鸟类的生物量与上一部分相比较小，因而该模型仅作参考，不作为接下来

讨论的依据。

4.6 人工育林

以上模型我们均假设人类没有采取如围海造陆以及退耕还林、人工育林等大规模措施，那么下面我们讨论这些因素加入的函数

这些人类行为主要影响的是红树林的面积。通过这一项，可间接的对红树林中特别是鸟类的生存状况产生影响。由于人类在深圳福田保护区主要的大规模活动有：围海造陆，退耕还林，人工造林，建立保护区。这些行为中，围海造陆，退耕还林，建立保护区影响红树林的总面积，人工造林只影响幼苗林地的面积。

4.6.1 增加红树林的生长区域

假设人类的影响为 h ，则有：

$$(M6.1) \begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = l_2 S_2 - d_1 S_1 + h & (4.6.1a) \\ \frac{dS_2}{dt} = l_3 S_3 - d_2 S_2 + h & (4.6.1b) \\ \frac{dS_3}{dt} = l_1 S_1 - d_3 S_3 + h & (4.6.1c) \end{cases}$$

其中限制条件为三者的面积均大于 0。

4.6.2 人工育林

人工造林的模型如下：

$$(M6.2) \begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = l_2 S_2 - d_1 S_1 & (4.6.2a) \\ \frac{dS_2}{dt} = l_3 S_3 - d_2 S_2 & (4.6.2b) \\ \frac{dS_3}{dt} = l_1 S_1 - d_3 S_3 & (4.6.2c) \end{cases}$$

这样，我们得到了一个可以较为完整的描述红树林生态的模型。接下来我们来考虑生态系统的稳定性问题。

根据建立出来的模型，生态系统的稳定性与否与方程中的参数有很大的关系，而这些参数的具体界定要依靠实际采样与分析。总体来说，对于上述每一个与生物量有关的方程，若方程右边的值为正，说明这部分发展良好，反之说明有衰退的趋势。

五、数值模拟

5.1 福田红树林周边深圳河河口处上层生物模型

针对(M1)：

由相关资料^[3]，浮游植物的生物量在一年中的不同时段有不同的平均值，由参考资料我们得到这四个季节中浮游植物的生物量大致为：

P 的四种初值^[3]：

春季：533.12mg/m³

夏季：116.67mg/m³

秋季：377.76mg/m³

冬季：222.96mg/m³

f_g 、 f_m 的大致范围均在 0.2 至 0.7 之间，一般取 0.5；

Z:由于不同营养级之间的能量传递效率约为百分之十，因而假定其初值为 P 初值的十分之一；

G 的变动范围在 1.2 到 4 之间，一般取 2；

N 由于红树林周边海域有富营养化的趋势，因而取值为 $0.2\text{mg/L}^{[4]}$ ，即 200mg/m^3 ；

μ 及 μ_p 的值在 0.15 到 2.0 之间，根据深圳湾的情况并结合资料^[2]，我们先取值为 0.3；

e 我们取值为 0.01/d；

m_p 一般为 0.1/d；

m_z 由于这一部分的生物相对复杂，根据环境等诸多因素的变动，其变动范围大于 0.0004/d 到 0.0026/d，考虑到该生态系统中的大多数游泳生物生命周期不长，那么在假设各个年龄层中的生物量依次递减时，我们取值为 0.0005/d；

K_N : 取 $0.8\text{mg/L}^{[2]}$ ；

I_m :我们没有找到关于总的无机氮负荷的资料，暂时取值为零。

下面的图像以夏天为例，其他季节类似。

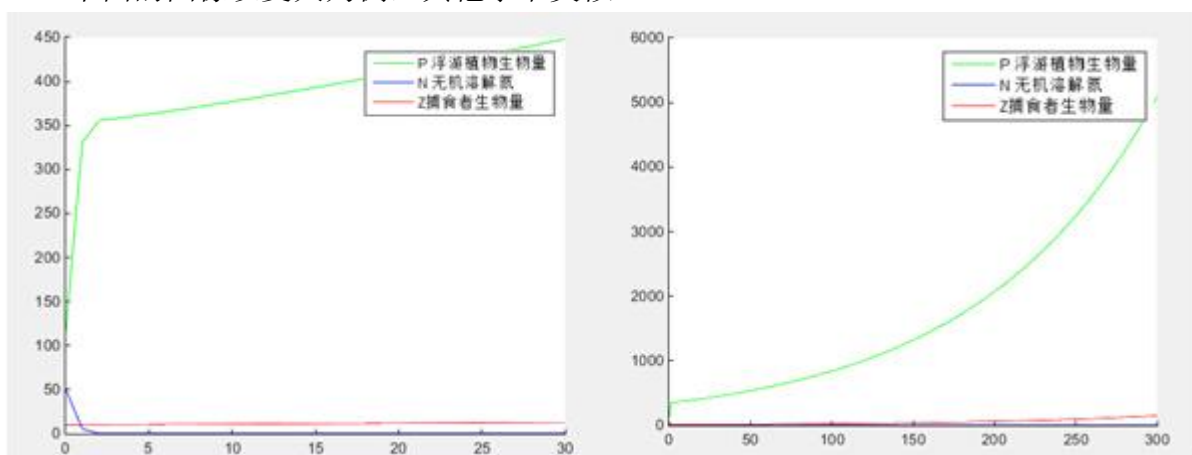


图 2 Z 初值取为 10 时 30 天的图像

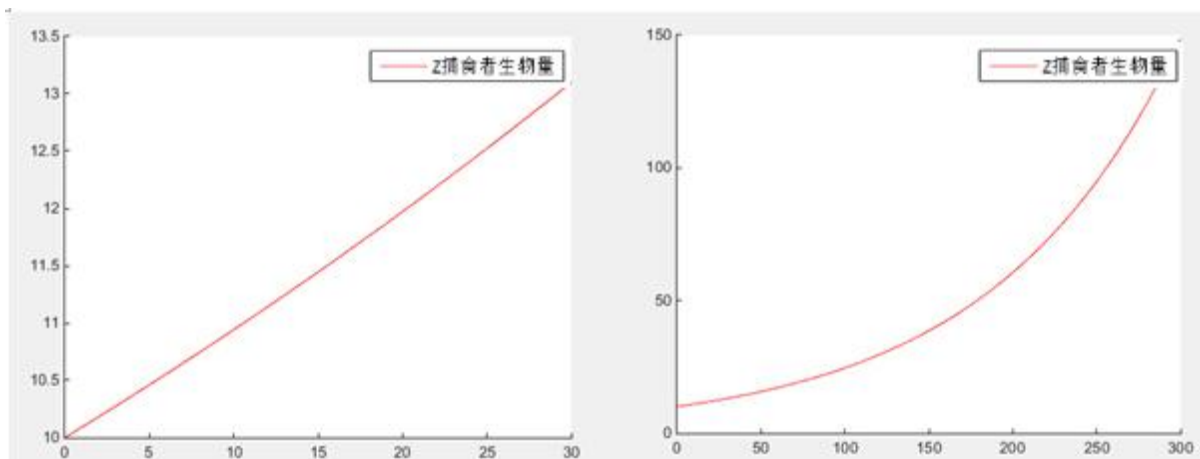


图 3 Z 初值取为 10 时 300 天的图像

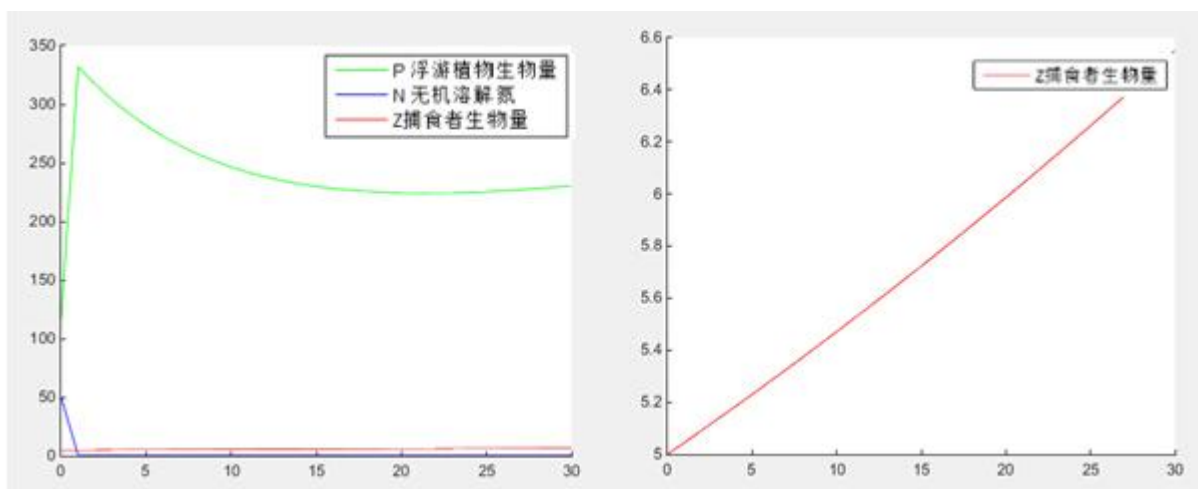


图 4 Z 的初值取为 5 时 30 天的图像

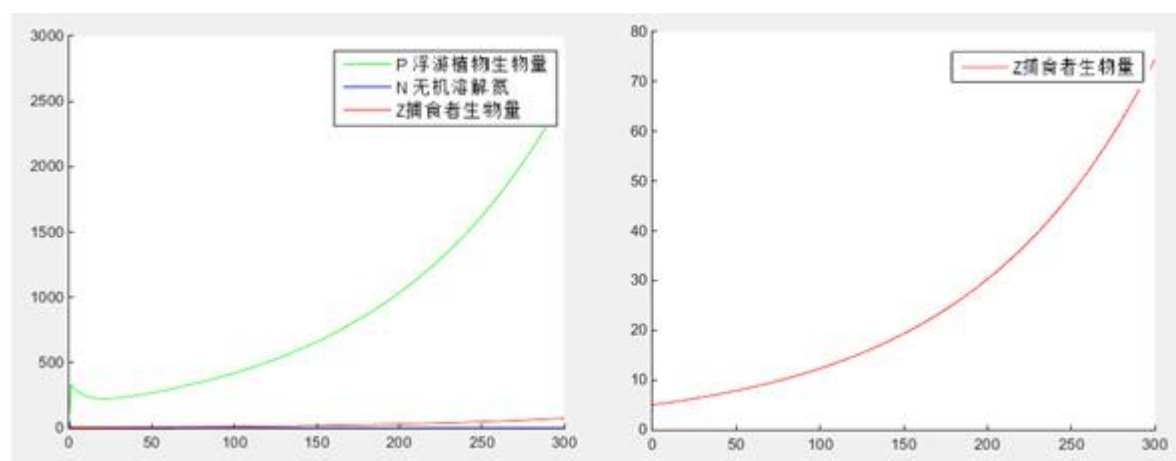


图 5 Z 的初值取为 5 时 300 天的图像

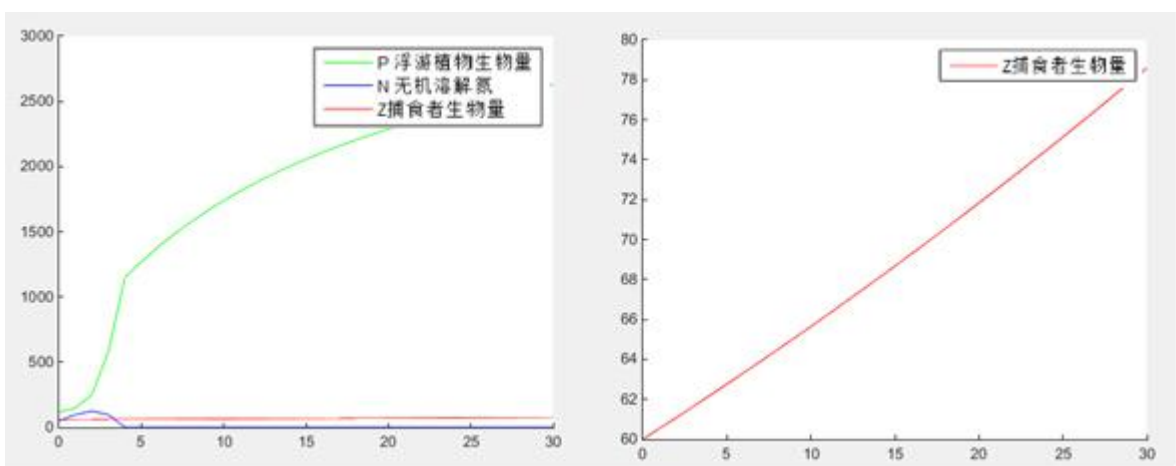


图 6 Z 初值取为 60 时 30 天的图像

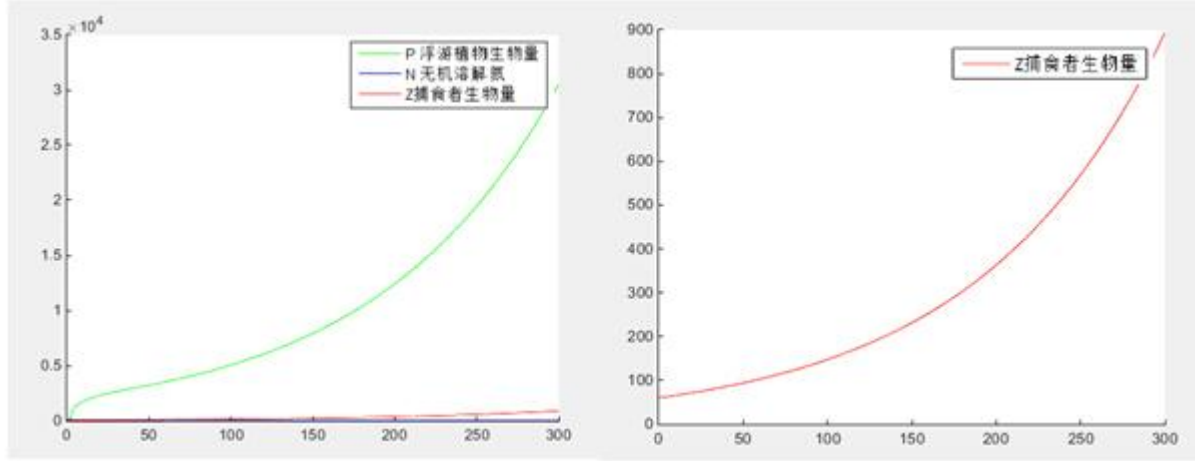


图 7 Z 初值取为 60 时 300 天的图像

以上各图之中由于没有找到深圳湾及其附近海域的资料，因而借用了渤海海域以及其他一些海域的资料，且部分参数没有可用的资料，因而以上各图只能大致表现变化趋势，如果要得到准确的预测图需要精确的数据。

同时，在一些参数未知的情况下，较为随意地取一些初值，结果得到如上不甚合理的图像，尽管在图中动物的生物量相对稳定或是缓慢上升，但此时无机氮含量与浮游植物的生物量均出现与现实情况十分不相符的走向，这说明该模型的可靠与否受具体参数的影响很大，在实际应用的过程中要特别注意参数的正确测量与选取。

由该动态模型，我们一方面可以大致得到深圳河口的近海的浮游生物状况，另一方面，我们得到输入下一部分的生物量包括死亡后落入泥沙中的生物碎屑和被下一级的捕食者采食的部分。

直接输入给下一层的捕食者的能量为被采食的部分，除此之外，由于滩涂动物有采食泥沙中有机物碎屑的习性，因而我们把自然死亡掉入泥沙的部分算入滩涂动物能量来源的一部分，则输入滩涂生物的能量为 $m_p P + m_z Z$ 。

5.2 福田红树林以及周边植物的生长模型^[9]

求解(M2):

$$\begin{cases} W = W_0 e^{\frac{rR_1\alpha}{\rho\beta}(t-t_0)} \\ C = e^{-\frac{rR_1\alpha}{\rho\beta}(t-t_0)} C_0 + \frac{\rho R_2 - \frac{\alpha}{\beta}}{r \frac{R_1\alpha}{\rho\beta}} e^{-\frac{rR_1\alpha}{\rho\beta} t_0} \\ N = e^{-\frac{rR_1\alpha}{\rho\beta}(t-t_0)} N_0 + \frac{\rho R_3 - \lambda \frac{\alpha}{\beta}}{r \frac{R_1\alpha}{\rho\beta}} e^{-\frac{rR_1\alpha}{\rho\beta} t_0} \end{cases}$$

此处 W_0 、 C_0 、 N_0 分别为 $t = t_0$ 时对应的值，而 $t = t_0$ 取为初值。

5.2.1 理论分析:

已知 W_0 、 C_0 、 N_0 均为大于 0 的数。

1) 当 $\frac{rR_1\alpha}{\rho\beta} > 0$ 时，

W会随着 t 呈指数形式增长趋于无穷；

C会随着 t 呈指数形式递减趋于 $\frac{\rho R_2 - \frac{\alpha}{\beta}}{r \frac{R_1 \alpha}{\rho \beta}} e^{-\frac{r R_1 \alpha}{\rho \beta} t_0}$ ；

N会随着 t 呈指数形式递减趋于 $\frac{\rho R_3 - \lambda \frac{\alpha}{\beta}}{r \frac{R_1 \alpha}{\rho \beta}} e^{-\frac{r R_1 \alpha}{\rho \beta} t_0}$ ；

2) 当 $\frac{r R_1 \alpha}{\rho \beta} < 0$ 时，

W会随着 t 呈指数形式递减趋于 0；

C会随着 t 呈指数形式增长趋于无穷；

N会随着 t 呈指数形式增长趋于无穷。

5.2.2 数值分析

取各个参数的初值为：

r: 30；

R_1 : 0.5；

R_2 : 0.0002；

m_w : 0.2；

R_3 : 0.00002；

λ : 0.22；

ρ : 100kg/m³；

$\frac{\alpha}{\beta}$: 0.051；

时间单位为小时，初值假设如下：

W	C	N
0.6	1.2	0.49

其中的比例系数与碳、氮的含量以及植物的遗传特性有关。

在这里我们得到的是滩涂处于某个稳定状态时的植物的生物量，随着状态改变，W跟着改变。由于人类活动对滩涂植物的群落结构影响大但对植物的总的生物量影响不大，因而在这一动态模型中可以加入这一静态模型作为其中的一环。

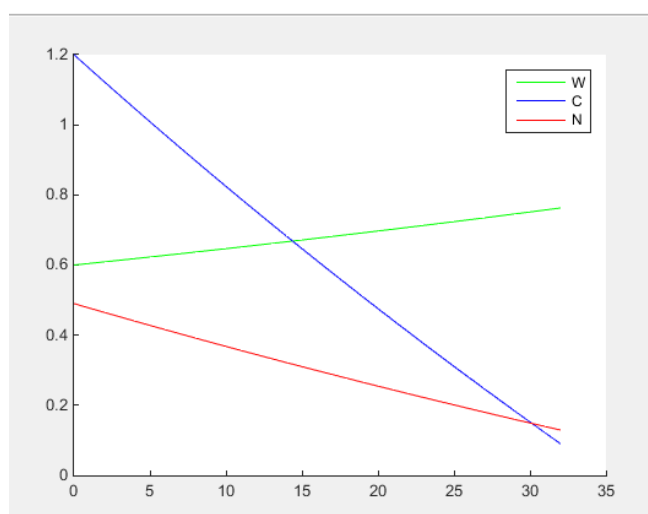


图 8 碳氮相对不足时植物生长情况图

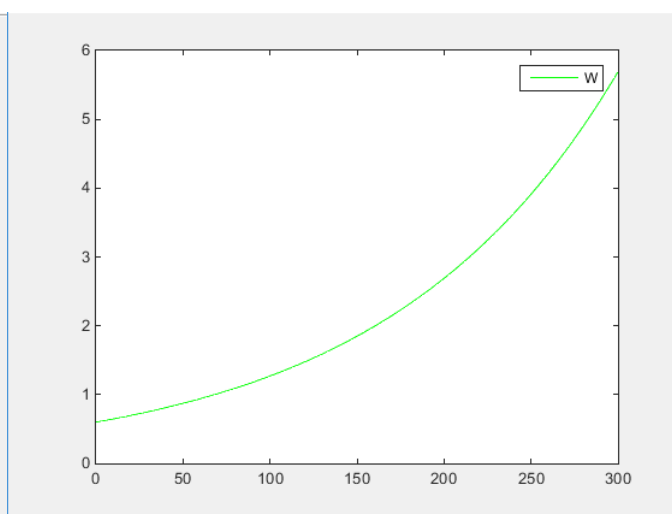


图 9 碳氮供应充足时植物生长情况图

5.3 红树林面积变化模型

为求解(M3), 令 $A = \begin{pmatrix} -d_1 & l_2 & 0 \\ 0 & -d_2 & l_3 \\ l_1 & 0 & -m_s \end{pmatrix}$, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为 A 的特征值, $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ 为相

应的特征向量, 得到 $\lambda^3 + a\lambda^2 + b\lambda + c = 0$ 。其中 $a = d_1 + d_2 + d_3$, $b = d_1d_2 + d_1d_3 + d_2d_3$, $c = d_1d_2d_3 - l_1l_2l_3$ 。

再令 $\Delta = \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3$, 其中 $q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c$, $p = -\frac{a^2}{3} + b$ 。

由一元三次方程求解公式得到以下结论:

$$\begin{cases} \text{当 } \Delta > 0, \text{ 则有一个实根, 一对共轭虚根;} \\ \text{当 } \Delta = 0, \text{ 则有三个实根, 其中两个相等;} \\ \text{当 } \Delta < 0, \text{ 则有三个不相等的实根;} \end{cases}$$

并且可以得到:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt[3]{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt[3]{\Delta}} \\ \lambda_2 = \omega \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt[3]{\Delta}} + \omega^2 \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt[3]{\Delta}} \\ \lambda_3 = \omega^2 \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt[3]{\Delta}} + \omega \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt[3]{\Delta}} \\ \omega = \frac{-1 + \sqrt{3}i}{2} \end{cases}$$

由简单证明可知, 对于矩阵 A , 存在可逆矩阵 B , 使得 $A = BJB^{-1}$, 其中 J 为 A 的 Jordan 矩阵。

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = e^{A(t-t_0)} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix} + \int_{t_0}^t e^{A(t-s)} ds * \begin{pmatrix} h \\ h \\ h \end{pmatrix}$$

(下面的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为上面的解的一种排序方式)

a) $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = (\vec{P}_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} \quad \vec{P}_2 e^{\lambda_2(t-t_0)} \quad \vec{P}_3 e^{\lambda_3(t-t_0)}) B^{-1} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix}$$

b) $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = (\vec{P}_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} \quad (t\vec{P}_1 + \vec{P}_2) e^{\lambda_1(t-t_0)} \quad \vec{P}_3 e^{\lambda_3(t-t_0)}) B^{-1} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix}$$

c) $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = (\vec{P}_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} \quad (t\vec{P}_1 + \vec{P}_2) e^{\lambda_1(t-t_0)} \quad (\frac{t^2}{2}\vec{P}_1 + t\vec{P}_2 + \vec{P}_3) e^{\lambda_1(t-t_0)}) B^{-1} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix}$$

其中 S_{10} 、 S_{20} 、 S_{30} 分别为 $t = t_0$ 时对应的值，此处取 $t = t_0$ 为初值。

在该模型中，先不考虑极端天气变化、重大环境事故等突发因素的影响，时间单位以年来计算。这里对于红树林老林、新林的界定参考具体的生物学界定。且在本模型中假设三种年龄层中的树木分布均匀。

5.3.1 理论分析：

$$\text{由} \begin{cases} \frac{dS_1}{dt} > 0 \\ \frac{dS_2}{dt} > 0 \\ \frac{dS_3}{dt} > 0 \end{cases}, \text{ 可得:}$$

当 $d_1 d_2 d_3 < l_1 l_2 l_3$ 时， S_1 、 S_2 、 S_3 同时增长；

当 $d_1 d_2 d_3 = l_1 l_2 l_3$ 时， S_1 、 S_2 、 S_3 趋于稳定；

当 $d_1 d_2 d_3 > l_1 l_2 l_3$ 时， S_1 、 S_2 、 S_3 同时递减；

5.3.2 数值分析：

参数 μ_1 、 μ_2 与红树林自身的性质以及害虫的生物量 A 有关，一般与 A^k 成正比， k 为一个常数，一般为1或2。由于我们无法从资料得知 k ， A 的具体数值，因而我们先通过资料查找估计出这两个参数的值，关于害虫的预警我们放在下一部分：对于红树林生态系统的评估部分来讲。在这里我们取两个参数的值分别为0.01与0.02。

为了方便计算，我们假定初始状态下 $S_1 + S_2 + S_3 = 100$ ，这样在应用与实际时只需要将监测开始时的红树林面积乘以相应的比例即可。

由参考资料[6]，我们取四组初值，分别为：

	S_1	S_2	S_3
1	38.17	61.02	0.81
2	32.65	64.49	2.86
3	59.76	37.87	2.37
4	72.83	25	2.17

这里给出选用第二组数据的部分图像。

取参数为：

l_1	l_2	l_3	d_1	d_2	d_3
0.03	0.04	0.03	0.045	0.04	0.02

图像如下:

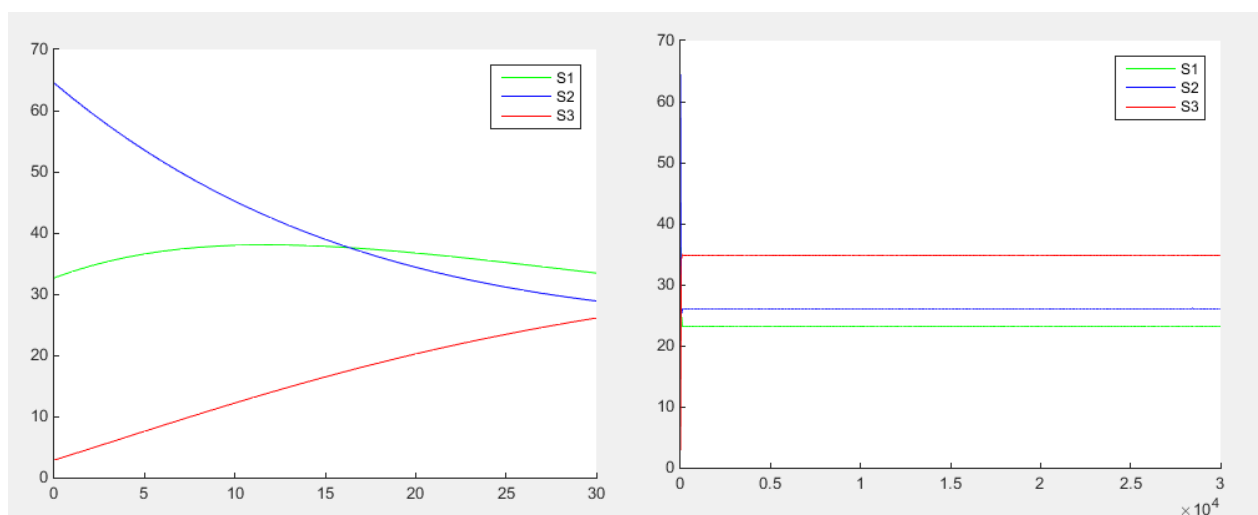


图 10 红树林各年龄段植物趋于稳定图

取参数为:

l_1	l_2	l_3	d_1	d_2	d_3
0.03	0.04	0.03	0.055	0.04	0.02

图像如下:

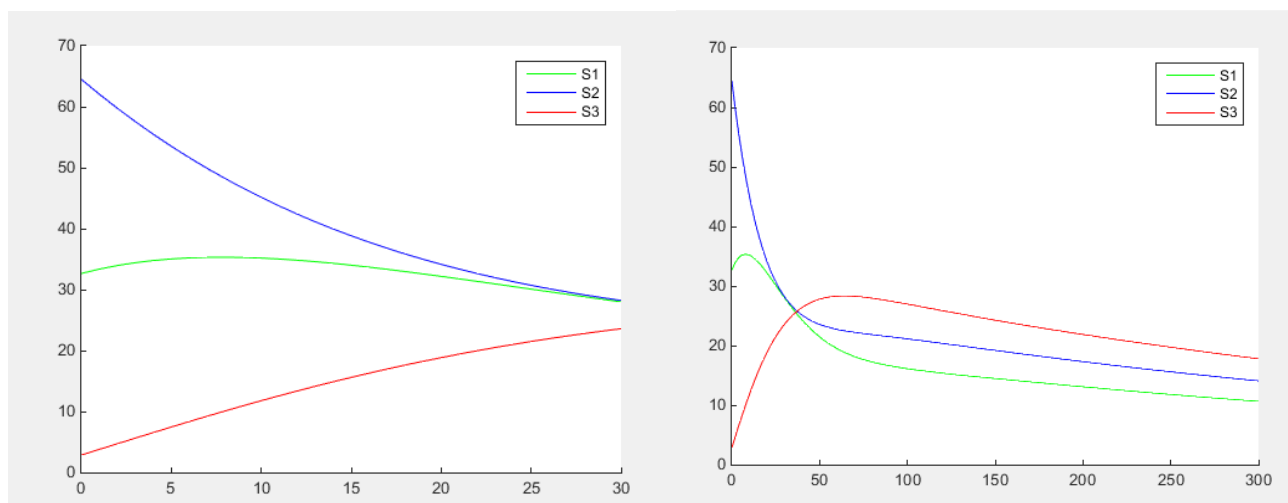


图 11 红树林各年龄段植物递减图

取参数为:

l_1	l_2	l_3	d_1	d_2	d_3
0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02

图像如下:

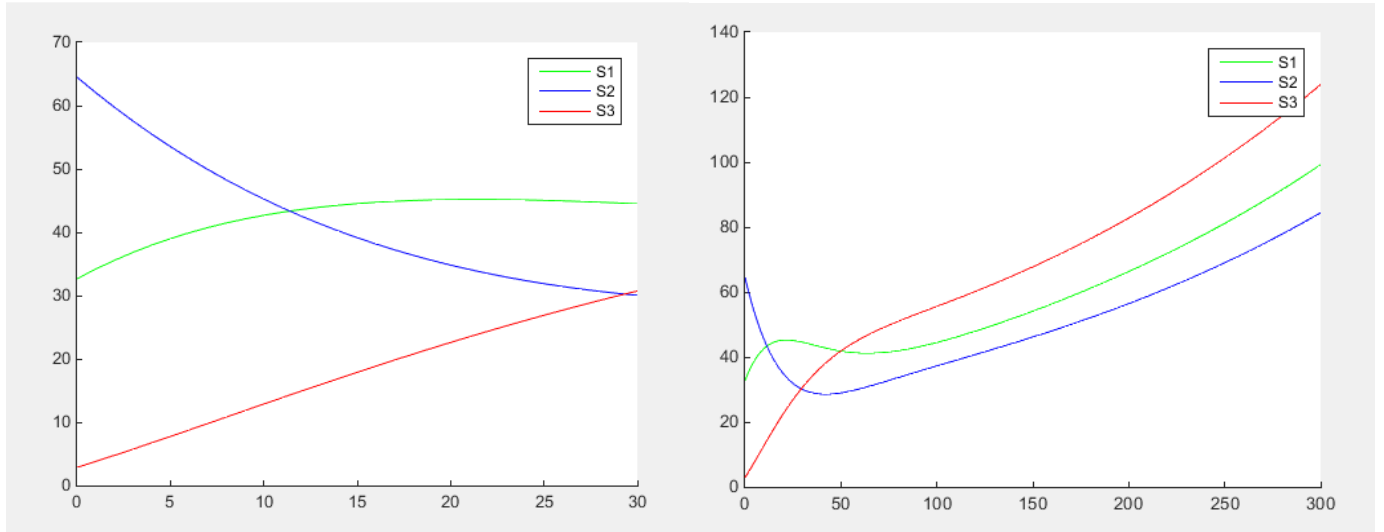


图 12 红树林各年龄段植物递增图

这大致表示出红树林在一定参数下的最终发展趋势。同样由于资料的缺乏，上述参数与实际情况存在误差。

5.4 滩涂中小型生物模型

针对(M4):

1) 在 $k = 1$ 时可求得解析解如下:

$$\begin{cases} T = T_0 e^{(\mu_T - m_T - G_T)(t - t_0)} \\ \mu_T = \alpha P_T \end{cases}$$

2) 在 $k = 2$ 时可求得解析解如下:

$$\begin{cases} \frac{1}{T} = e^{(t_0 - t)(\mu_T - m_T)} \frac{1}{T_0} + \frac{G_T}{\mu_T - m_T} e^{-t_0(\mu_T - m_T)} \\ \mu_T = \alpha P_T \end{cases}$$

其中 T_0 、 t_0 是初值。

理论分析:

a) $K=1$ 时,

$\mu_T - m_T - G_T > 0$ 时, T 随着 t 呈指数增长趋于无穷;

$\mu_T - m_T - G_T < 0$ 时, T 随着 t 呈指数减少趋于 0;

b) $K=2$ 时,

$\mu_T - m_T > 0$ 时, T 随着 t 呈指数减少趋于 0;

$\mu_T - m_T < 0$ 时, T 随着 t 呈指数增长趋于 $\frac{\mu_T - m_T}{G_T} e^{t_0(\mu_T - m_T)}$ 。

5.5 鸟类模型

求解(M5), 得其解析解为:

$$\begin{cases} B = B_0 e^{(\mu_B - m_B)(t - t_0)} \\ \mu_B = \gamma P_B^x + \delta + mS \end{cases}$$

其中 $x = 1$ 或 2 , B_0 、 t_0 为初值, γ , δ 均为比例系数。

理论分析:

当 $\mu_B - m_B > 0$ 时, B 随着 t 呈指数增长趋于无穷;

当 $\mu_B - m_B < 0$ 时, B 随着 t 呈指数减少趋于 0;

5.5' 常驻鸟模型

求解 (4.5a'), 得其解析解为:

$$B = \frac{K_B B_0 e^{r(t-t_0)}}{B_0(e^{r(t-t_0)} - 1) + K_B}$$

或

$$B = \frac{K_B}{1 + \left(\frac{K_B}{B_0} - 1\right) e^{-r(t-t_0)}}$$

其中 B_0 、 t_0 为初值。

理论分析:

(1) $B_0 < K_B$ 时, B 随着 t 的增加而增加到 K_B ;

当 $B < \frac{K_B}{2}$ 时, $\frac{dB}{dt}$ 单调增加, 即 B 随着 t 的增加速率越来越大;

当 $B > \frac{K_B}{2}$ 时, $\frac{dB}{dt}$ 单调减小, 即 B 随着 t 的增加速率越来越慢;

(2) $B_0 > K_B$ 时, B 随着 t 的增加而减少到 K_B 。

5.6 人工育林

5.6.1

针对(M6.1), 求得通解为:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = e^{A(t-t_0)} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix} + \int_{t_0}^t e^{A(t-s)} ds * \begin{pmatrix} h \\ h \\ h \end{pmatrix}$$

这里的A、B、 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和无退耕还林时的一样, 下面讨论类似。

a) $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} &= (\overrightarrow{P_1} e^{\lambda_1(t-t_0)} \quad \overrightarrow{P_2} e^{\lambda_2(t-t_0)} \quad \overrightarrow{P_3} e^{\lambda_3(t-t_0)}) B^{-1} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix} \\ &+ \left(\frac{\overrightarrow{P_1}}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) \quad \frac{\overrightarrow{P_2}}{\lambda_2} (e^{\lambda_2(t-t_0)} - 1) \quad \frac{\overrightarrow{P_3}}{\lambda_3} (e^{\lambda_3(t-t_0)} - 1) \right) B^{-1} \begin{pmatrix} h \\ h \\ h \end{pmatrix} \end{aligned}$$

b) $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} &= (\overrightarrow{P_1} e^{\lambda_1(t-t_0)} \quad (t\overrightarrow{P_1} + \overrightarrow{P_2}) e^{\lambda_1(t-t_0)} \quad \overrightarrow{P_3} e^{\lambda_3(t-t_0)}) B^{-1} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix} \\ &+ \left(\frac{\overrightarrow{P_1}}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) \quad \frac{\overrightarrow{P_1}}{\lambda_1} (t-t_0) e^{\lambda_1(t-t_0)} + \frac{\overrightarrow{P_2} - \overrightarrow{P_1}}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) \quad \frac{\overrightarrow{P_3}}{\lambda_3} (e^{\lambda_3(t-t_0)} - 1) \right) B^{-1} \begin{pmatrix} h \\ h \\ h \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$c) \quad \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$$

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{P}_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} & (t\vec{P}_1 + \vec{P}_2) e^{\lambda_1(t-t_0)} & (t^2\vec{P}_1 + t\vec{P}_2 + \vec{P}_3) e^{\lambda_1(t-t_0)} \end{pmatrix} B^{-1} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\vec{P}_1}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) & \frac{\vec{P}_1}{\lambda_1} (t-t_0) e^{\lambda_1(t-t_0)} + \frac{\vec{P}_2 - \vec{P}_1}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) & -\frac{\vec{P}_1(t-t_0)^2}{2\lambda_1} e^{\lambda_1(t-t_0)} + \frac{\vec{P}_2 - \vec{P}_1}{\lambda_1} (t-t_0) e^{\lambda_1(t-t_0)} + \frac{\vec{P}_1 - \vec{P}_2 + \lambda_1 \vec{P}_3}{\lambda_1^2} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) \end{pmatrix}$$

$$* B^{-1} \begin{pmatrix} h \\ h \\ h \end{pmatrix}$$

其中 S_{10} 、 S_{20} 、 S_{30} 分别为 $t = t_0$ 时对应的值，此处取 $t = t_0$ 为初值。

5.6.2

针对模型 6 的人工育林(M6.2)，求得通解为：

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = e^{A(t-t_0)} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix} + \int_{t_0}^t e^{A(t-s)} ds * \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix}$$

$$a) \quad \lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$$

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{P}_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} & \vec{P}_2 e^{\lambda_2(t-t_0)} & \vec{P}_3 e^{\lambda_3(t-t_0)} \end{pmatrix} B^{-1} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\vec{P}_1}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) & \frac{\vec{P}_2}{\lambda_2} (e^{\lambda_2(t-t_0)} - 1) & \frac{\vec{P}_3}{\lambda_3} (e^{\lambda_3(t-t_0)} - 1) \end{pmatrix} B^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix}$$

$$b) \quad \lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$$

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{P}_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} & (t\vec{P}_1 + \vec{P}_2) e^{\lambda_1(t-t_0)} & \vec{P}_3 e^{\lambda_3(t-t_0)} \end{pmatrix} B^{-1} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\vec{P}_1}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) & \frac{\vec{P}_1}{\lambda_1} (t-t_0) e^{\lambda_1(t-t_0)} + \frac{\vec{P}_2 - \vec{P}_1}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) & \frac{\vec{P}_3}{\lambda_3} (e^{\lambda_3(t-t_0)} - 1) \end{pmatrix} B^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix}$$

$$c) \quad \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$$

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{P}_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} & (t\vec{P}_1 + \vec{P}_2) e^{\lambda_1(t-t_0)} & (t^2\vec{P}_1 + t\vec{P}_2 + \vec{P}_3) e^{\lambda_1(t-t_0)} \end{pmatrix} B^{-1} \begin{pmatrix} S_{10} \\ S_{20} \\ S_{30} \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\vec{P}_1}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) & \frac{\vec{P}_1}{\lambda_1} (t-t_0) e^{\lambda_1(t-t_0)} + \frac{\vec{P}_2 - \vec{P}_1}{\lambda_1} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) & -\frac{\vec{P}_1(t-t_0)^2}{2\lambda_1} e^{\lambda_1(t-t_0)} + \frac{\vec{P}_2 - \vec{P}_1}{\lambda_1} (t-t_0) e^{\lambda_1(t-t_0)} + \frac{\vec{P}_1 - \vec{P}_2 + \lambda_1 \vec{P}_3}{\lambda_1^2} (e^{\lambda_1(t-t_0)} - 1) \end{pmatrix} B^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix}$$

$$* B^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix}$$

其中 S_{10} 、 S_{20} 、 S_{30} 分别为 $t = t_0$ 时对应的值，此处取 $t = t_0$ 为初值。

5.7模型七（备注）

上述模型中出现人类的影响 m_T 、 m_S ，下面我们来说明这一参数与具体的人类活动之间的关系。由题目后所给的参考资料[13]主要有影响作用的具体量为：噪声、化工废水排放、大气质量、水中有机质含量。我们假定这些因素的影响相互之间是独立的，即 m_T 、 m_S 为这些因素造成的影响的线性和，其中每一个因素造成的具体影响需要进一步的实际测量确定。

表 1 具体的各参数与需要测量的量的对应关系

P	水环境中浮游植物生物量的测定
Z	水环境中游泳动物生物量的测定
N	水环境中 N 元素的监控
μ_P	水环境中 N、P 元素的监控
I_m	总的无机氮负荷量
人为因素 m_S 、 m_T （由于对象不同因而这两个系数与右侧量之间的具体关系不同）	噪声监控
	化工废水排放情况
	水环境中化学需氧量
	大气质量
模型三与模型六的初值	红树林总面积
	红树林的年龄组成

在得到了模型一至六之后，由所解出的结果，在资源等都丰富且人类影响不足以造成毁灭性的后果的前提下，由于福田红树林自然保护区内的营养元素含量较为丰富，因而自然状况下，在动植物的生长期中，保护区内部以及周边低级动植物的生物量接近于指数增长，直到土地、营养物质等资源下降之后，增长速度减缓，整体生物量趋于稳定甚至降低、最终趋于消减。

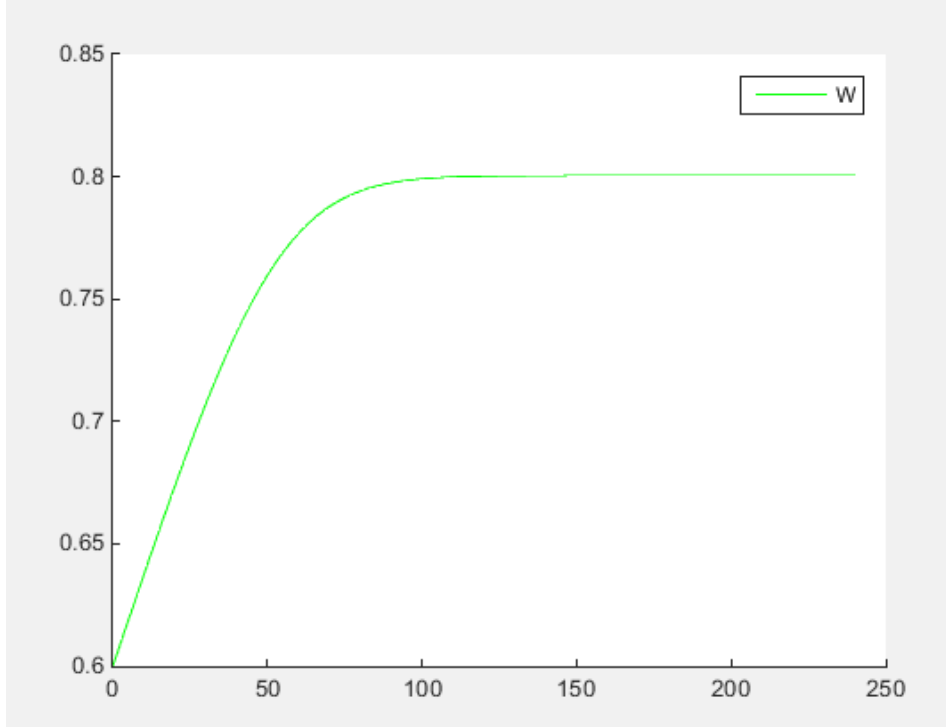


图 13 假定滩涂之中的氮元素供给不足时滩涂植物的生物量的变化图

六、模型的结果分析

由上述讨论，初值与参数会对生物量的变化趋势造成很大的影响。尤其是福田红树林周边深圳河河口处上层生物模型，虽然正体趋势所受的影响不大，但三个变量的具体变化情况对相关参数敏感。由于目前缺乏实际的数据，表现人类影响的参数不能够被正确取得，于是我们大概估计了一下该参数的范围，并取不同的值画出多组能够大致反映生态环境变化趋势的图像。由图象可知，在人类没有大规模采用保护措施时，生态系统所受的影响不大，但当该参数大于一定的数值时，较短时间内生态系统出现明显的恶化趋势。这个参数的具体范围详见下一步生态系统稳定性的分析。结合福田红树林保护区的现状，我们不排除目前人类的影响已经产生了较大影响的可能。

再考虑人类的大规模影响。受这一行为影响最大的是红树林，我们也主要就这一部分进行讨论。由“目前红树林面临的主要问题及其解决方法”中的图像可知，当进行大规模填海造陆或开垦活动时，短时间内红树林的总面积下降很快，之后在人类活动影响维持不变的情况下，变化趋势趋向于与之前的模型三相同；当人类在红树林有退化的迹象时进行幼林补种或移栽成年树木等活动时，相当于改变了模型三中的初值，那么由模型三中的讨论，此时红树林总面积下降的趋势得到减缓，但由于林区内不同年龄段的树木所占的面积之间的比例发生改变，最终得到的收敛的结果也会发生改变，当补种行为不当加之生存环境恶化使得红树林难以成年时，如下图所示，可能会导致红树林中各个年龄段的树木的比例不当。

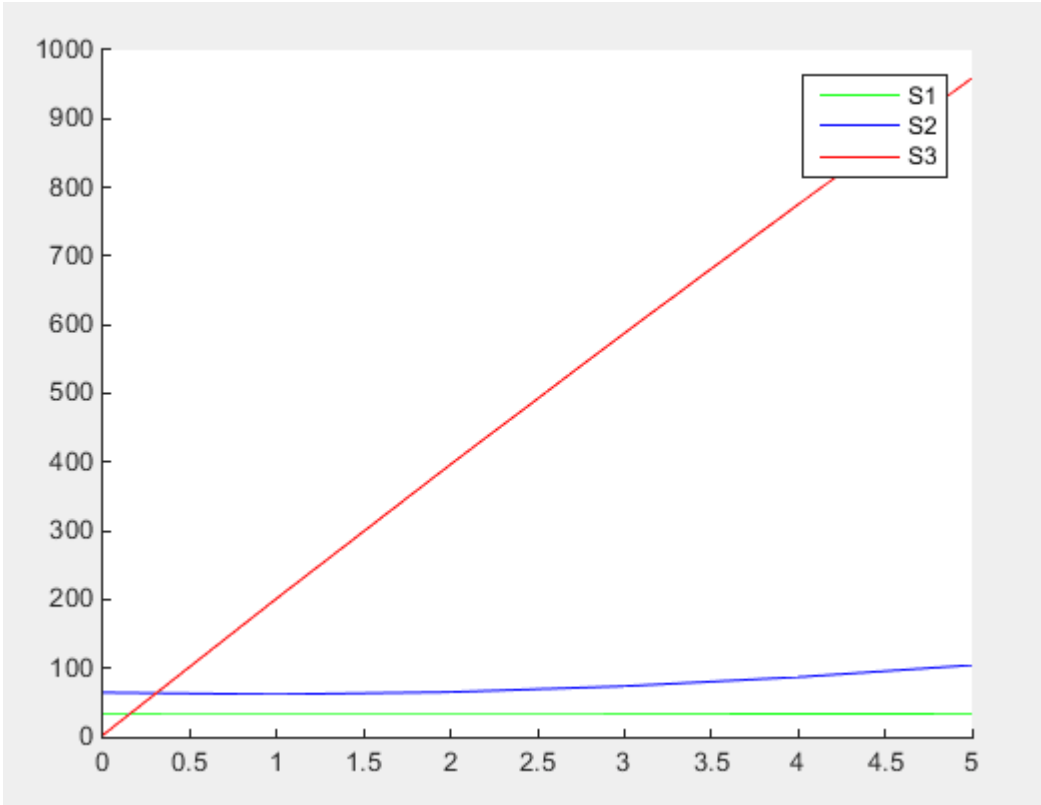


图 14 过度补种树苗时红树林不同年龄层树木变化情况

当然，实际上处理我们模型中所提到的那些因素之外，诸如地震、极端低温等的不可抗力会对红树林造成非常严重的影响这些因素是在实际的保护工作中一经发现就要进行预警的监测量。

6.1 大数据管理支撑平台的建立

由于目前缺乏相关资料，且短时间内我们没有条件去准确的找到二者之间相互关系。尽管我们认为按照这种方式建立的评价体系有更高的准确度，但短时间内可能无法实现依托这一方法实际的建立评价体系。所以在评价方面我们结合方程组以及P S R模型，采用PSR模型的大框架，但在其中一部分项目的评分上借助我们所给出的方程组，在生物生产力上我们由模型给出相应的矩阵中的项。

表 2 PSR 模型结构

准则层	因素层	指标层
压力子系统	自然压力	极端天气
		入侵物种种类及数量
	人类压力	噪声
		海水有机污染物含量
		有害重金属含量
		红树林周围环境农药含量
状态子系统	生境质量	围海造陆面积
		溶解氧 (mg/L)
		总 N (mg/L)

		氨氮 (mg/L)
		硝氮 (mg/L)
		总 P (mg/L)
		可溶性 P (mg/L)
		COD (mg/L)
		BOD (mg/L)
		噪声
		空气质量
		极端天气天数
		大肠菌群总数 (*10 ⁶ 个/L)
		致病性肠道细菌 (*10 ⁵ 个/L)
	生物与生态	水环境中浮游植物生物量的测定
		水环境中游泳动物生物量的测定
		水环境中 N 元素的监控
		水环境中 P 元素的监控
		总的无机氮负荷量
		人为因素
		各个方程的初值
响应子系统	社会响应	G D P
		人口密度
		相关宣传
		出台措施

我们选用综合指数法对深圳近海生态系统进行评价。综合指数法的指标明确易懂，能综合反映出生态系统的状况，便于在决策时作为参考依据。生态系统评价综合指数的计算方法为：

$$DI = \sum_{i=1}^n L_i W_i \quad (6.1)$$

式中DI表示深圳近海生态系统的综合评价指数， L_i 为指标i的评价值， W_i 为指标i的权重值，n 为指标个数。DI值在（0，1）之间，其值越小，表明生态系统状况愈差。其分级标准如下表所示。由于最终评价结果将采用公式（6.1）分别就压力子系统、状态子系统、响应子系统分别得出各项得分 $DI_{\text{压力}}$ 、 $DI_{\text{状态}}$ 和 $DI_{\text{响应}}$ ，并对其进行合成，得出生态

态系统综合得分 $DI_{\text{综合}}$ （公式(6.2)），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。就各个子系统而言，在评价过程中，压力子系统得分越高，表明生态系统所受到的压力越大，对生态系统的干扰作用就越大；状态子系统得分越高，表明生态系统健康状态越好；响应子系统得分越高，表明人类通过改变响应手段来减缓生态系

统退化进程的成效越明显，有利于改善生态系统的状态。故而在最后合成时，需对压力子系统的得分进行正向化，即 $DI'_{\text{压力}} = 1 - DI_{\text{压力}}$ 。

$$DI_{\text{综合}} = DI'_{\text{压力}} \times W_{i\text{压力}} + DI_{\text{状态}} \times W_{i\text{状态}} + DI_{\text{响应}} \times W_{i\text{响应}} \tag{6.2}$$

6.1.1.2 指标权重的确定

评价指标对被评价对象影响程度的大小，称为评价指标的权重，指标权重的准确性对评价结果的科学性具有重大影响。目前常用的指标权重确定方法主要有层次分析法、模糊综合评价法、主成分分析法、因子分析法和熵值法等。不同海湾之间生态环境差异很大，而层次分析法可以较好的反映研究区域的特征和问题，故本文应用层次分析法确定指标的权重。

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，简称 AHP 法）是美国运筹学家、匹兹堡大学的 A. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代中期提出的一种系统分析方法，它为分析由相互关联、相互制约的众多因素构成的复杂系统问题提供了简便而实用的决策方法。它把复杂问题分解为各个组成部分，将这些要素按支配关系分组成有序的层次结构，通过两两比较的方式确定诸要素的相对重要性，然后综合人的判断来确定诸要素相对重要性的顺序。

经过数十年的发展，层次分析法已经发展成为一种较为成熟的决策方法，在具体操作过程中，本文应用 yaahp 层次分析软件进行权重分析。

运用层次分析法的具体的步骤[76]如下：

(1) 建立递阶层次结构模型：

上层元素对下层元素的支配关系所形成的层次结构被称为递阶层次结构。AHP 要求的递阶层次结构一般以下三个层次组成：

- 决策目标（最高层）：指问题的预定目标；
- 中间层要素（中间层）：指影响目标实现的准则；
- 备选方案（最低层）：指促使目标实现的措施。

上一层元素可以支配下层的所有元素，但也可只支配其中部分元素。递阶层次结构中的层数与问题的复杂程度及需要分析的详尽程度有关，可不受限制。

(2) 构造出各层次中的所有判断矩阵-

其基本方式是将各因素之间进行两两相比较，建立成对比较矩阵。即每次取两个因子 x_i 和 x_j ，以某因素 Z 为目标，以 a_{ij} 表示 x_i 和 x_j 对 Z 的影响大小之比，全部比较结果用矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 表示。称 A 又为 Z-X 之间的成对比较判断矩（简称判断矩阵）。 a_{ij} 的取值范围引用数字 1 取值及其倒数作为标度。下表列出了各标度的含义。

表 3 层次分析法各标度的含义

标度	含义
1	表示两个因素相比，具有相同重要性
3	表示两个因素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值

倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij} , 那么因素 j 与因素 i 的重要性之比为 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$
----	---

(3) 层次单排序及一致性检验-

判断矩阵 A 对应于最大特征值 λ_{\max} 的特征向量 W , 经归一化后即为同一层次相应因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值, 这一过程称为层次单排序。上述构造成对比较判断矩阵的办法虽能减少其它因素的干扰, 较客观地反映出一对因子影响力的差别。但综合全部比较结果时, 其中难免包含一定程度的非一致性。如果比较结果是前后完全一致的, 则矩阵 A 的元素还应当满足:

$$a_{ij}a_{jk} = a_{ik}, \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (6.3)$$

需要检验构造出来的 (正互反) 判断矩阵 A 是否严重地非一致, 以便确定是否接受 A 。

(4) 层次总排序及一致性检验:

总排序权重要自上而下地将单准则下的权重进行合成。对层次总排序也需作一致性检验, 检验仍像层次总排序那样由高层到低层逐层进行。这是因为虽然各层次均已经过层次单排序的一致性检验, 各成对比较判断矩阵都已经具有较为满意的一致性。但当综合考察时, 各层次的非一致性仍有可能积累起来, 引起最终分析结果较严重的非一致性。

各准则层与指标层之间的矩阵关系如下, 其中矩阵每行从上至下所对应的项的顺序与上面的表格相同。

1、自然压力:

$$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.5000 \\ 2.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}$$

相互关系

$$\begin{pmatrix} 0.4472 \\ 0.8944 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

2.人类压力

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.2000 & 2.0000 & 0.3333 & 0.3333 \\ 5.0000 & 1.0000 & 9.0000 & 2.0000 & 2.0000 \\ 0.5000 & 0.1111 & 1.0000 & 0.3333 & 0.3333 \\ 3.0000 & 0.5000 & 3.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 3.0000 & 0.5000 & 3.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.1563 \\ 0.8123 \\ 0.1057 \\ 0.3902 \\ 0.3902 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 5.0551 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

3.生物与生态

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 0.3333 & 0.5000 & 3.0000 & 0.2000 & 0.3333 \\ 1.0000 & 1.0000 & 0.3333 & 0.5000 & 3.0000 & 0.2000 & 0.3333 \\ 3.0000 & 3.0000 & 1.0000 & 2.0000 & 6.0000 & 0.3333 & 1.0000 \\ 2.0000 & 2.0000 & 0.5000 & 1.0000 & 4.0000 & 0.5000 & 0.5000 \\ 0.3333 & 0.3333 & 0.1667 & 0.2500 & 1.0000 & 0.1111 & 0.1667 \\ 5.0000 & 5.0000 & 3.0000 & 2.0000 & 9.0000 & 1.0000 & 3.0000 \\ 3.0000 & 3.0000 & 1.0000 & 2.0000 & 6.0000 & 0.3333 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

结果

$$\begin{pmatrix} 0.1398 \\ 0.1398 \\ 0.3831 \\ 0.2557 \\ 0.0604 \\ 0.7735 \\ 0.3831 \end{pmatrix}$$

4.根据深圳湾污染物的情况以及小组讨论，给出如下比例:(由于我们经验以及研究不多，这个比例关系仅作参考)

表 4

被检测量	所占权重
溶解氧 (mg/L)	0.0100
总 N(mg/L)	0.0100
氨氮 (mg/L)	0.0100
硝氮 (mg/L)	0.0100
总 P (mg/L)	0.0100
可溶性 P (mg/L)	0.0100
COD (mg/L)	0.0198
BOD (mg/L)	0.0198
噪声	0.0099
空气质量	0.0100
极端天气天数	0.0100
大肠菌群总数 (*10 ⁶ 个/L)	0.0099
致病性肠道细菌 (*10 ⁵ 个/L)	0.0099

5.社会影响

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.5000 & 0.2500 & 0.2500 \\ 2.0000 & 1.0000 & 0.5000 & 0.5000 \\ 4.0000 & 2.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 4.0000 & 2.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0.1644 \\ 0.3288 \\ 0.6576 \\ 0.6576 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 4.0000 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

准则层与因素层之间的关系为：

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.2000 & 0.5000 & 0.3333 & 1.0000 \\ 5.0000 & 1.0000 & 3.0000 & 2.0000 & 5.0000 \\ 2.0000 & 0.3333 & 1.0000 & 0.5000 & 2.0000 \\ 3.0000 & 0.5000 & 2.0000 & 1.0000 & 3.0000 \\ 1.0000 & 0.2000 & 0.5000 & 0.3333 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

对应的特征向量与特征值为：

$$B = \begin{pmatrix} 0.1511 \\ 0.8139 \\ 0.2759 \\ 0.4646 \\ 0.1511 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 5.0153 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

综合起来，得到如下表格（已进行归一化）

表 5 各指标层中的数据与最终指标之间的关系			
准则层	因素层	指标层	所占权重(相对于最终结果)
压力子系统	自然压力	极端天气	0.0271
		入侵物种种类及数量	0.0542
	人类压力	噪声	0.0369
		海水有机污染物含量	0.1919
		有害重金属含量	0.0249
		红树林周围环境农药含量	0.0922
		围海造陆面积	0.0922
状态子系统	生境质量	溶解氧 (mg/L)	0.0100
		总 N (mg/L)	0.0100
		氨氮 (mg/L)	0.0100
		硝氮 (mg/L)	0.0100
		总 P (mg/L)	0.0100
		可溶性 P (mg/L)	0.0100
		COD (mg/L)	0.0198

		BOD (mg/L)	0.0198
		噪声	0.0099
		空气质量	0.0100
		极端天气天数	0.0100
		大肠菌群总数 (*106 个/L)	0.0099
		致病性肠道细菌 (*105 个/L)	0.0099
	生物与生态	水环境中浮游植物生物量的测定	0.0163
		水环境中游泳动物生物量的测定	0.0163
		水环境中 N 元素的监控	0.0449
		水环境中 P 元素的监控	0.0299
		总的无机氮负荷量	0.0071
		人为因素 (与人类影响有关)	0.0906
		各个方程的初值	0.0448
响应子系统	社会响应	G D P	0.0074
		人口密度	0.0147
		相关宣传	0.0296
		出台措施	0.0296

注：该表格与上面的表格 2 一一对应

指标层的各项得到实际数据后,需要根据一定的方式换算成一个 0 到 1 之间的数据,如果该指标所代表的项目对环境的伤害越大,则该指标对应的数值越接近 1,否则对应的数值接近 0。根据以上矩阵得到的各项所占权重进行计算,最后得到的结果与环境状态之间的对应关系如下表所示:

表 6 深圳近海生态系统评价分级标准及含义

等级	DI 值	状态	意义
I	≥0.8	优	生态系统具有稳定的结构和功能, 系统恢复再生力强
II	0.6-0.8	良	生态系统功能较为完善, 受到干扰后一般可以恢复
III	0.4-0.6	中	受到一定程度破坏, 尚可维持其基本功能, 受干扰后易恶化
IV	0.2-0.4	差	生态系统结构和功能退化, 生物多样性降低, 环境问题突出
V	≤0.2	劣	生态系统结构和功能几乎崩溃, 生态环境遭到严重破坏

结合福田目前的情况, 以及参考资料[14]中所给的数据, 大致给保护区评分如下:

表 7

准则层	因素层	模拟评分	总得分
压力子系统	自然压力	0.6	0.5134
	人类压力	0.4	
状态子系统	生境质量	0.5	
	生物与生态	0.6	
响应子系统	社会响应	0.8	

6.2 生态系统评估与预警

在对生态系统的评估中，同样由以上的稳定性分析以及部分的模型求解，通过对于方程本身的分析，我们得到如下结论：

第一个模型时效较短且参数受时间影响大，故主要依靠参数修正以及定时的实际测量，再将测量结果与已有的国家标准比较；

模型二中在营养供给充足时，植物生长良好，在营养不足时停止生长甚至下降。结合深圳湾的实际情况，在 30 天内，植物长势良好这一结果是可以接受的。

模型三中通过理论分析得到参数与红树林面积之间的关系为：

- (1) 当 $d_1 d_2 d_3 < l_1 l_2 l_3$ 时， S_1 、 S_2 、 S_3 同时增长；
- (2) 当 $d_1 d_2 d_3 = l_1 l_2 l_3$ 时， S_1 、 S_2 、 S_3 趋于稳定；
- (3) 当 $d_1 d_2 d_3 > l_1 l_2 l_3$ 时， S_1 、 S_2 、 S_3 同时递减；

在深圳红树林面临衰减的条件下，当测量所得的各个参数的结果满足(1)时，可认为红树林目前情况良好；满足(2)时需要加强监控；满足(3)时红树林状况不容乐观，应加强监管保护工作。

模型四的分析方法与模型三类似，得结果为：

- (1) $K=1$ 时，
 - 1) $\mu_T - m_T - G_T > 0$ 时， T 随着 t 呈指数增长趋于无穷；
 - 2) $\mu_T - m_T - G_T < 0$ 时， T 随着 t 呈指数减少趋于 0；
- (2) $K=2$ 时，
 - 1) $\mu_T - m_T > 0$ 时， T 随着 t 呈指数减少趋于 0；
 - 2) $\mu_T - m_T < 0$ 时， T 随着 t 呈指数增长趋于 $\frac{\mu_T - m_T}{G_T} e^{t_0(\mu_T - m_T)}$

在模型五中，当 $\mu_B - m_B > 0$ 时， B 随着 t 呈指数增长趋于无穷；当 $\mu_B - m_B < 0$ 时， B 随着 t 呈指数减少趋于 0。

实际上这几组方程之间是通过影响其他方程组中的参数来实现相互之间的联动的。实际中结合福田红树林自然保护区的实际情况，保护区富营养化严重，滩涂植物的生长

情况总体上不算糟糕，于是我们主要研究鸟类与鸟类的主要食物：滩涂生物之间的关系。

$$T = e^{(\alpha P_T - m_T - \beta B)(t - t_0)} \quad (6.4)$$

$$B = B_0 e^{(aT - m_B)(t - t_0)} \quad (6.5)$$

联立得：

$$T = T_0 e^{(\alpha P_T - m_T - B_0 e^{(aT - m_B)(t - t_0)})(t - t_0)} \quad (6.6)$$

该方程中 α , β , a 为参数，其余参数的含义与上面的模型一致。

这时结果属于隐函数式，因而我们主要借助 MATLAB 进行数值解的求解并给以下模拟，得到如下关系：

取定 $T_0 = 10$, $m_B = 0.5$ （由于 m_B 将会很大程度上影响图像变化，此处不予讨论）

1. 当 $\alpha P_T - m_T \leq 1$ 时（该变量以变化 10 倍讨论）

a) 当 $\beta B_0 = 7$ （ $1 < \beta B_0 < 10$ ）（该变量以变化 1 做讨论）

- i. 当 $a = 0.1$ 时，图像先递减再递增；
- ii. 当 $a = -0.1$ 时，图像整体变化趋势为先递减在增加，但 T 与 t 不再一一对应；
- iii. 当 $a = -1$ 时，图像先递减再递增；
- iv. 当 $a \leq -10$ 时，图像递增；

b) 当 $\beta B_0 = 1$ 时

- i. 当 $a \leq 0$ 时，图像递增；
- ii. 当 $0 < a \leq 0.01$ 时，图像递增趋于一个常值；
- iii. 当 $a > 0.01$ 时，图像递减趋于一个常值；

c) 当 $\beta B_0 = 0.1$ 时（ $0 < \beta B_0 < 1$ ）

- i. 当 $a \leq 0$ 时，图像递增；
- ii. 当 $0 < a$ 时，图像先递增后递减趋于一个常值；

2. 当 $\alpha P_T - m_T \geq 10$ 时（其中 a)、b)情况类似）

a) 当 $\beta B_0 = 7$ （ $1 < \beta B_0 < 10$ ）

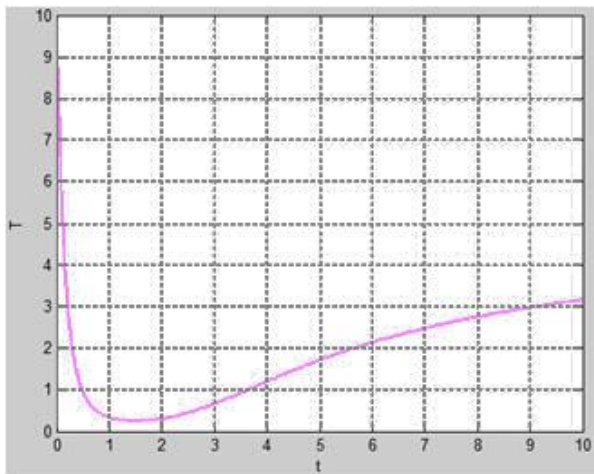
- i. 当 $a > 0$ 时，图像先递增再递减，趋于一个常值；
- ii. 当 $a \leq 0$ 时，图像递增；

b) 当 $\beta B_0 = 0.1$ 时（ $0 < \beta B_0 \leq 1$ ）

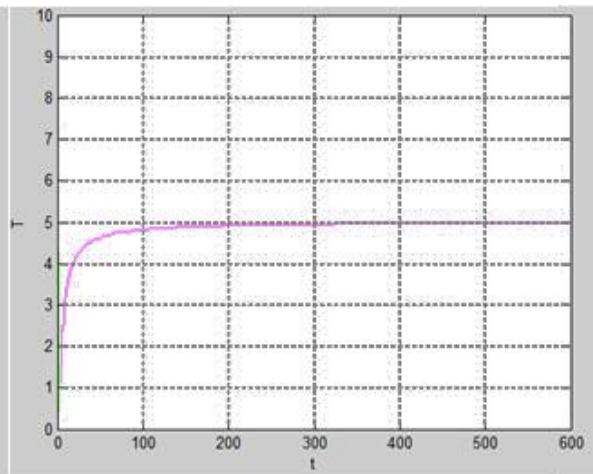
- i. 当 $a > 0$ 时，图像先递增再递减，趋于一个常值,且随着 a 的增加，图像趋于 0；
- ii. 当 $a \leq 0$ 时，图像递增；

在其他变量不变的情况下，改变 m_B ，并根据 10 倍画一条线得出，在很小区域内使得图像趋于无穷、0 或一个常值。

下图给出了图像的一部分情况。其中 T_0 取为 10， m_B 取为 0.5。

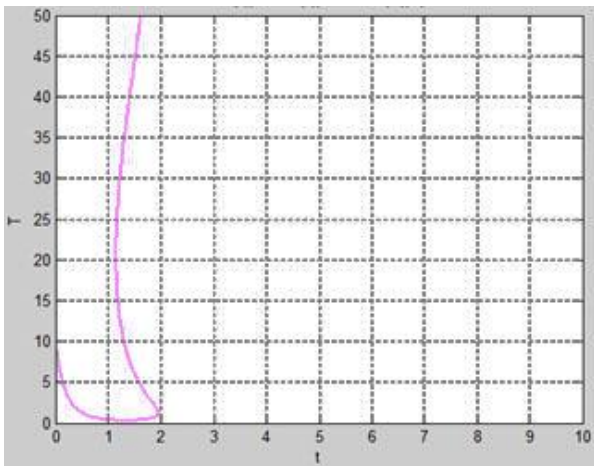


(t 在 0-10 图像)

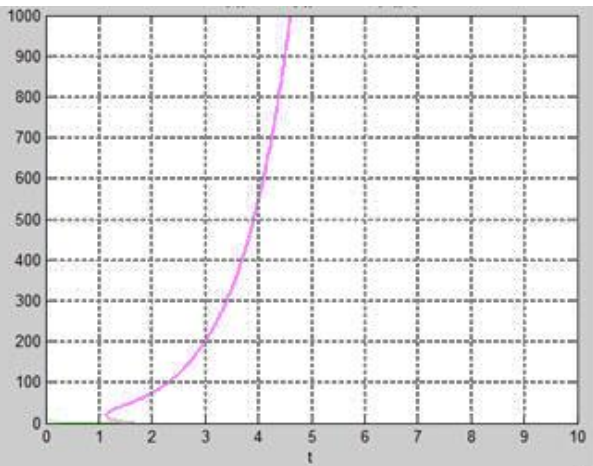


(t 在 1-600 图像)

图 15 $\alpha P_T - m_T = 1$, $\beta B_0 = 7$, $a = 0.1$ 时的 T - t 图像

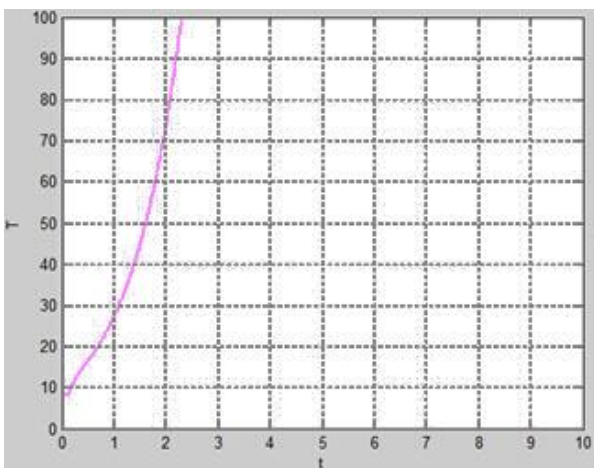


(T 在 0-50 的图像)

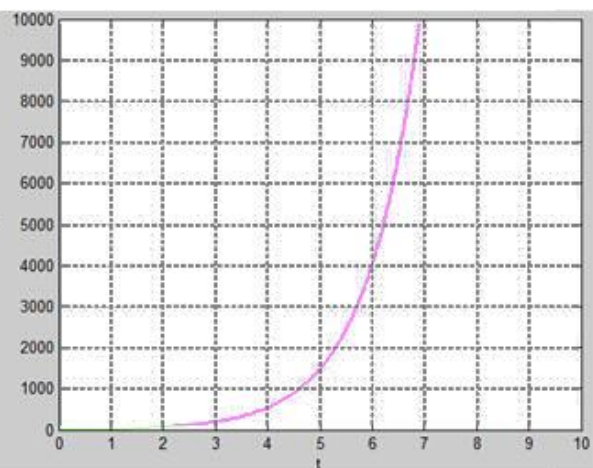


(T 在 0-50 的图像)

图 16 $\alpha P_T - m_T = 1$, $\beta B_0 = 7$, $a = -0.1$ 时的 T - t 图像

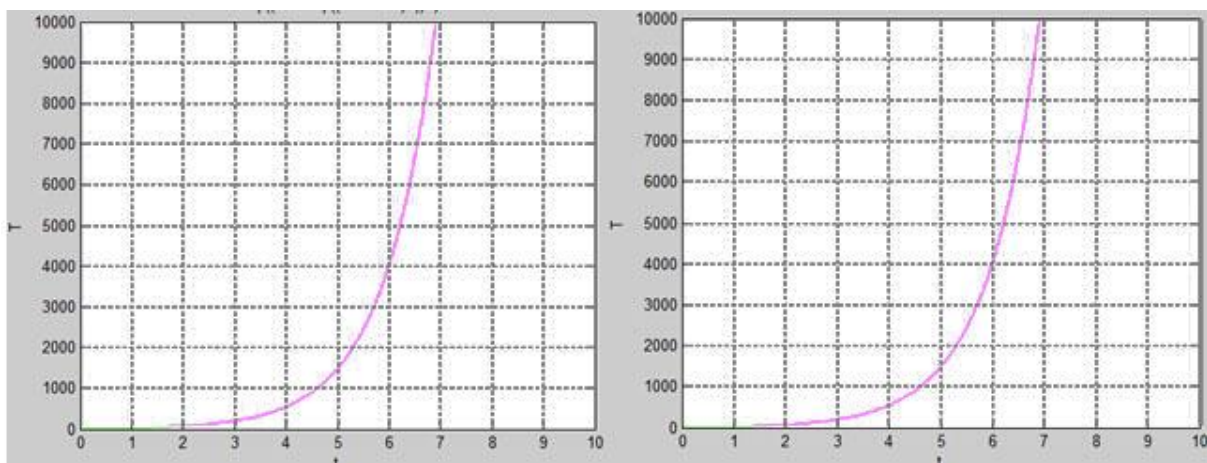


(T 在 0-100 的图像)



(T 在 0-10000 的图像)

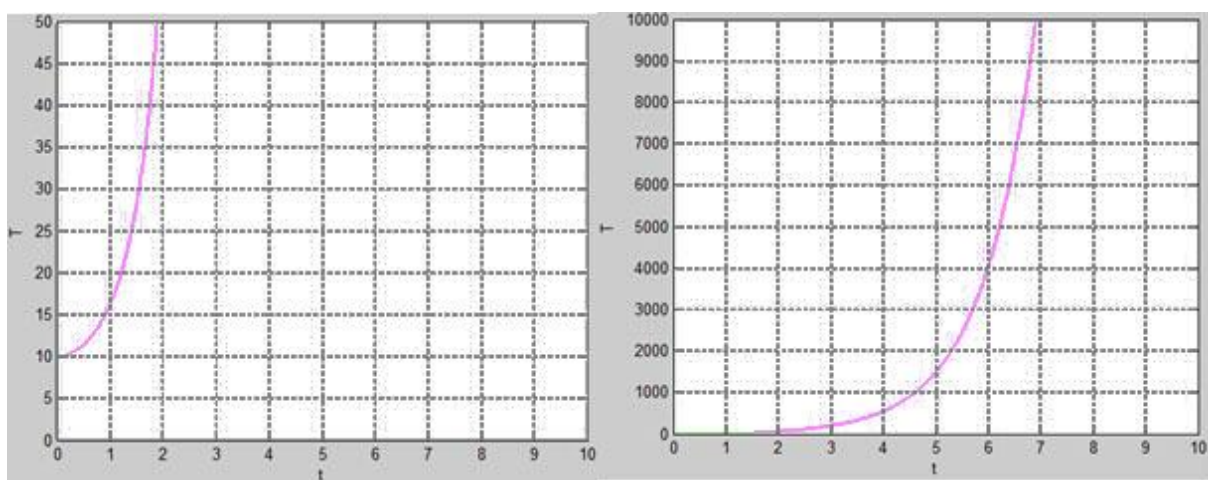
图 17 $\alpha P_T - m_T = 1$, $\beta B_0 = 7$, $a = -1$ 时的 T - t 图像



($a = -10$)

($a = -1000$)

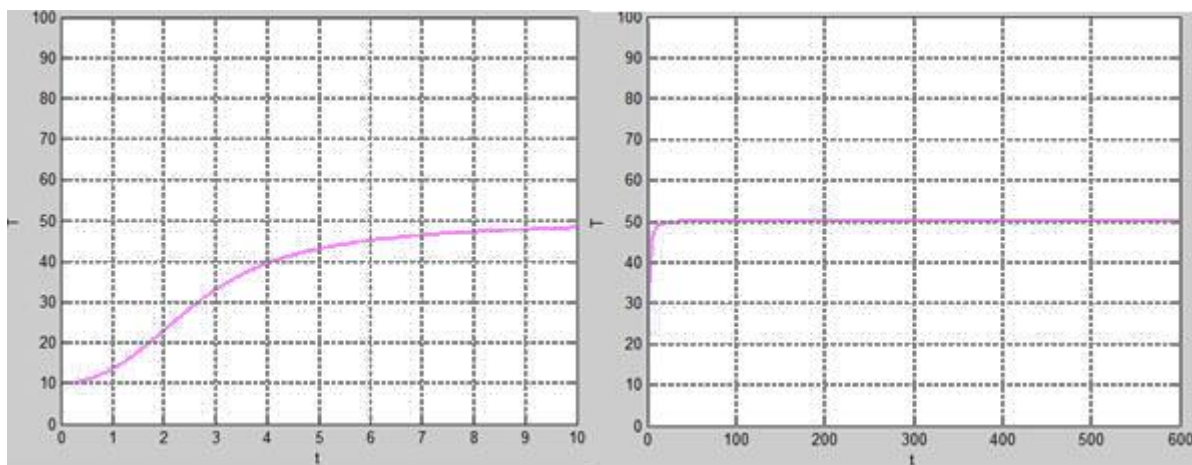
图 18 $\alpha P_T - m_T = 1$, $\beta B_0 = 7$ 的 T - t 图像



(T 在 0-50 的图像)

(T 在 0-10000 的图像)

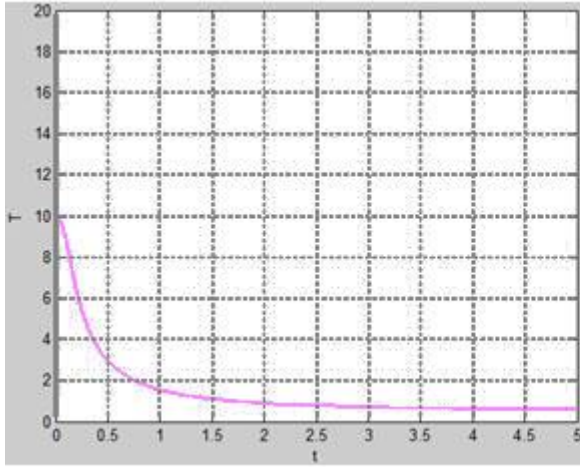
图 19 $\alpha P_T - m_T = 1$, $\beta B_0 = 1$, $a = -0.01$ 时的 T - t 图像



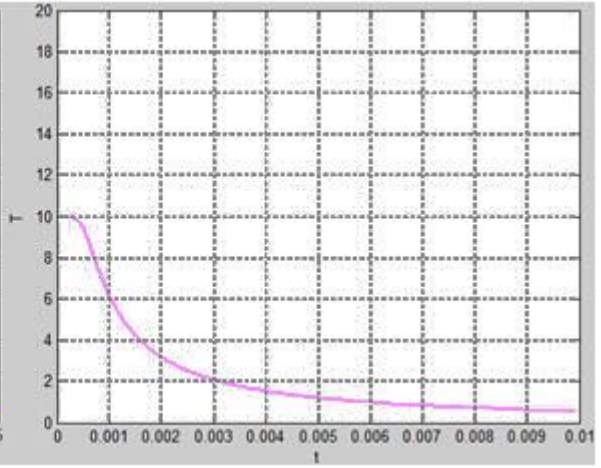
(t 在 0-10 时的图像)

(t 在 0-600 时的图像)

图 20 $\alpha P_T - m_T = 1$, $\beta B_0 = 1$, $a = 0.01$ 时的 T - t 图像

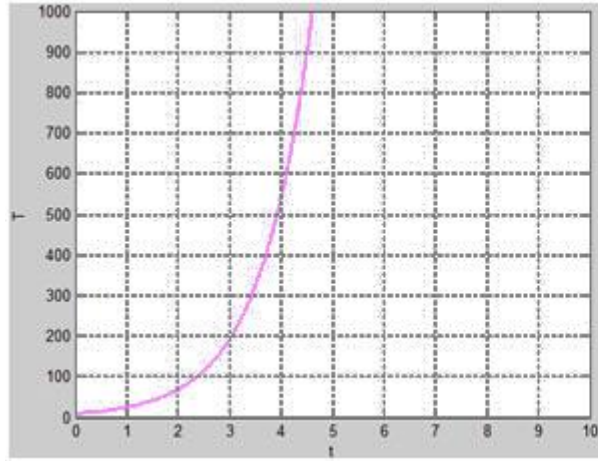


($a = 1$ 时的图像)

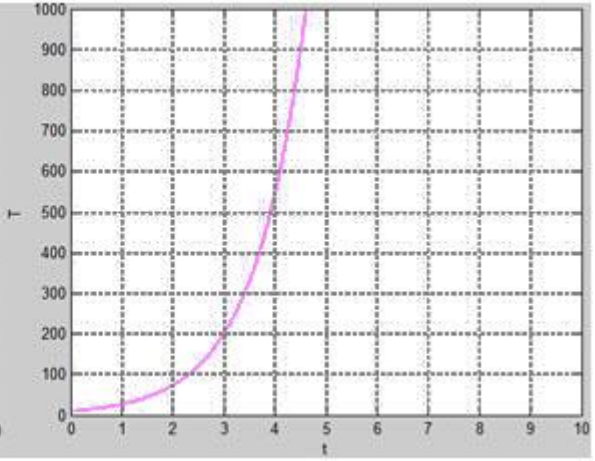


($a = 1000$ 时的图像)

图 21 $\alpha P_T - m_T = 1, \beta B_0 = 1$ 时的 $T-t$ 图像

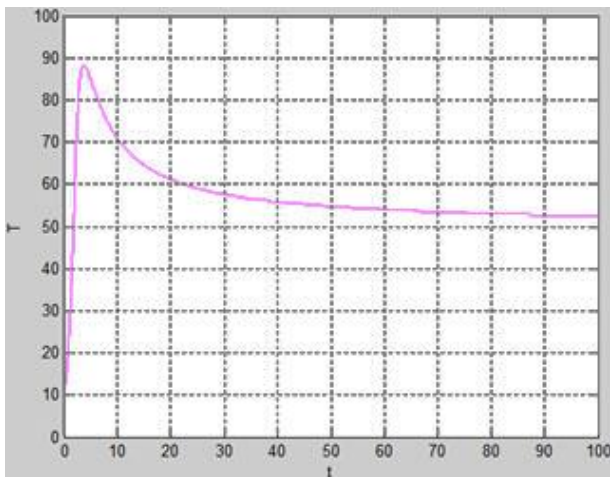


($a = -0.01$ 时的图像)

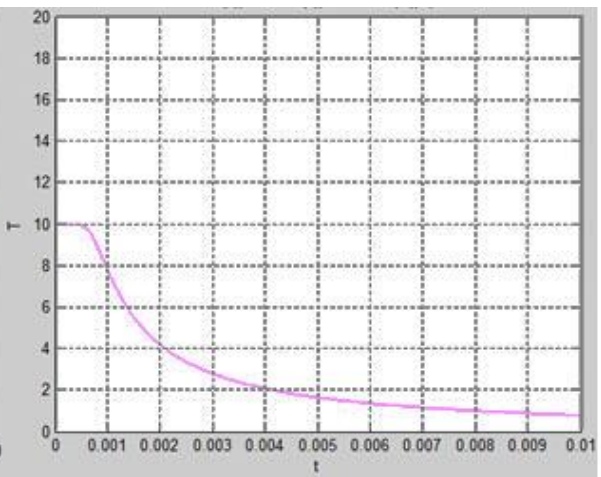


($a = -100$ 时的图像)

图 22 $\alpha P_T - m_T = 1, \beta B_0 = 0.1$ 时的 $T-t$ 图像

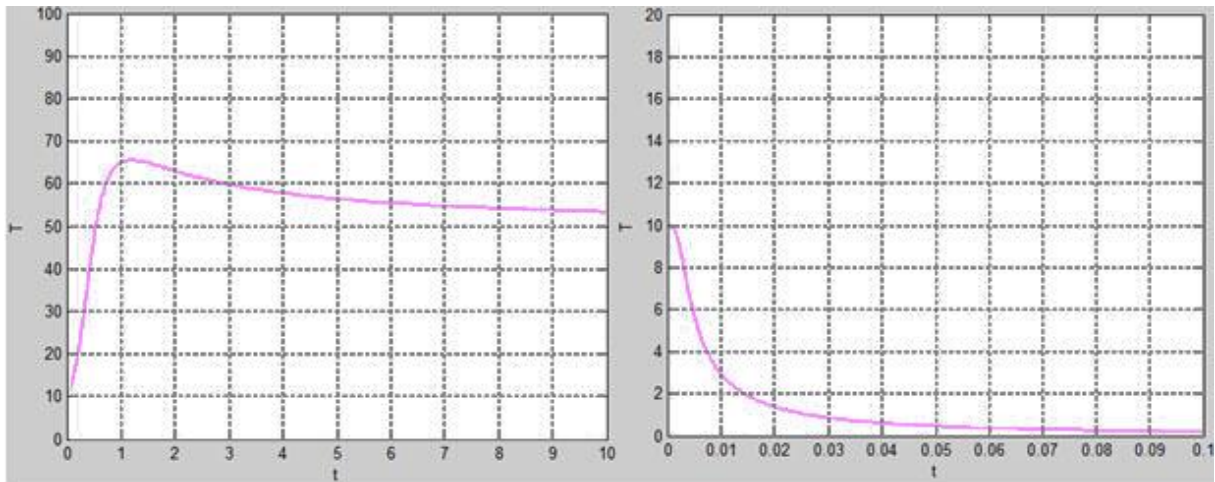


($a = 0.01$ 时的图像)



($a = 1000$ 时的图像)

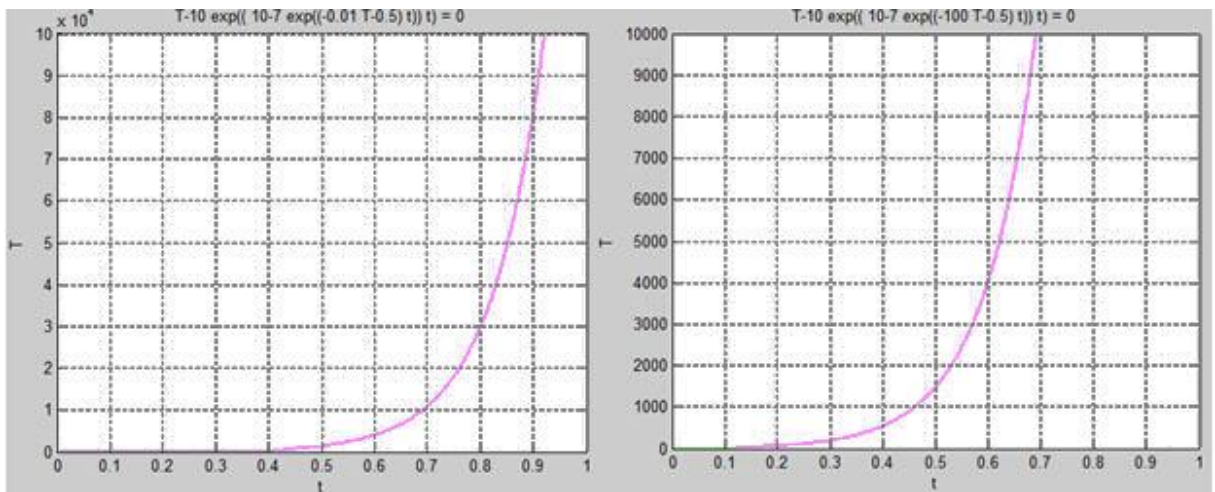
图 23 $\alpha P_T - m_T = 1, \beta B_0 = 0.1$ 时的 $T-t$ 图像



($\alpha = 0.01$ 时的图像)

($\alpha = 1000$ 时的图像)

图 24 $\alpha P_T - m_T = 10$, $\beta B_0 = 7$ 时的 $T-t$ 图像



($\alpha = 0.01$ 时的图像)

($\alpha = 1000$ 时的图像)

图 25 $\alpha P_T - m_T = 10$, $\beta B_0 = 7$ 时的 $T-t$ 图像

鸟类与红树林之间也存在相互影响的关系。但由于通过上网进行资料查阅，红树林本身主要为鸟类提供生活空间而非提供食物，鸟类对红树林的影响主要表现在控制虫害，即控制红树林方程组中有关虫害的参数。那么当鸟类数量下降时，相当于图 11 的情况。

根据上述 PSR 模型，根据我们模拟得到的结果来看，需要对红树林周边的人类活动进行密切的监测，尤其是生活污水排放问题。

除上述常规监测量，当出现异常低温^[13]、地震等可在短时间内对红树林造成重大影响的大规模自然灾害时，应直接预警。

由于模型六之中的 h 是一个阶梯函数，只在一定的时间范围内起作用，因而模型六的最终走向与模型三类似。

总的来说，上述各个部分总体处于上升趋势或收敛于某一合乎目前在生物学中可被认定为生态良好的值时，生态系统稳定，若出现急剧下降或过快上升，如模型三中在部分参数的选取情况下，整个红树林呈现幼化的趋势，这是不利于生态系统稳定的。

再由模型七，人为影响参数主要与噪声，生活污水排放等有关，则得到具体数据后带入方程之中，可以得到各个模型中的相应的参数 m 的具体值，代入上述各项分析之中，得到上述模型所描述的每一部分生物或生态环境一定范围内的变化趋势。反过来说，在实际的操作过程中，我们通过上述分析过程结合模型七即可给出每一个需要被具体测量

的参数的正常范围，测得量在范围之内时，即可认定生态系统状态良好。

6.3 目前红树林面临的主要问题及其解决方法

6.3.1 目前红树林面临的主要问题

通过查阅相关的资料，目前深圳福田红树林自然保护区面临的问题有：

- 1) 红树林保护区水质恶劣远远不能达到国家级保护区的标准。^[15]
- 2) 红树林最大的鸟巢基地距离广深线只有 100m, 目前鸟类的栖息受到了非常大的噪声影响^[10]；
- 3) 深圳河口泥沙淤积严重，若不采取任何行动红树林目前的主要生长区域在可预见的将来消失；^[11]
- 4) 虽然近年来政府对于红树林的重视程度有所提升，但在保护项目增多的同时，红树林周边房价上涨很快，红树林的旅游价值被过度开发，这在目前该红树林生态系统并没有得到良好回复的前提下是不利的；
- 5) 红树林周边人口稠密，深圳河污染较为严重，尽管海湾有一定的吞吐自净能力，但模型一中也给出了浮游植物数量急剧增加即出现赤潮的可能性。
- 6) 红树林周边建有大型高尔夫球场，若监管不力，高尔夫球场所造成的农药污染将会严重影响红树林的生长。

由于目前为止没有明确的证据表明海桑在本保护区内会发展成为外来入侵物种，因而建议目前对海桑以及可能使海桑爆发的变量即林间空地的监测，暂时不采取更进一步的措施。因而本文主要考虑人为对红树林的影响。

基于我们构建出的模型，由于保护区的保护目标种群之一鸟类的生物量受红树林面积以及水质的影响较大，红树林为鸟类提供栖息地、主要生活空间，并具有一定的降噪功能，一定程度上降低鸟类被人类惊扰的长度，而水质影响到鸟类的食物来源，由上面的 T-t 图像，当受水质影响的参数随着水质的污染情况增重而变动时，T 的下降明显且随着时间轴的推进 T 值趋于稳定，相应的鸟类数量也先减少后趋于稳定。因而我们认为目前最应该解决的问题是影响红树林面积的问题以及水质污染问题。



图 26 保护区周边的排污口以及排污量的图示^[15]

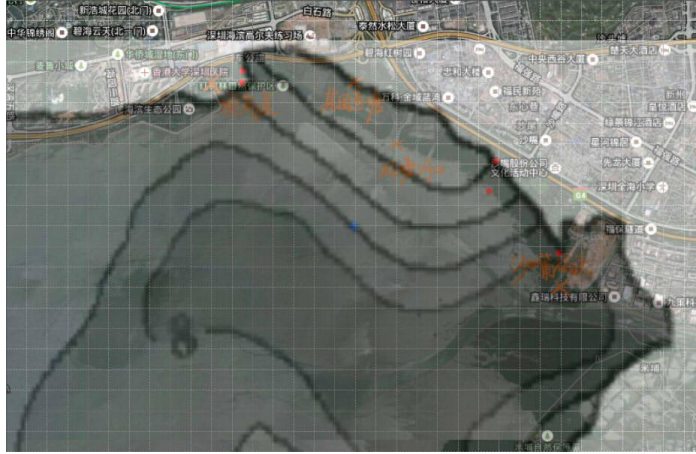


图 27 深圳湾的水体交换周期图^[15]

由上图可见，保护区东南部水体交换时间较慢，为 8 天，而保护区内水质交换相对较快，可能与保护区内有河流流动有关。而水体交换周期的不同，可能是保护区内水质情况差异性大的原因之一。

如下图：

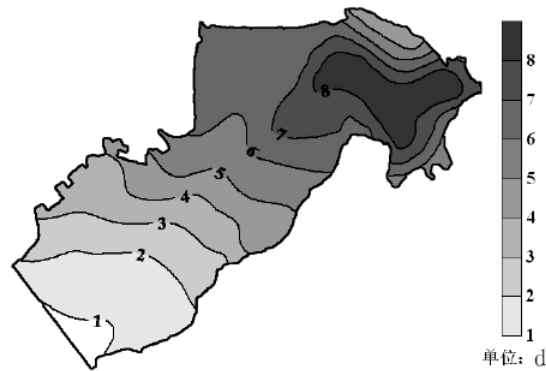


图 28 监测点选择依据图

根据参考资料[14], 几个观测点之中沙嘴码头与凤塘河口的氮磷含量都相对较高，观鸟屋的磷含量也相对较高，基围鱼塘的这几项指标都相对较低，这与水体交换时间长短较为吻合。由于条件限制关于这部分的讨论仅限于此。

那么在忽略潮汐的情况下，进行如下假设：

- ① 水流单向流动；
- ② 水流流速一定；
- ③ 污水排放速度一定；

这样，我们将实际情况简化为一维，得到一维对流方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = kC \quad (6.7)$$

令 $\begin{pmatrix} t \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & m \\ u & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$ ，其中 m 、 n 为任取的参数。

当矩阵 $\begin{pmatrix} 1 & m \\ u & n \end{pmatrix}$ 可逆时, 即 $n \neq um$, 我们可以得到

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{n - mu} \begin{pmatrix} n & -m \\ -u & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \end{pmatrix}$$

那么

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha} = \frac{\partial C}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \alpha} + \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \alpha} = \frac{\partial C}{\partial t} * 1 + \frac{\partial C}{\partial x} * u = kC$$

得到

$$C = A(\beta) e^{k\alpha}$$

其中 $A(\beta)$ 是关于 β 的函数, 由上面已知 $\alpha = \frac{nt - mx}{n - mu}$, $\beta = \frac{-ut + x}{n - mu}$, 可以得到

$$C = A\left(\frac{-ut + x}{n - mu}\right) e^{k\frac{nt - mx}{n - mu}}$$

其中 $A\left(\frac{-ut + x}{n - mu}\right)$ 为关 $\frac{-ut + x}{n - mu}$ 的函数

取 $m = 0, n = 1$, 有 $C = A(-ut + x)e^{kt}$;

取 $m = 1, n = 1$, 有 $C = A\left(\frac{-ut + x}{1 - u}\right) e^{k\frac{nt - mx}{1 - u}}$;

依次类推。

结合实际情况, 我们选用最简单的情况进行模拟, 即令 $A(-ut + x)$ 等于 $-ut + x$ 。由参考资料[15], 这样的估计所产生的误差是可以接受的。

那么由模拟, 污水分布浓度趋势如图示, 可看出排放口附近的污水浓度下降不快。

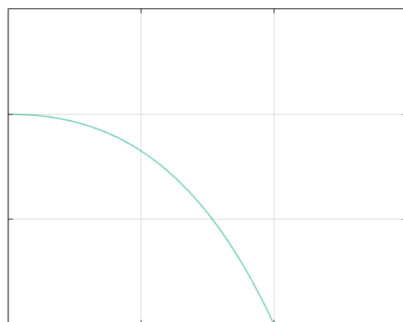


图 29 污水分布浓度趋势图

但若要对深圳湾的水质状况进行更深入的研究, 则应引入二维以上的对流扩散方程, 方程形式如下:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + u_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + u_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + u_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right) + r_A$$

其中 C_A 为某种物质在水体空间中的浓度, u_x , u_y , u_z 为水体在三个方向上的水流速度, D_{AB} 为物质 A 在水体中的扩散系数, r_A 为单位时间内水体中物质 A 产生的量。若将当地的潮汐水文数据带入上述方程, 则可对不同的污染物在深圳湾水域的分布进行描述。由

再结合已有资料, 仅靠深圳湾水体自净能力无法解决水质问题, 必须减排。由参考资料[15], 目前深圳湾减排至少要有 75%。

为了解决上述问题,一方面要继续落实污水减排政策,争取关停保护区内的污水处理厂,另一方面需要在红树林周边坚决执行退耕还林政策,减少甚至停下围海造陆的进程,并适当的采取措施以减缓深圳河口淤积的速度,使得红树林自身的演进速度可以跟得上生存环境的变迁。



不过除这些行动之外,由图片我们看出,若单单的植树造林或是增加红树林可能的生长面积,只能暂时改变红树林的生长趋势,但无法从根本上消除红树林的退化趋势,因而在力所能及的范围内,也应该尽力减少人为因素的影响,即减小参数 m 的数值以保证红树林自身的自然演替速度。

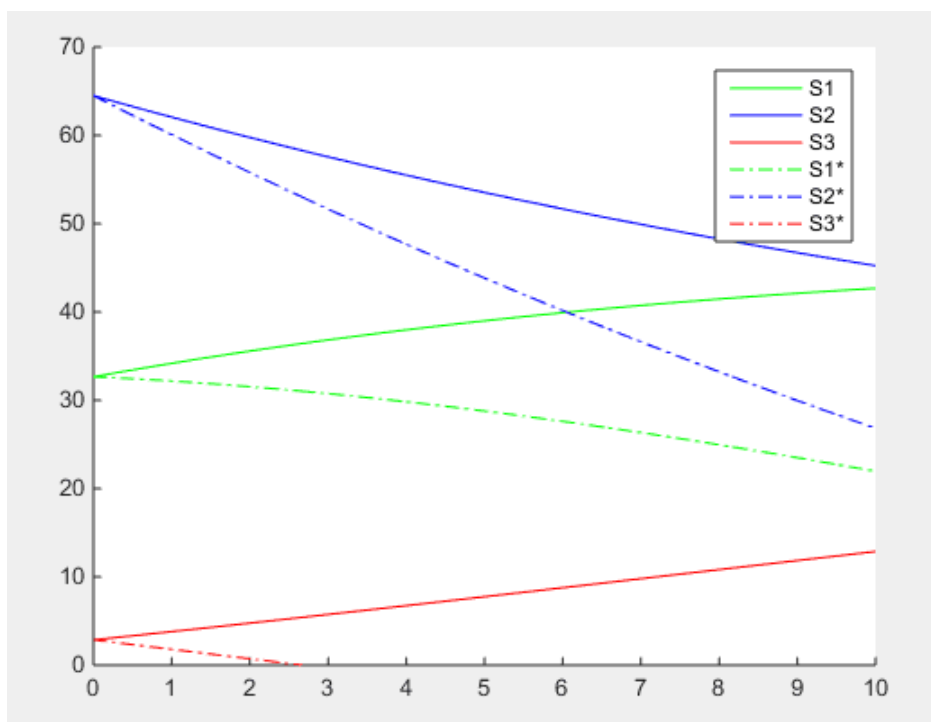


图 31 采取负影响后的红树林面积变化图

除了上述两点以外，由 PSR 模型以及相关新闻可知，为提高保护区生境质量，并提高环境监测的准度以及水平，应考虑采取包括增加对温度、大气、噪声等影响红树林生态的因素的定时监测，在深广高速靠近保护区一侧加装噪声隔离装置等措施。同时由于目前国际交流日益密切，生物入侵风险日益加大，该因素影响上述方程中的 m_T 以及 m_B 项，而由上面的模拟可以看出这两个参数对方程结果产生较大的影响，因而应加强海关对生鲜产品的检查力度，尽量降低外来物种入侵的风险。

总结而言：

1. 适当的采取措施以减缓深圳河口淤积的速度；
2. 增加对温度、大气、噪声等影响红树林生态的因素的定时监测，在深广高速靠近保护区一侧加装噪声隔离装置；
3. 适当的人工造林、退耕还林，在增加现有红树林面积的同时，停止红树林周边的填海造陆活动；
4. 在生活污水的治理上严加控制，必须减排；
5. 加强海关对生鲜产品的检查力度，尽量降低外来物种入侵的风险；

七、 模型评价

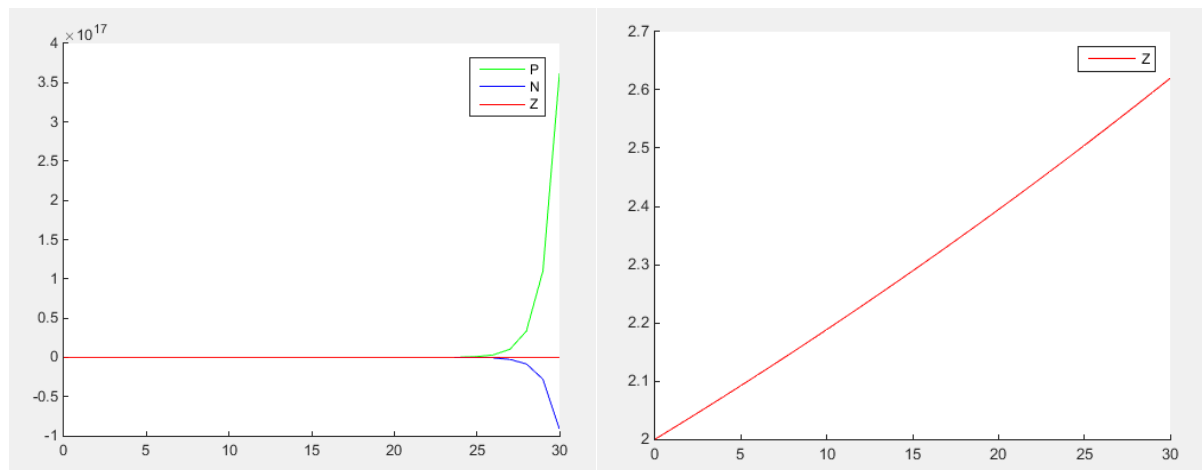
7.1 模型优点

- 1) 本模型通过建立微分方程，较为完整的描述了深圳市福田红树林保护区的生态系统的结构以及各部分之间的关系；
- 2) 本模型结合了微分方程与线性模型，一定程度上提高了模型的精度，并且避免了偏微分方程的出现，使得计算相对容易，计算速度相对较快，有利于适应数据更新速度明显加快的动态监测系统；

3) 对于不确定的参数, 本模型提供了多种参数以及多种初值的解的图像, 使得本文的结论的适用范围有所扩大, 讨论的可信度也有所提升;

7.2 模型缺点

1) 由于深圳湾附近的数据目前还比较缺乏, 我们无法保证该模型的结果完全适用于深圳湾的情况;



如上图示, 参数未正确取得时, 图像与真实情况偏离很大。

2) 本模型在合理的范围内进行的较大的简化, 导致本模型在计算速度较快的同时, 不能做到对某些变量的精确描述;

3) 本模型中存在大量的参数, 且这些参数本身也会受时间、地理、人为等因素的影响, 因而本模型无法做到长期准确的预测, 模型适用的时间段比较短, 需经常对参数进行修正。

4) 虽然利用方程组的参数与方程结果之间的关系来构建模型理论上更合理, 但目前我们无法利用这种方式得到一个完成度比较高的方案。本文在构建评价体系是采用了 P S R 模型的体系, 但由于条件的限制, 本文 P S R 模型之中各个层次中指标的选择不是非常合适, 同时由于 P S R 模型对人的意见有比较大的依赖性, 需要深入的调查与丰富的经验, 在这方面存在不足。除此之外, P S R 模型自身考虑人的思想的特点既是优点也是缺点, 这使得该模型的科学性较容易受影响, 且一致性与合理性之间的平衡有时候并不容易找到。同时, PSR 模型虽然能够较为科学地反应各项之间的比例关系, 但对于各项之间为什么一定要是这样的关系并没有给出一个很好的解决方案, 比较模糊, 因而我们期待更好的评价方法的出现。

八、 模型改进

1. 由于时间限制, 本模型对具体情况进行了较大的简化, 在大部分模型中将人类的影响简化为一个参数, 且在模型 7 中确定该参数时, 我们假定各种不同的人类活动造成的影响与总的参数 m 之间是线性相关的, 然而实际上他们之间的关系需要实际的实验数据进行验证与确定;

2. 目前本模型只能做到短时间内深圳福田红树林保护区的描述以及预警, 但在时间跨度较大时, 该模型会有很大的误差, 这与参数本身并不一定是恒定的以及实际情况的复杂性不无关系。同样由于时间的限制, 在建立模型的过程中尽管组内成员已经查阅了一定量的资料, 但对于生物数学模型的了解还没有太深, 对于某些生物生态过程的描述不够细致准确, 比如在滩涂动物模型中未考虑同一类别下生物之间的互相竞争, 从提高

准确度的方面来考虑, 应该加上这一项。

3. 本文中采用微分方程进行描述, 由于所求解的量不完全一致, 如在生物模型中我们主要考虑生物量, 而在红树林的演进模型中我们考虑红树林面积的变化, 因而该模型没有对于各个营养级之间的能量流动进行全面的描述。由参考文献[12]我们得知, 目前在描述能量流动的生物数学模型的领域, EWE 模型相对成熟且拟合效果更好, 可以考虑在建立微分方程的同时辅助以 EWE 模型, 提升模型的可信度以及描述的精度。

4. 根据上面的讨论, 我们大致得出管理支撑平台应监测至少应该是 PSR 模型中准则层中所给的量, 然而这对一个大数据支撑平台的监理来说是不够的。我们希望通过上述方程组中不同参数对于最终结果的影响程度给出具体被监测值的监测周期, 也希望通过一维对流方程的升级版, 即二维对流扩散方程给出理论上最佳的水质监测点等等。但由于目前我们无法得到实际中参数的变化情况, 并且这部分资料的影响会很大, 所以本文没能很好的讨论这一部分, 而这一部分可以多加改进。

参考文献

- [1] 岳天祥. 资源环境数学模型手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 李夜光, 李中奎, 耿亚红. 富营养化水体中 N、P 浓度对浮游植物生长繁殖速率和生物量的影响[j]., 生态学报, 2006, 26 (2): 317-332
- [3] 马德毅等主编. 山东省近海海洋环境资源基本现状. 北京: 海洋出版社, 2013.04. [4] 金辉, 温琰茂, 袁野. 珠江三角洲基塘系统水体中氮的形态分布及其水化学指标关系研究[J]. 生态经济, 2008, (第 5 期).
- [5] 王迎宾, 刘群. 鱼类自然死亡率的估算及其影响因子的探讨[J]. 中国海洋大学学报·自然科学版, 2005, (第 1 期).
- [6] 卢群, 曾小康, 石俊慧, 陈里娥, 周凯, 雷安平, 咎启杰. 深圳湾福田红树林群落演替[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4662-4671.
- [7] 扬州大学网站 http://jpkc.yzu.edu.cn/course/zwyx/0501kcrr_02_2b.asp
- [8] 郑帷婕, 包维楷, 辜彬, 何晓, 冷俐. 陆生高等植物碳含量及其特点[J]. 生态学杂志, 2007, (第 3 期).
- [9] 谭永基, 蔡志杰. 数学模型 [M]. 复旦大学出版社, 2011.
- [10] 百度文库《红树林》红树林所面临的威胁与保护措施, 人为干扰部分 <http://wenku.baidu.com/link?url=5xelXBqTJADVHmG5WXAVXI56FQznMmffVCLLbElftyos9ArqrAYRlvzmQVhb-NGnWURIn52WV9jansyfkWLnq2ApsLz90mwYOpEqHKatVjS>
- [11] 林鹏. 中国红树林湿地与生态工程的几个问题[J]. 中国工程科学, 2003, (第 6 期). [12] 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, (第 5 期).
- [13] 《广西近海生态系统健康评价》 孙龙启 厦门大学 10384
- [14] 福田红树林湿地水环境监测 北京大学深圳研究生院 环境与能源学院 李瑞利
- [15] 深圳湾水动力时间参数计算及主要营养盐减排效果分析 万由鹏 清华大学

附录

附录一.

表不同年龄群落的立木级分布的动态

立木级 Tree class		II	III	IV	V
4a群落	多度/(个体数/100m ²)	33.78	54	0.72	0
4 age community	百分数/%	38.17	61.02	0.82	0
17a群落	多度/(个体数/100m ²)	1.33	30.1	15.24	0
17 age community	百分数/%	2.86	64.49	32.65	0
56a群落	多度/(个体数/100m ²)	0.67	10.67	15.5	1.33
56 age community	百分数/%	2.37	37.87	55.03	4.73
73a群落	多度/(个体数/100m ²)	0.33	3.83	10.67	0.5
73 age community	百分数/%	2.17	25	69.57	3.26

附录二.

表不同年龄群落的高度级分布的动态

高度级 Height		<1m	1—2.5m	2.5—5m	5—10m
高度级处于分级线的个体归于较高的一级					
4a群落	多度/(个体数/100m ²)	4.67	59.28	24.56	
4 age community	百分数/%	5.27	66.98	27.75	
17a群落	多度/(个体数/100m ²)		2.03	16.51	28.13
17 age community	百分数/%		4.35	35.37	60.27
56a群落	多度/(个体数/100m ²)		2.17	5.5	20.5
56 age community	百分数/%		7.69	19.53	72.78
73a群落	多度/(个体数/100m ²)		0.33	5.67	9.33
73 age community	百分数/%		2.17	36.96	60.87
高度级处于分级线的个体归于较高的一级					

目标层	要素层	要素亚层	指标层
红树林湿地健康评价指标	群落结构	自然性	林分起源、集约度
		结构完整性与稳定性	树种丰度、建群种比例、郁闭度、龄组结构、幼树中优势种比例、更新等级
	生物安全性	物种组成	植物、大型爬行动物、鸟类、土壤动物和土壤微生物
		外来入侵种	种类、数量、面积、面积比例
	群落稳定性	病虫害危害	危害植株数占总株数比例、危害面积及危害面积比例
		湿地破碎化程度	林地总面积、林地面积退化率、湿地开垦面积百分率
		多样性生境的完整性	有林地面积比例、林外裸滩面积比例、浅水水域面积比例、潮沟面积比例
	生境理化性质指标	经济生产活动对群落的干扰	林地距居民区的距离、道路、工厂
		潮滩土壤	土壤结构、土壤盐度、土壤 pH、硫化物、土壤总有机、土壤养分、沉积物重金属含量
	生物因子指标	水文水质	盐度、水位、淹水的延时、淹水的频率、COD、BOD、DO、pH、无机氮、活性磷、重金属含量、石油类
			每平方米底栖动物洞穴的数量