

福田红树林生态系统模型框架 的构建及应用实例研究

摘要

本文是关于福田红树林自然保护区生态系统健康保护问题的研究。保护区因其地处城市腹地、面积小的特点，生态环境较为脆弱。针对这一现状，本文建立了涵盖动态监测、生态健康评估和迫切问题预测的一体化模型。

本文依据种间关系建立食物网，筛选出影响生态系统的主要物种和与主要物种相关的包括水环境质量、环境空气质量、噪声在内的环境因子。并基于此模型框架，主要解决以下问题：

首先，建立以 Lotka-Volterra 方程为基础的微分方程模型，根据生物量的变动情况予以简化。根据单因子指数法和动态加权处理后的水质综合影响指数，结合参数的灰色识别方法和最小二乘原则，确定微分方程组的参数。通过微分方程模型实现对保护区主要生物变化趋势的动态监测。

其次，红树林湿地生态系统是一个社会，经济，自然互为因果，互相影响和叠加的动态复合生态系统，因此本文选用 PSR 模型建立健康评估系统。在指标选取方面，在把握指标整体性、可操作性的基础上，参照其他红树林地区的健康评价指标体系，从压力、状态、响应方面选取了以外来物种入侵、水环境污染、环境污染治理投资额为代表的 13 个指标。为了平衡主客观影响，选取层次分析模型和熵权模型相结合的方式确定各指标权重。根据综合指数法确定当前生态系统压力、状态、响应方面的评分分别为 0.378、0.41、0.53，认为该研究区域承受着较大的自然和人为压力，且响应程度不高，导致生态系统状态下滑。

再次，在满足微分方程模型和健康评价体系的数据要求下，从数据监测频率和监测范围方面，尽量精简地给出数据监测方案。

最后，从健康评价权重和现状评估这两方面综合考虑，确定水环境污染为当下最迫切需要解决的生态系统问题。针对水环境指标数据的不同趋势，将其划分为整体型和波动型指标进行预测。整体型指标包括溶解氧、化学需氧量，采用灰色神经网络模型预测方法，将 2015 年 1 月的预测值和实际值比较，误差均小于 4%；波动型指标包括氨氮、大肠菌群总数，采用曲线拟合的方式进行预测，将 2015 年 1 月的预测值与实际值比较，误差均小于 10%，两种预测方式都能达到较理想的效果。根据水质污染状况，分析水质综合指数较高监测点的污染物来源和水质恶化原因，提出具体的针对性治理建议。

文章结尾针对论文中建立的福田红树林自然保护区湿地生态系统模型，进行优缺点分析，为模型进一步改进提供方向。

关键词：Lotka-Volterra 方程；动态加权方法；PSR 评价模型；灰色神经网络预测模型

目录

I	问题重述	1
1.1	背景	1
1.2	本文拟研究的问题	2
II	问题分析	2
2.1	生态系统模型框架与健康评价体系的分析	2
2.2	数据监测方案的分析	3
2.3	最迫切问题的分析	3
III	具体数据及其分析	3
3.1	给出的数据	3
3.2	补充的数据	4
3.3	对数据的预处理	4
IV	模型假设	5
4.1	模型假设	5
V	模型建立与求解	6
5.1	生态系统模型框架的构建	6
5.2	种群系统动力学模型的建立	8
5.2.1	模型的准备	8
5.2.1.1	水质数据的处理	8
5.2.1.2	其他污染数据的处理	16
5.2.2	种间关系的微分方程建模	17
5.2.2.1	生态系统种间关系的分析	17
5.2.2.2	Lotka-Volterra 模型的建立	18
5.2.2.3	模型的简化与求解	20
5.3	生态系统健康评价体系的构建	26
5.3.1	问题分析	26
5.3.2	深圳福田红树林保护区健康评价指标体系	27
5.3.3	指标评价标准	29
5.3.3.1	压力子系统	29
5.3.3.2	状态子系统	33
5.3.3.3	响应子系统	35
5.3.4	指标权重的确定	36
5.3.4.1	层次分析模型	36
5.3.4.2	熵权法模型	37
5.3.5	综合指数法	38
5.3.6	部分求解	38
5.3.6.1	评价模型求解	39
5.3.6.2	层次分析模型求解	42
5.3.6.3	综合指数法求解	43
5.4	生态监测方案的构建	44
5.5	最迫切生态问题的预测与控制	46
5.5.1	问题分析	46
5.5.2	水环境质量的预测	47
5.5.2.1	整体型指标预测的分析	47

5.5.2.2 灰色系统预测模型的建立	48
5.5.2.3 灰色神经网络综合预测	50
5.5.2.4 波动型指标预测的分析	52
5.5.2.5 水质综合影响指数的预测	55
5.5.2.6 水环境质量的控制改善	56
VI 模型评价与推广	57
6.1 模型评价	57
6.2 模型推广	59
VII 参考文献	60
附录:	62

I 问题重述

1.1 背景

福田红树林自然保护区位于深圳湾北东岸深圳河口处（如图 1-1 所示），是为保护红树林湿地生态系统而建立的国家级自然保护区。相比于其他湿地生态系统，福田红树林自然保护区面积狭小，且其地处城市腹地，受人类活动影响较大，故系统生态健康十分脆弱。



图 1-1 福田红树林自然保护区区域图

目前，国内外关于湿地生态系统的研究主要涉及湿地退化及其原因分析、保护、恢复重建与管理、对全球气候变化的响应以及评价等方面^[1]。国外关于湿地退化、恢复工作已取得丰硕成果。在人类活动影响下湿地环境变化规律及其对策、湿地对气候变化的响应以及湿地保护、可持续性、动态监测等问题成为研究的热点。关于福田红树林的研究主要涉及红树林自然保护区的生态问题及其修复对策、海桑种群生态学研究、红树引种及引起的变化、红树林生态系统 EWE 模型构建、健康评价指标体系等方面。在红树林湿地健康评价的研究并不深入，没有形成统一的标准和完整的体系^[2]。

目前福田红树林健康评价主要基于抽样监测数据和专家经验等静态方法，且存在监测数据不全面、监测点覆盖面不足、监测频率过低等问题。目前仅存在昆虫、鸟类数目的部分数据以及水质的多年多点位的监测数据，生态系统内其他生物，尤其是红树植物

的监测数据有待补全。

据上析，福田红树林需构建一体化生态模型框架，为生态系统的动态监测，健康评估及预警提供大数据管理支撑平台和动态模拟分析支撑平台。

1.2 本文拟研究的问题

1. 建立湿地生态系统的模型框架，力求重现福田红树林自然保护区的原貌。并且在建立该模型框架的基础上，实现对种群数量的动态监测，并确定生态系统健康评价体系。
2. 依据生态系统健康评价体系所要求的数据构成，设计保护区未来的数据监测方案。
3. 通过查阅相关资料与建模分析，确定福田红树林当下最迫切需要解决的生态系统问题，对其发展趋势进行预测，并提出合理可行的保护、管理方案。

II 问题分析

2.1 生态系统模型框架与健康评价体系的分析

模型框架是对福田红树林生态系统的一个模拟重现。在这个过程中，考虑到建立模型的需要，应该在能够保持生态系统主体的前提下，对模型框架做尽可能地简化。在模型的简化过程中，首先，应该福田红树林自然保护区的具体研究范围与具体生态情况；其次，应明确系统中的主要生物因子和生境因子，将它们作为模型框架的生态主体；最后，应着重分析这些生态因子之间的耦合关系，并在此基础上讨论保护区内主要物种的数量变化情况。

在生态系统模型框架的基础之上建立的生态系统健康评价体系有多个生态系统评价指标构成，并作为生态系统数据监测及问题预测的重要参考对象。

考虑到福田红树林自然保护区地处深圳市腹地，红树林湿地生态系统是一个社会，经济，自然互为因果，互相影响和叠加的动态复合生态系统，相比其他类似生态评价研究，决定采用 PSR 评价模型进行评价。对于健康评价体系指标，分别从“压力”、“状态”、“反应”三个方面依次进行分析。其中“压力”指的是人类活动对环境的压力，“状态”反映环境当前的状态或者趋势，“响应”则是指人类面对环境问题采取的对策。可见，PSR 评价模型抓住了“社会 - 经济 - 自然”复合生态系统中相互关系特点，从社会、经济和自然的因果关系中反映出生态系统的状况。

对于生态评价指标之间权重的确立，本文考虑到主客观结合的原则，分别采取层次分析模型和熵权模型结合的权重确定体系。在层次分析法的权重确定过程中，本文将参

考专家意见和类似评价的指标体系构成，避免笔者主观赋权。为平衡不可避免的主观性问题，本文辅以客观的熵权模型予以权重，来保证权重确定体系的客观性。

在生态指标的评价过程中，需要对量纲、数量级，正逆方向不同的指标实施标准化处理。针对存在业界内统一的评价标准的指标评价，按照该评价标准进行生态评价；针对存在无业界内统一的评价标准的指标评价，可通过对于往年数据的统计分析，找出该指标的最高评价标准，利用 TOPSIS 方法进行评价分析。

2.2 数据监测方案的分析

监测方案具体由监测内容、监测方式、监测点位和监测频率确定。及时、准确地获取监测数据是对生态系统健康状况进行现状评价和未来预测的基础。

监测内容主要为生态系统健康评价体系中所要求获得的数据。对于易于监测获取的数据，可参考对于该数据获取的普遍方案，确定监测方式、监测点位以及监测频率，根据福田红树林生态系统健康评价体系的数据要求加以修正；对于生态系统健康评价体系中某些难于直接获取或获取步骤十分复杂的数据，本文尽量通过易获取的数据代替，或通过对于已知数据的分析，求解出该数据。

2.3 最迫切问题的分析

生态系统中最迫切的问题应从所建立的生态系统的健康评价和微分方程模型中确定。该生态问题同时满足两个条件：一、该问题目前形势已经非常严峻；二、该问题尚未得到合理的控制，对生态系统整体的影响较大。根据上述条件，从当前生态系统的健康评价中选取被破坏程度大且权值高的指标所反映的生态问题，最终确定出当前生态系统中最迫切的问题。

选定出该问题后，本文将对该问题的未来状况实施预测，并针对其对未来可能产生的影响，提出保护控制方案。

III 具体数据及其分析

3.1 给出的数据

本文中使用的数据主要来自附件 2：2012.4-2013.4 福田红树林保护区生物多样性监测报告、官方水质监测数据和北大水环境监测报告。

附件 2 给出福田红树林保护区鸟类、浮游植物、底栖动物、红树植物、水质和昆虫

的检测报告，其内容主要包括：2012.7-2013.4 鸟类数量和种类数的动态变化数据；部分主要藻类的出现年份、种类数量、细胞密度变化情况；底栖动物物种数季节变化情况、鸟类主要捕食物种在 2011.4-2013.1 的密度和生物量的动态变化情况以及 2005-2013 年度底栖动物种群丰富度比较；部分红树植物的生长状况、优势群落的凋落物变化情况；水域内理化特征、营养盐、有机污染物、细菌、重金属离子在 2010-2012 年 5 个监测点位的数据比较情况；2013.7-2013.4 保护区昆虫数量的变化情况。

官方水质监测数据给出了在 4 个监测点位上水质指标数据在高、低潮时段分别的监测情况，其中包括 15 个指标在 2013 年的季节变化情况以及 12 个指标在 2011-2013 年的年度变化情况。

北大水环境监测报告则给出了在 2014.4-2015.1 期间内 20 个水质指标数据的季节变化情况以及对其水质状态的部分评价。

在上述数据中，有些是以柱状图形式给出的，并未标记具体数值。本文中使用专业图像处理软件读取像素坐标，按照图像比例求出各变量的具体值。由于部分数据在不同文件中分别提供数值形式或图像形式，将对经过上述方法处理后的图像形式数据与数值型式数据进行比较，发现误差在 0.1% 以内，故认为使用该方法获取的数据准确有效。

3.2 补充的数据

为更加全面的对保护区进行建模分析，本文使用了在网络公开资料中搜集到的其他相关数据作为辅助。主要包括 2006-2013 年深圳市二氧化硫年平均浓度和 2008-2013 年深圳市市区环境噪声等效声级平均值，其数据来源均为深圳市统计局统计年鉴。

3.3 对数据的预处理

综合三份资料所提供的水质数据，共有水质指标在 2011-2014 年的年平均变化数据和 2011.1-2015.1 的季度变化数据，但其中缺少 2014 年 1 月份指标数据。（经过简单计算后，发现由 2014 年平均数据和 4、7、10 月份数据求得 2014 年 1 月份数据时会产生部分负值。）对各个指标的变化情况进行分析，发现大部分指标呈现出稳定的整体变化趋势，小部分指标按周期规律产生波动。对于呈现整体性稳定变化趋势的指标，本文选择适当的曲线进行拟合，得出 2014 年 1 月数据；对于存在周期性变化规律的指标，若其相邻年份其他各月数据数值变化极小，则选取 2013 年 1 月与 2015 年一月数据进行平均，得出 2014 年 1 月数据。在本文的后续建模分析中，发现由此种方法得出的数据能

够良好的反映水质指标状态变化规律且数据使用过程效果良好符合实际规律，认为此种处理方式恰当。

同时化学需氧量在 2011 年 4 月份时数据约为 110mg/L，而其他各 16 个月份化学需氧量数据均在 50-60 mg/L 附近波动，考虑到实际情况下不可能产生如此大的数据误差，故认为 2011 年 4 月化学需氧量数据存在测量错误。而通过观察可发现化学需氧量数据存在整体性变动趋势，且无明显季节差异，故以 2011 年 1 月与 2011 年 7 月数据的平均值作为 2011 年 4 月数据。

对于鸟类主要捕食的底栖动物，附件 2 中共提供其在 2011.4-2013.1 于 10 个监测点位的种群密度和生物量，但是部分监测点位数据缺失。根据本题的实践需求，只要考虑其在地区内的平均生物量即可，故对于存在缺失监测点位数据的月份，使用已有监测点位数据取平均得到。同时，在数据构成上要求底栖动物数据与鸟类、昆虫等生物数据在时间点上相匹配，这就需要找到 2013.4 底栖动物的生物量。考虑到底栖动物数量与季节密切相关，并呈现出明显的周期性规律，使用已有的 2011 年 4 月和 2012 年 4 月数据的平均值来代表 2013 年 4 月数据，数值为 16.4864。

对于昆虫的数量，附件 2 中提供了其在 2012.7-2013.4 的数据，但缺失 2013 年 2 月上、中旬的数据。在只能找到保护区昆虫数量在这 10 个月内数据的情况下，观察到昆虫数量在 2013 年 1 月至 2 月之间呈现出明显的上升趋势。故使用插值的方法补全 2013 年 2 月上、中旬的数据，得到上旬数据为 313，中旬为 451。

此外，附件 2 中鸟类、昆虫和底栖动物数据在数量级上存在明显的错误（例如，保护区内鸟类数量大于昆虫数量）。考虑到物种数量数据主要由样方法在部分取样的情况下处理得到，认为附件 2 中各物种数量数据反应保护区整体数量的一部分。在不知各物种分别取样比例的情况下，仅使用附件 2 中数据代表保护区内各物种数量的变化趋势。

IV 模型假设

4.1 模型假设

1. 所建立的生态模型框架能够较好的反映红树林自然保护区的生态状况，且模型框架以外的影响因素可以忽略不计。
2. 生态系统中同一物种生物无个体差异。
3. 不考虑生物种群的年龄因素，个体差异以及能量转换时间；除鸟类外其他生物

不存在迁入迁出影响。

4. 建模分析过程中无人为故意破坏和特大自然灾害对福田红树林造成不可修复的影响。

V 模型建立与求解

5.1 生态系统模型框架的构建

福田红树林自然保护区东起新州河口，西至海滨生态公园，南达滩涂外海域和深圳河口，北至广深高速公路。沿海岸线长约 9km，平均宽度约 0.7km，区域范围在北纬 22° 30′ - 22° 32′，东经 113° 56′ - 114° 3′ 之间，属东亚季风区，亚热带海洋性季风气候区，其范围确定为有一定面积红树林存在的滨海湿地，包括红树林，林外裸滩，潮沟及低潮时水深不超过 6m 的水域，总面积 3.68 平方公里。其地理范围已在图 1-1 中给出。

表 5-1 福田红树林自然保护区生物种类^[3]

类别		种类	优势种群代表
植物	红树植物	9 科 12 属 16 种	秋茄、桐花树、白骨壤
	其他陆生植物	41 科 98 种	台湾相思、木麻黄
	浮游植物	6 门 7 纲 35 属 117 种	硅藻门、裸藻门
哺乳动物		7 科 12 属 15 种	鼠科、蝙蝠科
鸟类	陆鸟	9 目 28 科 57 属 89 种	雀形目、鹃形目
	水鸟	9 目 16 科 51 属 100 种	鹭科、鸭科
昆虫		10 目 59 科 96 种	半翅目、鳞翅目
其他陆生动物		4 目 14 科 23 属 31 种	变色蜥蜴、沼蛙
底栖动物	鱼类	11 种	青弹涂鱼、广东弹涂鱼
	多毛类	11 科 16 种	羽须鳃沙蚕、腺带刺沙蚕
	其他	46 科 58 属 94 种	拟黑螺、褶痕相手蟹
浮游动物		不详	

福田红树林自然保护区是重要的鸟类栖息地，且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、浮游植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。该地生

物现存生物种类如表 5-1 所示。

福田红树林生态系统主要是一个湿地生态系统，重点保护的生物为鸟类和红树植物。尽管此间物种繁多、关系复杂，但本文可以从中筛选出与鸟类和红树植物有密切联系且生物量权重较大的生物如昆虫类生物、鱼类、藻类等生物，将其作为模型框架中主要研究的生物因素；在对每种生物因素进行分析后，筛选出主要影响其生长发育且变动较大的生境因素如水环境质量、城市规模等，将其作为模型框架中的生境因素。

在生态模型框架中，系统的总能量来源是太阳能。生产者通过光合作用将太阳能吸收并转化为其体内的化学能，将环境中简单的无机物变成有机物。生产者制造的有机物被植食性动物所利用，部分能量就从生产者转移到初级消费者体内，供养初级消费者生长繁殖。初级消费者又会被更高一级的消费者所捕食。以此类推，同样完成能量的流动。分解者能将动植物残体复杂的有机物分解为简单的无机物，并且在分解过程中释放能量，最终将能量归还于无机环境之中。同时在这个过程中，有相当一部分能量在动植物的呼吸作用下传递到无机环境中。

在简化的模型框架之下，福田红树林湿地生态系统中的生产者为红树植物和藻类，初级消费者为鱼类和昆虫类生物，高级消费者为鸟类，无机环境中的因素主要为水环境质量和城市规模。至此，绘制起福田红树林生态系统能量流动图如图 5-1 所示：

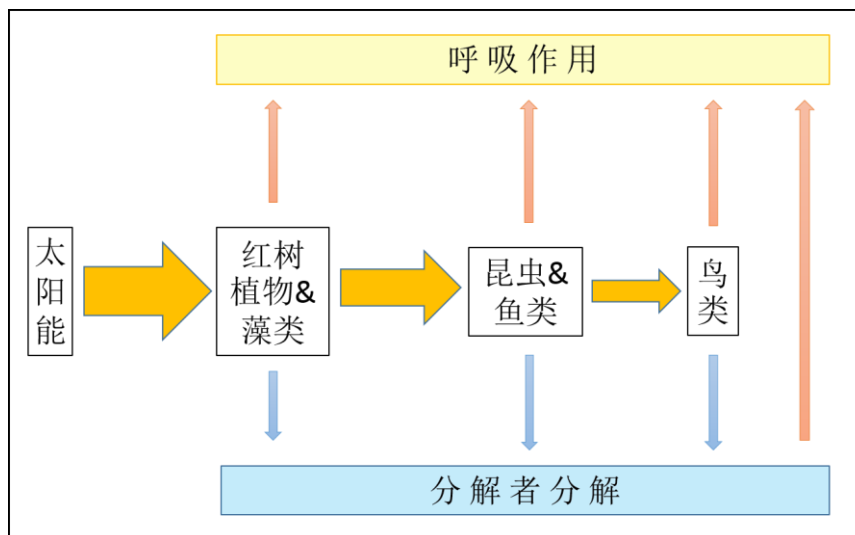


图 5-1 福田红树林生态系统能量流动图

由上述分析可知，福田红树林湿地生态系统的主要生物因素有红树植物、藻类、鱼类、昆虫类生物和鸟类；主要生境因素有水环境质量和城市发展规划。结合生态系统中食物链、食物网等生态关系，绘制生态系统模型框架图如图 5-2 所示。

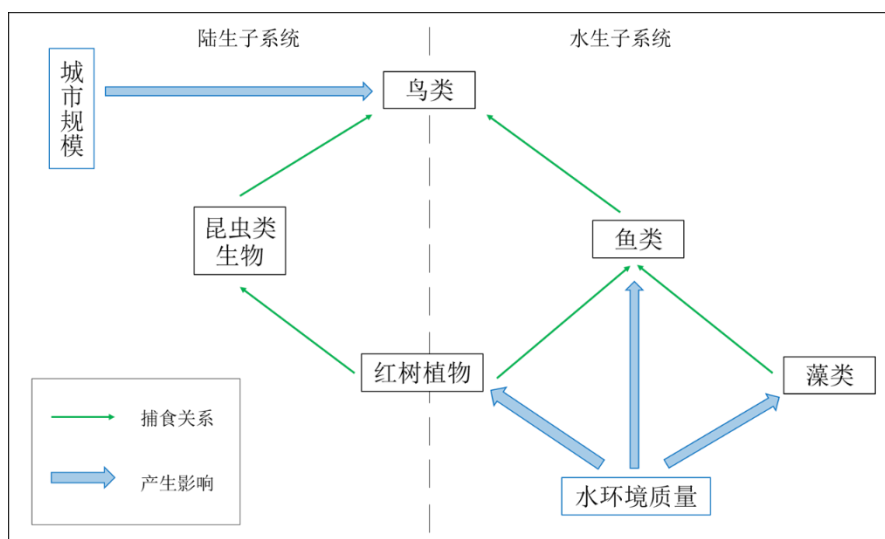


图 5-2 生态系统模型框架图

5.2 种群系统动力学模型的建立

除却健康评价体系中的各个指标的生态状况，福田红树林自然保护区内主要种群的数量变化情况也是需要被重点考虑的因素之一。按照生态系统的整体性原则，生态系统是一个整体，系统一旦形成，各生态要素不可分解成独立的要素孤立存在。同时，生境要素不可能孤立地起作用，而会产生多种综合效应，并与各种生物因子形成耦合关系。接下来将借助微分方程从系统动力学角度对自然保护区内主要生物因素的数量变化情况进行建模分析。

5.2.1 模型的准备

5.2.1.1 水质数据的处理

官方大量给出的保护区内水质数据含有大量水质指标，在实际处理水质对水生生物影响的过程中，不可能对全部指标进行数据分析，应在机理性分析的前提下，对指标数据进行处理，并且筛选出具有代表性的水质指标，进行水质对水生生物的影响分析。

1. 原始数据的处理

水质数据应该要反应一段时间内水质的平均状况。经查阅资料可知，深圳湾属于不规则半日潮，且水平潮流具有明显的往复流性质，一天内水质各指标数据基本处于高低潮数据数值之间。因此本文对于各指标高低潮时间段的水质进行平均处理，代表该水域各指标的具体数据。另外，在得出整体水质状况的过程中，还应尽消除由于个别地点数值波动引起的异常。

2. 保护区整体水质状况的确定

水质数据包括福田红树林自然保护区四个水质监测点二十个月份的数据，为得出保护区的综合水质，应该确定保护区各个监测点的水质数据的权重，并给出保护区整体的水质情况。

保护区内的四个监测点位分别为观鸟屋、鱼塘、凤塘河口和沙嘴码头。在对 4 个地点相同指标的相关系数的分析过程中，笔者发现大多数指标的相关系数大于 0.8 或接近 0.8，考虑到测量误差的存在，可以认为不同地点的指标间为高度正相关，即 4 个检测点位的水质状况有相似的变化趋势，可以代表保护区整体水质的变化状况。其中凤塘河口和沙嘴码头均处于河流入海口地区，水中含有大量工业污水，水质相对较差；而观鸟屋和鱼塘处水质较好。在实际的红树林湿地中，水环境质量基本优于凤塘河口和沙嘴码头处水质，与观鸟屋和鱼塘处水质更为接近。不妨在对保护区整体水质进行计算的时候，给观鸟屋、鱼塘、凤塘河口和沙嘴码头分别设定 0.3、0.3、0.2、0.2 的权重系数。

3. 综合水质指标的确定

水质监测状况中的 20 个检测指标可分为四大类：理化指标，包括盐度、浊度、氧还原电动势、电导率、pH 值和溶解氧；营养盐和有机物污染指标，包括总氮、氨氮、硝酸盐氮、总磷、可溶性磷、COD 和 BOD；微生物污染指标，包括大肠杆菌总数、致病性肠道菌数；重金属污染指标，包括 Cd、Pb、Ni、Cr、As 等重金属离子浓度。

根据官方给出数据及北大检测报告所给出的结论，可知保护区水质中重金属污染物指标和大部分理化指标均符合国家一类地表水标准，但溶解氧、营养盐、有机物污染及微生物污染指标均处于超标状态，需要得到进一步的保护与管理。符合标准的指标，则被认为不会对保护区水生生物的生长繁殖产生影响，而对于尚未达标的水质指标，应综合其影响最终确定出综合水质指数。

对指标进行 R 型聚类^[4]，得到各指标之间的相关系数，并做图结果如图 5-3 所示。

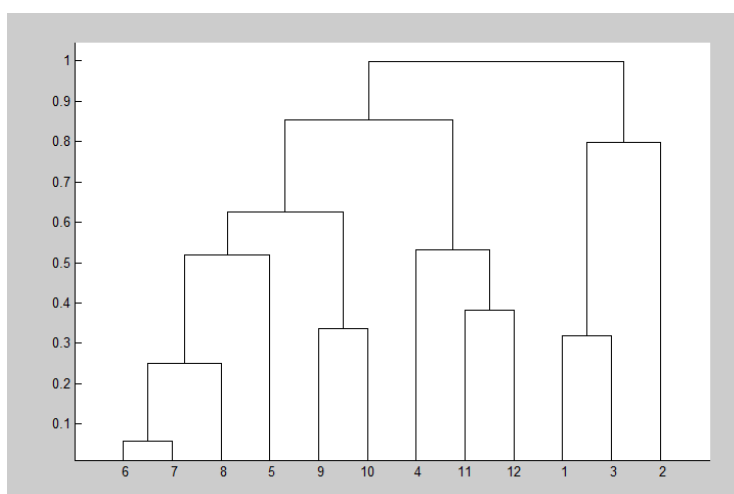


图 5-3 水质指标聚类结果图

据 2014 年深圳湾水环境质量监测报告，福田红树林湿地水环境监测中称福田红树林湿地水域中的氧含量严重不足，有机物污染较重。重金属砷、铬、镉、铅、镍含量低于检出限，符合地表水 I 类水质标准，表明该地区重金属污染得到有效控制。但是，氮磷营养盐(主要是氨氮和可溶磷)水平较高，致病性微生物含量严重超标。而溶解氧，化学需氧量作为有机物污染具有代表性的指标，直接影响到该水域水生动物的生存，氮含量与藻类生物的生存有直接联系。综合以上因素，加之考虑指标间的相关系数之后，从中筛选出溶解氧、氨氮、COD、大肠菌群总数这四个指标。为了求得综合水质指数，在确定四个指标间的权重系数过程中，指标间重要程度的确定应客观根据其所能提供信息量的大小确定：若某指标趋于稳定，数值基本稳定在一个较小的区间范围内，表示该指标提供的信息量并不大；相反，若某指标波动幅度大，数值变动能够带来较大的差异，表示该指标能够提供较大的信息量。

表 5-2 《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[5]中四个主要项目标准限值

指标	溶解氧 (DO) mg/L	氨氮 (NH ₃ -N) mg/L	化学需氧量 (COD) mg/L	大肠菌群总数 个/L
一类	≥ 7.5	≤ 0.15	≤ 15	无具体评价标准
二类	≥ 6	≤ 0.5	≤ 15	
三类	≥ 5	≤ 1	≤ 20	
四类	≥ 3	≤ 1.5	≤ 30	
五类	≥ 2	≤ 2	≤ 40	
劣五类	< 2	> 2	> 40	

根据地表水环境质量标准规定，关于地表水的水质可分为 I 类、II 类、III 类、IV 类、V 类、劣 V 类共六个级别（如表 5-2 所示），只要水质中某一项指标达到高类别的标准，该水质就被评判为高类别。这导致实际中不仅不同类别水质具有较大的差异，处于相同类别的水质在各个污染物浓度上也存在一定差异。在计算水质综合指数的过程中，既要考虑到不同类别之间“质”的差异，还应计算同一类别水中“量”的差异，而不能仅仅依靠国家标准给出的类别判定方法进行讨论。对于不同的水质指标，还应该在对指标进行标准化及权重确定之后，优化指标实际的作用效力，并利用权重和优化后的效力共同计算出水质综合影响指数，此指数仅在物种分析中作为水质状况的一个代表，并不实际表示保护区内水质某个指标的情况。

在实际中，指标的作用效力并非仅仅按照浓度增加而线性增加，例如化学需氧量在

二类指标区间内增加一个单位的影响效果要远远比其在劣五类指标区间内增加一个单位的效果大。若仅用指标浓度判断指标的影响效力往往会产生较大的误差，甚至导致错误的结果。故在指标影响效力确定的过程中既要考虑指标具体数值的大小，还应考虑指标在该数值下实际能够产生的影响系数。在此，本文引入动态赋权综合评价方法^[6]：根据各个指标 x_i 的实际状况，在进行指标的极小型、极大型或中间型标准化得到 x_i' 之后，依据指标特性构造依据指标数值而动态变化的动态赋权函数 p_i ，赋权按照 $X = \sum_{i=1}^n p_i x_i'$ 的形式给出评价。

1) 符号说明

以 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别代表溶解氧、氨氮、化学需氧量和大肠菌群总数， x_{ij} 代表 x_i 指标在 j 时刻的数据数值， (a_k^i, b_k^i) 代表 x_i 指标的第 k 类标准区间。

2) 各评价指标的标准化处理

无论是确定指标数据权重还是对其影响效力进行优化，都需要考虑数据的具体数值大小，为了消除变量的量纲效应，使每个变量都具有同等的表现力，首先应对各个监测点数据与表 5-2 所给标准，对指标分别进行标准化处理。

①溶解氧的标准化：

溶解氧(DO)为极大型指标，首先将数据做极小化处理，即通过倒数变化令 $x_{li}' = \frac{1}{x_{li}}$ ，

然后再做极小型指标的极差变换将数据标准化，即令 $x_{li}'' = \frac{x_{li}' - m_1'}{M_1' - m_1'}$ ，其中 $m_1' = \min\{x_{li}'\}$ ，

$$M_1' = \max\{x_{li}'\}.$$

取 $m_1' = \min\{x_{li}'\}$ 、 $M_1' = \max\{x_{li}'\}$ 、 $x_{li}'' = \frac{x_{li}' - m_1'}{M_1' - m_1'}$ 在进行数据的标准化处理之后，对应

的分类区间随之变化为

②氨氮、化学需氧量、大肠菌群总数的标准化：

氨氮、化学需氧量本身就是极小型指标，直接根据上述极小型数据的极差变换公式进行数据的标准化。

③大肠菌群总数的标准化：

地表水环境质量评价标准中没有对大肠菌群总数的具体评价标准，仅有关于粪大肠杆菌的数量标准，且粪大肠杆菌的数量符合极小型指标。通过查阅相关资料，可知大肠

菌群总数和粪大肠杆菌数量呈现正相关关系，且大肠菌群总数越多，水质污染越严重，亦符合极小型指标的评价标准。为此，根据极小型标准化处理方法，利用极差变换，得到标准化数值。

经过对指标的标准化处理，得到处理后的大肠杆菌，溶解氧，氨氮，化学需氧量的标准化数据，如表 5-3 所示。

表 5-3 指标标准化结果

指标	大肠杆菌							
年份	2013.1	2013.4	2013.7	2013.10	2014.1	2014.4	2014.7	2014.10
结果	0.9968	0.1127	0	0.1023	0.9984	0.1101	0.0028	0.4650
指标	溶解氧 DO							
年份	2011.1	2011.4	2011.7	2011.10	2012.1	2012.4	2012.7	2012.10
结果	1	0.8507	0.2840	0.5945	0	0.8195	0.3513	0.6703
年份	2013.1	2013.4	2013.7	2013.10	2014.1	2014.4	2014.7	2014.10
结果	0.2273	0.5035	0.3506	0.2632	0.3851	0.5068	0.5509	0.2064
指标	氨氮 NH ₃ -N							
年份	2011.1	2011.4	2011.7	2011.10	2012.1	2012.4	2012.7	2012.10
结果	0.4498	0.0708	0	0.1214	0.9101	0.2004	0.3456	0.4504
年份	2013.1	2013.4	2013.7	2013.10	2014.1	2014.4	2014.7	2014.10
结果	1	0.2916	0.3335	0.3762	0.9514	0.2862	0.3543	0.4651
指标	化学需氧量 COD							
年份	2011.1	2011.4	2011.7	2011.10	2012.1	2012.4	2012.7	2012.10
结果	0.6973	0.4166	0.1359	0.3407	0.4421	0	0.7456	1
年份	2013.1	2013.4	2013.7	2013.10	2014.1	2014.4	2014.7	2014.10
结果	0.6093	0.2202	0.6973	0.3130	0.2640	0.2154	0.5965	0.1305

其月份变化情况如图 5-4 所示。

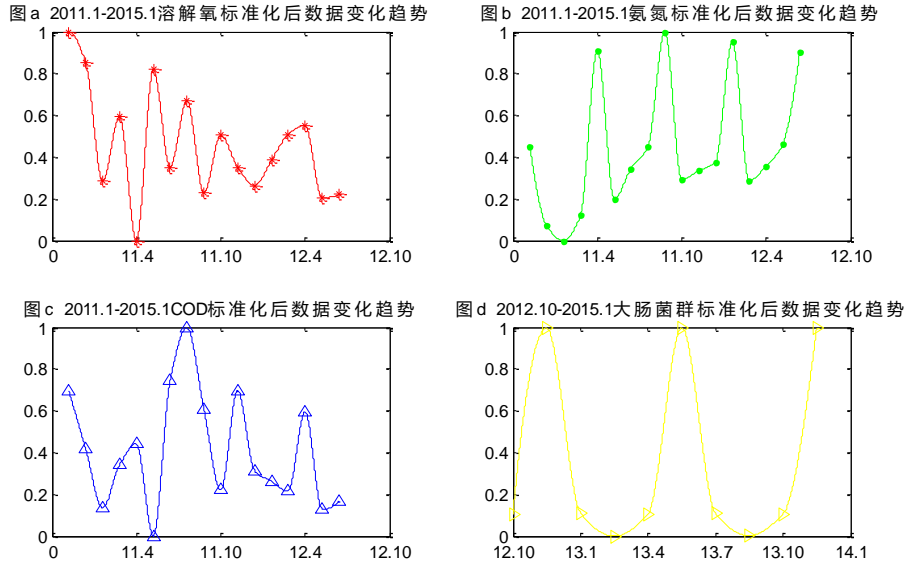


图 5-4 各指标数据标准化后趋势

3) 指标间权重系数的确定

结合上述分析，这里以数据的均方差代表波动幅度，选择能够客观反映数据信息量大小的均方差法进行权重的计算，计算采用标准化后数据，步骤如下：

①：计算指标 x'_i 数据的平均值，即令

$$\bar{x}'_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x'_{ij}$$

②：计算指标 x_i 的均方差 s_i ，其中

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x'_{ij} - \bar{x}'_i)^2}$$

③：将各指标的均方差归一化确定指标相应的权重 ω_i ，即令

$$\omega_i = \frac{s_i}{\sum_{k=1}^m s_k}, i=1,2,\dots,m.$$

按照以上步骤，取 m 、 n 分别为 4、16，并且带入相应的指标原始数据，计算求得各指标权值。溶解氧，氨氮，化学需氧量和大肠杆菌的均方差依次为 0.2584，0.3046，0.2646，0.5469，考虑到大肠菌群变动幅度过大，所以凭借经验人工赋予其 0.2 的权值。最终权值确定为

$$\omega_1 = 0.2497, \omega_2 = 0.2944, \omega_3 = 0.2559, \omega_4 = 0.2,$$

4) 动态加权函数的确定

①：单因子指数法数据处理：

应将指标的实测数据与水质标准进行对比，一般选取水质标准中最高允许标准进行比较。

利用公式 $y_i = \frac{x_i}{c}$ 进行确定，其中 c 为某一指标评价的最高标准值， y_i 为单因子指标处理后的数值。

由于大肠菌群总数没有相应的水质评价标准，我们只对溶解氧、氨氮和化学需氧量数据进行单因子指数处理。

氨氮、化学需氧量的最高评价标准值分别为 2、40，溶解氧在经过极小化处理后的最高评价标准为 0.5。

经过单因子指数法处理后，溶解氧的指标区间变为：

$(0, 0.1667], (0.1667, 0.3333], (0.3333, 0.4], (0.4, 0.6667], (0.6667, 1], (1, \infty]$;

氨氮的指标区间变为：

$(0, 0.075], (0.075, 0.25], (0.25, 0.5], (0.5, 0.75], (0.75, 1], (1, \infty]$;

化学需氧量的指标区间变为：

$(0, 0.375], (0.375, 0.5], (0.5, 0.75], (0.75, 1], (1, \infty]$.

②动态加权函数的确立：

加权函数可以设定为偏大型正态分布函数，即

$$p_i(y_i) = \begin{cases} 0 & y_i \leq \alpha_i \\ 1 - e^{-\left(\frac{y_i - \alpha_i}{\sigma_i}\right)^2} & y_i \geq \alpha_i \end{cases} \quad (5-1)$$

其中 α_i 在这里取为指标 y 的一类水标准区间的中值， $\alpha_i = \frac{1}{2}(b_1^i - a_1^i)$ ， σ_i 由 $p_i(a_4^i) = 0.9 (i=1,2,3,4)$ 确定。其加权函数示意图如图 5-5 所示。

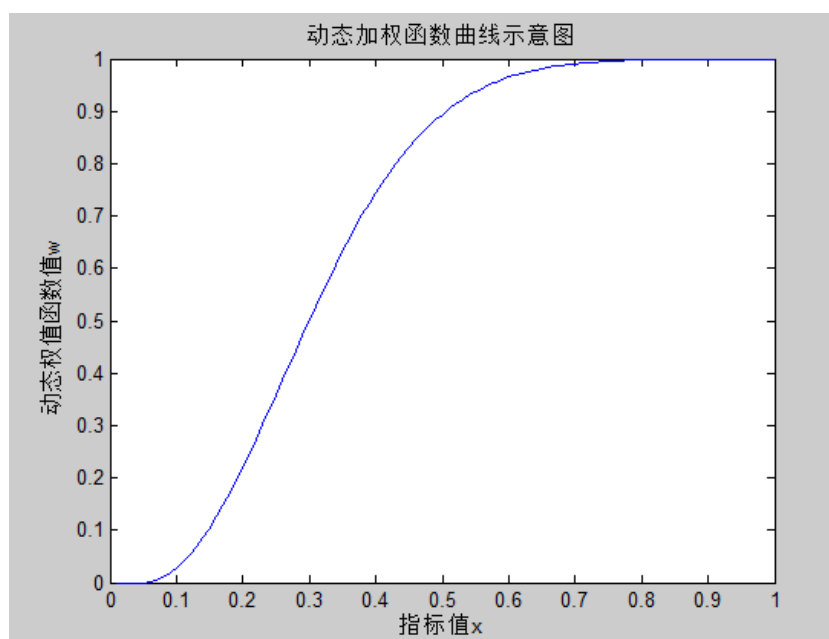


图 5-5 动态加权函数曲线示意图

由实际数据计算可得 $\alpha_1=0.1333$, $\alpha_2=0.0375$, $\alpha_3=0.1875$, $\sigma_1=0.1758$, $\sigma_2=0.3048$, $\sigma_3=0.2059$, 带入 (5-1) 式分别可以得到溶解氧、氨氮、化学需氧量三项指标的动态加权函数表达式。

5) 综合评价指数函数的确定:

综合上述分析与计算, 同时利用指标权重与影响效力赋权确定水质综合影响指数, 该指数在 j 时刻的数值计算公式为,

$$X = \sum_{i=1}^3 \omega_i p_i y_i + \omega_4 x'_4$$

6) 水环境质量指标数据处理结果:

再结合动态加权法和均方差权重确定方法, 求出 2013.1-2014.10 年水环境质量综合分值, 如表 5-4 所示。

表 5-4 综合评价结果

年份	2013.1	2013.4	2013.7	2013.10	2014.1	2014.4	2014.7	2014.10
结果	0.7436	0.5667	0.5442	0.5647	0.7439	0.5662	0.5448	0.5652

综合图表, 可以观测出保护区综合水质影响指数呈现周期性变化: 冬季水质较为恶劣, 春、夏、秋三季水质有所好转。但全年水质指标呈现恶劣状况, 其数值均高于 0.5,

5.2.1.2 其他污染数据的处理

根据附件一给出的分析,除却水环境污染外,城市高速发展过程中附带的大气污染、噪声污染和光污染对保护区的生态环境产生了巨大影响。在污染分析过程中,因无法准确查到保护区附件的污染数据,本文用深圳市或福田区的平均数据代替。

1) 大气污染:

大气污染对于保护区环境的影响主要体现在城市大气中硫氧化物含量过高,在一定程度上阻碍了红树林生态系统正常的生存和发展,对保护区内动植物均产生负面影响。

表 5-5 2006-2013 年二氧化硫年平均值 (mg/立方米)

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
二氧化硫年平均值 mg/m^3	0.030	0.023	0.016	0.013	0.011	0.011	0.010	0.011

根据深圳统计年鉴所给出的全市年二氧化硫平均值数据(如上表),可以明显地看出城市年平均二氧化硫浓度在 2010 年之前逐年降低,而 2010 年及之后年份,大气二氧化硫平均值基本保持稳定。因此可以看出,深圳市在逐年加强对于大气污染的管理与控制,推测其未来浓度值会呈现出一个稳定降低的趋势。故选取 2010 年至 2013 年二氧化硫年平均值数据代表城市大气污染对于保护区动植物的影响,其数值为 $0.11\text{mg}/\text{m}^3$ 。

2) 噪声污染:

噪声污染为工程施工、车辆行驶等人类活动所产生的噪声,体现为市区环境噪声等效声级平均值,其主要影响保护区鸟类的迁徙、觅食和栖息。

表 5-6 2008-2013 年区域环境噪声年平均值 dB(A)

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013
区域环境噪声平均值	56.4	56.8	56.7	56.7	56.9	56.8

根据年鉴所给出的区域环境噪声平均值(表 5-6 给出),可以发现城市噪声指数近六年来基本处于稳定状态,极差控制在 0.5dB(A) 之内,预计往后的年份其指数也不会产生太大变化。不妨以六年平均值作为近期环境噪声数据,其数值为 56.7dB(A) 。

3) 光污染:

光污染主要为保护区周边建筑、路灯以及车辆所发出的光亮,主要影响鸟类的正常生活。

本文没有查到有对城市光污染的统计数据,但通过分析保护区周边光污染来源——

建筑、路灯等基本处于稳定状态，可以假定光污染数据变动很小，以定值代替。

大气污染对保护区内所有生物产生影响，而声、光污染仅会限制鸟类的生存活动，不妨拟定声光综合指数代表噪声污染及光污染对鸟类的限制作用，且通过分析其影响程度，在作用系数上，给定噪声污染为 0.7，光污染为 0.3。

5.2.2 种间关系的微分方程建模

5.2.2.1 生态系统种间关系的分析

通过对前述生态系统模型框架的分析可知，该系统中的主要生物因素为红树植物、浮游植物、昆虫类生物、水生生物和鸟类，主要生境因素为城市规模和水环境质量。本文将此模型框架看作一个整体，其各要素之间直接或间接地形成正、负反馈关系。而系统要素主要可以归为两大类：一类为容易接受外界控制的外部量——主要为生境因素；另一类为无法直接由外部实现控制而受到外部因素影响的内部量——主要为生物因素。考虑到实际情况中外部量的变化多由人类活动引起，内部量对于外部量的改变作用微乎其微，故在系统动力学分析中本文仅考虑外部量对内部量的作用而忽略内部量对外部量的改变。那么，显然外部量的变动是本文实现控制的手段，而内部量的变化规律与特点是本文所主要关心的问题。

生态系统的内部量主要为其生物因素：红树植物、浮游植物、昆虫类生物、水生动物和鸟类。接下来，本文将逐一去分析这五个种群的生物习性与数量表示方法。

1. 红树植物作为陆地生态系中的主要生产者，通过光合作用合成有机物，且主要是通过其枝叶为昆虫类生物提供食物。红树植物的生长发育还和水环境质量中重金属离子浓度有关，但从水质监测情况来看，海水中重金属离子浓度含量满足一类指标范围，不会产生不良影响，故在此不考虑重金属离子对于红树植物的影响。现实中红树植物的枝叶总量并不容易测定，但若同模型假设一般忽略红树植物的个体差异，则红树植物面积就可以在很大程度上反映枝叶总量，而树林面积的容易通过遥感等技术测定的。

2. 浮游植物作为生态系统的生产者，通过吸收太阳能合成有机物。作为鱼类、虾类等水生动物的主要食物来源，浮游植物的生长受水质中营养离子浓度影响，尤其当富营养化加重时藻类植物会发生疯长。目前，浮游植物并无准确数据对其进行量化，作为营养级别的最底层生物，假设浮游植物作为被捕食者来源充足，微分方程组中不再给予讨论。

3. 昆虫类生物是系统中的初级消费者，以红树植物的枝叶为食，且作为鸟类的食物。现实生活中测定生态系统中昆虫类生物的数量时总是通过取样测定，尽管这个测定

结果并不能代表自然保护区中昆虫类生物的真实数量，却也能准确反映其变化状况，故在系统中本文选取该数量进行建模。不考虑人工灭虫等因素。

4. 水生动物作为生态系统中的初级消费者，作为鸟类的捕食对象，以生产者浮游植物为食，其生存受到水质多项指标例如溶解氧的影响。水生动物在由以上几种生物构成的食物网中，主要以被捕食对象羽须鳃沙蚕和腺带刺沙蚕为主。附件二数据涉及到以上两种生物的十个监测的单位体积内的生物质量。本文中假设十个监测点位分布均匀，以十个监测点平均值代表福田保护区水域内单位体积该生物质量，以上两种生物单位体积内生物质量总和代表水生动物的量。

5. 鸟类是子系统中的高级消费者，在系统中主要依靠捕食昆虫类生物为生，且受到城市规模的影响。同时福田红树林自然保护区作为鸟类迁徙的重要停落点，系统中鸟类在秋、春季节存在大量的迁入与迁出。同昆虫类生物一样，鸟类生物的数量测定也是通过取样的方法，模型中仅用该取样数据反应鸟类的数量变化状况。

通过上述分析，可以明显的看出生态系统内部构成两条捕食链：红树植物为昆虫类生物提供食物来源，鸟类捕食昆虫类生物；水生生物捕食浮游植物，鸟类捕食水生生物。且生物数量受到生境因素城市规模及水环境质量的影响，主要体现在城市规模对鸟类生存环境的破坏以及水环境质量对浮游植物和鱼类生长繁殖的影响。在确定相互之间的直接影响关系后，系统内部因素的影响变动情况就可利用微分方程组进行定量刻画，下面借助经典的 Lotka-Volterra 种间作用模型建模定量分析物种变化情况。

5.2.2.2 Lotka-Volterra 模型的建立

Lotka-Volterra 模型利用系统动力学中正负反馈的原理定量描述了生物量的变化规律，并分析了生态系统中的各个功能组之间的相互影响，其理论基础可以归纳为 Lotka-Volterra 方程：该方程描述了功能组生物量变化率和功能组之间的互惠或竞争的程度和其自身的密度作用因素。

1) 一般场景下各种群数量变动过程：

①生产者的生物量变动过程：

在不考虑消费者的情况下，生产者生物量 x 的增长符合 Logistic 增长模型，即

$$\frac{dx}{dt} = (a + \lambda x(t))x(t)$$

其中 a 表示初始状况下生产者种群的内禀增长率，而 $\lambda x(t)$ 表示与种群生物量成正比的自身的密度制约项。

当初级消费者 y 存在时，单位时间内每个初级消费者对于生产者的捕食量与生产者

生物量 x 成正比，比例常数为 b ，且 b 为负值，故

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= (a + \lambda x(t))x(t) + bx(t)y(t) \\ &= x(t)(a + \lambda x(t) + by(t))\end{aligned}$$

②消费者的生物量变动过程：

在不考虑生产者 x 的情况下，消费者 y 没有食物来源且会受到自身种群密度制约，以 a' 表示初始状况下消费者种群的内禀增长率，而 $\lambda'x(t)$ 表示与种群生物量成正比的自身的密度制约项；

生产者为消费者提供能量，供给消费者生长繁殖，提供能量总量为 $cbx(t)y(t)$ （在此不考虑时间滞后性），其中 c 是能量转化率，为正值；

单位时间内每个更高级消费者对此级别消费者的捕食量与此级别消费者生物量 y 成正比，比例常数为 d ，且 d 为负值。

故可得消费者的数量变动微分方程，即

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dt} &= y(t)(a' + \lambda' y(t)) + cbx(t)y(t) + dy(t)z(t) \\ &= y(t)(a' + cbx(t) + \lambda' y(t) + dz(t))\end{aligned}$$

2) 保护区内物种数量变动过程：

①符号说明：

以 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别代表红树植物，浮游植物，昆虫类生物，水生生物和鸟类的生物量； $a_i, i=1,2,\dots,5$ 分别代表五种生物的内禀增长率； x_6 代表水质综合影响指数； x_7 代表年平均二氧化硫浓度； x_8 代表声光综合影响指数； $\lambda_{ij}, i=1,2,\dots,5,6,7,8, j=1,2,\dots,5$ 代表物种对物种的种间作用系数。

②保护区物种数量变动关系：

结合 5.4.2.1 种间关系的分析与上述微分方程模型，逐一建立系统中各种群的微分方程。Lotka-Volterra 模型建立的过程中，对每个物种都考虑其自身密度制约因素，不再一一进行说明。

红树植物的生物量变动受到昆虫类生物数量的负向影响，有

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1(t)(a_1 + \lambda_{11}x_1(t) + \lambda_{31}x_3(t) + \lambda_{71}x_7(t))$$

水生植物生物量的变化除受到水生生物数量的负向影响外，还与水质综合指数呈负相关，有

$$\frac{dx_2}{dt} = x_2(t)(a_2 + \lambda_{22}x_2(t) + \lambda_{42}x_4(t) + \lambda_{62}x_6(t) + \lambda_{72}x_7(t))$$

昆虫类生物数量变化受到红树植物的正向影响和鸟类的负向影响，有

$$\frac{dx_3}{dt} = x_3(t)(a_3 + \lambda_{13}x_1(t) + \lambda_{33}x_3(t) + \lambda_{53}x_5(t) + \lambda_{73}x_7(t))$$

水生动物数量变化除受到水生植物的正向影响和鸟类的负向影响外，也还与水质综合指数呈负相关，有

$$\frac{dx_4}{dt} = x_4(t)(a_4 + \lambda_{24}x_2(t) + \lambda_{44}x_4(t) + \lambda_{54}x_5(t) + \lambda_{64}x_6(t) + \lambda_{74}x_7(t))$$

鸟类数量的变化与昆虫类生物和水生生物数量呈正相关，但受到城市规模指数的负面影响，有

$$\frac{dx_5}{dt} = x_5(t)(a_5 + \lambda_{35}x_3(t) + \lambda_{45}x_4(t) + \lambda_{55}x_5(t) + \lambda_{75}x_7(t) + \lambda_{85}x_8(t))$$

结合上述分析，可以初步判断出 a_1 ， a_2 ， λ_{13} ， λ_{24} ， λ_{35} 和 λ_{45} 为正值，其余参数均为负值。

5.2.2.3 模型的简化与求解

1. 模型的简化：

Lotka-Volterra 模型中共计 5 个微分方程，7 个变量，21 个待确定变量。在给定数据并不充足的情况下，求解十分困难。而模型的主要任务是对系统进行短时间内的预测，为此，应在对结果影响不大的情况下，对方程组中要素进行合理分析，寻求适当的简化。

对于系统的外部量来说，除水质综合影响指数随季节变化明显外，年平均二氧化硫浓度和声光影响指数多以年度为单位进行统计，且其具体数值基本常年稳定，故在短时间内本文将这两个因素视作常数。

由前述数据分析知，系统的内部量中红树植物、浮游植物的数据较少且较为模糊，无法准确观察出其趋势；而红树植物与浮游植物作为系统中的生产者，它们在系统中的关联地位较低，仅分别与昆虫类生物和水生动物有直接联系。且从实际现状来看，保护区中生产者生物量为足够的。故本文假定系统内生产者数量充足，不对其生物量进行分析。且其对系统的作用由昆虫类生物、水生动物代替承担，使其内禀增长率变为正数。

至此，将 x_7, x_8 看作常量，去掉方程组中与 x_1, x_2 有关的方程与分项，视 a_3, a_4 为正数。那么，不妨令

$$\begin{cases} a_3' = a_3 + \lambda_{73}x_7 \\ a_4' = a_4 + \lambda_{74}x_7 \\ a_5' = a_5 + \lambda_{75}x_7 + \lambda_{85}x_8 \end{cases}$$

其中 a_5' 为负数，其余两个参数正负未定。

则模型简化后只含有 3 个方程，4 个变量与 11 个待确定参数。具体形式如下：

$$\begin{cases} \frac{dx_3}{dt} = x_3(t)(a_3' + \lambda_{33}x_3(t) + \lambda_{53}x_5(t)) \\ \frac{dx_4}{dt} = x_4(t)(a_4' + \lambda_{44}x_4(t) + \lambda_{54}x_5(t) + \lambda_{64}x_6(t)) \\ \frac{dx_5}{dt} = x_5(t)(a_5' + \lambda_{35}x_3(t) + \lambda_{45}x_4(t) + \lambda_{55}x_5(t)) \end{cases}$$

2. 参数的确定:

微分方程组中需要确定的参数有 $a_i', i=3,4,5$. 以及 λ_{ij} .

① 参数确定的方法^[7]:

设共有 m 个变量, 取一个确定的时间间隔, 对连续微分方程进行离散化处理, 得

$$x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)) \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

由灰色系统理论中灰导数和偶对数的映射关系, 给出参数的灰色辨识方法, 有

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = x_i(t+1) - x_i(t) \\ x_i(t) = \frac{x_i(t+1) + x_i(t)}{2} \end{cases}$$

则微分方程变化为:

$$x_i(t+1) - x_i(t) = a_i \left[\frac{x_i(t+1) + x_i(t)}{2} \right] + \sum_{j \neq i} \lambda_{ji} \frac{[x_i(t+1) + x_i(t)][x_j(t+1) + x_j(t)]}{4}$$

将 $t=1, 2, \dots, n-1$ 时的数据代入上式可得下面的方程组

$$\begin{cases} x_i(2) - x_i(1) = a_i \left[\frac{x_i(1) + x_i(2)}{2} \right] + \sum_{j \neq i} \lambda_{ji} \frac{[x_i(2) + x_i(1)][x_j(2) + x_j(1)]}{4} \\ x_i(3) - x_i(2) = a_i \left[\frac{x_i(2) + x_i(3)}{2} \right] + \sum_{j \neq i} \lambda_{ji} \frac{[x_i(3) + x_i(2)][x_j(3) + x_j(2)]}{4} \\ \vdots \\ x_i(n) - x_i(n-1) = a_i \left[\frac{x_i(n-1) + x_i(n)}{2} \right] + \sum_{j \neq i} \lambda_{ji} \frac{[x_i(n) + x_i(n-1)][x_j(n) + x_j(n-1)]}{4} \end{cases}$$

用矩阵形式表示为

$$Y_i = B_i \hat{a}_i$$

其中

$$Y_i = (x_i(2) - x_i(1), x_i(3) - x_i(2), \dots, x_i(n) - x_i(n-1))^T$$

$$B_i =$$

$$\begin{cases} \frac{x_i(2)+x_i(1)}{2} & \frac{[x_i(2)+x_i(1)][x_1(2)+x_1(1)]}{4} & \dots & \frac{[x_i(2)+x_i(1)][x_m(2)+x_m(1)]}{4} \\ \frac{x_i(3)+x_i(2)}{2} & \frac{[x_i(3)+x_i(2)][x_1(3)+x_1(2)]}{4} & \dots & \frac{[x_i(3)+x_i(2)][x_m(3)+x_m(2)]}{4} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_i(n)+x_i(n-1)}{2} & \frac{[x_i(n)+x_i(n-1)][x_1(n)+x_1(n-1)]}{4} & \dots & \frac{[x_i(n)+x_i(n-1)][x_m(n)+x_m(n-1)]}{4} \end{cases}$$

$$\hat{a}_i = (a_i, \lambda_{4i}, \dots, \lambda_{mi})^T$$

在最小二乘准则下，求解上述超定方程组，有

$$\hat{a}_i = (a_i, \lambda_{4i}, \dots, \lambda_{mi})^T = (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T Y_i.$$

② 参数确定过程中的数据处理：

水质数据采用动态加权和标准化处理后的溶解氧，化学需氧量，氨氮和大肠菌群数据。大肠菌群数据波动幅度过大，均方差计算值过高，为了避免其权重过大造成的不合理水质趋势值，采用均方差法确定前三个指标的权重，占总权重的 0.8，大肠菌群数据标准化后的结果占总权重的 0.2. 再对水质 2012 年 1 月到 2014 年 1 月的数据进行插值，从 2012 年 10 月到 2013 年 4 月平均选取 14 个点作为水质数据。

鸟类数据使用附件 2 提供的鸟类 2012 年 10 月到 2013 年 7 月每月两次的数量统计结果，选取 2012 年 10 月到 2013 年 4 月七个月份上下半月的十四个数据作为鸟类数据。

昆虫数据使用附件 2 提供的昆虫 2012 年 10 月到 2013 年 7 月每月三次的数量统计结果，选取区 2012 年 10 月到 2013 年 4 月七个月份上下半月的十四个数据作为昆虫数据。其中对二月上旬和四月下旬缺失的昆虫数据用本月其他统计数据进行补全。

水生生物作为鸟类捕食对象，数据以鸟类主要捕食的底栖动物羽须鳃沙蚕和腺带刺沙蚕数据代表，使用附件 2 提供的 2011 年 4 月到 2013 年 1 月的单位体积内的生物质量数据惊醒差距，从 2012 年 10 月到 2013 年 4 月平均选取 14 个点作为水生动物数据。

③ 对保护区模型进行参数确定：

知保护区共有 4 个变量，根据所给数据，确定时间间隔为半个月，共获得 14 组数据。

昆虫类生物需确定的参数为 $\hat{a}_3 = (a'_3, \lambda_{33}, \lambda_{53})^T$ ；水生动物需确定的参数为 $\hat{a}_4 = (a'_4, \lambda_{44}, \lambda_{54}, \lambda_{64})^T$ 、鸟类需确定的参数为 $\hat{a}_5 = (a'_5, \lambda_{35}, \lambda_{45}, \lambda_{55})^T$ 。

根据上述方案，依次求解方程组得参数为：

a'_3	2.5841832	λ_{44}	0.0000417	λ_{35}	0.0010140
λ_{33}	-0.0008071	λ_{54}	0.0008419	λ_{45}	-0.0000592
λ_{53}	-0.0005390	λ_{64}	-0.847126	λ_{55}	0.0000220

a'_4	2.299916	a'_5	-0.4202033		
--------	----------	--------	------------	--	--

④ 参数的误差分析：

根据生态学原理基本知识，就目前生态系统简化结果分析，光污染，噪声污染和大气污染作用在昆虫，水生动物，鸟类的影响并不会对其内禀增长率正负造成影响。

昆虫，水生动物，鸟类物种内部的密度制约理论上为负值，考虑数据选取过程中的补全和插值取点造成的误差，可以接受的数据范围是昆虫的种群密度制约接近于 0。

鸟类和水生动物间的作用系数出现正负反转的现象，考虑鸟类 9-11 月份的大规模迁徙，对种群系统中各生物量造成瞬时大幅度影响，数量波动显然对作用系数造成影响，由于方程组内并未涉及到针对此类干扰的脉冲微分方程^[8]，出现这种现象也是在可接受的范围之内。

本文将针对上述问题，对鸟类和水生动物之间的作用系数进行修正。

⑤ 参数的修正：

针对鸟类和水生动物之间作用系数正负反转的问题，将同一数量级的数值加减在原先确定参数，更正正负影响系数。

经过上述修正后的参数，由于数据确定时产生的误差和数据统计量不足的原因，仍然存在误差，但基本正负问题已得到解决。

最终的参数确定结果见下表：

a'_3	2.5841832	λ_{44}	-0.000042	λ_{35}	0.0010140
λ_{33}	-0.0008071	λ_{54}	-0.0000842	λ_{45}	0.00000592
λ_{53}	-0.0005390	λ_{64}	-0.847126	λ_{55}	-0.0000022
a'_4	1.049706	a'_5	-0.4202033		

3. 模型的求解：

有上述调整后的参数代入微分方程组进行求解，得到如下结果：

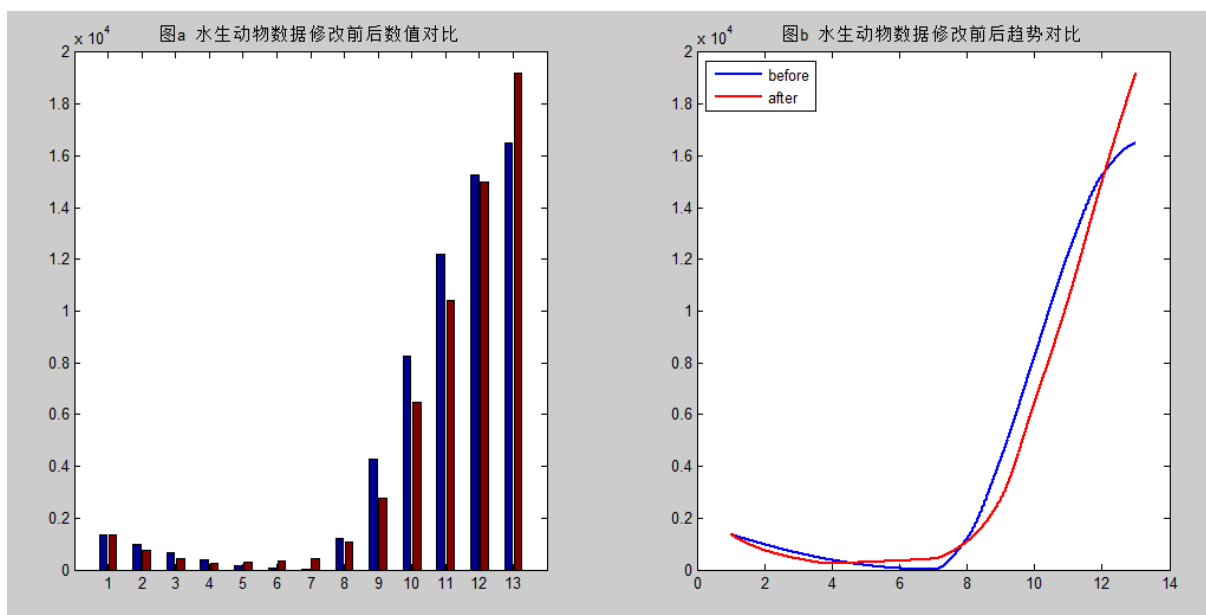


图 5-6a 水生动物数据修改前后数值与趋势对比图

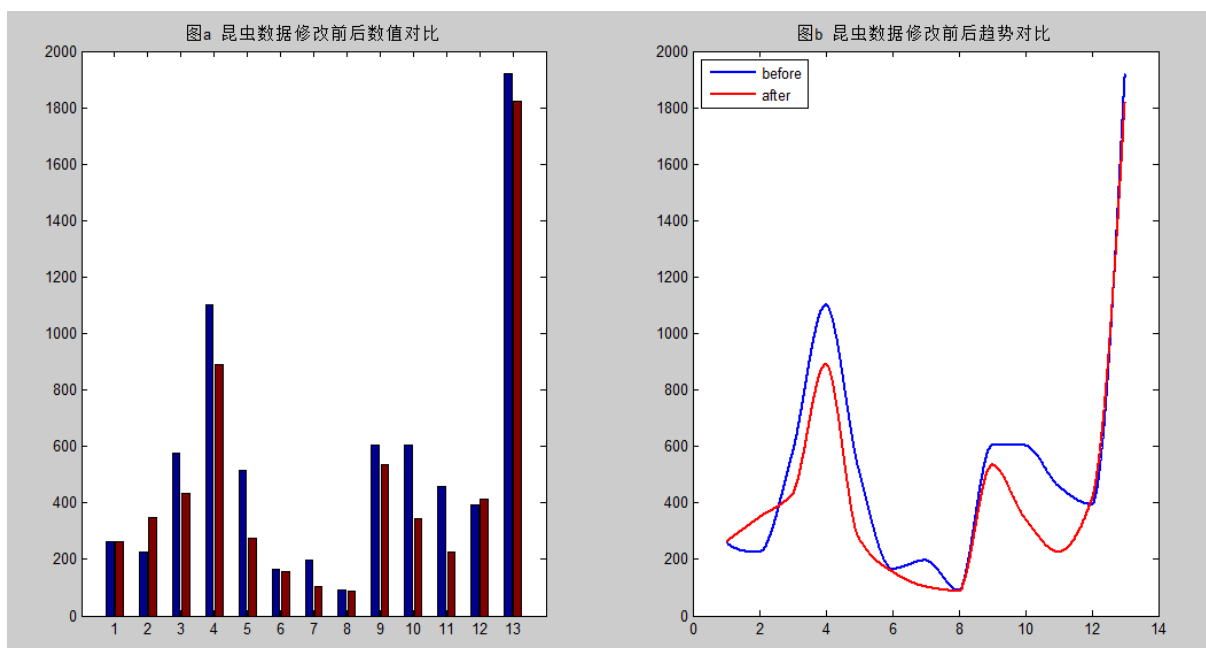


图 5-6b 昆虫数据修改前后数值与趋势对比图

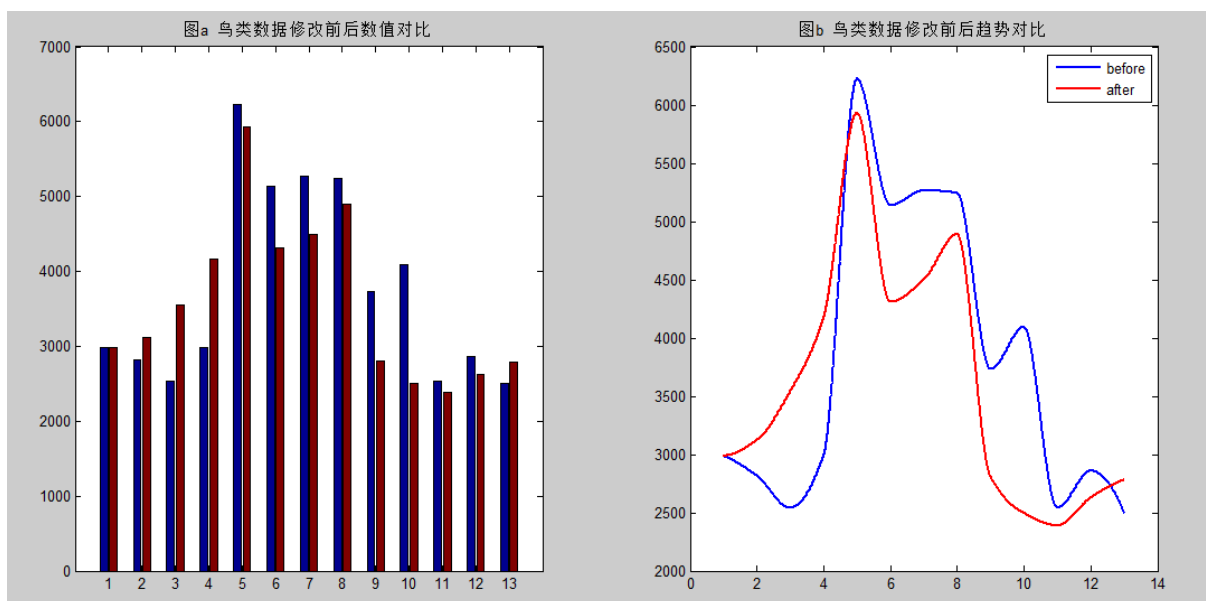


图 5-6c 鸟类数据修改前后数值与趋势对比图

更正后参数确定的方程组求解后，挑取 10 月到 4 月上旬的生物量数据发现，针对鸟类迁徙和虫害爆发时刻数量大幅增加时数据吻合程度不高的情况，可以在原有方程组内添加脉冲微分方程进行优化。水生生物，鸟类和昆虫类生物生物量的变化趋势和数值大小在其他时刻都基本吻合第一次确定参数时所提供的数据。

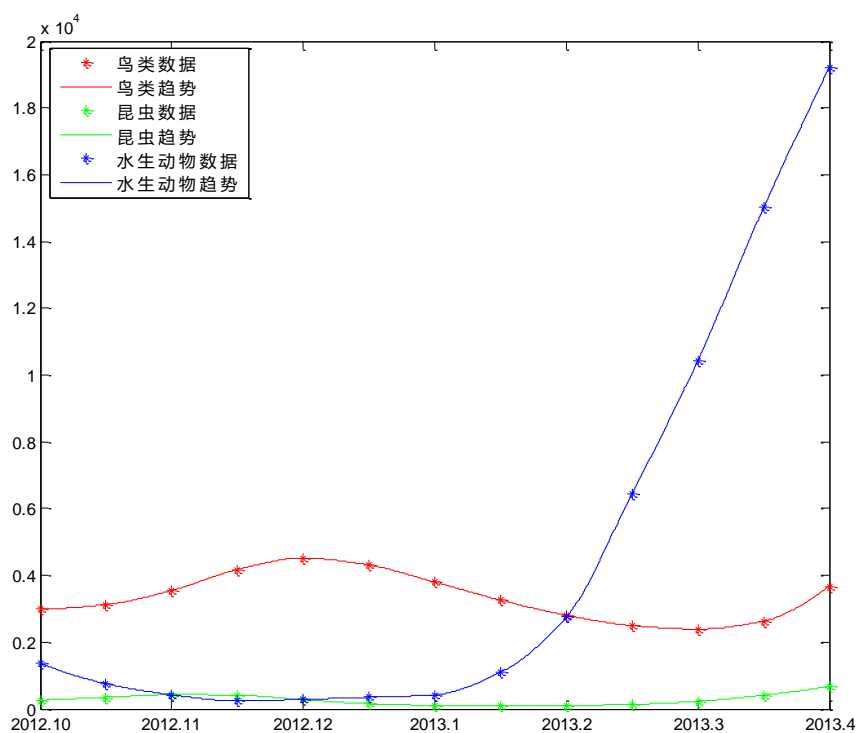


图 5-7a 水生生物、鸟类和昆虫类生物已有数据的变化趋势

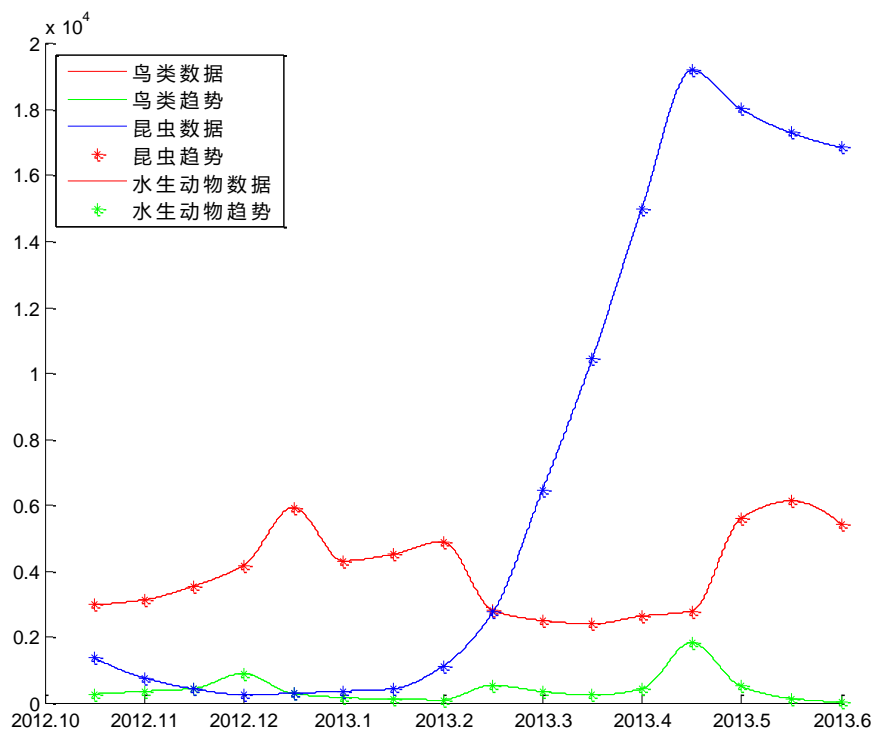


图 5-7b 水生生物、鸟类和昆虫类生物预测数据的变化趋势

鸟类在十二月上旬和四月下旬即将出现的峰值的是由于方程组并未考虑到对捕食者对食饵的功能性反应^[9]。用更一般的语言描述，食饵数量越大，被每个不是这在单位时间内吃掉的就越多。这在一定程度上是合理的。但是，捕食者总有吃饱的时候。因此，在本文中的微分方程中，假定功能性反应与食饵数量成正比，意味着忽略了消化饱和因素，所以与实际情况不完全吻合。

5.3 生态系统健康评价体系的构建

5.3.1 问题分析

生态系统健康概括说为系统具有自我恢复能力及活力,有对付极端胁迫压力的抵抗能力以及可以持续为人类提供服务的能力^[10]。但湿地生态系统健康作为生态系统健康的一部分,并无明确定义。但根据红树林湿地健康评价指标体系中对健康的内涵阐述^[2],可以理解为:关键生态组分和有机组织保存完整且无疾病,对长期或突发的自然或人为扰动能保持弹性和稳定性,整体功能发挥正常,维持人类社会的发展需求,如防风消浪护堤、保持生物多样性、净化污染物、生态旅游等生态服务功能没有退化。

因此本文将从已有的生态系统健康概念的基础上,通过生态系统健康的三个特征,即活力、组织力及恢复力,再结合福田红树林湿地健康内涵,和自然保护区具体的生态

系统结构及社会人类对于生态系统的压力以及生态系统对人类活动的响应来确定该地区生态系统健康评价方法的指标。

福田红树林自然保护区与深圳湾北岸，是一个复杂的湿地生态系统，不仅包括海岸带生态系统和部分陆地和海洋生态系统，在深圳经济高速发展的过去 30 多年时间里，福田红树林湿地生态系统受城市扩张和环境污染影响较为严重，红树林湿地面积不断缩减，滩涂淤积导致海床升高、高楼林立阻断鸟类迁飞通道、水环境污染导致鱼虾死亡、外来物种海桑疯狂扩散已然构成生物入侵、虫害频繁爆发导致红树植物白骨壤不能自然繁殖等生态问题日益突出，整个生态系统在空间结构与生态过程、自我调节与更新能力以及对外部胁迫的恢复能力等方面，均呈现出不稳定性和不可持续性征兆。

面对这个社会，经济，自然互为因果，互相影响和叠加的动态的复合生态系统，福田红树林保护区对于某一特定时期的生态系统进行健康评价并不能完全反映该生态系统的实际情况，本文将发挥 PSR 评价模型具有易调整性，在实际评价工作中可以针对具体情况在时空的尺度上进行扩展，对模型进行调整以说明某些更具体的问题和能抓住“社会 - 环境 - 自然”复合生态系统中相互关系特点^[11]，从压力子系统、状态子系统和响应子系统三个方面出发建立健康评价模型框架，对保护区进行详细的健康评价，帮助其详细的了解该地区生态情况，为找出最迫切问题提供科学依据，帮助保护区科学管理维护福田红树林湿地生态系统。

5.3.2 深圳福田红树林保护区健康评价指标体系

本文针对福田红树林湿地的特点，在以借鉴其他类型指标体系设置为基础的前提下，不仅要把握住整体性，可操作性，系统性等原则^[12]，还要把握住指标筛选要有代表性的原则，一个评价指标可以用来推断几个属性，且具有易控制和操作的特点，容易监测，计算简单，具有技术和经济可行性；且在对红树林健康稳定性的主导因子正确理解的基础上，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。

综合以上几个原则，笔者对该地区生态系统健康特征作出详细调查，在为保护区提出最迫切问题和保护建议的目的下，找出导致当地生态发生显著变化的因子即主要因子，作为评价指标。在此基础上，文章将运用系统分析的思路，将复杂的生态系统划分为目标层，准则层，因素层，指标层进行分析。其中目标层作为指标体系的最高层次，指福田红树林湿地生态系统评价研究的总体目标，实现福田自然保护区自然、社会与经济的可持续发展。准则层包含压力，状态，响应三个子系统，共同保证目标层的实现。

生态系统压力指生态系统压力指导致湿地生态系统结构和功能变化的直接生态压

力和驱动湿地生态系统发生变化的压力，并分为自然压力和人类压力两个因素层。

人类压力主要来源于人类日益频繁的经济活动引起的各类污染物排放增加，经济发展带动各产业发展，经济发达地区吸引更多外来务工者，减少了人均居住面积，结果也导致了楼房平均高度的增高，阻碍了鸟类的迁徙，而作为最能概括地反映各国经济发展水平的综合经济指标，GDP 的变化同意概括了上述结果。

自然压力主要包括生态方面的极端灾害天气，风暴次数和赤潮的发生和生物方面代表红树林保护区典型特征的红树林病虫害爆发以及外来物种入侵。

状态子系统分为环境质量，生物与生态，生物生产力，和生境质量四个方面作为因素层。其中红树林保护区的环境质量本文中称为非生物状态，其一方面自然压力类似赤潮发生的影响，另一方面从人类压力来看，人均 GDP 指标的大幅度增加从另一角度来讲象征着各产业的飞速发展，其中包含重工业的发展，会导致水环境质量恶化，大气污染加重，车流量增大等情况所以选择水环境质量，环境空气质量和噪声环境作出状态评价。生物与生态，生物生产力以及生境质量本文中统称为生物状态，其中前两者其主要受到灾害天气病虫害和外来入侵物种造成的影响，所以选择微分方程模型中的稳定性结果作为其状态评价。微分方程模型是通过刻画生物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，稳定性描述的含义是在以保护区生物构成为基础的条件下，目前的生物数量结构能否在一段时间内趋于一个平衡点，即达到稳定的平衡的状态，或者说保护区生物的数量结构在面对不同程度的突发情况例如极端灾害天气，虫害造成的昆虫数量骤增和外来入侵物种的干扰下，是否仍然可以达到平衡状态，微分方程的稳定性描述对此做出状态评价再合适不过。关于生境质量，生境是指生态学中环境的概念，生境又称为栖息地。关于和 GDP 增长带来的城市扩张压力，风暴发生和极端恶劣天气对红树植物的影响，又考虑到红树林作为保护区分布范围最广，重要性最大的主要植被，以红树林生境面积减少率作为自然响应的评价指标。

响应子系统应该涵盖自然响应和社会响应两个方面作为因素层。其中自然响应主要反映的是在压力状态下各种环境和生物指标的变化情况和趋势，具体指标已经体现在了状态子系统生的生境质量里，所以在此处不在讨论。社会因素相关的响应活动可以描述政府、组织、人群和个人为预防、减轻、改善或适应非预期的环境状态变化而采取的对策、活动或投资^[13]。随着人类日益频繁的经济活动所导致的人均 GDP 增长，水污染和大气污染的出现，将根据环境污染治理投资额和污水治理率的响应情况做出评价。而关于自然压力中自然灾害，红树林病虫害以及外来物种入侵，将根据保护区建设与管理指标的响应程度做出评价。

据生态系统健康评价的目的及指标选择原则，该 PSR 指标体系详细回答了“发生了什么、为什么发生、本文将如何做”，共选取共 14 个指标，并用 PSR 模型形成指标体系。如图 5-8 所示。

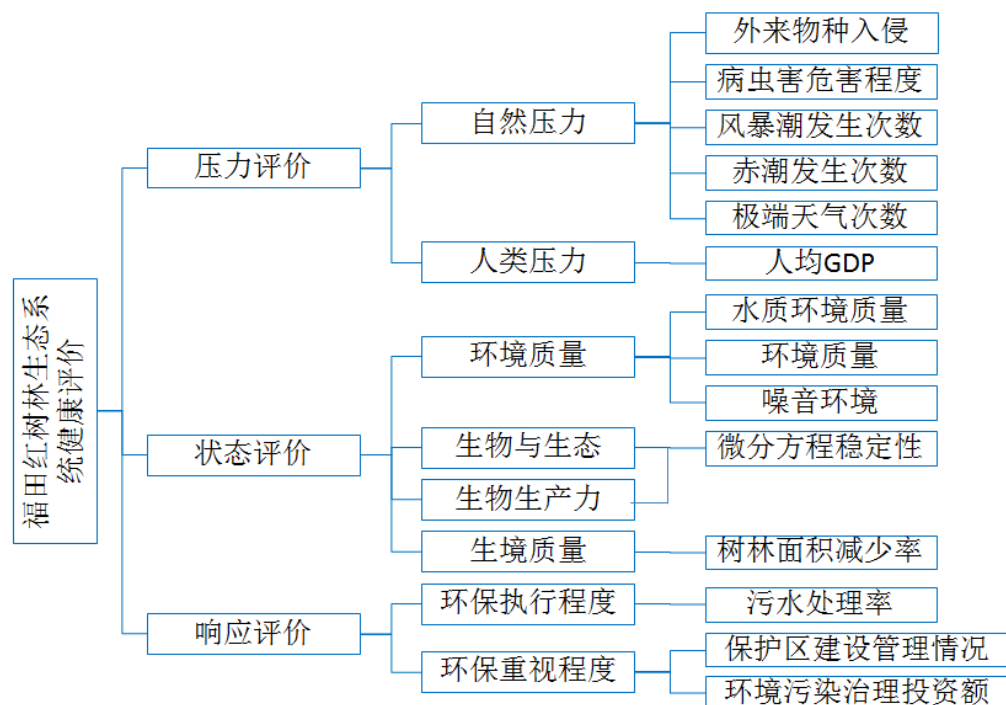


图 5-8 PSR 模型指标体系图

5.3.3 指标评价标准

5.3.3.1 压力子系统

1. 自然压力：

1) 外来入侵物种：

福田自然保护区的外来入侵物种主要以海桑为主的植物类存在。考虑到只从外来入侵物种种类和入侵面积年扩散速率两个方面出发并不能很好的评价这个指标，所以在对外来入侵物种评价过程中，本文通过使用陆琴燕等人研究外来植物入侵红树林生态系统风险评估时的方法^[14]，针对福田红树林外来植物入侵红树林生态系统特征，建立了从外来植物引入，适生，扩散、危害和防治五个阶段进行评估并涵盖了引入途径，引入规模，引入管理，气候适应抗逆性，适应能力，环境因子，扩散方式，生长速度扩散现状，控制机制，扩散趋势，生态危害，社会危害，经济危害，健康危害，防治管理共 17 个指标构成的外来入侵植物的风险评估指标体系，重点对海桑、无瓣海桑的引

种进行风险评估。外来植物入侵红树林生态系统风险等级评价标准见表 5-7。

表 5-7 红树林生态系统外来物种入侵风险等级评价标准

风险等级	风险水平	综合风险值	隶属度	管理策略
一级	极高危险	80-100	0.8-1	禁止引进，实行检疫
二级	高度危险	60-80	0.6-0.8	禁止引进，实行检疫
三级	中度危险	40-60	0.4-0.6	允许引进， 提出严格的风险防控措施
四级	低度危险	20-40	0.2-0.4	可以引进， 适当管理以控制风险上升
无极	极低危险	0-20	0-0.2	可以引进或无需任何控制

2) 病虫害面积：

根据福田保护区生物多样性监测报告中，完成采集昆虫 5000 余头，113 种，其中以海榄雌瘤斑螟、八点广翅蜡蝉、报喜斑粉蝶 为优势种类，并造成了对红树植物的严重为害。其中，喜斑粉蝶华南亚种在深圳福田红树林保护区严重危害海桑科海桑和无瓣海桑两种乔木红树；如图 5-9 所示，八点广翅蜡蝉最喜欢在秋茄上产卵，其次为白骨壤、海桑、木榄和桐花树，八点广翅蜡蝉数量的第一个高峰期出现在 7 月下旬，第二次出现在次年 4 月上旬，也带动了昆虫数量的大幅增加，产生两个峰值；海榄雌瘤斑螟对福田区红树林白骨壤的危害情况最为严重，如图 5-10 所示，白骨壤叶片受害率一直维持在 25.7% 以上，12 月中旬危害最轻，叶片受害率为 25.7%；11 月中、下旬及次年 2 月下旬，白骨壤嫩稍被蛀率较高，被蛀率均达 90.9% 以上，其中 11 月下旬高达 100%。

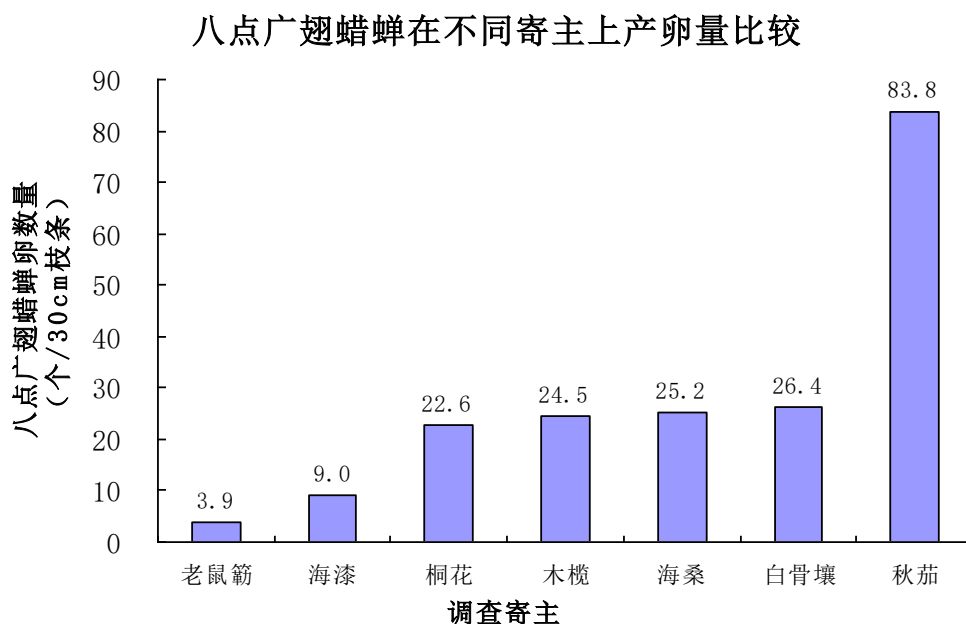


图 5-9 八点广翅蜡蝉在不同寄主植物上产卵量对比图

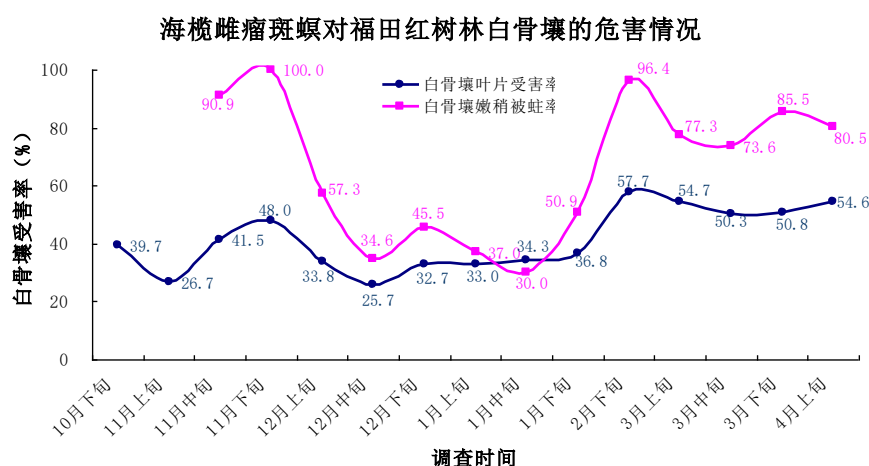


图 5-10 海榄雌瘤斑螟对白骨壤的危害度变化图

本文将针对这三类对红树林危害最为严重的昆虫建立评价标准，并且为了保证红树种类的多样性完整性，每一种病虫害将以受其危害程度最大的红树种类作为评价标准。为了保证评价项目的代表性，对于八点广翅蜡蝉，报喜斑粉蝶和海榄雌瘤斑螟，文章分别根据其对秋茄，海桑，无瓣海桑和白骨壤四种红树的危害程度作为评价内容。报喜斑粉蝶的危害程度以海桑和无瓣海桑全年内被其入侵最大面积比例评价。八点广翅蜡蝉的危害程度根据秋茄全年内最大的带卵率和 30cm 枝条的平均带卵密度评价。海榄雌瘤斑螟的危害程度结合白骨壤 7 月上旬到 10 月下旬的最大枝条枯萎率和 10 月下旬到 4 月上旬的最大叶片受损率评价。上述评价指标均参考历年监测年份中的监测数据，使用

TOPSIS 方法确定隶属度评分。

3) 风暴潮发生次数:

风暴潮灾害的产生是由强烈的大气扰动（台风，热带气旋，大气扰动）引起的海平面异常升高而来的。深圳作为海滨城市，历来是台风，风暴潮的多发地带。本文根据 1952-2014 年深圳国家基本气象站记录中的数据显示，在 1952-2008 年 57 年间，总共有 256 个热带气旋影响深圳（具体分布如表 5-8 所示），年均 4.1 个，其中严重影响年均 1.1 个，7.8 月份为气旋的多发季，月均 1.1 个/年。去 57 年内平均风暴次数 4.1 位中等偏上压力作用程度，隶属度定为 0.8. 无风暴潮时隶属度为 0.

表 5-8 1952-2008 年间热带气旋对深圳的影响次数

年代	总数	年代	总数
1952-1960	42	1981-1990	32
1961-1970	50	1991-2000	33
1971-1980	43	2001-2014	56

4) 赤潮发生次数:

赤潮是海洋中某些微小的浮游生物在一定条件下爆发性增殖而引起海水变色的一种有害的生态异常现象^[15]。赤潮生物的存在和水体的水质富营养化是赤潮发生的主要原因。评价标准参考“中国海岛生态系统评价”(908~02~04~08)项目中的评价标准^[16]

表 5-9 赤潮发生次数评价标准

赤潮发生次数	隶属度	压力状况
三次以上	0.8—1.0	压力很大
三次	0.6—0.8	压力较大
两次	0.4—0.6	压力中等
仅发生一次	0.2—0.4	压力较小
没有发生	0—0.2	压力轻微

表 5-10 赤潮发生面积评价标准

赤潮发生面积	隶属度	压力状况
大于 80 平方千米	0.8-1.0	压力很大
60-80 平方千米	0.6-0.8	压力较大
40-60 平方千米	0.4-0.6	压力中等

20-40 平方千米	0.2-0.4	压力较小
低于 20 平方千米	0-0.2	压力轻微

5) 极端天气次数

因红树植物的耐高温性较好, 极端高温事件对于红树林湿地生态系统的影响并不明显。反而一般低温事件对于红树植物的生长的影响较大, 因此极端低温天气将会对红树植物造成更大的危害。反观近几年深圳低温日年出现频率均在两天以下, 因其属亚热带海洋性气候, 全年气候温和, 最低气温一般在 0 度以上, 所以该指标并未对红树林保护区的红树植物造成压力, 分析后确定剔除该指标。

2. 人类压力:

人均 GDP:

GDP 是国内生产总值的英文 (Gross Domestic Products) 缩写, 是指一个国家 (或地区) 所有常住单位在一定时期内生产活动的最终成果, 反映一个国家 (或地区) 经济发展的总体规模, 其增长速度表明经济总体发展运行情况^[17] GDP 除以常住人口总量的值数代表人均 GDP, 其是最能概括地反映各国经济发展水平的综合经济指标。参考《中国宜居城市评价标准》^[18], 并考虑到物价涨幅因素和深圳经济发展水平偏高的情况, 赋予人均 GDP 为 5 万元/人的隶属度为 0.2, 人均 GDP 为 15 万元/人时隶属度为 1。

5.3.3.2 状态子系统

1. 环境空气质量评价

深圳市环境空气主要污染物是可吸入颗粒物、二氧化硫和二氧化氮。可吸入颗粒物来源呈多样性, 既有地面土壤和扬尘, 又有大量的建筑尘, 还有燃煤尘和冶炼尘等。环境空气中二氧化硫主要来源于工业生产中含硫化石燃料如煤、褐煤和重油的燃烧。二氧化氮除自然来源外, 主要来自于燃料的燃烧、城市汽车尾气。此外, 工业生产过程也可产生一些二氧化氮。因此以上述三种环境空气质量指标作为评价指标, 以 2012 年指定的自 2016 年一月一日起实施由环境保护部和国家质量监督检验检疫总局发布的环境质量标准 (GB 3095-2012) 对未来的环境空气质量进行评价。运用单因子污染指数法, 根据最差指标标准确定环境空气质量, 达到一级标准隶属度评分为 1, 达到二级标准隶属度评分为 0.5, 超过二级标准为零。具体标准见下表:

表 5-11 环境空气质量评价标准

污染物项目	平均时间	一级	二级	单位
二氧化硫	年平均	20	60	微克/立方米

二氧化氮	年平均	40	40	微克/立方米
颗粒物（粒径小于等于 $10\mu\text{m}$ ）	年平均	40	70	微克/立方米

2. 噪音环境标准

保护区周边的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。该指标评价标准将依据《城市区域环境噪声标准》（GB 3096-93）^[19]，对全市区域环境噪声进行检测。具体标准见下表：

表 5-12 噪音环境评价标准

类别	昼夜	夜间	隶属度
0	50	40	1
1	55	45	0.8
2	60	50	0.6
3	65	55	0.4
4	70	55	0.2
超出第四类别	>70	>55	0

3. 水质评价

关于水环境质量评价，是通过数理方法手段，对该水域的指标要素分析，做出定量的描述，摸清区域水环境质量的变化趋势。本文选用单因子污染指数法，即将水环境质量的指标数据与《国家地表水环境质量标准》（GB3838-2002）进行比较，确定水质类别，最后选择其中最差级别作为该区域水质状况类别，做出定性评价，即可初步满足 PSR 模型对于水质评价的需求。

另外，若选择水环境质量为最迫切需要解决的问题，为了反映出水环境质量的变化趋势，本文还将结合均方差法确定权重和动态加权的方法，对水环境质量的变化趋势做出检测，为其预测提供可靠数据。

4. 微分方程持久性评价

关于持久的概念，对于微分方程组来说，如果存在正常数 m, M ，且 $0 < m < M$ ，和有限的时间 T ，当 $t > T$ 时，满足初始条件的每个解均大于 m ，小于 M ，即微分方程组称为持久的。持久性评价，本文将根据微分方程模型的高维持久性分析，结合参数确定的结果，给出各个生物量满足持久性条件的最大区间和组合范围，做出评价时生物量在该范围内

便说明该系统不会有物种发生消亡。评价结果将结合描述种间关系的微分方程组预测的生物量趋势定性评价。

5. 红树林面积减少率

关于红树林面积减少率的计算，其中红树林面积可使用遥感监测的方法具体检测。而关于红树林面积减少率的评价准则，采用《近岸海洋生态健康评价指南》^[20]中的标准对五年内红树林面积减少情况做定量评价，具体标准参照下表。

表 5-13 红树林面积减少评价标准

等级	阈值	隶属度
优	0-5%	1
中	5%-10%	0.5-1
劣	10%-15%	0-0.5

5.3.3.3 响应子系统

1. 污水处理率

作为重要的环境污染治理指标，污水之利率包括城市生活污水处理率和工业废水达标处理率，其很大程度上反映了陆源污染物的排放对海洋的污染影响。本文参考颜利等利用工业废水和城市生活污水处理率表征社会对压力做出响应的指标时的标准，对该指标评价。具体标准^[21]见下表 5-14。

表 5-14 污水处理率评价标准

隶属度 指标	0.8-1	0.6-0.8	0.4-0.6	0.2-0.4	0-0.2
城市生活污水处理率	97.5-100	92.5-97.5	85-92.5	80-85	0-80
工业废水达标处理率	90-100	65-90	35-65	20-35	0-20

2. 环境污染治理投资额和保护区建设管理情况

环境污染治理投资额一定程度上反映出的是当地政府对环境污染智力的重视程度和当地经济发展和环境治理之间的平衡。参考《国家环境保护模范城市考核指标》^[22]制定评价标准，见表 5-15。

表 5-15 环境污染治理投资额评价标准

指标	标准	隶属度
----	----	-----

环境污染治理投资金额	环境污染治理投资额增长率与经济增长率能够保持相对 1 平衡, 污染治理保障程度较好, 经费得到有效利用。	1
	环境污染治理投资额能保持一定水平的增长, 环境治理基本有保障, 能够维持环境处于健康状态。	0.7
	环境污染治理投资额增长率缓慢, 难以满足经济发展所带来环境治理需要, 环境健康状况出现退化趋势。	0.4
	环境污染治理投资额不增加甚至逐年减少, 污染治理难以得到保障, 环境恶化加重。	0.1
保护区建设与管理指标	具备与保护区管理目标相适应的管护、科研、宣传教育等能力; 部门之间沟通良好, 监管工作覆盖全面。	1
	基本具备与保护区管理目标相适应的管护、科研、宣传教育等能力; 内部规章制度基本健全, 管理较规范, 能够满足行政管理需要。	0.8
	管护、科研、宣传教育等能力与实现保护区挂历目标存在差距; 内部规章制度不全, 管理工作遇到很大困难, 存在较大困难。	0.5
	管护、科研、宣传教育等能力明显不足; 内部规章制度严重缺失, 管理混乱。	0.2

5.3.4 指标权重的确定

上述分析中, 本文通过科学的分析最终确定了 12 个评价指标, 评价模型的核心是权重的确定, 关于权重的确定方法很多, 为了保持主观性与客观性的平衡, 本文使用熵权法和层次分析法结合的方式确定权重。

5.3.4.1 层次分析模型

层次分析法是一种定性和定量结合, 系统化, 层次化的分析方法。基本思路是通过两两对比得出各因素权重, 层次分析的核心也就是是判断矩阵的构造。根据每项元素的两两比较, 通过评分判断优劣, 构造判断矩阵, 可以表示为:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

矩阵所有元素表示指标之间相对重要程度，通常使用 1~9 进行度量，其标度如下表 5-16 所示。

表 5-16 判断矩阵中个元素的确定

标度	两目标相比
1	两元素相比，同样重要
3	两元素相比，前者比后者稍微重要
5	两元素相比，前者比后者明显重要
7	两元素相比，前者比后者强烈重要
9	两元素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	介于以上两种情况之间
以上各数倒数	两目标反过来比较

基于上述标准建立相应的判断矩阵，并对判断矩阵的特征向量进行求解，检验矩阵的一致性；若通过一致性检验，则权重确定。若检验没有通过，需要对判断矩阵进行重新调整。

5.3.4.2 熵权法模型

信息熵是系统无序程度的量度，熵值取权法的优势在于，它是通过判断各个因素的变化剧烈程度来决定该因素在最终目标中所占的权重。某项指标的指标值变异程度越大，信息熵越小，说明该指标相对作用越大，即该指标的信息量越大，该指标的权重越大；反之，某项指标的指标值变异程度越小，信息熵越大，说明该指标相对作用越小，即该指标提供的信息量越小，该指标的权重越小。而且熵权法、离差最大化法、变异系数法和均方差决策法这一系列相似的客观权重确定方法中，熵权法对指标差异的敏感性最强。

熵权法的评价矩阵与层次分析法类似，由于红树林湿地生态系统评价指标体系中各指标的量纲、数量级及指标正逆方向的确定差异化程度不同，首先需要对原始指标体系的指标数据做标准化处理。红树林生态系统评价指标体系中第 i 地区第 j 个指标 x_{ij} 的信息熵是：

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

$$I_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$$

上式 $k = \ln m$ 为常数， m 是红树林研究区域的总地块数目；由上述分析可以看出红树林生态系统评价指标体系中第 i 地区第 j 个指标的信息熵值 I_j 越小，表明这个指标的指标值表现差异性较大，提供的信息量相对较多其在指标体系中的其权重应较大；反之，表明这个指标的指标值表现差异性较小，提供的信息量相对较少，其在指标体系中的其权重应较小。在具体应用时，根据红树林生态系统评价指标体系中各指标的信息熵的大小进行综合加权来分析指标的重要程度，具体公式为：

$$r_j = 1 - I_j$$

$$\omega_j = \frac{r_j}{\sum_{k=1}^m k_j}$$

5.3.5 综合指数法

本文使用综合指数法对福田保护区进行评价，即按一定标准将每一指标值划分成不同等级分别赋分，并对所得分值进行标准化，然后用加权求和法计算每一指标的权重，通过综合健康指数 (Comprehensive Health Index, ICH) 计算整个湿地生态系统的总指数值，最后根据总指数的分级数值范围确定湿地生态系统健康的等级。综合健康指数的确定由压力，状态，响应三个子系统的综合健康指数分值相加得到，其中响应（压力、状态）子系统可根据以下公式计算：

$$DI_{\text{响应}} = \sum_{i=1}^n L_i W_i$$

n 为响应子系统指标个数， W_i 为指标 i 的权重值， L_i 为指标 i 的归一化后的评价值。其中压力子系统需要正向化，即通过 $DI'_{\text{压力}} = 1 - DI_{\text{压力}}$ 得出压力子系统的健康综合指数为 $DI'_{\text{压力}}$ ，与状态子系统和响应子系统相加得到最终的福田保护区综合健康指数。

5.3.6 部分求解

鉴于当地对福田保护区的生态情况做系统性管理时间并不长，尤其是在保护区相关

的数据统计方面,并不能够满足当前模型求解的需要,因此本文只对进行健康评价模型的部分求解,权重确定只给出层次分析法的权重确定,健康评价着重求解压力子系统的外来入侵物种,红树林病虫害指标和状态子系统的水环境质量,环境空气质量,噪声污染指标和稳定性指标。

5.3.6.1 评价模型求解

1. 外来物种入侵求解

因篇幅有限,具体求解过程见附件1。

研究计算结果表明,海桑无瓣海桑入侵福田红树林湿地生态系统综合风险值达39.5,其入侵风险等级为四级,低度风险,因此海桑无瓣海桑可以引进,需要适当管理以控制风险上升。

此外,从关于深圳福田红树植物海桑种群生态学研究^[23]中发现,对无瓣海桑和海桑的人工林的生态功能进行了初步分析和评价后^[24]认为:海桑和无瓣海桑作为深圳湾人工造林的主要引种,未对原有红树林生态系统的结构和功能造成不利影响,而且在对恢复和发展红树林地的面积和提高红树林生态系统的生物多样性两个方面具有积极的作用。另外,在对深圳湾红树林外来引种海桑和无瓣海桑的生态适应性,扩散现状及生态入侵的可能性进行了研究。研究结果表明:海桑和无瓣海桑对深圳湾的气温,盐度,潮滩与土壤等基本适应,子代在生长定居方面面对极端低温的限制因子时抗寒性逐渐增强,局部区域有一定的繁殖力和扩散力,从种群生物生态学特性,生态位理论,群落更新理论等方面分析认为,海桑和无瓣海桑在深圳湾造成生态入侵的可能性不大。针对目前,天然扩散的海桑和无瓣海桑的幼苗幼树可采用人工拔苗,对幼树注射内吸式除草剂的方法,可以作到控制其生长和自然扩展。因此,必要时完全可以控制海桑和无瓣海桑在深圳湾的生态入侵发生。

2. 病虫害入侵面积求解

因现有数据并不能完成TOPSIS方法的隶属度确定,本文的评价将根据据现时最近的时间点,2012年7月到2013年4月的现状评价做定性评价。2012年7月到2013年4月,八点广翅蜡蝉在秋茄上的产卵量最大,平均每30cm枝条上可有83.8个卵;八点广翅蜡蝉的产卵高峰期7月、8月寄主植物带卵率较高,其中7月上旬寄主带卵率高达82.0%。白骨壤7月开始抽新稍时未发现新的被虫为害枯萎的枝条;8月、9月,10月白骨壤枝条枯萎率上升,其中10月中旬白骨壤枝条枯萎率最高,达到42.5%。11月中、下旬及次年2月下旬,白骨壤嫩稍被蛀率较高,被蛀率均达90.9%以上,其中11月下旬高达100%。据上析,作出定性评价,隶属度评分为0.7。

3. 风暴潮发生次数求解

根据深圳气象局提供的‘2015 卷深圳年鉴^[25]’，中 2014 年数据。全年有 4 个台风进入深圳 500km 范围内，其中有 2 个对深圳市造成风雨影响，分别为 9 号台风“威马逊”（超强台风级）和 15 号台风“海鸥”（台风级）。台风影响数量较同期气候平均值（3.5 个）偏少 1.5 个，为 1999 年以来影响数量最少年份之一（与 2000 年、2007 年、2011 年并列最少年）。7 月 17-19 日，9 号台风“威马逊”（超强台风级）成为首个影响深圳的台风，比平均初台影响时间偏晚 12 天。8 月无台风影响，从 1953 年有气象记录以来共有 17 个年份 8 月无台风影响记录，近 10 年仅有 2010 年和 2011 年 8 月无台风影响。据上析，隶属度评分为 0.7。

4 赤潮发生次数求解

据 2014 年深圳市海洋环境公报提供的信息，2014 年，深圳市海域共发现赤潮 7 起，包括 3 次多纹膝沟藻赤潮，2 次红色赤潮藻赤潮，以及赤潮异弯藻和夜光藻赤潮各 1 次。去年的赤潮发现集中在 2 月~6 月，占全年赤潮发现次数的 86%。其中，去年 6 月 18 日~6 月 25 日发生在大鹏湾大梅沙海域的红色赤潮藻赤潮规模最大，持续时间最长。隶属度评分为 0.7。

5. 人均 GDP 评价求解

表 5-17 2009-2013 年人均 GDP 评价求解

年份	人口总数（万）	人口密度 （人/平方千米）	人均 GDP （元/人）	隶属度
2009	995.01	4891	84147	0.47
2010	1037.66	5311	92296	0.54
2011	1046.74	5369	110421	0.68
2012	1054.74	5400	123147	0.78
2013	1062.98	5422	136947	0.9
2014			143074	0.94

人均 GDP 为 5 万元/人的隶属度为 0.2, 人均 GDP 为 15 万元/人时隶属度为 1。

6. 水环境质量求解

据官方提供 2011-13 水质数据，2011 年除重金属污染指标符合地表水一类指标外，少数指标监测点监测数据均超出第五类水质，达到劣五类，部分指标，部分监测点达到劣五类，并从 2011 年起，超标趋势逐年上涨。根据 2014 年初到 2015 年初的水质数据

发现，超标趋势有所放缓，并呈现小幅度回落，但部分指标如 COD，BOD，DO，N，P 在多数监测点位仍然超标属于劣五类水质，表明水体富氧化程度和有机污染问题并未达到有效防治，与国家自然保护区要求的一类水质标准相差甚远。隶属度分值为零。

7. 环境空气质量求解

从数据发现，从 2006 年以来二氧化硫排放量一直维持在一级标准，pm10 监测数据有小幅回暖趋势，二氧化氮排放量自 2006 年来于 2012, 2013 年首次突破三级指标，达到二级指标，总体来说环境空气质量得到了较好地整治，预计在未来达到一个更好的情况，隶属度评分为 0.5。

表 5-18 环境空气质量求解结果

<div>年份</div> <div>污染物项目</div>	2009	2010	2011	2012	2013
二氧化硫	13	11	11	10	11
二氧化氮	42	45	48	40	40
颗粒物（粒径小于等于 10 μ m）	57	57	57	54	62
级别	三级	三级	三级	二级	二级

8. 噪音环境求解

根据深圳人居网提供的《2014 年度深圳市环境状况公报》数据显示，城市声环境质量基本稳定。全市区域环境噪声等效声级平均值为 56.8 分贝，处于一般（三级）水平，与上年持平，隶属度评分为 0.6 分。建议加强道路交通噪声污染防治, 针对保护区周边道路滨海大道的交通节点通过铺设降噪路面、种植密实绿化林带、安装道路声屏障、安装通风隔声窗、优化交通管理等技术措施降低噪声影响，并严格执行机动车喇叭鸣放管理。

9. 持久性分析求解

根据模拟生态系统建立的微分方程模型的预测结果可以很明显的看出，水生动物作为水陆之间的唯一联系，受水质的影响较大。水质的恶化将会导致水生动物数量的减少，这一情况的发生会减少鸟类的食物来源，同时增加鸟类对昆虫的捕食量增大，致使昆虫数量减少或者灭亡，鸟类缺少足够的食物来源，最终的结果是导致鸟类迁出，对生态系统造成不可逆的毁坏，隶属度评分为 0.5。因此对水质的控制俨然成为当下最迫切需要解决的问题，本文将针对水质指标进行预测，并根绝水质预测结果结合微分方程组进行

控制结果效果评价。

10. 红树林面积减少率求解

目前，红树林面积受城市扩张影响，宝安因填海造地，红树林面临进一步减少，福田红树林也面临着同样的问题。因准备数据不足，本文并不能给出准确的定量评价，结合目前城市扩张压力给红树林带来的影响，给与给指标一个中等隶属度水平 0.6 作为目前红树林面积减少率的评价。

11. 污水处理率，环保投资金额和保护区建设管理情况求解

表 5-19 2006-2013 年响应子系统评价结果

年份	城市生活污水 处理率	隶属度	环境保护投资 (亿元)	环境保护投资 占 GDP 比重	隶属度
2006	65.23%	0.1	156.6	2.75%	0.65
2007	70.45%	0.1	193.5	2.86%	0.7
2008	75.03%	0.1	218.58	2.8%	0.7
2009	80.17%	0.2	233.73	2.85%	0.7
2010	88.81%	0.5	272.96	2.87%	0.7
2011	93.97%	0.73	298.65	2.6%	0.6
2012	96%	0.95			
2013	96.22%	0.95			

自 2011 年以来不完全数据统计，环境污染治理投资额增长率缓慢，难以满足经济发展所带来环境治理需要，环境健康状况出现退化趋势，因此隶属度评分为 0.6。福田红树林保护区管护、科研、宣传教育等能力与实现保护区挂历目标存在差距；内部规章制度不全，管理工作遇到很大地，存在较大困难，隶属度评分为 0.5。

5.3.6.2 层次分析模型求解

层次分析法两指标间的重要程度的确定，以广西生态系统健康评价^[11]中指标的重要程度比较为基础，结合其他湿地生态系统层次分析法权重确定过程，给出由微分方程稳定性，水环境质量，外来物种入侵，外来物种入侵，红树林病虫害，年风暴潮数，赤潮发生次数面积，污水治理率，环境污染治理投资额，保护区建设与管理，人均 GDP，红树林生境面积减少率十一个指标构成的判别矩阵如下：

1	2.9	4	7.2	9.1	9.1	9.1	9.3	9.3	9.3	9.3	9.6	10.7
0.3448	1	1.4	2.5	3.1	3.1	3.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.3	3.7
0.25	0.7143	1	1.8	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.7
0.1389	0.4	0.5556	1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.5
0.1099	0.3226	0.4348	0.7692	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.2
0.1099	0.3226	0.4348	0.7692	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.2
0.1099	0.3226	0.4348	0.7692	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.2
0.1075	0.3125	0.4348	0.7692	1	1	1	1	1	1	1	1	1.2
0.1075	0.3125	0.4348	0.7692	1	1	1	1	1	1	1	1	1.2
0.1075	0.3125	0.4348	0.7692	1	1	1	1	1	1	1	1	1.2
0.1075	0.3125	0.4348	0.7692	1	1	1	1	1	1	1	1	1.2
0.1042	0.3030	0.4167	0.7692	0.9091	0.9091	0.9091	1	1	1	1	1	1.1
0.0935	0.2703	0.3704	0.6667	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.9091	1

通过一致性检验，最终权值确定结果见下表：

表 5-20 层次分析法最终权值结果

红树林生态系统评价指标	权值	红树林生态系统评价指标	权值
微分方程稳定性	0.3716	噪声环境	0.0402
水环境质量	0.1279	污水治理率	0.0402
外来物种入侵	0.0929	环境污染治理投资额	0.0402
红树林病虫害	0.0521	保护区建设与管理	0.0402
年风暴潮次数	0.0408	人均 GDP	0.0388
赤潮发生次数和面积	0.0408	红树林生境面积减少率	0.0341
环境空气质量	0.0408		

5.3.6.3 综合指数法求解

表 5-21 健康评价综合指数法求解结果

子系统	评分	权重	加权分值
压力子系统 (正向化)	0.378	0.268	0.101
状态子系统	0.41	0.6215	0.255
响应子系统	0.53	0.1205	0.0638

通过压力(正向化)、状态、响应 3 个子系统的分别评价,得到深圳福田红树林湿地生态系统评价的最终结果为 0.42, 根据生态系统健康评价标准,属于“中等”的范围,可认为研究区域生态系统处于一般的状态,生态系统结构和功能较完善,受到干扰后的恢复力较强。压力(未正向化)、状态、响应 3 个子系统得分分别为 0.622, 0.41, 和 0.53。

其中, 响应值>压力值>状态值, 表明现阶段福田红树林湿地生态系统处于不稳定的状态, 而且来自于自然和人类压力(尤其自然压力)正对生态系统造成严重的影响, 如不及时加强保护, 生态系统将面临更为严重的压力, 同时响应的值较高, 说明该地区及时对压力做出响应, 从而抑制了压力不断增大的恶性循环。

5.4 生态监测方案的构建

基于健康评价指标体系下的监测方案的设计:

介于保护区之前的监测点信息的时间、空间离散度较大(时间间隔较长、测点密度过于稀疏), 环境因子监测明显不足, 本文针对以上情况, 根据健康评价模型的构成需求, 重新设计监测方案, 为福田保护区动态监测提供更好的数据支持。

基于健康评价的指标体系, 保护区需要通过年鉴或者统计资料收集支撑健康评价的外部指标, 类似于风暴潮次数, 赤潮发生次数面积, 人均 GDP 水平, 环境污染投资治理金额, 保护区建设与管理情况和污水治理率的统计数据。关于保护区内部指标, 需要详细设计检测项目, 监测时间间隔, 监测点位。

水环境质量下的检测指标主要包括反应有机物污染的溶解氧 DO, 生化需氧量 BOD, 化学需氧量 COD, 氨氮 NH₃-N, 反应水体富营养化程度的氮 N, 磷 P, 重金属含量和反应当地生活污水排放对水域影响程度的大肠菌群数目。考虑到该地区冬季有枯水期和指标的季节性变化相对明显, 需要分别从 1 月 4 月 7 月 10 月监测四组数据。监测点位要遵循少点位涵括大面积的思想, 首先在处于独立水域的, 代表营养物质 N, P 较高标准的鱼塘设立监测点。其次在分别处于保护区上游两个排污点下游的风塘河口和沙嘴码头设立监测点, 代表有机物污染的较高标准。最后在距离上述三地较远的观鸟亭设立第四个监测点, 代表福田保护区水质的一般标准。

红树植物的监测指标以海桑, 无瓣海桑, 秋茄, 白骨壤, 桐花树的面积为主, 由于其生长周期较长, 幼苗发育相对成年数目相对较快但面积比重较小, 所以以年为单位通过遥感监测手段进行整个保护区范围内的面积监测。根据病虫害指标评价的数据构成, 还需要对海桑和无瓣海桑的叶片受损率, 秋茄的带卵率和 30cm 枝条的平均带卵密度, 白骨壤 7 月上旬到 10 月下旬的枝条枯萎率和 10 月下旬到 4 月上旬的叶片受损率实施监测。

昆虫的监测主要考虑到红树林病虫害的爆发时间前后, 应该安排较密的时间节点。据往年数据推测, 昆虫数量的三个峰值阶段: 第一个高峰期出现在 7 月下旬, 主要由作为虫害爆发始作俑者的广翅蜡蝉形成; 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。

鸟类的监测主要考虑到候鸟的迁徙影响，在迁徙前后安排较密的时间节点。秋季（9-11 月），受迁徙候鸟集群迁徙，鸟类数量明显增加，至春季（3-4 月），受迁徙影响，鸟类数量有明显的回落。因此对鸟类以月为单位进行检测，9-11, 3-4 月份上、下旬分别进行监测。

水生生物监测主要以作为被鸟捕食对象的水生生物为主。因为被鸟类捕食生物种类繁多，因此为同一计量单位，将以水生生物总质量为统计指标，计算所有可被鸟类捕食的对象的质量和，按季度分别于 1, 4, 7, 10 月份别进行统计监测。

浮游植物的监测数据和水质的富营养化情况相关系数很高，又作为水生生物的食物来源，监测单位体积内的生物质量，将以密度为单位，分别于 1, 4, 7, 10 月以季度为单位进行监测，监测点位以靠近水质监测点位为主，为了捕捉水质情况，位置较为灵活。

最后根据健康评价和种间关系的微分方程组的数据构成，为了得到和保护区周边环境更匹配的压力和状态指标数据，应该对保护区周边的二氧化硫，二氧化氮，颗粒物（粒径小于等于 10 μ m），环境噪声以及凤塘河口和沙嘴码头上游的生活污水处理率和污水排放点的污水处理率实施监测。

表 5-22 监测方案具体执行表

项目	监测内容	监测点位	监测频度	监测手段
水环境 质量	溶解氧，生化需氧量，化学需氧量 氨氮，氮，磷 重金属含量 大肠菌群数目	鱼塘 凤塘河口 沙嘴码头 观鸟亭	每季度一次 1、4、7、10 月	——
红树植物	秋茄带卵率	保护区全范围	七月上旬到四月上旬，一月三次 每月一次	
	秋茄 30cm 枝条平均带卵率			
	海桑无瓣海桑叶片受损率			
	白骨壤叶片受损率		十月下旬到四月上旬	
	白骨壤枝条枯萎率		七月上旬到十月中旬，一月三次	

	海桑、无瓣海桑、秋茄、白骨壤、桐花树的面积		每年一次	遥感监测
昆虫	昆虫数目	保护区全范围	每月三次 4、7、11、12 重点监测	——
鸟类	鸟类数目 重点保护鸟类数目	保护区全范围	每月两次 9-11、3-4 月重点监测	
水生动物	被鸟捕食对象的水生生物，如鱼类，羽须鳃沙蚕和腺带刺沙蚕，单位体积内的生物质量	整个水域	每季度一次 1、4、7、10 月	样方法

续表 5-22 监测方案具体执行表

浮游植物	单位体积内的生物质量	靠近水质监测点位为主	每季度一次 1、4、7、10 月	——
噪声污染	环境噪音	保护区周边	每月一次	
环境空气质量	颗粒物(粒径小于等于 $10\mu\text{m}$)，二氧化硫，二氧化氮	保护区周边	每月一次	
污水排放	生活、工业污水处理率	凤塘河口，沙嘴码头上游	每月一次	

5.5 最迫切生态问题的预测与控制

5.5.1 问题分析

根据微分方程持久性分析，根据时间推移后的预测结果看来，就目前水质的发展趋

势分析,水质恶化对水生动物造成的负面影响将作为水陆的唯一联系,间接影响到陆生动植物的生存,对整个湿地生态系统造成不可逆的破坏。

结合保护区整体的健康评价,水环境质量作为权值第二大的指标,评价结果属于最低的劣五类标准,隶属度分值为零,评价结果不乐观。在水环境质量评价过程中,通过查阅资料,笔者发现很多水环境质量中多项指标与保护区内水生物种联系密切,验证了水环境质量与微分方程内的存在合理性。一方面水生生物呼吸耗氧使溶解氧含量降低,另一方面沙嘴码头和凤塘河口位于排污点下游,经受着含有大量有机物的废水排放,有机物的分解直接导致 COD 指标上升,还会消耗大量溶解氧,间接对水生生物的生存造成影响。而且氮磷含量的大幅超标会造成水体的富营养化,会引起水域内浮游植物的大量繁殖,消耗水中的溶解氧,对水生生物的生存造成压力

根据上述分析,就目前 DO, COD, N, P 大部分监测点监测数据超标至劣五类的情况下,水环境质量作为可控的内部因素,已经俨然成为当前最迫切需要解决的问题,需要立即采取正确的措施立即维护治理。下文中将以水环境质量作为最迫切问题,对水质发展进行预测,结合种间微分方程组,对水质的控制结果进行评价,提出整治管理建议。

5.5.2 水环境质量的预测

在水环境综合影响指数的建立过程中,主要涉及的指标为溶解氧、氨氮、化学需氧量和大肠菌群总数,故主要对以上指标进行建模预测。通过对指标已有数据的观测,发现氨氮和大肠菌群总数波动幅度较大,而溶解氧和化学需氧量相对呈现出一个整体性的趋势。在实际建模过程中,很难使用一种方案就能对两类指标分别完成预测。所以本文选取不同的预测模型,分别对以溶解氧、化学需氧量为代表的整体型指标和以氨氮、大肠菌群总数为代表的波动型指标进行预测。

5.5.2.1 整体型指标预测的分析

保护区内溶解氧、化学需氧量指标数据在有限的时间和空间范围内监测获得,因此指标数据所能够提供的信息也是不完全的。因此保护区内水质监测数据是一个部分信息已知,部分信息未知或不确定的黑箱系统,而对水环境指标的中短期预测问题就转化为一个黑箱预测问题。

本文选取灰色系统与人工神经网络相结合的预测方式^[26]。灰色预测是实现水质数据预测的一般方法,但对数据的光滑度有着较高的要求,且通常无法反映出局部的数据波动,而人工神经网络预测模型在理论上可以逼近任何形状的曲线,且经过一定次数的向后影响与向前反馈机制后,对数据趋势有着准确的把握,预测误差较小。

考虑到只需对单一变量进行预测，且一阶微分项能够满足预测需求，所以本文选取 GM(1, 1) 模型进行灰色预测。而选择逼近能力较强、学习速度较快的 RBF 模型进行神经网络预测。在预测过程中，首先取不同组数据进行 GM(1, 1) 建模，分别确定预测某已知时刻水质数据。其次，将各个 GM(1, 1) 模型所得数据作为 RBF 神经网络的输入层，将实际水质数据作为神经网络的输出层，按照有导师学习方式训练。最后，根据两种模型综合确定的预测函数对未来水质数据进行测定。

为保证结果的准确性，指标数据所选取的时间跨度不宜过大，而指标数据个数又不宜过少。综合考虑以上两方面，本文选取 2013 年 7 月至 2014 年 10 月数据进行预测，使用 2015 年 1 月数据进行比较。

5.5.2.2 灰色系统预测模型的建立

1) GM(1, 1) 模型的建立:

设时间序列 $x^{(0)}$ 共有 n 个观测值，组成非负原始数据序列如下：

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$$

首先，为保证建模方法的可行性，计算原始数据序列的级比

$$\lambda(k) = \frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)} \quad (k = 2, 3, \dots, n)$$

若所有级比 $\lambda(k)$ 均落在可容覆盖 $X = (e^{-\frac{2}{n+1}}, e^{\frac{2}{n+1}})$ 之内，则可以利用原始数据序列 $x^{(0)}$ 进行灰色预测分析。否则，需要对原始数据序列 $x^{(0)}$ 做必要的变换处理：

$$y^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) + c \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

使变换后数列 $y^{(0)}$ 的级比 $\lambda_y(k)$ 落入可容覆盖 X 。

其次，对原始数据序列做一次累加生成序列

$$\begin{aligned} x^{(1)} &= (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \\ &= (x^{(0)}(1), x^{(1)}(1) + x^{(0)}(2), \dots, x^{(1)}(n-1) + x^{(0)}(n)) \end{aligned}$$

$$\text{其中 } x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (k = 1, 2, \dots, n).$$

对原始数据序列进行加权邻值生成序列

$$z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$$

其中 $z^{(1)}(k) = \alpha x^{(1)}(k) + (1-\alpha)x^{(1)}(k-1) \quad (k = 2, 3, \dots, n)$ ， α 为加权参数，一般情况下取值 0.5。

于是 GM(1, 1) 的白化微分方程模型为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (5.5-1)$$

其中 a 为发展灰度, b 为内生控制灰度。

因为 $x^{(0)}(k) = x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)$, 故取 $x^{(0)}(k)$ 为灰导数, $z^{(1)}(k)$ 为白化背景值, 建立灰微分方程

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$$

或

$$x^{(0)}(k) = -az^{(1)}(k) + b$$

即矩阵形式为

$$Y^{(0)} = B \cdot (a, b)^T$$

$$\text{其中 } Y^{(0)} = (x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n))^T, B = \begin{pmatrix} -z^{(1)}(2) & -z^{(1)}(3) & \dots & -z^{(1)}(n) \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}^T.$$

用最小二乘法求得参数的估计值为

$$(\hat{a}, \hat{b})^T = (B^T \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot Y^{(0)} \quad (5.5-2).$$

由于方程 (5.5-1) 有特解

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}) \cdot e^{-at} + \frac{b}{a}$$

所以

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k+1) &= \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \\ &= (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}) \cdot (e^{-ak} - e^{-a(k-1)}) \quad (k=0, 1, 2, \dots, n-1, \dots) \end{aligned} \quad (5.5-3)$$

2) 保护区数据的导入:

分别导入保护区溶解氧、化学需氧量于 2013 年 7 月、10 月, 2014 年度 1 月、4 月、7 月和 10 月的 6 组数据为 GM(1, 1) 预测的观测值, 取 2015 年 1 月的数据作为预测结果的比较值。具体数据如下表所示。

表 5-23 溶解氧、化学需氧量的原始数据 (mg/L)

	2013. 7	2013. 10	2014. 1	2014. 4	2014. 7	2014. 10	2015. 1
DO	2. 837	2. 642	2. 914	3. 185	3. 284	2. 515	2. 546
COD	57. 949	53. 568	53. 012	52. 455	56. 801	51. 488	51. 920

在每个指标的预测过程中，由于 GM(1, 1) 预测要求至少 4 组观测数据，故可分别取第 i 组以后的数据建立模型， $i=1,2,\dots,n-3$ 。 ($n\geq 4$)。共可建立 $n-3$ 组预测子模型，分别记为 $GM_i(1,1)$ ，且各个子模型都可对其后年份数据进行预测。

3) GM(1, 1)模型的求解：

通过最小二乘法确定参数，对每个指标都确定出 $n-3$ 个预测模型，其分别与比较值的误差和模型函数关系如下。

表 5-24 溶解氧和化学需氧量通过 GM(1, 1) 得到的结果

指标	GM(1, 1)子模型	预测值(mg/L)	相对误差	模型函数关系
溶解氧	$GM_1(1,1)$	2.9407028	15.4878%	$\hat{x}^{(0)}(t+1) = 3.69025e^{-0.1065t}$
	$GM_2(1,1)$	2.7274994	7.1148%	$\hat{x}^{(0)}(t+1) = 3.2392e^{-0.03439t}$
	$GM_3(1,1)$	2.4099023	-5.3579%	$\hat{x}^{(0)}(t+1) = 2.8757e^{0.003727t}$
化学需氧量	$GM_1(1,1)$	53.3545224	2.7637%	$\hat{x}^{(0)}(t+1) = 53.5751e^{0.0006877t}$
	$GM_2(1,1)$	53.3835693	2.8196%	$\hat{x}^{(0)}(t+1) = 53.4943e^{-0.0004146t}$
	$GM_3(1,1)$	52.6490873	1.4049%	$\hat{x}^{(0)}(t+1) = 54.5268e^{-0.008761t}$

5.5.2.3 灰色神经网络综合预测

1) RBF 神经网络模型：

RBF 人工神经网络由一个输入层、一个隐含层和一个输出层组成，其工作原理是把网络看成是对未知函数的逼近，任何函数都可以表示成一组基函数的加权和，也即选择各隐含层神经元的传输函数，使之构成一组基函数来逼近未知函数。RBF 神经网络克服了 BP 神经网络收敛速度慢、容易陷入局部极小值的缺陷，同时具有收敛速度快能够进行全局逼近的优势，具有较高的预测精度。

设神经网络的输入层为 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ ，输出层为 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ ，输入层数据沿正向传播，在由输入层传播到各隐含层和由隐含层传播到各输出层的过程中分别确定权值 v_{ij} 和 w_{ij} 。将输出层数据与实际输出数据作比较，将比较误差反向传播，重新确定权值 v_{ij} 和 w_{ij} 。（权值的确定过程较为复杂，这里不进行说明，程序主要由 MATLAB 神经网络工具箱完成）直到输出层数据与实际输出数据的误差小于某一确定值时，完成训练过程。

2) 灰色神经网络模型：

①根据上述 GM(1, 1) 预测模型，共求得关于指标溶解氧和化学需氧量的 5 个模拟值

和 3 个预测值，模拟值时间为 2014 年 1 月至 2015 年 1 月，预测值时间为 2015 年 4 月至 2015 年 10 月，具体数据如下表所示。

表 5-25 溶解氧和化学需氧量使用 GM(1, 1) 预测结果 (mg/L)

	编号	2014. 1	2014. 4	2014. 7	2014. 1 0	2015. 1	2015. 4	2015. 7	2015. 1 0
DO	1	2. 897	2. 908	2. 919	2. 930	2. 941	2. 952	2. 963	2. 974
	2	3. 130	3. 024	2. 922	2. 823	2. 727	2. 635	2. 546	2. 460
	3	2. 914	3. 317	2. 982	2. 681	2. 410	2. 166	1. 947	1. 751
	实际 值	2. 914	3. 185	3. 284	2. 515	2. 546			
COD	1	53. 50	53. 46	53. 43	53. 39	53. 35	53. 32	53. 28	53. 24
	2	53. 47	53. 45	53. 42	53. 41	53. 38	53. 36	53. 34	53. 32
	3	53. 01	54. 05	53. 58	53. 11	52. 65	52. 19	51. 73	51. 28
	实际 值	53. 01	52. 46	56. 80	51. 49	51. 92			

②将指标的 5 个模拟值作为 RBF 神经网络的输入层向量，以原始序列作为神经网络的输出向量，使用 MATLAB 神经网络工具箱进行训练，确定每个节点的权值。

③将 GM(1, 1) 模型所得的 3 个预测值作为神经网络的输入层向量，按照训练好的神经网络进行仿真模拟，所得的 3 个输出数据就是灰色神经网络模型的预测值如下。

表 5-25 溶解氧和化学需氧量使用神经网络预测结果 (mg/L)

	2015. 4	2015. 7	2015. 10
溶解氧	2. 246	2. 116	2. 041
化学需氧量	51. 136	50. 973	50. 965

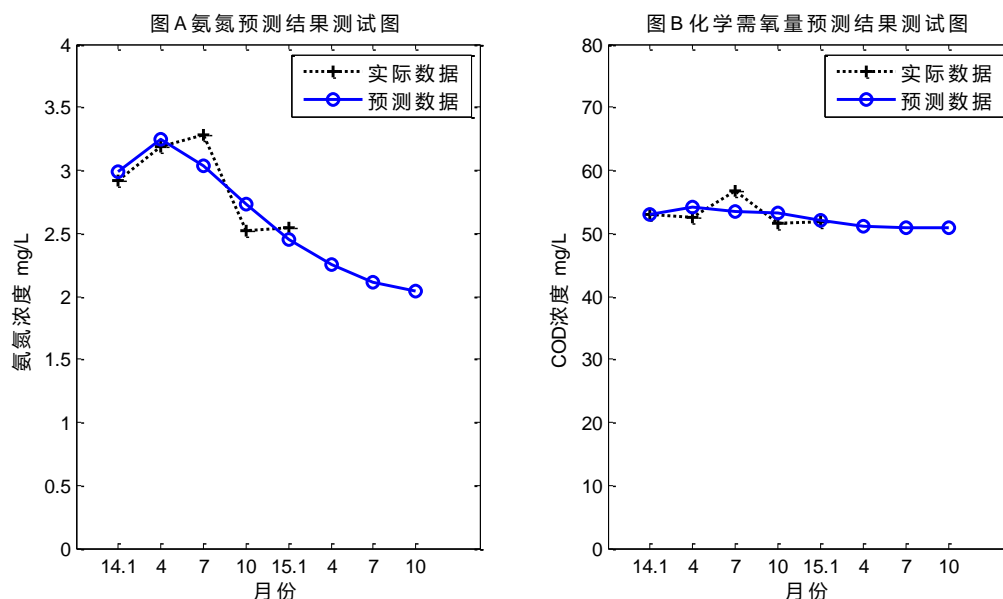


图 5-11 溶解氧和化学需氧量预测结果与实际数据对比图

表 5-26 2015 年 1 月溶解氧和化学需氧量使用 GM(1, 1) 与神经网络结果对比

预测方法 项目	$GM_1(1,1)$	$GM_2(1,1)$	$GM_3(1,1)$	灰色神经网络
溶解氧实际值	2.546	2.546	2.546	2.546
溶解氧预测值	2.9407	2.7274	2.4099	2.450
误差	15.4878%	7.1148%	-5.3579%	3.77%
化学需氧量实际值	51.92	51.92	51.92	51.92
化学需氧量预测值	53.3545	53.3835	52.6490	52.028
误差	2.7637%	2.8196%	1.4049%	0.21%

将 GM(1, 1) 模型预测结果与灰色神经网络预测结果进行比对发现，灰色神经网络对化学需氧量的预测结果误差在 0.21% 左右，比 GM(1, 1) 模型单独预测结果 2.7637%，2.8196% 和 1.4049% 精确。灰色神经网络对溶解氧的预测结果误差在 3.77% 左右，比 GM(1, 1) 模型单独预测结果 15.4878%，7.1148%，-5.3579% 精确。故认为灰色神经网络结果满足精度需求。

5.5.2.4 波动型指标预测的分析

波动型指标在月份之间具有较大差异，整体数据成波动状态，无法满足灰色预测的差异性条件。但这类指标具有较为显著的周期性特点，即：虽然指标数据在年份之内具有较大波动，但在不同年份之间指标具有相同的变化趋势。故在建模的过程中，本文分别对其月份数据和年平均数据进行分析，借助函数曲线拟合其发展趋势。

1) 氨氮指标预测：

对氨氮已知 17 个月份的数据进行三次样条插值，绘制图 5-12 所示。

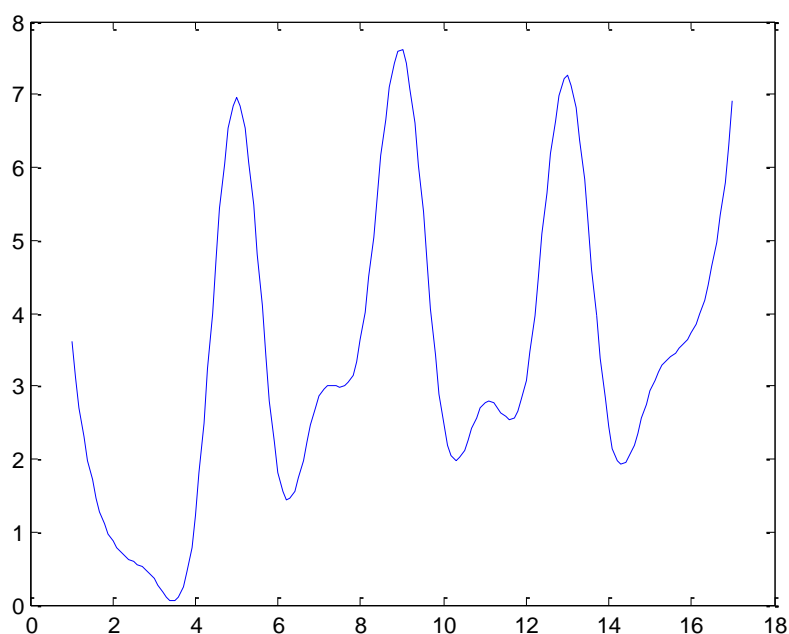


图 5-12 氨氮数据三次样条插值结果图

可发现其 17 个月份的数值变化情况呈现出明显的周期性，变化周期大约为一年。且其在一年范围内呈现出明显的规律性：1 月份数值处于全年最高点，4 月份数值相比于 1 月份急速下降，7、10 月份又有所回升。而 4 个年份中 1、4、7、10 月份的比例大致相同。

分别计算各个每年各个月份数据占所在年份平均数据的比例，再进行平均处理后，得到结果如下。

表 5-27 氨氮各月份数据量与其所在年份平均数据的比例

月份	1 月	4 月	7 月	10 月
比例	1.805	0.565	0.720	0.878

再对 2011-2014 年度氨氮数据进行拟合，得到图像如图 5-13 所示。其表达式为：

$$y = 3.717e^{0.0238t} - 66.54e^{-3.371t}$$

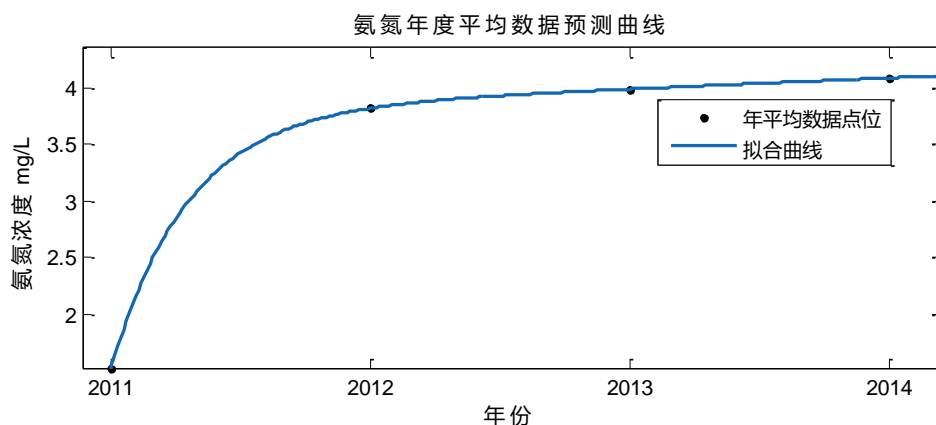


图 5-13 氨氮年度平均数据预测曲线

指数拟合曲线整体呈现上升状态，且上升幅度不断减小，对于年度数据指标有着良好的拟合效果，认为能够反应氨氮指标的年度变化情况。故本文对氨氮年度指标进行预测，根据年度平均数据与数据比例，预测 2015 年 4、7、10 月份的指标数值情况。

在上式中令 $t=5$ ，可解得 2015 年氨氮年度平均数据约为 4.187。

由此推测 2015 年氨氮指标于 1、4、7、10 月份的数据分别为 7.557、2.366、3.014、3.676。将 2015 年 1 月份预测数据与实际数据进行比对，发现误差约为 9.40%，认为预测满足精度。

2) 大肠菌群总数预测：

官方给出大肠杆菌在 2013 年 1、4、7、10 月份，2014 年 4、7、10 月份与 2015 年 1 月份的数据，如表 5-28 所示。

表 5-28 大肠杆菌原始数据 (* 10^6 个/L)

时间	2013.1	2013.4	2013.7	2013.10	2014.4	2014.7	2014.10	2015.1
数值	7.84	3.0585	2.449	3.0025	3.0446	2.4643	3.0179	7.8571

通过观察可发现大肠菌群总数的变化呈现出明显的规律：在 1 月份数值较高，4、7、10 月份数值明显降低，且相对稳定，其中 7 月份数值最低。而在不同年份的相同月份处，数据相差极小，不超过 10^{-1} 。不妨取 2013 年 1 月份与 2015 年一月份数据平均值作为 2014 年 1 月份数据，对大肠菌群总数在 9 个月份的数据进行三次样条插值，绘制图形如图 5-14 所示。

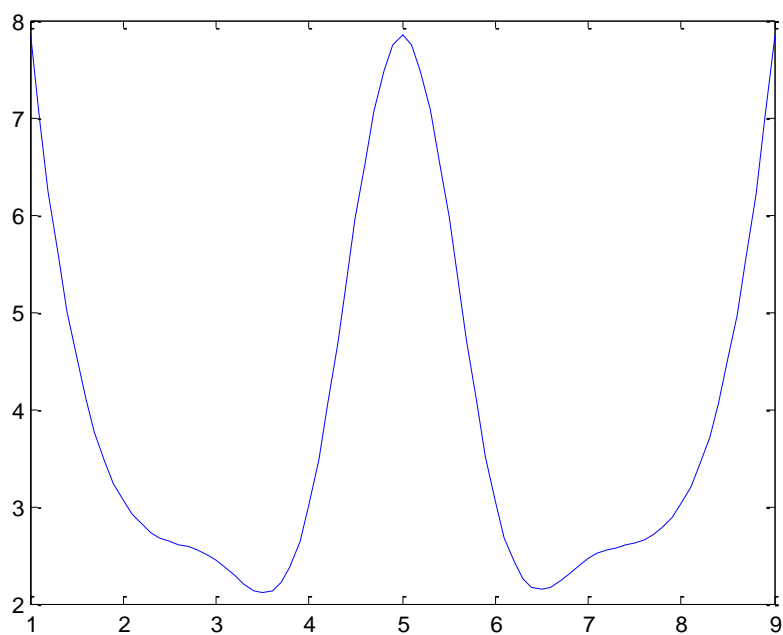


图 5-14 大肠菌群数据三次样条插值结果图

通过观察可发现大肠菌群总数的变化呈现出明显的规律：在 1 月份数值较高，4、7、10 月份数值明显降低，且相对稳定，其中 7 月份数值最低。而在不同年份的相同月份处，数据相差极小。

分别计算各个每年各个月份数据占所在年份平均数据的比例，再进行平均处理后，得到结果如下表所示。

表 5-29 大肠菌群各月份数据量与其所在年份平均数据的比例

月份	1 月	4 月	7 月	10 月
比例	1.917	0.746	0.600	0.736

计算的大肠菌群总数于 2013 年度和 2014 年度的平均数据分别为 4.088、4.094，数据相差不超过 10^{-2} 。按照其略微增加的趋势，不妨以 4.10 作为 2015 年的年度平均数据。

根据各月数据比例，预测 2015 年度 1、4、7、10 月份数据分别为 7.862、3.058、2.462、3.017。其中 2015 年 1 月份数据的预测值与实际值误差小于 10^{-3} ，认为预测准确。

5.5.2.5 水质综合影响指数的预测

至此，本文对与水质综合影响指数相关的四个指标分别进行了预测，其预测结果如下。

表 5-30 与水质综合指数相关 4 个指标预测结果

时间 指标	2015. 1	2015. 4	2015. 7	2015. 10
溶解氧 (mg/L)	2. 450	2. 246	2. 116	2. 041
氨氮 (mg/L)	7. 557	2. 366	3. 014	3. 676
COD (mg/L)	52. 028	51. 136	50. 973	50. 965
大肠菌群总数 (*10 ⁶ 个/L)	7. 862	3. 058	2. 462	3. 017

结合水质综合影响指数的权重，不难确定水质综合影响指数在 2015 年度 1、4、7、10 月的预测值。将 2015 年度 1 月的预测值与实际值进行比较，发现其预测误差按指标顺序分别为 3. 77%，9. 4%，0. 21%，0. 1%。除氨氮外其他数据预测误差极小，考虑到氨氮具有明显的季节波动性，认为预测的整体结果满足预测精度。

5. 5. 2. 6 水环境质量的控制改善

根据最迫切问题的提出，本文将针对水环境质量的改善提出管理对策和建议，并对调控的有效性做简要分析评价。

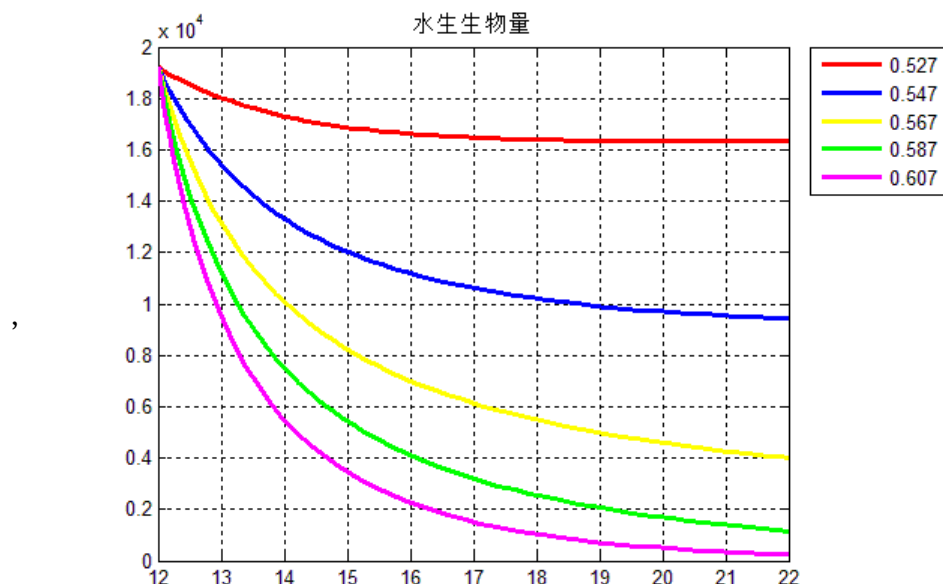


图 5-15 不同水质指数下的水生生物量随时间变化情况

水生动物在本文中是水环境质量影响陆生系统的唯一途径，因此将根据水生动物数量的变化情况，判断水质治理的有效性。对 2013. 4 月上旬到 2013. 9 月上旬的水质评价结果，与对应时间下的水生生物量建立关联，做图 5-15。如图，2013 年四月上旬的水质综合

指数数据结果为 0.527, 模拟未来五个月内的水生生物量情况, 再多次模拟水质情况同一时刻水质情况恶化后的生物量情况发现, 当水质恶化, 综合指数值为 0.607 是水生生物将面临着在未来一段时间内灭亡的危险。以上结果说明了水环境质量的改善会对对生态系统的持续性产生正影响, 即说明了水环境质量的可行性, 有效性, 和其改善对水生动物生物量影响的大体趋势。在确定了水环境质量改善的有效性后, 下文将针对目前水环境质量恶化的情况, 提出管理意见。

福田保护区位于城市之中, 受人类活动影响大, 使环绕在钢铁森林里的保护区受到越来越严重的有机物污染, 超出水质的自我净化能力。从 2010-2013 年保护区水质监测结果分析, 重金属砷、铬、镉、铅、镍含量符合地表水 I 类水质标准, 表明重金属污染得到控制。但水域的溶解氧、氨氮、可溶性磷、BOD 指标数值呈现逐年上升趋势, 表明富营养化程度和有机污染加重。凤塘河口和沙嘴码头位于排污点下游, BOD 等有机污染指标和溶解氧指标明显高于其他监测点位。本文将以凤塘河口为代表作为主要治理对象, 其他排污点仿照凤塘河口的整治措施。目前凤塘河口的水质现状是水体受海水顶托影响, 河道出口段水流速度较小, 造成河水中泥沙和污染物沉积, 长期的厌氧环境, 促使发酵, 导致河水变黑发愁, 污染严重^[27]。因此, 减少污染物排放量和增加水体交换能力是削弱排污点影响的主要途径。为减少污染物对下游保护区的影响, 采取以下两点措施:

1) 对凤塘河口, 沙嘴码头等污水流入出提前进行截污, 将污水拦截并抽入市政水管网, 去除污染源。

2) 借助潮汐动力增强保护区水体和海水的交换能力, 减弱上游污染物排放影响。

3) 河道清淤, 控制河道出口段水流速度, 避免河口泥沙和污染物的沉积。

针对以上措施进行改善, 从水质恶化原因出发改变水质恶化的局面, 对湿地生态系统的恢复和稳定持续的发展有深远的影响。

VI 模型评价与推广

6.1 模型评价

福田红树林生态系统的模型涉及生态系统的时空演变规律以及生物、非生物因素对水生、陆生生态的影响和反馈机制, 并需要预测系统动态变化再根据变化给出调整策略, 是一个复杂的系统, 本文采用的基于信息反馈的系统动力学模型是目前能相对比较全面的涵盖这些方面的为数不多的模型。

福田红树林生态系统是一个自然-经济-社会复合的生态系统, 其评价指标涉及多学

科多领域^[13]。本文选择 PSR 模型对该生态系统进行整体评价，通过压力 - 状态 - 响应三个子系统的划分，能够提供有效指标分类方案；该模型的因果关系能加深社会对生态系统内问题的产生、现状、趋势的认识，有利于生态系统的管理和优化；易于调整，数据定时更新能够实现动态评价，并观察生态系统健康状况随时间变化情况。

在生态系统健康评价过程中，确定各评价指标的权值是不可避免的。熵权法、离差最大化法、变异系数法、均方差决策法、因子分析法及灰色关联度法是 6 种常用客观赋权方法。考虑到其客观性和适应性，本文选择熵权法确定权值。相对于主观赋值的方法，熵权法对指标差异的敏感性最强，其精度更高，客观性更强，可以更好的解释所得的结果。并且熵权法可以应用于任何需要确定权重的过程，其广泛适用性也保证了本模型的正确性。

在水质的综合评价过程中，通过聚类寻找各指标之间的关系，分析相关系数找到最有代表性的指标并根据其所能提供信息量的大小确定指标间重要程度。这样最大程度地保证了原始数据提供的信息量，在简化模型的同时保证模型的客观真实性。采用动态加权综合评价法，针对多因素多属性的指标既能包含“质差”又能包含“量差”，即考虑到各因素各属性的“差异”的影响和作用，也充分考虑各属性的“广泛性”与“民主性”，使得评价结果科学合理。

但是该模型也存在一些问题，主要问题是：

1. 缺乏长期的监测资料，从而使模拟和验证数据缺乏，影响模型的预测精度；
2. 微分方程组未考虑到捕食者对食饵的功能性反映。用更一般的语言描述：食饵数量越大，每个捕食者在单位时间内吃掉的食饵就越多，这在一定程度上是合理的，但是同时应该考虑到捕食者总有吃饱的时候。因此，在本文的微分方程中，假定功能性反映与食饵数量成正比，意味着忽略了消化饱和因素，所以不能很好地跟实际情况吻合。同时没有考虑时间的滞后性，即在能量流动方面，食物在消费者体内不会立即转换为能量；
3. 在考虑鸟类生物的数量变化情况时，未对其在短时间内的迁入、迁出进行瞬时性分析，导致参数修改后的生物量与实际生物量存在偏差。在后续分析中可以考虑加入脉冲微分方程对鸟类迁入迁出做瞬时性分析；
4. 建模过程中存在不确定性因素的分析 and 处理不够，不确定性因素主要方面如图 6-1 所示。

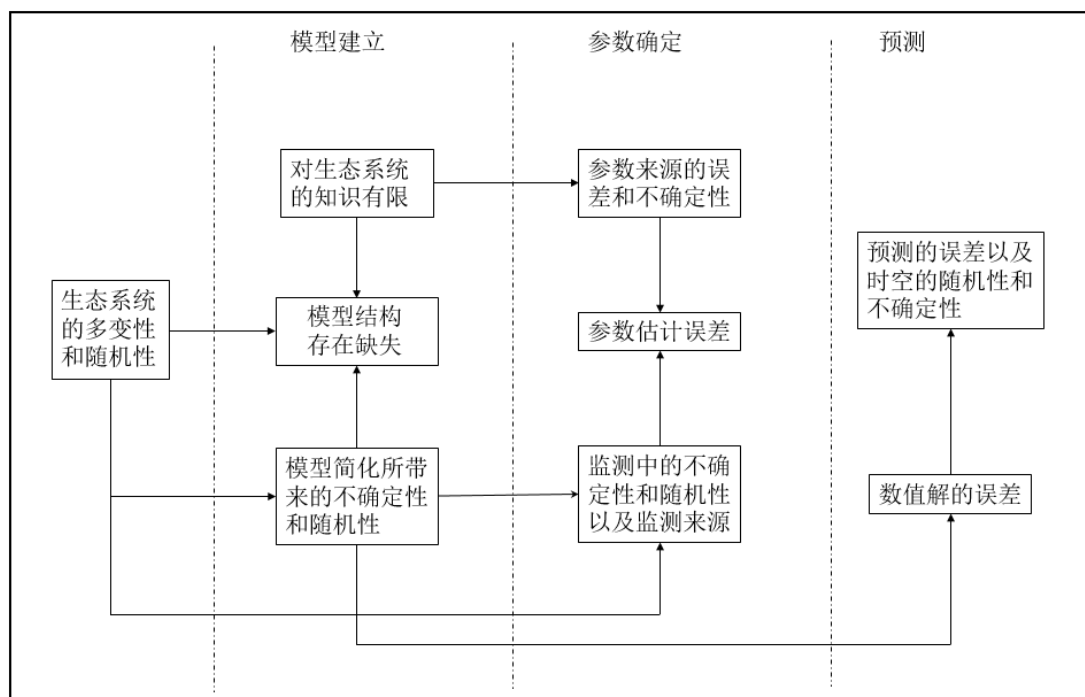


图 6-1 系统动力学模型不确定性因素分析图

6.2 模型推广

本文由以下几个子模型组成：1. 基于微分方程组的系统动力学模型；2. 基于 PSR 的生态系统健康评价模型；3. 生态系统监测方案；4. 生态系统种群微分方程模型；5. 灰色神经网络水质预测模型；该模型可以比较全面地完成对复杂系统的动态监测、健康评价、数量预测等，可以进行如下推广：

对其他生态系统建模提供思路及方向，例如湖泊生态系统、海洋生态系统的模型构建、健康评价、发展预测等。

对于多因素多指标的复杂系统的综合评价，尤其是涉及社会、经济、资源和环境四大系统之间协调的综合案例，例如城市规划环境影响评价、国家可持续发展状况评价等。

对于多种因素相互影响、相互制约、共同发展的复杂系统的发展预测，例如研究药品及其代谢物在机体内的吸收分布、代谢和排泄的过程的定量规律等。

对于多指标影响的质量综合评价问题的解决，尤其是具有统一标准的多指标评价问题，例如股票业绩评价、安全风险评价等。

VII 参考文献

- [1] 李益敏、李卓卿, 国内外湿地研究进展与展望, 云南地理环境研究, 第 25 卷第 1 期, 2013. 2
- [2] 郭菊兰、朱耀军等, 红树林湿地健康评价指标体系, 湿地科学与管理, 第 9 卷第 1 期, 2013. 3
- [3] 刘莉娜、陈里娥等, 深圳福田红树林自然保护区的生态问题及修复对策研究, 海洋技术, 第 32 卷第 2 期, 2013. 6
- [4] 司守奎、孙玺菁, 数学建模算法与应用, 国防工业出版社, 2014. 9:193-207
- [5] 国家环境保护总局、国家质量监督检验检疫总局, 地表水环境质量标准 (GB3838-2002) , http://wenku.baidu.com/link?url=CyGdyf7r-60qy_Ya5SvTEy0YE-0WsTCVmHzSBenv5CfINzIYM415VmmXZHy7Nf21mLkeDABu58dMj_sz0sFSvLIbvQzZ0YSfVTorBwd1RLC, 2002. 4
- [6] 韩中庚, 数学建模方法及其应用, 高等教育出版社, 2009. 6:171 - 182
- [7] 李姓莉、沈虎兰等, Logistic 和 Lokta-Volterra 模型参数的灰色估计方法研究, 大学数学, 第 20 卷第 6 期, 2004. 12
- [8] 陈兰荪, 脉冲微分方程理论及其应用, 科学出版社, 2011. 6:165-168
- [9] 马知恩, 种群生态学的数学建模与研究, 安徽教育出版社, 1996. 6:41 - 73
- [10] Tett P, Gowen R, Painting S, et al. Framework for understanding marine ecosystem health[J]. Marine Ecology Progress Series, 2013. 494:1-27.
- [11] 孙龙启, 广西近海生态系统健康评价, 厦门大学硕士学位论文, 2014
- [12] 袁兴中、陆健健, 生态系统健康评价-概念构架与指标选择[J], 应用生态学报, 2001. 12
- [13] 姜峰, 兴化湾海湾生态系统健康评价研究[D], 厦门大学硕士学位论文, 2012
- [14] 陆琴燕、刘永等, 外来植物入侵红树林生态系统风险评估体系的构建及应用, 广东农业科学, 2013. 10:171-175
- [15] 崔廷伟、张杰等, 赤潮光谱特征及其形成机制[J], 光谱学与光谱分析, 2006. 2(65): 884-886
- [16] 国家海洋局第三海洋研究所. 中国海岛生态系统评价方法专题研究报告[R], 2010.
- [17] 孙磊, 胶州湾海岸带生态系统健康评价与预测研究[D], 中国海洋大学博士学位论文, 2008

- [18] 中华人民共和国建设部科技司, 中国宜居城市评价标准, http://wenku.baidu.com/link?url=lgVYUCVeA6vF_aYR8Th5wEYq8NQzGwaeKApMVbaYcqA59Pb2Xq9hsuw0imNLPvZ_nGsWz4Ic0Ta7a_cA5qHt_Hr6fiwQ3l5lukmFkqbN3QW, 2007.4
- [19] 国家环境保护局, 城市区域环境噪声标准 (GB3096-93), http://wenku.baidu.com/link?url=-Nb25yFqrFK30bE64_0msTg4k5Ft6DYzRV2U5ISFaAq16LRDBv4Ez59kMP8q38zdDcLATIhYLzvhSpR8N9ds0_cfNjDX1E80x-KMUU8Fks3, 1993
- [20] 国家海洋局, 近岸海洋生态健康评价指南, 中华人民共和国国家标准 HY/T087-2005[S], 2005
- [21] 颜利、王金坑等, 基于 PSR 框架模型的东溪流域生态系统健康评价[J], 资源科学, 2008, 30(1): 107-113.
- [22] 国家环境保护部, 国家环境保护模范城市考核指标及其实施细则, <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201101/W020110125328042389677.pdf>, 2011
- [23] 梁铭忠, 深圳福田红树植物海桑种群生态学研究, 广西师范大学硕士学位论文, 2006
- [24] 咎启杰、王勇军等, 2003-首届中国可持续消费与生产国际论坛暨中国环境科学学会 2003 年学术年会会议论文, 2003
- [25] 深圳市气象台, 2015 卷深圳年鉴, <http://www.szmb.gov.cn/article/XinXiGongKai/TongJiShuJu/ZhuanXiangTongJiBaoGao/2015/05/07/554ad28a60533.html>, 2015.5
- [26] 胡玉琢, 改进型灰色神经网络模型在水质预测中的应用, 重庆大学硕士学位论文, 2008
- [27] 王建平, 凤塘河口实地调查与生态恢复对策研究, 中山大学硕士学位论文, 2008

附录：

1、PSR 模型对生态系统综合评价过程中外来物种入侵求解结果

指标	参数	评价标准	分值	赋值
引入途径	有意引入	人为有意引入的可能很小	1	4
		有可能通过人为有意引入	2	
		有已证实的有意引入行为	4	
	无意引入	不易被人为无意引入	1	2
		有可能通过人类媒介无意引入	2	
		与人类活动关系密切。有已证实的无意引入	4	
引入规模	引入数量	基本没有实际意义的数量引入	0	2
		一次性引入，每次引入的数量很小	1	
		有限次数的引入，但一次引入数量较少	2	
		可能多次引入，且一次引入数量较大	3	
	引入次数	引入频数和几率为零	0	2
		引入频数和几率低	1	
		引入频次和几率较大	2	
		引入频次和几率非常大。十分频繁	3	
引入管理	法规控制管理	有相关规定和要求已引起重视和关注或正在进行官方防治	0	0
		无相关规定和要求但已引起重视和关注或正在进行官方防治	1	
		缺乏相关的规定，亦尚未引起重视和关注	2	
	检疫控制管理	已列入现行检疫控制对象，有较为完备的控制程序或措施。可以很好地预防其传入	0	0
		已列为检疫控制对象，现行的管理手段可能将其截获	1	
		尚未列入检疫控制对象，但由于当地的关注度，现行的管理手段可能将其截获	1	
		未列入检疫控制对象，在现有外来物种管理手段下可被引入	2	
气候适应	气候适应能力	对当地气候适应性很差	0	1
		对当地气候适应性一般	1	

		对当地气候适应性适宜	2		
抗逆性	生长期 抗逆能力	对逆境的耐受能力较差	0	1	
		对生长过程中的某些逆境具较强的抗性	1		
		对生长过程中的多种逆境具有较强的抗性	2		
	繁殖期 抗逆能力	对逆境的耐受能力较差	0	1	
		对生长过程中的某些逆境具有较强的抗性	1		
对生长过程中的多种逆境具有较强的抗性		2			
适应能力	生长适应能力	物种生长对环境的选择性较低；生长速度快，生长周期短；适应环境能力强，入侵后很快进入生长阶段；遗传适应性强。以上 4 种特征无明显表现	0	1	
		以上 4 种特征明显表现出 1，2 种	1		
		以上 4 种特征明显表现出 3 种以上	2		
	繁殖方式	主要依靠无性方式进行繁殖	1	1	
		主要通过有性种子方式进行繁殖	1		
		兼营有性繁殖和无性繁殖	2		
	有性繁殖能力	几乎没有有性繁殖	0	2	
		1 年 1 次有性繁殖	1		
		1 年可多次有性繁殖	2		
	无性繁殖能力	几乎没有无性繁殖能力	0	0	
		无性繁殖仅能用于维持一般的种	1		
		无性繁殖可导致种群的快速增长	2		
	环境因子	水分条件	不适宜	0	2
			适宜	2	
		土壤盐度条件	不适宜	0	0
适宜			2		
土壤营养条件		不适宜	0	2	
		适宜	2		
扩散方式	扩散方式多样性	风媒传播、水流传播、人类运输媒介传播以及自身扩散。4 种传播扩散方式具有 1 种以上	1	1	

		4 种传播扩散方式具有 2 种以上	2	
		4 种传播扩散方式具有 3 种以上	3	
	扩散距离	较短. 只在生长区域附近扩散	0	0
		较长, 可在生长区域周边的生态系统扩散	1	
		很远, 可以跨区域扩散	2	
生长速度	扩散速度	扩散到定殖成功的时间很短, 一般半年以内完成	2	1
		时间中等, 一般半年到 1 年完成	1	
		时间较长, 一般 1 年以上完成	0	
	生长速度	从幼体发育成熟为成体的速度快, 远快于同生态位的本地种	2	2
		从幼体发育成熟为成体的速度适中, 和同生态位的本地种相当	1	
		从幼体发育成熟为成体的速度慢, 慢于同生态位的本地种	0	
	扩散面积	占据的区域面积较小, 仅在个别行政区有分布或总体面积小于 5 000 m ²	0	1
		在 2 个或以上行政区内有分布。总体面积不小于 5 000 m ² 的区域面积	1	
		广泛的分布, 至少满足以下一项分布标准: (1) 总体累计占据区域面积至少达到 30 000 m ² ; (2) 至少在 4 个或以上的行政区有分布, 每个区至少达到 1 000 m ² ; (3) 至少在 4 个或以上的行政区有分布, 且每个区内至少有一处覆盖了当地的局部生态群落; (4) 至少在 4 个或以上的行政区有分布。每个区至少达到 1 000 m ² 或至少有一处覆盖了当地的局部生态群落。	2	
扩散现状	扩散程度	离散的个体分布	0	1
		从生分布。或偶见的高密度片区	1	
		主要以成片的大面积出现。且混杂有其他入侵危害物种	2	
	不良影响区比	发生负面影响的区域占总体分布面积的比例小于 5%	1	1

	例	发生负面影响的区域占总体分布面积的比例 5%— 20%	2	
		发生负面影响的区域占总体分布面积的比例 20%— 50%	3	
		发生负面影响的区域占总体分布面积的比例大于 50%	4	
扩散趋势	同生态位竞争物种	本地区有同生态位竞争的物种, 竞争优势大于外来种	0	2
		本地区有同生态位竞争的物种, 竞争优势和外来种相当	1	
		本地区有同生态位竞争的物种, 竞争优势小于外来种	2	
	空余扩散空间	本地区其适宜的生境或可能扩散的区域面积较小	1	2
		本地区存在一些适宜其入侵或与已入侵区域类似的生境未予入侵	2	
		本地区仍有较大面积的适宜其入侵或与已入侵区域类似的生境未予入侵	3	
控制机制	天敌状况	本地区存在有效的天敌	0	0
		本地区存在天敌, 但作用效果不明显	1	
		本地区没有有效的天敌	2	
	控制管理状况	已采取有效的控制管理措施, 效果明显	0	0
		已采取控制管理措施, 但作用效果不明显	1.5	
		没有采取控制管理措施	3	
生态危害	对本地种的危害	不会造成威胁或威胁不明显	0	1
		有一定威胁, 但影响不大	1	
		可造成威胁(如危害特有或珍稀物种的栖息场所、影响本地物种的生长, 造成其退化, 甚至消失)	2	
	对生态系统过程的影响	对生态系统过程基本没有影响	0	1
		略微表现出影响, 其作用可察觉, 但较缓和或不很明显	1	
		显著地表现出影响, 且可能造成不可逆地改变和破坏	2	

	对环境的影响	对生态系统因子没有影响	0	1
		略微表现出影响，其作用可察觉，但较缓和或不很明显	1	
		显著地表现出影响，且可能造成不可逆地改变和破坏	2	
	对生物多样性的影响	不会造成威胁或威胁不明显	0	0
		有一定威胁。但影响不大	1	
		可造成威胁	2	
社会危害	社会生产影响	对周边社会生产方式产生有利影响，提高了社会生产率	0	1
		对周边社会生产方式和生产效率无太大影响	1	
		对周边社会生产方式产生不利影响，降低了社会生产率	3	
	社会生活影响	对周边社会生活产生有利影响	0	1
		对周边社会生活无太大影响	1	
		对周边社会生活产生不利影响	3	
经济危害	农林渔业影响	基本无影响	0	0
		至少对 1 种农作物、树种、水产品造成影响，危害面积不大	1	
		可对多种农作物、树种、水产品造成影响，危害面积较大	2	
	交通运输影响	基本无影响	0	0
		可对港口河道航运造成影响，但影响较小	1	
		可对港口河道航运造成严重影响（如大面积侵占海域滩，或造成潜在的航道淤积作用）	2	
	资源利用影响	对资源利用基本没有影响	0	0
		有利于资源更好利用	1	
		阻碍资源的利用	2	
	旅游产业影响	基本无影响	0	0
		对旅游景观资源造成一定影响	1	
		对旅游景观资源造成显著影响	2	
健康危害	动植物健康危害	不是病虫害的寄主或不能为病虫害滋生提供环境	0	2

	害	是病虫害的寄主或可为病虫害滋生提供环境	2	
	人类健康危害	无明显影响	0	0
		至少可表现出一种影响	2	
		可造成一个或多个显著影响，危害人群健康	4	
防治管理	防治方法与效果	清除方式简便，技术成熟，可长期根除入侵物种	0	0
		清除方式有效，短期内防止效果好，但容易反复	1	
		只在小面积区域或物种生活史的某一阶段效果好或短期内防止效果一般，容易反复	2	
		尚无有效的防治方法	3	
	防治副作用	对当地生物群落或本土物种基本无负面作用	0	0
		有效地防除方式对当地的生物群落或本土物种造成一定影响	1	
		有效地防除方式会造成对当地的生物群落或本土物种造成严重影响	2	
	防治成本	防止快捷，成本低	0	0.5
		需短期人力与资金投入，将其控制或放置到为害水平以下的时间少于一年	0.5	
		需短期大量的人力与资金的投入，将其控制或放置到为害水平以下的时间少于5年	1	
		需长期大量的人力与资金的投入，将其控制或放置到为害水平以下的时间少于5年或更多	1.5	
		造成的危害与不利影响是不可逆的，无法恢复	2	
总计			100	39.5