

# 昆虫种群动态模拟模型

句荣辉, 沈佐锐\*

(中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094)

**摘要:** 昆虫是动物界中最大的类群, 与人类有着密切的利害关系。对昆虫的数量预测与符合经济和生态规律的管理, 一直都被国内外列入重点研究课题。种群动态模拟是害虫管理中重要的基础工作。近十年来, 关于昆虫种群动态模型的理论 and 实验研究进展迅速。现分别从单种种群和多种种群两个方面对国内外近些年来昆虫种群动态模拟模型的研究进展进行了概括和总结。单种种群从两个方面阐述: 一是最基本的种群动态模拟模型 Logistic 方程的研究成果, 包括方程的修正、参数的拟合与最优捕获策略等; 另一个方面是对种群动态模拟常用的矩阵模型的概述, 主要介绍不等期年龄组、矩阵维数的变化、矩阵维数与历期的关系、个体之间的发育差异以及发育速率差异等等对昆虫种群动态模型的影响。多种群主要从建模和模型应用两个部分对国内外研究成果进行综述。最后, 对种群动态模拟模型研究的发展方向做了深入地讨论, 即在原有的数据采集工作的基础上, 使用面向对象程序设计语言, 把各种要素包括各种物种及各种环境条件抽象成类, 用消息传递来表示昆虫种群内个体与个体、昆虫种群与环境之间的相互作用, 再结合先进的数学算法, 建立一个直观的、操作简单的昆虫种群动态模型库, 使模型结构与现实世界有最大的相似性。这样就可以实现昆虫种群动态的可视化、立体化、实时化和精确化的监测及预测。

**关键词:** 昆虫; 种群动态; 模型

文章编号: 1000-0933(2005)10-2709-08 中图分类号: Q141, Q145, Q96, Q968 文献标识码: A

## Review on insect population dynamics simulation models

JU Rong-Hui, SHEN Zuo-Rui (College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2709~2716.

**Abstract:** Insects, the largest group of animals in the world, are closely related with human beings. Quantitative forecasting of insect population dynamics and rational management of insect populations, based on economic and ecologic laws, are always ranked highly in scientific and technological researches. Simulation of insect dynamics is the prerequisite base of pest management. In the last ten years, both theoretical and experimental researches on simulation models of insect population dynamics have been progressing very rapidly either in China or overseas. The paper just makes efforts to review these researches from two regards, single species and multiple species. For the first regard, two aspects are reviewed. One is on the so-called Logistic equation, which is the simplest model to simulate insect population dynamics. The research on Logistic equation focuses mainly on modification of the basic equation under new conditions, parameter fitting to experimental data, the optimal strategies for harvesting insects by the Logistic law, and so on. Another aspect is on matrix models, which are frequently used to simulate insect population dynamics. Studies on matrix models focus on the influence of some problems on insects population dynamics. The problems mainly include the optimal dimension of matrix, relationship between the dimension and the development period of insects, differences in individual growth, differences in the development rates, and so on. For the second regard, also two aspects are reviewed, on modeling of population dynamics for multiple species and on application of the models. Finally, the future direction of researches on simulation of insect population dynamics is discussed in detail. That

**基金项目:** 国家“十五”攻关资助项目(2001BA50PB01)

**收稿日期:** 2004-05-12; **修订日期:** 2005-02-18

**作者简介:** 句荣辉(1978~), 黑龙江省肇东市人, 女, 博士生, 主要从事昆虫种群动态模型研究。E-mail: juronghui119@sohu.com

\* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: ipmist@cau.edu.cn.

**Foundation item:** the National Advanced Project of the tenth five-year Plan(No. 2001BA50PB01)

**Received date:** 2004-05-12; **Accepted date:** 2005-02-18

**Biography:** JU Rong-Hui, Ph. D. candidate, mainly engaged in constructing insect population dynamics simulation models. E-mail: juronghui119@sohu.com

is, automatic logging of experimental data should be realized to replace artificial data collection to large extent. Then the data can be used to build a database of insect population dynamics for the development of simulation models toward their visual and convenient operations. This modeling database can be developed by visual programming language, in addition to advanced algorithms. All kinds of elements such as divers species and various environmental conditions can be abstracted as "classes". And relations between individuals within an insect population and between insect population and the environment can be expressed by the message delivering. The model database can make the monitoring and forecasting of insect population dynamics be visual, more simple and precise.

**Key words:** insect; population dynamics; models

昆虫是动物界中最大的类群,任何环境均有昆虫存在,并有其独特的行为生态特性,与人类有密切的利害关系,对昆虫的数量预测与符合经济及生态规律的管理,一直被国内外列为重点研究课题。昆虫的种群动态是昆虫种群生态学的研究核心。种群动态概括地可以分为数量、时间、空间 3 个结构,生态上的空间系具有实质结构的场所。它包括着当时的生物因素与非生物因素的作用,生物的丰富度和栖境的多样性与稳定性等对种群的作用总和。目前,国内外已对害虫的生物学,包括个体生态学、发生与季节性消失、为害损失迁飞行为与机制、种群生态学,以及预测、生物防治、化学防治及抗药性等方面进行了研究。人们应用模拟模型加深了对害虫种群生命系统理解,并改进了对害虫种群的管理和具体防治措施。近些年来,关于昆虫种群动态模拟模型的研究发展迅速,从理论模型的建立、模型参数估计、稳定性讨论、实验验证,到作用机理的研究都有长足的进展。本文试图从单种种群和多种种群两个方面对近些年来有关昆虫种群动态模拟模型的理论 and 实验的研究进展进行了概括性地总结,同时,对今后昆虫种群动态模拟模型研究的发展方向进行了深入讨论。

## 1 国内外单种种群作用系统动态模拟模型的研究现状

单种种群是指同一物种的个体占据一定空间而有机组合的群体。单种种群系统亦称种群的生命系统,它包括下列结构特征:①种群生长型(亦称种群的时间分布);②种群结构和种群过程的生物学特征,如:生命表参数;③种群密度;④种群的扩散与迁移;⑤种群在空间的平面分布与垂直分布;⑥各种综合性理化因素对种群的作用<sup>[1]</sup>。

### 1.1 国内外 Logistic 模型研究现状

种群生长型的特征一般有两类基本型,即 J 型生长型与 S 型生长型。J 型生长型亦称 Malthus 指数增长模型,是无限空间中种群增长的基本形式。S 型生长型是由 Logistic 方程来模拟的。Logistic 方程是由比利时人 Verhulst 提出,后被 Pearl-Reed 发现,因此称 Verhulst-Pearl 方程<sup>[2]</sup>。Logistic 方程是一个经典的生态学模型,指出了有限空间种群增长的基本规律,已广泛应用于种群生态学研究领域,描述生物种群数量的时空动态关系。近些年对 Logistic 模型的研究主要集中在方程的修正、参数(种群内禀增长率  $r$ , 环境容纳量  $k$ , 积分常数  $a$ )估计、数据拟合与最优捕获策略等方面。

Logistic 方程基于至少 5 种假定,使它能在假定所限制的“理想环境”中对生物种群有较为满意的拟合。而在自然界中,实际条件往往不能满足这五种假定,于是基于 Logistic 方程的修正方程是值得研究的。沈佐锐在这方面做过理论探讨,并用于描述菜蚜种群动态<sup>①</sup>。Logistic 方程的参数估计方法也有很多研究<sup>[4,5]</sup>,但这些方法大多数都是假设 3 个参数相互独立而对 Logistic 方程进行数据拟合分析的。唐启义等人 1996 年指出这些参数估计方法都存在着共同的错误,同时提出了具体的修正方法,即用 Marquardt 方法或单形加速法求参数种群内禀增长率( $r$ )和环境容纳量( $k$ ),然后根据实验初值求积分常数( $a$ ),从而使 Logistic 微分方程的共同参数  $r$  和  $k$  的估计一致<sup>[6,7]</sup>。另外,柏灵等人 2004 年讨论了稳定有界的 Logistic 方程的最优捕获策略的问题,选择单位时间的最大持久收益的极限均值作为管理目标,同时得到了最佳的种群水平,并且以概周期系数的 Logistic 方程为例,表明了该结果不仅推广了经典的关于自治的 Logistic 方程的收获问题,而且推广了关于周期的 Logistic 方程的收获问题的结果<sup>[8]</sup>。

### 1.2 国内外矩阵模型的研究现状

生命表可以对种群过程进行描述与分析。Morris 和 Miller 1954 年发表了云杉卷叶蛾(*Choristoneura fumiferana*)自然种群生命表,并利用生命表技术对种群动态进行了分析。此后,生命表技术被广泛应用于害虫的种群动态研究<sup>[9]</sup>。矩阵模型是模拟生物种群的主要工具之一,生命表用于昆虫种群动态预测的主要手段是为转移矩阵提供矩阵元素。矩阵模型研究进展主要集中在以下几个方面:不等期年龄组、矩阵维数的变化、矩阵维数与历期的关系、个体之间的发育差异以及发育速率的差异对种群动态的影响。

① 沈佐锐. 菜蚜种群时空动态的方法论研究. 北京农业大学研究生院硕士学位论文, 1983

转移矩阵要求划分年龄组的时间间隔(即转移矩阵每转移一步的时间)是一个常数<sup>[10]</sup>,即要求时间间隔与年龄组的间隔一致,这使该模型的应用受到很大的限制。J. H. Vandermeer 1975 年在 Leslie 矩阵模型的基础上建立了不等期年龄组的矩阵模型,该模型尽管扩大了矩阵模型的应用范围,但在推算第 2 个单位时间间距以上的种群时,各虫期虫数将会出现偏差。因此,庞雄飞等人 1980 年提出了以方块矩阵的形式给出模型,改进后就适用于连续推算种群的数量动态。但是庞氏模型要求矩阵的维数是不变的。然而大多数的发育历期和自然死亡率受环境因素的影响较大,环境发生变化发育历期和自然死亡率也会发生变化,而发育状况的改变,也势必引起种群年龄结构和数量发生变化,因此徐汝梅 1981 年提出了变维矩阵模型,该模型较好地解决了变温条件下,模拟种群动态问题。但是该模型的矩阵维数可能大于历期,这在模拟的过程中会出现延时,对此秦宗林等人 1995 年作了改进,使其矩阵维数和发育历期一致,同时将改进后的模型用于模拟谷蠹、玉米象、麦蛾的种群动态,得到了较好的结果<sup>[11]</sup>。同时徐氏模型也没有涉及发育速率对种群动态的影响,Ruesink 提出了描述同年龄级的个体发育速率随温度变化的差分方程<sup>[12]</sup>。但却没有涉及到由于营养条件和遗传因素等引起的发育速率的差异。张文庆等人 1994 年在 Ruesink 模型的基础上,根据昆虫个体一般不同步地进入下一个发育阶段的状况,综合考虑温度、营养条件和遗传因素等引起的发育速率的差异对种群动态的影响,对昆虫种群动态的模拟方法作了改进,并将该方法应用于三化螟种群动态的模拟和预测,经验证,该模型基本能够反映出田间三化螟在不同环境条件下种群的发生规律<sup>[13]</sup>。另外,徐氏模型还没涉及个体之间的发育差异,为此,黄荣华等人 1995 年提出了一种模拟昆虫种群动态的改进的变维矩阵模型,该模型以发育历期为维数,采用分解与合成的方法变维,并考虑了个体间的发育差异。而且该模型不仅考虑了一个虫态到下一个虫态的转变,还考虑了同一虫态在各个年龄组之间的转变,不论维数增加或降低还是维数不变,只要发育历期发生变化,则在变维后,各个年龄组的数量一般均会发生变化,从而使徐氏模型得以进一步发展<sup>[14]</sup>。

## 2 国内外多种种群作用系统模拟模型的研究现状

“害虫-天敌”系统的研究是开展生物防治和害虫管理的理论基础。数学模型量化方法的应用,使得可以通过利用计算机仿真模拟的手段,对生态系统进行多方面系统的研究。对于系统的复杂性,稳定性方面的研究已有相当的深度。在应用方面也取得了一定的成就,比较国内外同类研究工作,侧重点各有不同。国内研究比较侧重于种间关系的模拟工作,如功能反应、数值反应、系统动态模拟等;国外研究则较注重于个体行为特征对种间关系的影响,如搜索效应、攻击行为的选择、逃避攻击(捕食、寄生)、天敌间的干扰行为等。

### 2.1 国内外多种种群作用系统模拟模型在建模方面的研究现状

1994 年,祝增荣等人利用浙江十里丰早稻白背飞虱种群动态调查和文献资料及系统分析技术组建了白背飞虱种群动态模拟模型,经检验证明该模型对早稻种群是有效的,此方法可以用于分析早稻上种群动态的关键因子以加强对种群动态机制的理解<sup>[15]</sup>。Wei Feng 1997 年建立了一个资源与性竞争的混合数学模型,用以分析种群动态。结果表明,强的性竞争和低的出生率会导致生物种群的竞争排斥。如果性竞争弱的话,种群就有可能一直存活,这主要取决于种群的初始密度和种群的增长率<sup>[16]</sup>。同年,王冬生等人通过室内试验和分析,建立了粘虫的发育速率与温度关系模型、发育的时间分布模型、产卵与成虫寿命及温度的关系模型,应用计算机模拟技术,引入同龄组的概念,建立了适合于估测变温条件下粘虫种群动态的计算机模拟模型。运行结果表明,该模型可准确地模拟变温条件下粘虫的发育动态,并应用于田间粘虫预测和粘虫治理辅助决策<sup>[17]</sup>。1998 年,石根生等人根据林间调查和室内观察资料,分析了江西省万年县不同松林中马尾松毛虫不同发生代别低龄幼虫期的重要捕食天敌种类及数量。结果表明低龄幼虫期捕食天敌有 13 科 31 种,其中蜘蛛类最多,其次为蚂蚁类。同时还在室内研究了四种主要捕食天敌对马尾松毛虫低龄幼虫的捕食作用及其功能反应,其结果表明功能反应是 S 型,由此建立了它们的功能反应模型<sup>[18]</sup>。金文等人 1999 年从森林-舞毒蛾-寄生天敌系统的相互作用出发,组建了描述该系统的动力学行为的非线性离散模型。并讨论了模型的平衡态及其稳定性以及舞毒蛾的非线性性动力学行为,分析和模拟的结果与舞毒蛾的动态行为一致,加深了对森林舞毒蛾天敌系统的认识<sup>[19]</sup>。同年,娄永根等人在系统研究水稻品种对稻虱缨小蜂寄主选择行为、功能反应以及生长发育存活繁殖等影响的基础上,结合有关水稻品种-褐飞虱,褐飞虱-稻虱缨小蜂相互关系的文献资料,组建了水稻品种-褐飞虱-稻虱缨小蜂三者相互关系的模拟模型。模型分析表明水稻品种能直接和间接地通过物理或化学特性影响稻虱缨小蜂的寄生作用,其中以影响褐飞虱卵垂直分布型、稻虱缨小蜂的迁入时间、未成熟期历期和怀卵量等的水稻品种特性起主要作用。同时,模拟分析还表明中等抗性的水稻品种,配以增强稻虱缨小蜂寄生作用的品种特性,就能有效地控制褐飞虱的危害。而且还对协调水稻品种抗性与天敌协同控制褐飞虱的途径进行了讨论<sup>[20]</sup>。2001 年,蒋杰贤等人还应用二次正交旋转组合设计,研究了主要捕食性天敌草间小黑蛛、叉角厉蜻和拟水狼蛛捕食斜纹夜蛾低龄幼虫的综合效应,并建立了综合效应模型。对捕食量模型进行分析可以了解各天敌类群之间相互作用和对斜纹夜蛾捕食量的影响程度。结果表明,斜纹夜蛾密度的大小对天敌的总捕食量影响最大。在 3 种天敌中,对总捕食量影响最大的是草间小黑蛛,其次为叉角厉蜻若虫。拟水狼蛛对草间小黑蛛和叉角厉蜻若虫有杀伤作用,相互间干扰作用大,而草间小黑蛛与叉角厉蜻对斜纹夜蛾总捕食量有相互促进的作用<sup>[21]</sup>。同年,张文军等人就此问题于 2001 年根据密度制约性原

理,推导出描述昆虫种群时空动态的非线性偏微分方程模型。该模型由扩散、迁移、出生及死亡等成分组成,建立了模型的差分解法,同时也给出了模型参数的拟合方法<sup>[22]</sup>。另外,高增祥等人也提出了一类描述大尺度作物系统害虫种群时空动态的模型,该模型包含了寄主植物、昆虫密度以及天敌间的相互作用等<sup>[23]</sup>。苏战平等人对数学模型抽象、运算复杂、难于在基层推广的问题,于2002年用澳大利亚热带害虫研究中心开发的通用制模软件 Dymex 为外壳,以棉铃虫种群生命表为基础,构建了生存模型,以温度和光周期为自变量的棉铃虫滞育模型和发育进度模型,并对江苏通州和泗阳两地的第五代棉铃虫动态进行了模拟,减轻了建模的难度,以检索表列出模拟结果,便于基层使用<sup>[24]</sup>。同年,汤进龙等人应用特征根回归法建立了拟水狼蛛(*Pirata subpiraticus*)、食虫瘤胸蛛(*Oedothorax insecticeps*)、棕管巢蛛(*Clubiona japonicola*)和菱头跳蛛(*Bianor hotingchiehi*) 4种蜘蛛与褐飞虱(*Nilaparvata lugens*)共存系统捕食量的特征根回归模型,表明特征根回归法可用于蜘蛛对褐飞虱捕食量的定量分析<sup>[25]</sup>。王向阳等人2003年通过聚类分析,在明确麦田天敌消长演变规律的基础上,采用时间序列分析法,建立麦田总体天敌和优势天敌七星瓢虫的超长期预测模型,经试验,结果表明,季节水平模型、ARIMA模型的预测效果较好,并用这两种模型对未来3a麦田天敌的消长进行了超长期预测<sup>[26]</sup>。

## 2.2 国内外多种种群作用系统模拟模型在模型应用方面的研究现状

1995年,汪信庚等人建立了由数据库、模型库及图形显示系统组成的二化螟种群时间动态预测模拟系统。此系统可进行全省区域内二化螟种群时间动态的模拟测报绘图和种群时间动态影响因子分析。模型有效性检验和灵敏度分析表明,预测的各地一代发生期比较接近田间实际发生期,计算绘出的全省各地发育进度和发生代次能反映出各地理区域的基本发生趋势;地理海拔、早稻收割、耕作制度都将影响种群的时间动态。另外,该系统可以作为植保高级部门宏观决策和各地分析发生期或代次成因时的工具<sup>[27]</sup>。同年,张文庆等人以三化螟种群动态模型和水稻产量损失预测模型为基础,根据水稻插植期、品种抗性、保护利用自然天敌和杀虫剂多次使用等控制措施以及它们的各种不同组合对该虫种群动态、水稻产量损失率和净收益的影响,以净收益最大为目标函数,研究三化螟种群的最优管理决策。该系统模型能够提供包括农药防治、生物防治和化学防治在内的,对三化螟种群实施有效管理的最优决策方案<sup>[28]</sup>。密度制约因素如:种群增长率和种群迁徙,都影响着生态模型的动态变化。温度是非生物、非密度制约因素,但是也是昆虫种群增长的一个重要的决定因素。Zhou X.等人1997年应用两种蚜虫种群的时间序列模型来观察温度和随机噪声对模型动态的影响。结果表明,在大多数情况下,温度升高,种群的密度增大,温度能引起种群动态的复杂变化。从模型中可以看出,如果气候比较温暖,蚜虫的种群会变得更丰富,更不稳定<sup>[29]</sup>。尽管Lokta-Volterra方程已经作为种间资源竞争模型被广泛地应用,但是近缘种中的许多竞争行为既包括资源的竞争又包括交配竞争。最优搜索理论预测消费者行为的突然变化会导致功能反应的不连续性,因此,具有最优搜索行为的种群动态模型可以用不连续的右边微分方程(differential equations with discontinuous right-hand sides)描述。David S. Boukal等人1999年分析了3个不同的具有最优搜索行为的天敌-猎物系统的行为,用可选择的食物检验天敌-猎物模型,用移动的天敌和固定的猎物、天敌和猎物都移动两种情况来检验双路径模型。结果表明,最优躲避行为可以改变Lokta-Volterra系统的内在稳定性<sup>[30]</sup>。种群循环一直困扰着生态学家,同年,Bruce E Kendall等人采用统计模型与机械模型结合的方法阐述了种群循环的内部机制<sup>[31]</sup>。Peter A Abrams在2000年对天敌与猎物之间的相互作用关系的进化做了综述,全面介绍了天敌的进化、猎物的进化与两者协同进化的理论及证据<sup>[32]</sup>。大部分理论种群动态模型是把种群密度作为状态变量,而忽略了种群个体之间的差异,然而个体的差异对种群调节规律是重要的。在天敌与猎物种群的共存系统中,天敌不仅对不同猎物的捕食有其嗜好性,而且对同一猎物的不同虫态也有选择捕食作用<sup>[33,34]</sup>。蒋杰贤等人2001年应用二次回归通用旋转组合设计,研究了叉角厉蝽4龄若虫与斜纹夜蛾低龄幼虫、中龄幼虫和高龄幼虫共存时,天敌对斜纹夜蛾3个龄期幼虫的选择捕食作用。结果表明,在3个年龄等级相同密度的组合下,叉角厉蝽倾向于捕食个体大的中高龄幼虫<sup>[35]</sup>。在人们对天敌-害虫系统进行建模研究其相互作用关系的同时,有很多学者对天敌-害虫系统模型的稳定性及其周期解也进行了大量的研究<sup>[36~38]</sup>。同年,汤进龙等人应用灰色系统理论研究了4种蜘蛛(拟水狼蛛、食虫瘤胸蛛、棕管巢蛛、菱头跳蛛)与褐飞虱共存系统捕食量的数学模型。对此模型的分析可以了解各天敌不同数量或者密度与褐飞虱不同密度组合下对褐飞虱捕食量的影响。应用该模型还可以预测相应时期的捕食量大小,所得预测值与实际值几乎一致。同时利用关联度来分析了对褐飞虱捕食量影响最大的因素以及各蜘蛛与褐飞虱捕食量关联程度的大小<sup>[39]</sup>。Volker Grimm等人2002年提出了基于个体的种群动态模型,并用它来精确地描述了种群内个体的增长、饥饿、资源等动态变化,指出这种基于个体的种群动态模型有助于种群动态的等级管理<sup>[40]</sup>。种群的生存力分析(Population viability analysis,简称PVA)是估计濒危物种种群大小和绝灭风险的一种方法<sup>[41,42]</sup>。它主要是研究随机干扰对小种群绝灭的影响,其目的是制定最小可存活种群,把绝灭减小到可接受的水平。由于生物多样性面临危机,所以该理论一提出来,相关研究便不断增长<sup>[43~46]</sup>。种群资源的合理开发和利用近年来已引起了学者的注意,研究种群的持续发展及对种群的最优捕获等一系列问题已成为热点,许斌等人2004年研究了一类具有功能反应的捕食-被捕食生物模型,用脉冲微分方程来描述脉冲现象种群生态系统中对种群的瞬时捕获,同时还得到了在脉冲控制下其渐进稳定的充分条件<sup>[47]</sup>。

### 3 关于研究深化的讨论

综观国内外研究进展,昆虫种群动态模拟模型尽管在理论与实验等方面都有了长足的发展,但是对模型的拟合方法大部分还停留在以前的平均值、枚举选优法、麦夸方法、四点法等方法上<sup>[48]</sup>,只有蔡煜东等人 1995 年首次将遗传算法用于对 Logistic 曲线的拟合,并取得了很好的效果<sup>[49]</sup>。遗传算法 GA(Genetic Algorithms)是由 J. H. Holland 教授于 1975 年提出的一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化搜索算法。它简单、通用、鲁棒性强、适于并行处理,因此遗传算法已被广泛应用在机器学习、软件技术、图像处理、模式识别、生物学、遗传学和社会学等方面。但是遗传算法本身存在着一些缺点,如:初期的未成熟收敛、后期搜索迟钝,重要参数如  $n$  (群体规模)、 $P_c$ (交叉概率)、 $P_m$ (变异概率)如何选择,交叉和变异算子如何协调工作,局部搜索能力较弱,单一的群体更新方式难以兼顾多样性和收敛性的要求,收敛速度较慢等问题<sup>[50]</sup>,因此该算法对复杂的应用场合效果并不理想。后来也有人将人工神经网络用于昆虫的预测工作<sup>[51-52]</sup>。人工神经网络 ANN(Artificial Neural Networks)是用大量的简单处理单元(神经元)组成的非线性动力学系统,它具有大规模并行、分布式存储与处理、自组织、自学习和高度的容错能力,适于处理需要同时考虑许多因素和条件的、不完整、不精确和模糊的信息处理问题<sup>[53]</sup>。但从总体来说,对曲线拟合的算法的研究还需要进一步加强,目前国际上对数据拟合最前沿的算法是支持向量机 SVM(Support Vector Machines)。支持向量机是 Cortes & Vapnik 1995 年首先提出来的<sup>[54]</sup>,是近年来机器学习研究的一项重大成果。根据 Vapnik & Chervonenkis 的统计学习理论<sup>[55-57]</sup>,如果数据服从某个(固定但未知的)分布,要使机器的实际输出与理想输出之间的偏差尽可能小,则机器应当遵循结构风险最小化原理,而不是经验风险最小化原理,即:就是应当使错误概率的上界最小化。支持向量机正是这一理论的具体实现,而人工神经网络却是基于经验风险最小化的原理。和传统的遗传算法、人工神经网络相比,支持向量机不仅结构简单,而且各种技术性能尤其是泛化性能明显提高<sup>[58]</sup>。同时具有卓越的学习效果,在数据拟合方面,SVM 主要用于函数逼近、时间序列预测和数据压缩等,它不象传统方法如人工神经网络那样对模型的依赖性很强,同时其曲线拟合的效果非常好。因此,如果将 SVM 算法引入昆虫种群动态模型的建立,将会使模型的模拟结果更为精确,从而更有利于对害虫进行管理,对濒临灭亡的物种进行保护。

在研究昆虫种群的动态问题,实际上是研究昆虫及其生存环境组成的昆虫-环境综合体内昆虫与昆虫、昆虫与环境之间的相互作用关系及综合体内部物种之间的相互作用而表现出来的结构、功能和动态变化规律。但是,昆虫种群动态模拟模型建立是要以大量的、可靠的生物与非生物数据为前提,所以前端数据采集直接影响着模型模拟结果的好坏。针对此问题 IPMIST 实验室已于 2003 年将数据采集原理应用到了病虫害的预测预报工作中,并开发出了适合农业病虫害预测的数据采集系统<sup>[59-61]</sup>,为昆虫种群动态模型的建立奠定了基础。

对昆虫种群动态模型的模拟其目的是为了使其模拟结果更为准确、更有效地为生产服务,以减少因病虫害造成的损失,服务于农业。这就要求建模算法不断改进,以及所要考虑影响种群动态因子要不断增加,即:使模型的限定条件不断减少,应用范围进一步扩大,这样就会使昆虫种群动态模型越来越复杂而不利于理解。因此,今后的昆虫种群动态模型的发展应该在原有的数据采集工作的基础上,使用面向对象程序设计语言,把各种要素即各种物种及环境条件抽象成类,用消息传递来表示昆虫种群内昆虫与昆虫、昆虫与环境之间的相互作用,再结合先进的数学算法,建立一个直观的、操作简单的昆虫种群动态模型库,使模型结构与现实世界有最大的相似性。这样就可以实现昆虫种群动态的可视化、立体化、实时化和精确化的监测及预测。从而也可以使基层工作人员以及初学者对昆虫种群动态模型有一个形象的、直观的认识,便于对其进行理解和掌握。

### References:

- [1] Ding Y Q. *Principle and application of insects population mathematics ecology*. Beijing: Science Publishing Company, 1980. 125~130.
- [2] Pearl R and Reed L J. On the rate of growth of the united states since 1790 and its mathematical representation. *Prec. Nat. Acao. Sc.*, 1920, 275~288.
- [3] Shen Z R. Logistic equation revised to describe density dynamics of an Aphid population on Chinese cabbage. *Journal of Beijing Agricultural University*, 1985, 11(3): 297~304.
- [4] Wang Z Z, Lin K X. Two-paried points method for estimating K value of logistic equation. *Acta Ecologica Sinica*, 1987, 7(3): 193~198.
- [5] Ma Z S. Optimization of nonlinear ecological models with the accelerated simplex algorithm. *Journal of Biomathematics*, 1992, 7(2): 160~167.
- [6] Tang Q Y, Hu G W, Feng M G, et al. An error in estimation of the parameters for logistic equation and its correction. *Journal of Biomathematics*, 1996, 11(4): 135~138.
- [7] Tang Q Y, Hu G W, Feng M G, et al. An optimal method of parameters estimation for differential equation in the population dynamic analysis. *Journal of Biomathematics*, 1996, 11(5): 69~75.
- [8] Bai L, Li X Y, Wang K. Optimal harvest policy for stably bounded logistic equation. *Journal of Biomathematics*, 2004, 19(1): 17~25.

- [9] Ding Y Q. *Insects mathematics ecology*. Beijing: Science Publishing Company, 1994. 155~158.
- [10] Xu R M. *Insects population ecology*. Beijing: Beijing Normal University Publishing Company, 1985. 243~247.
- [11] Qin Z L, Li G C. Matrix models of simulating insects population dynamics. *Grain Storage*, 1995, **24**(5~6): 105~114.
- [12] Ruesink W G. Modeling of pest population in the alfalfa weevil. In: Tummala, R. L. *et al* eds. *Modeling for Pest Management*, 1976.
- [13] Zhang W Q, Gu D X, Pu Z L. Improvement in the method for simulating the dynamics of insect population: A study on the dynamic population simulation model of paddy stem borer (*Tryporyza incertulas Walker*). *Acta Ecologica Sinica*, 1994, **14**(3): 281~289.
- [14] Huang R H, Ye Z X. An improved dimension-changeable matrix model of simulation the insect population dynamics. *Entomological Knowledge*, 1995, **32**(3): 162~164.
- [15] Zhu Z R, Cheng J A, Huang C W, *et al*. Simulation analysis of white-backed planthopper population dynamics on first season rice in Zhejiang province. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, **14**(2): 188~195.
- [16] Wei Feng. Competitive exclusion and persistence in models of resource and sexual competition. *J. Math. Biol.*, 1997, **35**: 683~694.
- [17] Wang D S, Wu S C, Yuan Q C. Computer simulation (model) of the development of *Mythimna Separata* population under fluctuating temperatures. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1997, **13**(4): 75~79.
- [18] Shi G S, Li D M. Predators of larvae of *Dendrolimus punctatus* (Walker) and their predation. *Entomological Knowledge*, 1998, **35**(6): 336~340.
- [19] Jin W, Liu L F. Nonlinear model for Gypsy Moth and its dynamics. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 1999, **35**(2): 174~179.
- [20] Lou Y G, Cheng J A. Simulation analysis on coordinated effects of rice varieties and *Anagrus Nilaparvatae* Pang et Wang on brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål). *Journal of Biomathematics*, 1999, **14**(4): 470~478.
- [21] Jiang J X, Liang G W. Effect of multiple predator species on common cutworm. *Chinese Journal of Biological Control*, 2001, **17**(3): 133~137.
- [22] Zhang W J, Gu D X. A non-linear partial differential equation to describe spatial and temporal changes of insect population. *Ecologic Science*, 2001, **20**(4): 1~7.
- [23] Gao Z X, Li D M. A spatiotemporal model for studying insect population dynamics in large scale system. *Entomological Knowledge*, 2001, **38**(2): 94~98.
- [24] Su Z P, Zhang X X, Zhai B P. Simulation and prediction of population dynamics of the fifth generation of *Helicoverpa armigera* (Hubner) in Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **45**(4): 465~470.
- [25] Tang J L, Wu J C. Application of latent root regression method in analysis of predation of predatory natural enemy in paddy field. *Chinese Journal of Application Ecology*, 2002, **13**(12): 1592~1594.
- [26] Wang X Y, Liu G R, Song A Y. The successive regulation and super long time prediction of natural enemies in wheat fields. *Entomological Journal of East China*, 2003, **12**(1): 46~52.
- [27] Wang X G, Cheng J A, He J H. A simulation system for prediction of population temporal dynamics of the striped rice borer *Chilo Suppressalis* (Walker). *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1995, **21**(1): 71~76.
- [28] Zhang W Q, Gu D X, Pu Z L. Optimal management decision on the population life system of Paddy Stem Borer, *Tryporyza Incertulas*. *Acta Entomologica Sinica*, 1995, **38**(3): 296~304.
- [29] Zhou X, Perry J N, Woiwod I P. Temperature change and complex dynamics. *Oecologia*, 1997 **112**: 543~550.
- [30] David S Boukal, Vlastimil Krivan. Lyapunov functions for Lotka-Volterra predator-prey models with optimal foraging behavior. *J. Math. Biol.*, 1999, **39**: 493~517.
- [31] Bruce E Kendall, Cheryl J Briggs, William W Murdoch. Why do population cycle? A synthesis of statistical and mechanistic modeling approaches. *Ecology*, 1999, **80**(6): 1789~1806.
- [32] Peter A Abrams. The evolution of predator-prey interactions: Theory and evidence. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000, **31**: 79~106.
- [33] Zhou J Z, Chen C M. Quantitative measurement of selectivity of predator for prey. *Acta Ecologica Sinica*, 1987, **7**(1): 50~56.
- [34] Zhou J Z, Chen C M. Predation of wolf spider *Lycosa pseudoannulate* to brown planthopper *Nilaparvata lugens* and simulation models there of: ■ selective predation. *Acta Ecologica Sinica*, 1987, **7**(3): 228~237.
- [35] Jiang J X, Liang G W. The selective predation of *Cantheconidea furcellate* Wolff on the different instar larvae of *Spodoptera litura* in coexistence of three-age type. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(4): 684~687.
- [36] Yang Z Q. Stability for a kind of models of pest and their natural enemies. *Journal of Biomathematics*, 1994, **9**(5): 37~43.
- [37] Yang D Q, Ou Y J. The stability of the intraspecific competition system for the natural enemies which possess functional breeding rate or

capturing rate. *Journal of Biomathematics*,1997,**12**(4):321~326.

- [38] Ding C W. The stability of equilibrium solutions of the ecologic model of pests and their natural enemies with non-homogeneous density distribution. *Journal of Biomathematics*,1999,**14**(2):185~191.
- [39] Tang J L, Wu J C, Li G S, *et al.* Studies on a mathematical model and relational grade for predation of several spiders to the brown planthopper in paddy-field. *Acta Ecologica Sinica*,2001,**21**(7):1212~1215.
- [40] Volker Grimm, Janusz Uchmanski. Individual variability and population regulation: a model of the significance of within-generation density dependence. *Oecologia*,2002,**131**:196~202.
- [41] Shaffer M L. Minimum population sizes for species conservation. *Bioscience*, 1981,**31**:131~134.
- [42] Boyce M S. Population viability analysis. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1992, **23**:481~506.
- [43] Li Y M, Li D M. Advance in population viability analysis. *Biodiversity Science*,1994,**2**(1):1~10.
- [44] Sznajd-Weron K. Instabilities in population dynamics. *Eur. Phys. J.*,2000,**16**:183~187.
- [45] Li Y M. Population viability analysis in conservation biology: precision and uses. *Biodiversity Science*,2003,**11**(4):340~350.
- [46] Sznajd-Weron K, Wolanski M. In search for the optimal strategy in population dynamics. *Eur. Phys. J.*, 2002,**25**:253~259.
- [47] Xu B, Chen D L, Sun J T. Impulsive control of a predator-prey system. *Journal of Biomathematics*,2004,**19**(1):77~81.
- [48] Wang M M, Li D M. Fitting logistic curve by marquardt's algorithm. *Acta Ecologica Sinica*,1986,**6**(2):142~147.
- [49] Cai Y D, Chen D H. A study on optimum fitting logistic curve by genetic algorithm. *Journal of Biomathematics*,1995,**10**(1):59~63.
- [50] Lin G F, Lin N Q, You M S. The application of neural networks to *Scirpophaga incertulas* forecasting. *Entomological Journal of East China*,1999,**8**(2):74~77.
- [51] Wen X H, Chen K Z. A new predicative neural network method for insect forecast. *J. Sys. Sci. & Math. Scis.*, 1995,**15**(1):64~74.
- [52] Wang J, Wang J H. Research fruit of traditional genetic algorithms. *Journal of East China Shipbuilding Institute*,2000,**14**(3):29~34.
- [53] Yu D H. Artificial neural networks. *Research and Development of World Science and Technology*,1996,**4**(2):47~50.
- [54] Cortes C, Vapnik V. Support vector networks. *Machine Learning*,1995,**20**:273~295.
- [55] Vapnik V N. *The nature of statistical learning theory*. New York: Springer Verlag, 1995.
- [56] Vapnik V N. *Statistical learning theory*. New York: Wiley,1998.
- [57] Vapnik V N. An overview of statistical learning theory. *IEEE Trans. Neural Networks*,1999,**10**(5).
- [58] Wang G S, Zhong Y X. Some new developments on support vector machine. *Acta Electronica Sinica*,2001,**29**(10):1397~1340.
- [59] Ju R H, Shen Z R. Data acquisition system applied to agricultural pest forecasting. *Plant Protection*,2003,**29**(5):54~57.
- [60] Ju R H, Shen Z R. Automatic inspecting system of environment parameter and small animal. *Review of China Agricultural Science and Technology*,2004,**6**(2):54~57.
- [61] Ju R H, Shen Z R. Greenhouse ecosystem health calling system based on short message. *Transactions of the CSAE*,2004,**20**(3):226~229.

## 参考文献:

- [1] 丁岩钦. 昆虫种群数学生态学原理与应用. 北京: 科学出版社, 1980. 125~130.
- [3] 沈佐锐. Logistic 修正方程及其对菜蚜种群密度动态的描述. 北京农业大学学报, 1985, **11**(3):297~304.
- [4] 王振中, 林孔勋. 逻辑斯谛曲线 K 值的四点式平均值估计法. 生态学报, 1987, **7**(3):193~198.
- [5] 马占山. 单纯形加速法拟合生态学中非线性模型. 生物数学学报, 1992, **7**(2):160~167.
- [6] 唐启义, 胡国文, 冯明光, 等. Logistic 方程参数估计中的错误与修正. 生物数学学报, 1996, **11**(4):135~138.
- [7] 唐启义, 胡国文, 冯明光, 等. 生物种群动态微分方程模型参数估计方法. 生物数学学报, 1996, **11**(5):69~75.
- [8] 柏灵, 李晓月, 王克. 稳定有界的 Logistic 方程的最优捕获策略. 生物数学学报, 2004, **19**(1):17~25.
- [9] 丁岩钦. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社, 1994. 155~158.
- [10] 徐汝梅. 昆虫种群生态学. 北京: 北京师范大学出版社, 1985. 243~247.
- [11] 秦宗林, 李光灿. 模拟昆虫种群消长动态的矩阵模型. 粮食储藏, 1995, **24**(5~6):105~114.
- [13] 张文庆, 古德祥, 蒲蛰龙. 昆虫种群动态模拟方法的一点改进——三化螟种群动态模拟模型的研究. 生态学报, 1994, **14**(3):281~289.
- [14] 黄荣华, 叶正襄. 一种模拟昆虫种群动态的改进的变维矩阵模型. 昆虫知识, 1995, **32**(3):162~164.
- [15] 祝增荣, 程家安, 黄次伟, 等. 白背飞虱种群动态的模拟研究. 生态学报, 1994, **14**(2):188~195.
- [17] 王冬生, 吴世昌, 袁全昌. 粘虫种群动态的计算机模拟. 上海农业学报, 1997, **13**(4):75~79.
- [18] 石根生, 李典谟. 马尾松毛虫幼虫的捕食天敌及其捕食作用的研究. 昆虫知识, 1998, **35**(6):336~340.
- [19] 金文, 刘来福. 舞毒蛾非线性模型及其动态. 北京师范大学学报(自然科学版), 1999, **35**(2):174~179.

- [20] 娄永根,程家安.水稻品种和稻虱缨小蜂对褐飞虱协同作用的模拟分析.生物数学学报,1999,14(4):470~478.
- [21] 蒋杰贤,梁广文.四物种共存系统中天敌对斜纹夜蛾控制作用的分析.中国生物防治,2001,17(3):133~137.
- [22] 张文军,古德祥.昆虫种群的一类时空动态模型研究.生态科学,2001,20(4):1~7.
- [23] 高增祥,李典谟.一类大尺度系统中昆虫种群时空动态模拟方法.昆虫知识,2001,38(2):94~98.
- [24] 苏战平,张孝羲,翟宝平.江苏棉区第5代棉铃虫种群动态的模拟及预测.昆虫学报,2002,45(4):465~470.
- [25] 汤进龙,吴进才.特征根回归法在稻田捕食性天敌捕食量分析中的应用.应用生态学报,2002,13(12):1592~1594.
- [26] 王向阳,刘光荣,宋爱颖,等.麦田天敌消长演替规律及超长期预测的研究.华东昆虫学报,2003,12(1):46~52.
- [27] 汪信庚,程家安,何俊华.二化螟种群时间动态预测模拟系统.浙江农业大学学报,1995,21(1):71~76.
- [28] 张文庆,古德祥,蒲蛰龙.三化螟种群系统的最优管理决策.昆虫学报,1995,38(3):296~304.
- [33] 周集中,陈常铭.捕食者对猎物选择性的数量测定方法.生态学报,1987,7(1):50~56.
- [34] 周集中,陈常铭.拟环纹狼蛛对褐稻虱的捕食作用及其模拟模型的研究 II.选择捕食作用.生态学报,1987,7(3):228~237.
- [35] 蒋杰贤,梁广文.叉角厉蟠对斜纹夜蛾不同龄期幼虫的选择捕食作用.生态学报,2001,21(4):684~687.
- [36] 杨正清.一类害虫与天敌模型的稳定性.生物数学学报,1994,9(5):37~43.
- [37] 杨德全,欧阳君.具有函数放养率或捕获率天敌有内竞争系统的稳定性.生物数学学报,1997,12(4):321~326.
- [38] 丁崇文.密度分布非均匀的害虫和天敌生态模型的平衡解的稳定性.生物数学学报,1999,14(2):185~191.
- [39] 汤进龙,吴进才,李国生,等.稻田多种蜘蛛对褐飞虱(*Nilaparvata lugens*)捕食量的数学模型及关联度研究.生态学报,2001,21(7):1212~1215.
- [43] 李义明,李典谟.种群生存力分析研究进展和趋势.生物多样性,1994,2(1):1~10.
- [45] 李义明.种群生存力分析:准确性和保护应用.生物多样性,2003,11(4):340~350.
- [47] 许斌,陈狄岚,孙继涛.一类具有功能反应的生物捕食系统的脉冲控制.生物数学学报,2004,19(1):77~81.
- [48] 王莽莽,李典谟.用麦夸方法最优拟合逻辑斯谛曲线.生态学报,1986,6(2):142~147.
- [49] 蔡煜东,陈德辉.运用遗传算法拟合 Logistic 曲线的研究.生物数学学报,1995,10(1):59~63.
- [50] 林高飞,林乃铨,尤民生.人工神经网络在三化螟预测中的应用.华东昆虫学报,1999,8(2):74~77.
- [51] 文新辉,陈开周,牛明洁.一种新的昆虫神经网络预测预报方法.系统科学与数学,1995,15(1):64~74.
- [52] 王健,王建华.标准遗传算法的研究进展.华东船舶工业学院学报,2000,14(3):29~34.
- [53] 余道衡.人工神经网络.世界科技研究与发展,1996,4(2):47~50.
- [58] 王国胜,钟义信.支持向量机的若干新进展.电子学报,2001,29(10):1397~1340.
- [59] 句荣辉,沈佐锐.农业病虫害预测预报上应用的数据采集系统.植物保护,2003,29(5):54~57.
- [60] 句荣辉,沈佐锐.环境因子与小动物自动监测系统.中国农业科技导报,2004,6(2):54~57.
- [61] 句荣辉,沈佐锐.基于短信息的温室生态健康呼叫系统.农业工程学报,2004,20(3):226~229.