

害虫预测预报的生态学基础和应用技术研究进展

周立阳, 高增祥, 李典谟*

(中国科学院动物研究所, 北京 100080)

摘要:概述害虫预测预报领域的最新动态,包括理论基础:非线性动力学、景观生态学、生物地理统计学、异质种群和生态系统链接理论,以及应用技术:地面诱捕、雷达监测、地理信息系统、全球定位系统、遥感、可视化技术和决策支持系统,对于害虫测报的基础理论研究和害虫管理的生产应用都具有重要的指导意义。

关键词:非线性动力学;时空异质性;生态系统链接

The ecological basis and applied technologies on forecasting insect pests population dynamics

ZHOU Li-Yang, GAO Zeng-Xiang, LI Dian-Mo (*Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: The prospect of forecasting population dynamics on insect pests was discussed. The related theories on non-linear dynamics, landscape ecology, bio-geographic statistics, Meta-population and ecosystem connection were described. The new advanced technologies, which could be applied on studying population dynamics of insect pests, such as Radar observation, geographic information system, global position system, remote sensing, visualization system and decision support system, were also explored. The above theories and technologies will be an important basis on studying population dynamics of insect pests, and it will be helpful on guiding insect pests control on crops production.

Key words: non-linear dynamics; spatial and temporal heterogeneity; ecosystem connection.

文章编号: 1000-0933(2001)05-01013-07 中国分类号: Q968.1, S433 文献标识码: A

随着人口的持续增长,粮食生产越来越关系到国计民生。而近年来各种害虫的持续暴发,已经给农林业生产造成了巨大损失。环境保护问题也已日趋激烈,尽管“综合治理”理论已应用了几十年,但化学农药的使用却有增无减。人们越来越关注生物种群变化的内在机制,基础性理论研究无疑会对这个问题作出贡献,而实用性技术的研究,更加密切联系生产实际,特别是能丰富害虫综合治理理论的内涵。近年来相关学科和理论技术的发展,拓展了害虫测报领域的研究空间,也为人们重新审视害虫测报问题提供了新的思想和方法。本文描述的内容涉及到众多的学科和领域,旨在抛砖引玉,为推动国内害虫测报的深入研究和提高害虫管理水平奠定基础。

1 理论动态

害虫预测预报的理论基础是与相关性学科,特别是理论生态学密切相关的。本文探讨目前国内外研究

基金项目:重点基础研究发展规划(编号:G200016210)、中国科学院创新方向项目(KSCX2-1-02-05)、国家自然科学基金(No. 30070128)资助项目

收稿日期:1999-06-30;修订日期:2000-05-10

* 通讯作者

作者简介:周立阳(1968~),男,江苏人,博士,助理研究员。主要从事害虫种群生态研究。

最为活跃的几个领域,这些基础性理论成果是构成文章下一部分害虫测报应用技术的主要依据。

1.1 非线性动力学

耗散结构理论、协同学、突变理论、混沌动力学和分形理论几乎都是创立于20世纪70年代,这些跨学科、非线性理论的共同目标是探索自然界的复杂性和规律性,因而被称为是继量子力学和相对论两项重大科学发现的第三次科学革命,这些非线性理论共同形成的学科称为非线性科学^[1]。普里高津把耗散结构定义为在远离平衡的条件下,借助于外界的能流和物质流而维持的一种空间或时间的有序结构。由于耗散结构理论是从热力学理论发展起来的,用它来解决问题需要受到热力学概念的限制。哈肯从动力学角度来研究从无序产生有序结构的规律性,并提出了适用范围更广的协同学理论:由于系统内各子系统之间存在相互作用,这种作用可用竞争、合作或反馈来表示,正是这种协同作用使系统在一定条件下自发组织起来,形成在宏观上的时空有序结构。突变理论是研究系统的状态随外界控制参数连续改变而发生不连续变化的数学理论,突变现象的共同特点是:外界条件的微变导致系统宏观状态的剧变,这只有在非线性系统中才可能出现。上述理论所研究的非线性动力系统的长时间行为,在相空间中表现为:轨线要么趋于一个点(定态吸引子),要么趋于一条闭合曲线(周期吸引子)。然而,非线性动力系统的长时间行为远非如此,在一定的参数范围内,轨线在相空间中被吸引到一个区域,在这个区域既不趋于一个点也不趋于一个环,而作无规则的随机运动,这就是混沌行为。然而,混沌行为又具有内在规律性,并非完全杂乱无章,而是使系统趋向于具有自相似结构的奇异吸引子。分形正是研究无特征尺度的自相似结构的理论,这就为研究非线性几何空间特征提供了有力的工具。

从上述非线性理论可以看出,非线性动力学的典型特征是研究非线性系统的稳定性、分支、涨落和对称性破缺等概念。生态系统本身无疑是一个非常复杂的有自组织现象的非线性结构,许多非线性理论都是从生态学角度发展起来的,如物种的竞争与协同学、简单的逻辑斯蒂模型与混沌、病虫害的暴发与突变等。因此,利用非线性动力学理论去研究物种的种群动态,是一个自然而又热门的课题。例如,Logan J A^[2]深入探讨了昆虫种群的混沌现象及其在害虫管理模型上的应用;Morris W F^[3]研究了自然种群产生混沌及其维持生态系统稳定性的条件;Sugihara G^[4]对虫媒传染病的区分于估计误差而考虑混沌的非线性预测;Daniel T C^[5]利用分形理论进行森林可视化技术研究;祖元刚^[6]利用分形理论中的分维方法研究了植被的空间异质性。

1.2 景观生态学

景观生态学是以生态空间理论为核心,把景观视为空间上镶嵌出现和紧密联系的生态系统组合,研究景观空间异质性的保持和发展的一门科学。生态空间理论是对生态系统空间关系进行研究的一种理论,主要包括尺度、空间格局和镶嵌动态等^[7]。在生态学中,尺度是指所研究生态系统的面积大小(空间尺度)或其动态变化的时间间隔(时间尺度)。空间格局是生态系统或系统属性空间变异程度的具体表现,包括空间异质性、空间相关性和空间规律性等内容,通常有均匀分布、聚集分布、线状分布和平行分布等。空间异质性通常包括空间组成和空间构型两个方面,前者是指景观组分(生态系统)的类型种类、数量和面积比例,后者是指生态系统的空间分布,斑块形状、大小和景观对比度、连接度。空间相关性是指斑块异质性与参数的空间相互作用及空间关联程度;空间规律性是指空间梯度和趋势。空间格局决定着资源地理环境的分布形成和组分,制约着各种生态过程,与干扰能力、恢复能力、系统稳定性和生物多样性有着密切关系。镶嵌是指一个系统的组分在空间上互相拼接而成为一个整体,通常分为生物和非生物镶嵌性,前者包括干扰、生物相互作用、植被空间格局、反应-扩散方程等,后者是指环境类型的变化,如土地、高程等。而空间异质性突出地表现在生态交错带上,它是指存在于相邻的不同均质景观单元之间的异质性景观,在这一景观内,环境因子和生物因子发生梯度上的突变,对比度增大。

长期以来,缺少有效的数据管理和分析工具一直阻碍着昆虫生态学中空间过程的研究。但近年来计算机技术的发展,如地理信息系统、遥感等,已经使得突破这一障碍成为现实。正如非线性动力学提供解决非线性问题的工具一样,人们必须从长期的考虑系统的直线相关思想中挣脱出来,才能去面对更加复杂而又深奥的自然界现象。因此,生态学中空间屏障的逾越,将不可避免地带动与时间尺度同等重要的空间尺度

上的种群动态研究。而景观生态学的相关理论,也奠定了研究生物种群空间动态的研究基础。例如,Levin S A^[8]研究指出,尺度的改变会影响到物种分布的类型,从小尺度的聚集分布会变化到较大尺度上的随机分布,种群动态也会从小尺度上的稳定点变动到较大尺度上的非平衡等。在空间异质性研究上,Johnson D L^[9]发现土壤类型的变化与害虫的发生密度紧密相关;Regniere J^[10]研究认为,景观水平上,物种的分布与发生是与环境因子紧密联系的,并组建了以温度变化为基础的害虫动态空间模型。

1.3 生物地理统计学

如何建立同时考虑时间与空间尺度的生态学模型,是长期以来困扰着生态模型工作者的重要问题。基于时间尺度的统计学方法已经发展到相当高的水平,但却并不能解决空间尺度的生态学问题。空间精确性模型考虑到真实的景观空间格局,研究栖息地斑块内物种的分布及空间关系,有力地推动了景观生态学的发展。与此相对的空间非精确性模型,更偏重于理论上的研究,在概率分布和随机性分析上模拟物种在空间上的动态。而关于空间相关性的研究,统计学方法仍有待于深入发展。目前应用最为广泛的是地统计学,它以区域化变量理论为基础,利用半变异函数揭示区域化变量的内在联系,直接测定和分析变量的空间相关性和依赖性,可用来设计抽样方法,进行空间数据估值,建立预测性模型。一个变量在空间上和其位置有关,该变量就是“区域化的”。区域化变量具有两个似乎矛盾的性质:一是随机性,即变量在空间上是随机的、不规则的,难以预测;二是结构性,即变量在时空上具有某种程度的自相关性,取决于分隔两点之间的距离和方向。周国法^[11]等在研究传统的生物统计学方法及地统计分析基础上,提出了生物地理统计学的概念和框架。它的基本假设是认为任何空间发生的生物学或生态学现象的组分都存在空间上的自相关性,不同的空间现象间存在空间上的互相关性,这种空间相关性随距离的增大而减弱,同时不同方向上的相关强度及相关特征可以是不同的,而且空间相关性随时间的变化而变化。空间相关性假设从根本上改变了传统生物统计学及生态学方法以样本都是随机选取为基础的理论体系,是生物统计学的突破性进展。

然而,生物地理统计学的内容仍有待于丰富和发展,大量的实践将有助于理论的成熟和完善。可喜的是国内外在这一领域已经开展了许多研究,例如,Dunning J B^[12]深入探讨了空间精确性模型在生态学上的应用前景;Holt R D^[13]组建了植被与动物种群动态的空间关联模型;Hiebeler D^[14]利用随机方程模拟了物种的空间栖息地构成,建立了非精确性模型;周国法利用生物地理统计学对舞毒蛾和松毛虫进行了深入研究,直观地显示了种群的空间动态。

1.4 异质种群

MacArthur & Wilson 的岛屿生物地理学理论假定存在着一个无灭绝风险的大陆种群,Levins 则取消了该限制条件而考虑了通过扩散侵占而联系在一起的一些区域种群的持续性问题,即异质种群结构(Meta-population)。异质种群理论所描述的是在斑块生境中,在空间上具有一定的距离,即存在明显的界限,但这些斑块彼此间通过扩散个体相互联系在一起,形成了许多局部种群的集合,因此也被称为是种群的种群,它是种群的概念在一个更高层次上的抽象和概括。异质种群理论最基本的概念是研究局部种群的灭绝与新的局部种群的建立这两个基本过程的联系。为此,异质种群与保护生物学关系非常密切,并被广泛地应用于濒危物种的生存研究。在异质种群理论一书中^[15],有关物种的竞争、异质种群的遗传、群落结构等问题都有非常详细的描述。需要特别指出的是异质种群理论与景观生态学的关系问题,Lima S L^[16]也强调,景观水平上的异质种群模型应该包括更多的生物运动、扩散和生境选择等方面的行为生态学知识。

关于害虫的种群结构问题,已经引起了人们的广泛注意。对于局部发生的病虫害问题,特别是有关虫媒传播的病原微生物,更容易存在异质种群的现象。然而,人们更加关注大尺度发生的,特别是具有较强的迁移能力的重要性害虫问题。很显然,从异质种群的概念上来看,这一类害虫并不存在异质种群现象,单从迁移率方面就可以得到上述结论。然而,时空的异质性却又确实影响着这些害虫的景观动态,而异质种群理论又与景观生态学关系密切,因此人们自然会把异质种群的概念与害虫的空间动态相联系。传统的害虫测报问题,可以说是基于个体生态学的角度发展起来的。而事实上,害虫的发生是以局部种群为基础的,“一个种群的种群”这个概念,在研究害虫发生的空间动态时似乎更加有用。例如,Kitron U^[17]研究了不同年份采采蝇的危害,提出了重点危害区域的“迁移”问题;Stelter C^[18]研究了一种蝗虫在生境遭洪水破坏

后,局部种群的灭绝与新局部种群的产生而导致该昆虫世代延续的问题,是典型的异质种群应用范例。这些工作虽然刚刚开始,但笔者认为,从种群的角度去建立测报模型,将是未来害虫测报领域的一个新的突破。

1.5 生态系统链接(Ecosystem connection)

从生态系统角度去考虑物种的动态问题,越来越受到人们的高度重视。从理论上讲,生物链将系统内的物种连接在一起,某一物种的变化将影响到其它物种的种群动态。然而,种群生态学家长期以来侧重于研究单一物种的动态,或者是研究几个物种的关系,如寄主、害虫和天敌的系统模拟等。在群落或生态系统的层面上,考虑物种间的种群动态之间的关系,也是目前生态学研究热点之一。生态系统链接的基本思想为:系统内某一物种的数量变化会引起一系列的生态系统反应,包括其它物种数量的变化以及物质、能量、信息流动等。

Jones C G^[19]等最近在科学杂志上发表了被称之为“Acorns connection(橡树果链接)”的研究成果。他们认为舞毒蛾造成的橡树落叶以及人类的一种传染病(Lyme disease)的流行决定于该生态系统内橡树的果实(包括由果实重新发展起来的幼苗)、白足鼠、舞毒蛾的蛹、鹿和跳蚤的种群动态。试验表明,在没有橡树果的情况下,以橡树果为食的白足鼠(取食舞毒蛾的蛹)的数量减少,可以引起舞毒蛾的暴发;如果增加橡树果的数量,将导致白足鼠的密度上升。增加橡树果的数量还会导致黑腿跳蚤的种群密度的提高,这是因为橡树果吸引了一种鹿的取食,而这种鹿是黑腿跳蚤的寄主。带有感染了 Lyme disease 细菌的黑腿跳蚤的白足鼠,是导致人类传染病的主要因素。该研究成果对于森林和人类保健的预测和管理都具有重要的启示。如果进一步拓展这种链接反应到整个生态系统,包括环境因素,将对人们重新审视害虫管理提供新的思路。例如,在松毛虫的治理中,大量化学农药的使用,既带来了天敌(包括鸟类)数量的变化,也是导致人类某些疾病的主要因素。如果再进一步从整体上考虑松毛虫防治的经济效益,应当将整个生态系统的变化,包括正反两方面,都要纳入研究计划。相信这样的研究,将会导致害虫经济阈值的新变化。因此,研究生态系统产生一连串相关反应的各种组分,将有利于制定新的害虫管理措施,包括害虫测报的新思想。

2 应用技术

害虫测报是一门应用性很强的学科,雄厚的基本理论是其发展的基础,而应用水平的提高,有赖于相关的高新技术。

2.1 监测技术

害虫发生的高峰期、数量等生物学参数的获取是害虫测报工作的重要组成部分,也是决定害虫测报精确性的首要因素。目前,监测手段主要包括昆虫间化学通讯及物理学反应两个方面。有关化学生态学的研究成果,特别是昆虫性信息素用于害虫测报已经取得了丰硕的成果。例如国内在棉花、松树、果树、蔬菜等农林业大害虫方面,都进行了利用性引诱剂作为监测手段的研究和应用工作。在物理学方面,黑光灯诱蛾一度被广泛使用,可喜的是近年来也有一些新的手段。典型的是荷兰有关的行为学研究技术,特别是利用数字化摄像方法,可以分析害虫的寄主选择及移动轨迹等;在声学方面,他们的产品可以方便地记录和分析昆虫发声的频率,这一方面国内研究进展缓慢,只是在水稻害虫褐飞虱方面有些研究成果。

在害虫发生的大区域监测上,雷达起到了非常重要的作用。国内将其应用于草地、森林和水稻等迁飞性大害虫的研究,在分析害虫的迁飞路线、飞行高度等方面,雷达有其独到之处。Riley J R^[20]在讨论遥感在昆虫学方面的应用时,特别强调了雷达在昆虫飞行观测方面的优势。但同时他又指出,利用低空数字化录象等技术,可以同样分析大区域害虫暴发的特征。这就是近年来航空录象及卫星遥感等技术获得广泛关注的原因,国外在舞毒蛾、沙漠蝗虫等方面已有许多成果。国内主要集中于松毛虫等林业害虫上,用于农业害虫的研究工作还未开展。正如 Liebhold A M^[21]所指出的,农业上的景观区域面积较小和破碎化,阻碍了遥感技术在农业害虫方面的研究。

2.2 “3S”技术

地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)和遥感(RS)被统称为“3S”技术,正是这些技术推动了景观生态学的研究,也使得害虫测报由传统的时间尺度上升到空间尺度的研究成为现实。这3个技术有着各自

独立、平行的发展和成就:GPS是以卫星为基础的无线电测时定位、导航系统,可为航空、航天、陆地和海洋等方面的用户提供不同精度的在线或离线的空间定位数据;RS在过去20年中,已在大面积资源调查、环境监测等方面发挥了重要的作用,在未来几年内,还将会在空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率方面有新的突破;GIS则被各行业用于建立各种不同尺度的空间数据库和决策支持系统,向用户提供多种形式的空间查询、分析和辅助规划决策的功能。近年来,国际上“3S”的研究和应用开始向集成化方向发展:GPS主要被用于实时、快速地提供目标,包括各类传感器和运载平台的空间位置;RS用于实时或准确地提供目标及其环境信息,发现地球表面上的各种变化,及时地对GIS进行数据更新;GIS则是对多种来源的时空数据进行综合处理、集成管理和动态存取,作为新的集成系统的基础平台。

“3S”技术在害虫测报领域已经被广泛地应用,例如,Kitron U^[17]对采采蝇的研究还发现,一些遥感信息,如植被的水分指数,与害虫的发生密度高度相关;Virtanen T^[22]利用GIS的叠加等处理,结合全球气候变化模型,分析了害虫的发生动态;Lefko S A^[23]利用GIS的水流模型,分析了土壤昆虫的生境;Schell S P^[24]利用“3S”集成技术,探讨了蝗虫的生态因子,组建了基于土壤因子的预测模型。

2.3 时空分析模型

相比于抽象的空间非精确性模型,基于GIS等技术的空间精确性模型更多地被应用于种群动态的研究中。大多数GIS软件都提供了基本的空间分析模块,包括空间插值、距离分析和缓冲区分析等,而一些更为复杂的模型,则需要利用其它高级语言来编程,这使得许多研究工作进展缓慢。目前应用最多的是发展较为成熟的地统计学模型,昆虫数量与密度、害虫危害发生率等都是区域化变量的例子,可以用区域化变量理论研究它们时空结构及时空依赖性关系。地统计学的核心参数是半变异函数。它通过测定区域化变量分隔等距离的样点间的差异来研究变量的空间相关性和空间结构。分隔距离 h 的两点 x 和 $x+h$ 的区域化变量 $z(x)$ 和 $z(x+h)$ 之间的变异,可以用它们的增量 $[z(x)-z(x+h)]$ 平方的数学期望(即区域化变量增量的方差):

$$2\gamma(h) = E\{[z(x) - z(x+h)]^2\} = \text{var}\{z(x) - z(x+h)\}$$

来表示, $\gamma(h)$ 称为半变异函数。根据半变异函数还可以建立各种插值和模拟模型,从而给人们提供直观的空间种群动态信息。有关地统计学模型与GIS连接的问题,也正在逐步实现,并已出现了相关的软件。

上述时空分析模型应用于害虫测报,已经有许多成功的范例。随着生物地理统计学的丰富和发展,害虫测报水平也将会得到进一步提高。例如,Brewster C C^[25-26]对白粉虱建立了空间精确性模型,探讨了不同的寄生植物及气候环境因子对该虫的影响;Sharov A A^[27]通过空间精确性模型研究,提出了利用屏障区域减缓舞毒蛾扩散的管理对策;Schell S P^[28]关于蝗虫的研究,分析了异质空间的相关性;Liebhold A M^[29]对舞毒蛾的地统计学分析发现,卵密度在25m到100km范围内空间相关性显著;Arbogast R T^[30]利用仓储害虫的性诱剂抽样数据,通过地统计插值处理,建了三维动态模型。

2.4 可视化技术

当人们在建立传统的系统模拟模型时,经常为抽象的数学方程所困扰。一个典型的例子是寄主植物-害虫-天敌模拟系统,尽管从详尽的表格上可以分析各物种的发育进度,但却很难对同时期系统的真实动态加以描述或者有一个直观的感觉。可视化技术或虚拟现实技术可以解决这一难题,通过对系统的各组分进行拟像化处理,并与相关的数学模型相结合,可以在计算机上模拟不同时空环境下系统的动态。例如,在给定寄主植物的发育模型以及害虫与天敌的数量模型之后,利用可视化技术,可以模拟不同时空环境下寄主植物的受害情况^[5]。在可视化技术中,分形等非线性理论被广泛地应用于植被的模拟,由此也体现了学科交叉的重要性。

2.5 决策支持系统

决策支持系统是直接为生产管理部门提供服务的有力工具,传统的决策支持系统以专家系统为核心,并以运筹学和线性规划等学科作为解决问题的主要依据。目前,随着计算机技术和相关学科的发展,决策支持系统无疑已经扩大了内涵。上述提到的各种技术,包括“3S”和可视化等,都是组建决策支持系统的有效手段。而生态系统链接理论,则应该构成现代决策支持系统的理论核心,专家系统等只是实现决策支持

系统的必要技术。从系统分析角度来讲,害虫测报并不是孤立的,害虫的发生只是生态系统的一个组分,单独考虑这一组分是不全面的,有时还会得出偏面的甚至错误的结论。

Bunch J M^[31]和 Oliveria F L^[32]关于综合森林资源管理系统(INFORMS)的研究为人们提供了一个现代决策系统的典范,该系统几乎应用了本文所涉及的各种技术和理论。INFORMS 是一个自动计算机系统,用来帮助美国农业部林务局资源管理者,利用综合的资源计划与景观水平上的项目分析,对环境进行评估。它是一个连结地理信息系统数据库、专家系统/规则库推理机、制图用户界面技术、各种模拟模型和单一的、容易使用环境内文件化工具的界面。其中的一个模块(PTIPS)用于病虫害的数据储存和管理,它包括以下功能:用于模拟病虫害暴发及其对森林植被影响的模型;在管理决策中,用非市场价值估价方法,考虑非货币资源;允许公众与资源管理者进行形象化交流的林分拟像系统。另外,还包含一个预测飞机喷洒后,农药的扩散和沉积模型,这一模型在设计病虫害的控制项目中非常有用。INFORMS 系统不仅可以高效地对整个生态系统资源进行管理,在病虫害的处理计划中也显示了强有力的应用价值。

3 结语

害虫测报是与其它众多学科的发展紧密关联的,本文所介绍的理论与技术无疑会对未来害虫管理研究起着重要的指导作用。先进的技术理论与理论也同时带来了思想上的革新,包括以下一些值得深思的问题:传统的线性分析方法,最终要被非线性理论所更替,尽管自然界是那样的复杂,非线性理论又是如此的深奥,似乎阻碍了进步,但必须记住,线性方法是无法彻底解决非线性问题的,人们在时间尺度上已经取得了辉煌的成就,但在空间尺度上却是刚刚起步,时空异质性的概念必须深入人们的脑海,才能摆脱长期以来均质理论的假设或抽象所形成的习惯性思维;种群动态的研究也同样需要考虑尺度问题,包括个体,种群和群落或系统等不同的层次,基于不同的层次所获得的结果,可能有助于同一问题的全面和彻底的解决。同时还要看到,新的理论或新的方法,也包括新的技术的出现,并不等于问题的解决,还有具体而又细致的实际工作等待人们去做。将国外先进的技术和新的理论应用于我国的害虫预测预报实践,首先,人们要熟悉这些理论,防止理论在错误的条件下使用。如,对于非线性科学这一当代科学的热门学科,懂行的人并不多,这就要加强学科交流,特别是思想上的交流。其次,一些先进的技术,如 GIS,要求的原始数据数量非常多,且质量要高。但我国的一些现有观察数据很难满足其要求,这就需要改进观察手段,提高监测的规范化水平,以便这些数据能被不同层次的研究所采用。再者,害虫预测预报是一项极其复杂的工作,综合采用各种先进的技术和新的理论是必要的。总之,只要坚持理论和技术的创新,我国的害虫预测测报就可以不断取得新的进步。

参考文献

- [1] 仪垂祥. 非线性科学及其在地学中的应用. 北京:气象出版社,1995. 1~273.
- [2] Logan J A, et al. Nonlinear dynamics and chaos in insect populations. *Ann. Rev. Entomol.*, 1992, 37: 455~477.
- [3] Morris W F. Problems in detecting chaotic behavior in natural populations by fitting simple discrete models. *Ecology*, 1990, 71: 1849~1862.
- [4] Sugihara G, et al. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. *Nature*, 1990, 344(19): 734~741.
- [5] Daniel T C, et al. Data visualization for forest health management decision support. In: *Resource technology 1997, Beijing international symposium proceedings*. China forestry publishing house, Beijing, 1998, 239~249.
- [6] 祖元刚. 植被空间异质性的分形分析方法. *生态学报*, 1997, 17(3): 333~337.
- [7] 肖笃宁. 生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, 17(5): 453~461.
- [8] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 1992, 73(6): 1943~1967.
- [9] Johnson D L. Spatial and temporal computer analysis of insects and weather: grasshoppers and rainfall in Alberta. *Mem. Ent. Soc. Can.*, 1988, 146: 33~48.
- [10] Regniere J. Generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models. *Environ. Entomol.*, 1996, 25(5): 869~881.

- [11] 周国法,徐汝梅.生物地理统计学.北京:科学出版社,1998.1~164.
- [12] Dunning J B, *et al.* Spatially explicit population models; current forms and future uses. *Ecological Applications*, 1995, **5**(1):3~11.
- [13] Holt R D, *et al.* Linking contemporary vegetation models with spatially explicit animal population models. *Ecological Applications*, 1995, **5**(1):20~27.
- [14] Hiebeler D. Stochastic spatial models; from simulations to mean field and local structure approximations. *J. Theor. Biol.*, 1997, **187**:307~319.
- [15] Gilpin M E and Hanski I A. Meta population biology. Academic Press, London, 1997. 1~454.
- [16] Lima S L, *et al.* Towards a behavioral ecology of ecological landscapes. *Trends. Ecol. Evol.*, 1996, **11**:131~135.
- [17] Kitron U, *et al.* Spatial analysis of the distribution of testes flies in the Lambwe valleys, Kenya, using Landsat TM satellite imagery and GIS. *J. Animal Ecology*, 1996, **65**:371~380.
- [18] Stelter C, *et al.* Modeling persistence in dynamic landscapes; lessons from a meta-population of the grasshopper *Bryodemis tuberculata*. *J. Animal Ecology*, 1998, **66**:508~518.
- [19] Jones C G, *et al.* Chain reactions linking acorns to gypsy moth outbreaks and Lyme disease risk. *Science*, 1998, **279**(13):1023~1026.
- [20] Riley J R. Remote sensing in Entomology. *Ann. Rev. Entomol.*, 1989, **34**:247~271.
- [21] Liebhold A M, *et al.* Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Ann. Rev. Entomol.*, 1993, **38**:303~327.
- [22] Virtanen T, *et al.* Modeling topclimatic patterns of egg mortality of *Epirrita autumnata* (Lepidoptera: Geometridae) with a geographic information system; prediction for current climate and warmer climate scenarios. *J. Applied Ecology*, 1998, **35**:311~322.
- [23] Lefko S A. Spatial modeling of preferred wireworm (Coleoptera: Elateridae) habitat. *Pest management and sampling*, 1998, **27**(2):184~190.
- [24] Schell S P, *et al.* Spatial analysis of ecological factors related to rangeland grasshopper (Orthoptera: Acrididae) outbreaks in Wyoming. *Environ. Entomol.*, 1997, **26**(6):1343~1353.
- [25] Brewster C C, *et al.* Spatio-temporal model for studying insect dynamics in large-scale cropping systems. *Environ. Entomol.*, 1997, **26**(3):473~482.
- [26] Brewster C C, *et al.* Simulating the dynamics of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) in an organic cropping system with a spatio-temporal model. *Environ. Entomol.*, 1997, **26**(3):603~616.
- [27] Sharov A A, *et al.* Model of slowing the spread of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) with a barrier zone. *Ecological Applications*, 1998, **8**(4):1170~1179.
- [28] Schell S P, *et al.* Spatial characteristics of rangeland grasshopper (Orthoptera: Acrididae) population dynamics in Wyoming; implications for pest management. *Environ. Entomol.*, 1997, **26**(5):1056~1065.
- [29] Liebhold A M, *et al.* Geostatistical analysis of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) egg mass populations. *Environ. Entomol.*, 1991, **20**(5):1407~1417.
- [30] Arbogast R T, *et al.* Implications of spatial distribution of insect populations in storage ecosystems. *Environ. Entomol.*, 1998, **27**(2):202~216.
- [31] Bunch J, *et al.* INFORMS-decision protocol; meeting the changing needs of forest resource planning. In *Resource technology 1997; Beijing international symposium proceedings*. China forestry publishing house, Beijing, 1998, 274~287.
- [32] Oliveria F L, *et al.* INFORMS; an enhanced decision support tool for watershed and landscape management is integrated with a knowledge-based reasoning toolkit. In *Resource technology 1997; Beijing international symposium proceedings*. China forestry publishing house, Beijing, 1998. 264~273.