

稻鸭共作系统中稻纵卷叶螟种群控制的模拟

秦 钟^{1,2}, 章家恩^{1,2*}, 骆世明^{1,2}, 张 锦^{1,2}

(1. 华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642;

2. 广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642)

摘 要: 为研究系统动力学方法在害虫种群的优化管理和预测等研究中的应用, 以稻纵卷叶螟第二代种群为研究对象, 分析了稻鸭共作系统中捕食性天敌蜘蛛及鸭对稻纵卷叶螟生长发育的影响, 构建了相应的系统动力学框架模型, 并利用 STELLA 软件对稻纵卷叶螟种群的数量动态进行了模拟和预测。结果表明, 当第二代稻纵卷叶螟初始的百穴卵量为 100 粒, 稻田蜘蛛密度为每百穴 12.623 头, 如果同时考虑鸭对 3 龄幼虫期稻纵卷叶螟卷苞 60% 的捕食率, 稻纵卷叶螟成虫的密度可降至每百穴 9.129 头, 鸭的捕食可使稻纵卷叶螟第三代卵期末的百穴卵量减少约 6.7%。稻田蜘蛛和鸭的共同作用对稻纵卷叶螟的控制效果优于仅受同等数量蜘蛛控制时的情况。研究结果可迅速、便捷地为害虫的优化管理等提供丰富的信息和参考。

关键词: 害虫控制, 种群动态, 生物防治, 稻纵卷叶螟, 种群控制, STELLA 模型, 蜘蛛, 鸭

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.049

中图分类号: S11+7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0283-07

秦 钟, 章家恩, 骆世明, 等. 稻鸭共作系统中稻纵卷叶螟种群控制的模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 283—289.

Qin Zhong, Zhang Jiaen, Luo Shiming, et al. Population control modelling of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee in rice-duck integrated farming system[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 283—289. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

稻纵卷叶螟 (*Cnaphalocrocis medinalis* Guenee) 是中国主要稻区普遍性、常发性害虫, 每年损失稻谷约 $5.0 \times 10^8 \sim 7.5 \times 10^8$ kg^[1]。稻纵卷叶螟的发生与危害程度不仅受迁入虫源和寄主生育状况的影响, 还和天敌有着极为密切的关系。许多学者已对稻纵卷叶螟的天敌种类、跟随关系、控制作用及影响因素等开展了多方面的调查与分析, 并在此基础上提出了将稻纵卷叶螟及其有影响的所有环境因子作为一个种群系统, 利用系统科学的方法与原理研究稻纵卷叶螟发生发展的动态及控制^[2-10]的研究思路: 即把种群按生长发育顺序依次划分为若干状态, 以各状态的存活概率和生殖力作为状态的传输, 把状态向量的输入和输出联系在一起; 把作用于种群的各种因子看成是系统的空间边界, 边界因子通过信息处理成为控制信号作用于状态输出的预期目标, 通过控制信号的反馈, 研究边界因子的排除、添加或干扰, 对系统施加优化控制。庞雄飞等先后提出了以作用因子组配的生命表^[11]、种群控制指数^[12]、状态空间法^[13]等研究方法,

并应用于稻纵卷叶螟等多个害虫系统控制的研究中。其中, 状态空间法的运用对现代控制理论中其他各种方法, 如系统动力学方法在害虫种群系统中的应用和发展起到了重要的推动作用。

系统动力学最为突出的优点在于它能处理高阶次、非线性、多重反馈、复杂时变的系统问题, 在研究害虫种群控制时, 借助系统动力学模型就可以把握系统各种反馈关系, 将系统与环境、系统内部各子系统之间相互作用的复杂关系通过一系列微分过程和函数关系加以表述, 从而实现对系统结构、功能乃至发展趋势进行模拟、预测和调控。近年来, 随着系统科学与生态学的相互渗透和计算机技术在生态学研究中的广泛应用, 出现了许多基于系统动力学的管理、决策或模拟仿真软件, 如 Vensim PLE, Simile, Swarm, STELLA 等。其中 STELLA (strongly-typed, lisp-like language, 简称 STELLA) 是最早用于动态模拟的软件之一, 由美国 Isee systems Inc. 创立, 因其图形界面十分友好, 已在多国成为一个构造系统模型和模拟复杂系统动态相互关系的工具而被广泛应用于科研、教学、管理等多学科领域, 发挥了巨大作用^[14-18]。而中国国内对其报道相对较少^[19-22]。

稻纵卷叶螟为远距离迁飞性害虫, 具有卵量大、孵化率和成活率高、为害重等特点^[23]。通过化学杀虫剂进行控制, 不仅生产成本相对较高, 还可能会增加稻纵卷叶螟的抗药性和防治难度, 农药残留对人、畜健康和生态环境也将造成影响。利用稻田养鸭生物防治技术对稻田病虫害进行有效控制是中国传统农业的精华, 许多田间调查的结果已证实稻鸭共作对稻纵卷叶螟等害虫也有一定的控制作用^[24-25]; 在稻纵卷叶螟成虫始发期至盛发

收稿日期: 2010-04-13 修订日期: 2010-11-05

基金项目: 国家自然科学基金 (30800134, 30770403); 国家重大基础研究发展计划 (973 项目) (2006CB100206); 广东省科技计划项目 (2007B020709007); 广东省现代农业产业技术体系项目

作者简介: 秦 钟 (1973—), 女, 宁夏银川人, 博士, 主要的研究领域为生态系统分析与模拟。广州 华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 510642。Email: q_breeze@scau.edu.cn

*通信作者: 章家恩 (1968—), 男, 湖北省广水市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生态学等相关领域的研究。广州 华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 510642。Email: jeanzh@scau.edu.cn

期间放鸭防治,可取得较好的防治效果^[26]。但在理论上,对稻鸭系统中稻纵卷叶螟种群数量的消长及鸭对稻纵卷叶螟一天敌系统的影响等仍缺乏深入细致的研究。针对以上情况,本文将根据已有的稻田稻纵卷叶螟第二代种群生命表的研究结果,在分析捕食性天敌蜘蛛、鸭捕食对稻纵卷叶螟各发育历期种群动态的影响和响应的基础上,构建稻纵卷叶螟生长发育的系统动力学模型进行情景分析和预测,旨在为稻纵卷叶螟种群的数量预测、优

化控制及稻鸭共作系统的田间管理提供依据。

1 数据来源

文中的数据主要来源于庞雄飞等^[27]在广东阳江海陵岛单作稻田对稻纵卷叶螟多年的调查和研究文献。根据1977—1983年稻纵卷叶螟第二世代平均生命表,结合模型中的变量与函数设置,将主要的数据和部分变量列于表1。模型模拟采用系统动态模拟软件 STELLA9.0 完成。

表 1 稻纵卷叶螟种群控制系统动力学模型的主要变量与参数表

Table1 Main parameters and variable values for system dynamics modeling of <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> (Guenee) population control					
虫态	虫期/d	死亡因子	各死亡因子下的存活率/% 或产卵量	各虫期存活率/% 或产卵量	每百穴蜘蛛
卵	4	捕食	$S_{BS}^E=0.5010$	$S_{BS}^E\times S_{JS}^E\times S_{BF}^E$	
		寄生	$S_{JS}^E=0.9536$		
		不孵	$S_{BF}^E=0.9186$		
1 龄幼虫	2	捕食及其他	$S_{BS+}^{L1}=0.5083-0.0081\times F_d^{L1}$	$S_{BS+}^{L1}\times S_{JS}^{L1}$	F_d^{L1}
寄生	$S_{JS}^{L1}=0.9040$				
2 龄幼虫	3	捕食及其他	$S_{BS+}^{L2}=0.6518-0.0081\times F_d^{L2}$	$S_{BS+}^{L2}\times S_{JS}^{L2}$	F_d^{L2}
寄生	$S_{JS}^{L2}=0.8158$				
3 龄幼虫	3	捕食及其他	$S_{BS+}^{L3}=0.8534-0.0081\times F_d^{L3}$	$S_{BS+}^{L3}\times S_{JS}^{L3}\times S_{BW}^{L3}$	F_d^{L3}
		寄生	$S_{JS}^{L3}=0.8234$		
		病亡	$S_{BW}^{L3}=0.9965$		
4 龄幼虫	3	捕食及其他	$S_{BS+}^{L4}=0.8385-0.0081\times F_d^{L4}$	$S_{BS+}^{L4}\times S_{JS}^{L4}$	F_d^{L4}
寄生	$S_{JS}^{L4}=0.7165$				
5 龄幼虫	4	捕食及其他	$S_{BS+}^{L5}=0.8880-0.0081\times F_d^{L5}$	$S_{BS+}^{L5}\times S_{JS}^{L5}\times S_{BW}^{L5}$	F_d^{L5}
		寄生	$S_{JS}^{L5}=0.7948$		
		病亡	$S_{BW}^{L5}=0.9779$		
蛹	7	捕食及其他	$S_{BS+}^P=0.6306$	$S_{BS+}^P\times S_{JS}^P\times S_{BW}^P$	
		寄生	$S_{JS}^P=0.7573$		
		病亡	$S_{BW}^P=0.9275$		
成虫	6	产卵量	每雌产卵量(S_{CL}^A)按 42 粒计(雌虫所占的比例 $BL_c=0.5$)		

注：1) 数据引自庞雄飞等^[27]。2) 幼虫期的“捕食及其他”致死因子包括田间捕食性天敌的捕食活动和害虫自然死亡两部分。3) 表中“S”表示死亡率；BS, JS, BF, BS+分别表示捕食、寄生、不孵、捕食及其他各这4种死亡因子； F_d^{L1} , F_d^{L2} , ..., F_d^{L5} 分别表示1龄, 2龄, ..., 5龄幼虫期时的蜘蛛密度。

2 分析方法

2.1 模型构建

在利用系统动力学模型建模时,可将稻纵卷叶螟各虫态视为“库(Stock)”,它们之间的相互转化可视为“流(Flow)”,影响状态变量变化的因素为“流速变量”,即本研究中的稻纵卷叶螟各发育阶段的存活数量或产卵量,其他因素则作为辅助变量或常量。根据稻纵卷叶螟不同虫态的转化和生长发育动态构成系统内部的反馈关系,建立的概念模型如图1所示。

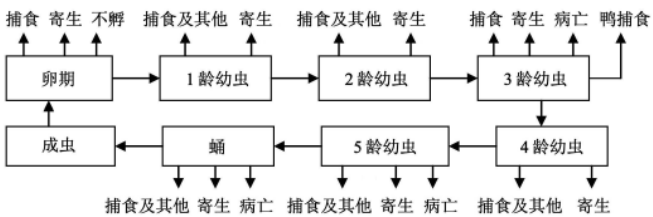
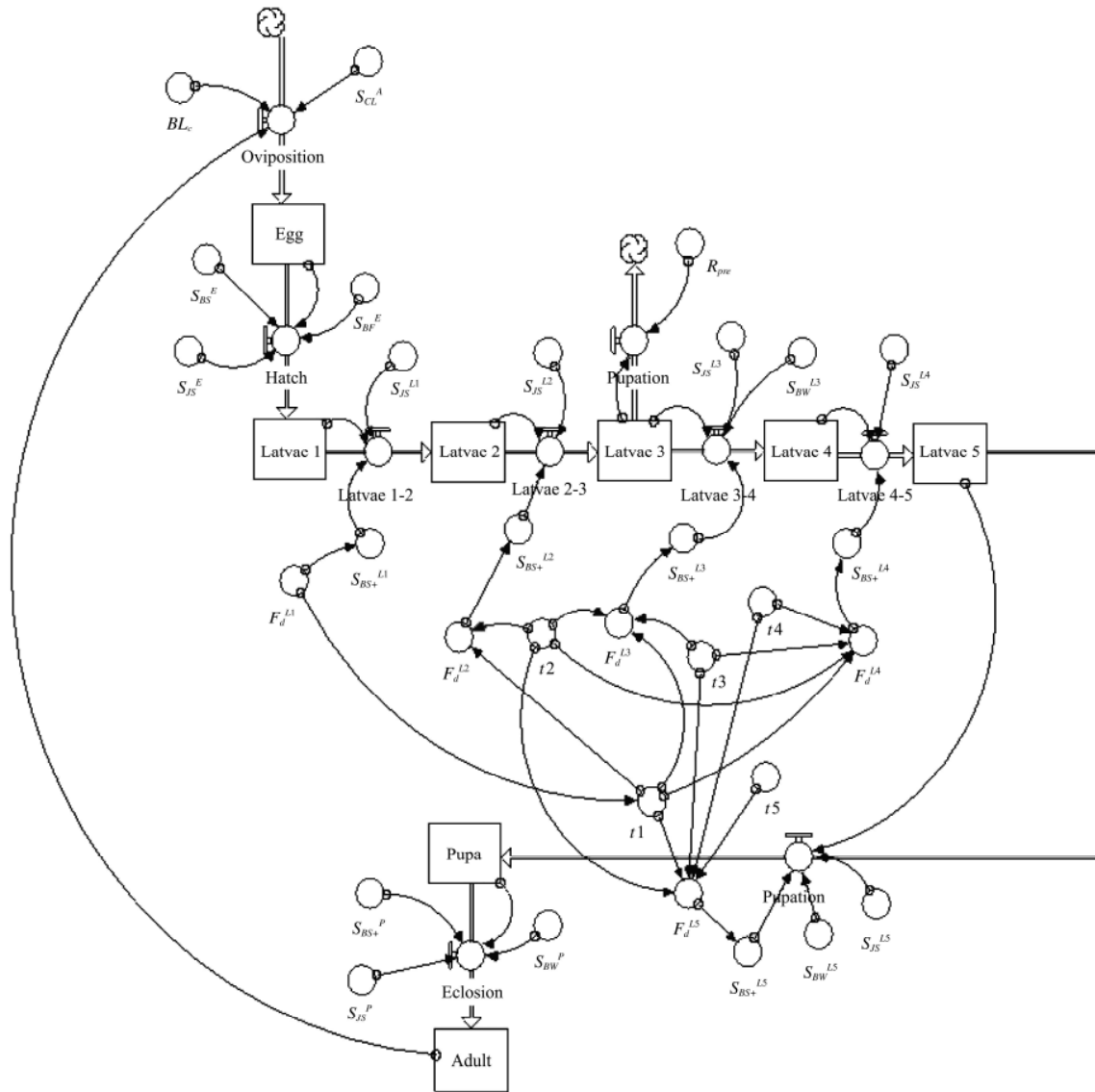


图 1 稻鸭共作系统中稻纵卷叶螟种群动态的概念模型
Fig.1 Concept model of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee population dynamics in the integrated rice-duck farming system

根据稻纵卷叶螟生长发育规律,可分为卵期、幼虫期、蛹期和成虫期4个虫态,其中幼虫期又分为5个龄级。在模型中,用8个库(Stock)分别表示稻纵卷叶螟的不同虫态或虫龄,其中Egg代表卵期,Larvae1, Larvae2, ..., Larvae5分别代表稻纵卷叶螟1~5龄幼虫,Pupa、Adult表示蛹期和成虫期的密度。从卵经孵化、发育至成虫,成虫产卵后再进行下一次发育过程构成反馈回路,虫态之间依次转换,形成8个流速变量,分别用“Hatch、Larvae1-2、Larvae2-3, ..., Larvae4-5”和“Pupation”、“Eclosion”、“Oviposition”来表示(图2)。根据卷叶螟自然种群生命表的分析数据,捕食、寄生、病死及其他等作用因子等,都会对稻纵卷叶螟各发育期的存活率产生不同程度的影响。在各项死亡因子中,因病死亡的稻纵卷叶螟仅出现于3龄、5龄幼虫及蛹期,由于寄生、捕食而引起死亡的稻纵卷叶螟涉及各个虫期。其中,以1龄幼虫被捕食及其他原因引起死亡的比例最大,其余依次为卵期、5龄、2龄、4龄、3龄幼虫。在模型中考虑了这些因素对稻纵卷叶螟数量的影响,将其视为控制变量,共计18个。此外,根据多年的观测数据,

稻纵卷叶螟种群的雌雄性比接近于 1:1, 因而雌虫所占的百分率可按 50% 计。单雌成虫平均产卵量计为 42 粒。

在模型中视稻纵卷叶螟种群的性比 (BL_c)、单雌产卵量 (S_{CL}^A) 为常量。



注: Oviposition 为产卵速率; Hatch 为卵进入幼虫 1 龄期的速率; Larvae1-2 为 1 龄幼虫转换为 2 龄幼虫的速率; Larvae2-3 为 2 龄幼虫转换为 3 龄幼虫的速率; ...; Pupation 为 5 龄幼虫转换为蛹的速率; Eclosion 为羽化速率; t_1, t_2, \dots, t_5 为时间; Predation、 R_{pre} 为分别表示鸭对 3 龄幼虫期稻纵卷叶螟卷苞的捕食量、捕食率; 其他参数的意义见表 1

图 2 稻鸭共作系统中稻纵卷叶螟种群的系统动力学模型

Fig.2 System dynamic model of *Cnaphalocrocis medinalis*(Guenee) population in the integrated rice-duck farming system

蜘蛛是稻田内捕食性天敌中的优势类群, 对稻纵卷叶螟种群具有重要的控制作用。根据庞雄飞等^[27]对稻纵卷叶螟第二代种群的研究, 在水稻生长期, 田间蜘蛛密度

$$F_d^{Li} = \frac{90}{1 + \exp(1.85 - 0.11t_i)} \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (1)$$

式中: F_d^{Li} 为蜘蛛密度; t_i 为时间, d; i 为幼虫虫龄。

若用 S_{BS}^{Li} ($i=1, 2, \dots, 5$) 表示稻纵卷叶螟幼虫期各龄级在捕食作用下的存活率, 其大小与蜘蛛密度 F_d^{Li} ($i=1, 2, \dots, 5$) 间的关系分别为

$$S_{BS+}^{L1} = 0.5083 - 0.0081 \times F_d^{L1} \quad (2)$$

$$S_{BS+}^{L2} = 0.6518 - 0.0081 \times F_d^{L2} \quad (3)$$

$$S_{BS+}^{L3} = 0.8534 - 0.0081 \times F_d^{L3} \quad (4)$$

$$S_{BS+}^{L4} = 0.8385 - 0.0081 \times F_d^{L4} \quad (5)$$

$$S_{BS+}^{L5} = 0.8880 - 0.0081 \times F_d^{L5} \quad (6)$$

向已经建立的稻纵卷叶螟系统动力学模型输入已知的数据或函数关系式, 令稻纵卷叶螟初始百穴卵量为 100 粒, 其他虫态的数量为 0, 以其为初值进行模拟。由于稻纵卷叶螟各虫态的发育历期不同, 模拟时不同虫态间的转换使用了“DELAY(<input>, <delay duration>, [<initial>])”这一函数, 以发育历期作为延迟的起始值, 该函数返回的值表示稻纵卷叶螟某虫态经历一段时间的发育后, 进入下一个虫态的数量。例如, 稻纵卷叶螟从卵期至幼虫 1 龄期的发育历期为 4 d, 由卵期进入幼虫 1 龄期的种群密度 (即图 2 中的流速变量“Hatch”)可表

示为 $\text{DELAY}(\text{Egg} \times S_{BS}^E \times S_{JS}^E \times S_{BF}^E, 4)$, 其中 $S_{BS}^E \times S_{JS}^E \times S_{BF}^E$ 表示虫卵在捕食、寄生和不懈 3 因素作用下的存活率。

模型运行后, 自动生成的主要动力学方程如下

$$\begin{aligned} \text{Larvae 1}(t) &= \text{Larvae 1}(t-dt) + (\text{Hatch} - \text{Larve1_2}) \times dt \\ \text{Larvae 2}(t) &= \text{Larvae 2}(t-dt) + (\text{Larve1_2} - \text{Larve2_3}) \times dt \\ \text{Larvae 3}(t) &= \text{Larvae 3}(t-dt) + (\text{Larve2_3} - \text{Larve3_4} - \text{Predation}) \times dt \\ \text{Larvae 4}(t) &= \text{Larvae 4}(t-dt) + (\text{Larve3_4} - \text{Larve4_5}) \times dt \\ \text{Larvae 5}(t) &= \text{Larvae 5}(t-dt) + (\text{Larve4_5} - \text{Pupation}) \times dt \\ \text{Pupa}(t) &= \text{Pupa}(t-dt) + (\text{Pupation} - \text{Eclosion}) \times dt \\ \text{Adult}(t) &= \text{Adult}(t-dt) + (\text{Eclosion}) \times dt \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\text{Egg}(t)$, $\text{Larvae1}(t)$, \dots , $\text{Pupa}(t)$, $\text{Adult}(t)$ 为某时刻 t 时稻纵卷叶螟种群卵、1~5 龄幼虫、蛹期和成虫期的密度。以卵为例, 在初始卵量每百穴卵量为 100 粒的情况下, 某时刻 t 的卵量可通过下面的语句来计算

$$\text{Egg}(t) = \text{Egg}(t-dt) + (\text{Oviposition} - \text{Hatch}) \times dt$$

$$\text{INIT Egg} = 100$$

INFLOWS:

$$\text{Oviposition} = \text{DELAY}(\text{Adult} \times S_{CL}^A \times \text{BL}_C, 6)$$

OUTFLOWS:

$$\text{Hatch} = \text{DELAY}(\text{Egg} \times S_{BS}^E \times S_{JS}^E \times S_{BF}^E, 4)$$

类似地, 可计算出稻纵卷叶螟种群在某时刻 t 所对应的其他虫态的密度。

2.2 参数设置

为了考察稻田蜘蛛和稻田放鸭对稻纵卷叶螟种群的控制作用, 将从以下两方面进行模拟:

一是不考虑鸭对稻纵卷叶螟的捕食 (即稻田不放鸭), 仅研究不同密度的稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟种群的控制作用。为此, 将模型中代表鸭通过捕食而使稻纵卷叶螟卷苞数减少的比率 (R_{pre}) 设为 0, 而将 1 龄幼虫期开始时的蜘蛛密度 (F_d^{L1}) 作为变量。根据庞雄飞等^[27]对稻田蜘蛛的观测数据, 设置每百穴 25.246、12.623 头和稻纵卷叶螟种群不受蜘蛛控制 (蜘蛛密度 F_d^{L1} 取 0) 3 种情景, 分别模拟稻纵卷叶螟各虫态随时间的动态变化。

二是将稻田蜘蛛的密度固定在每百穴 12.623 头这一水平, 综合考虑蜘蛛和鸭对稻纵卷叶螟的捕食作用。根据庞雄飞等^[27]对单作稻田稻纵卷叶螟第二代种群生命表的分析结果, 3 龄幼虫的存活率最高, 即 3 龄幼虫期蜘蛛对稻纵卷叶螟群的控制作用相对较弱。而稻鸭共作系统中由于鸭在田间的活动, 这个阶段它们对稻纵卷叶螟种群将会起到较为明显的控制作用。为此, 根据相关的文献报道^[25-26,28], 将鸭对稻纵卷叶螟卷苞的捕食率设为 30% 和 60% 这 2 个水平, 分别进行模拟。

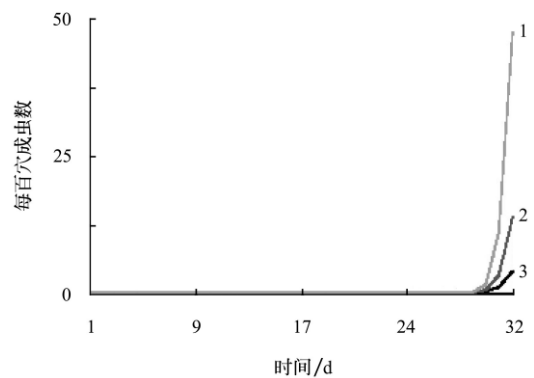
在模型运行过程中, 考虑到稻纵卷叶螟第二世代的发育历期为 32 d, 故将模型模拟时间设置为 1~32 d, 模拟步长设为 1 d。

3 结果与分析

3.1 稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟种群的控制作用

图 3 表示的是不考虑鸭对稻纵卷叶螟的捕食作用时,

稻纵卷叶螟成虫的数量动态。可以看出, 稻纵卷叶螟成虫在经历了 26 d 的发育历期后, 从第 30 天开始有成虫出现, 但 3 种情景下的数量及增速却不相同。当稻田蜘蛛的密度为每百穴 25.246、12.623 头, 稻纵卷叶螟经过一个世代, 即历期 32 d 后, 成虫的密度分别为每百穴 3.743 和 13.702 头, 说明如果稻田蜘蛛的数量减半, 稻纵卷叶螟成虫的密度将增加 3.7 倍左右。如果没有蜘蛛这一捕食性天敌存在, 稻纵卷叶螟种群的种群数量在成虫期显著增加, 在世代末期激增约 11 倍, 历期 32 d 后, 成虫密度可达每百穴 47.326 头, 与蜘蛛的密度为每百穴 25.246 头时的数量相比, 增加了 12.6 倍。



注: 由右至左, 曲线 1、2 和 3 分别代表稻田蜘蛛密度为每百穴 25.246、12.623 和 0 头时稻纵卷叶螟成虫的密度动态

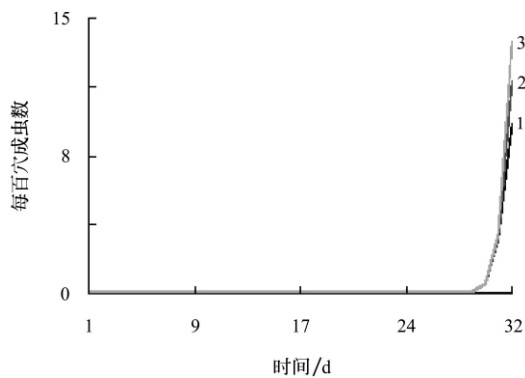
图 3 不同密度蜘蛛作用下稻纵卷叶螟成虫的密度动态变化曲线

Fig.3 Population dynamics of adult *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee under the control of spiders in rice paddy field

3.2 稻田蜘蛛和鸭对稻纵卷叶螟的控制作用

图 4 表示的是在蜘蛛和鸭共同作用下稻纵卷叶螟成虫的动态变化。可以看出, 在蜘蛛和 3 龄幼虫期鸭捕食共同作用下, 稻纵卷叶螟虫卵在经历了 26 d 的发育历期后, 从第 30 天也开始有成虫出现。在稻田蜘蛛密度为每百穴 12.623 头的情况下, 由于鸭对稻纵卷叶螟卷苞的捕食, 成虫期的种群数量均比没有鸭的情况下低。随着鸭捕食率的增加, 稻纵卷叶螟成虫数量有明显减少。在捕食率为 60%、30% 的情景下, 稻纵卷叶螟的成虫数量为每百穴 9.129 和 11.480 头, 比没有鸭时分别降低了 33.4% 和 16.2%。说明稻田养鸭后, 田间蜘蛛维持在一定密度, 就可以对稻纵卷叶螟种群起到较好的控制效果。

庞雄飞等^[15]利用状态空间分析法对稻田蜘蛛密度为每百穴 25.246、12.623 和 0 头的情景下, 经过一个世代, 即历期 32 d 后稻纵卷叶螟的数量进行了估算, 得到 3 种情景下稻纵卷叶螟的数量分别为初始数量的 0.0446、0.1640 和 0.5823 倍。假设稻纵卷叶螟初始标准卵量也以每百穴 100 粒计, 按上述方法计算得到的历期 32 d 后稻纵卷叶螟的成虫密度为每百穴 4.46、16.4 和 58.23 头, 与本研究的结果相比, 前者的预测结果平均偏高 20.6% 左右, 主要原因可能是由于状态分析法假设各虫期在最后的年龄组才出现死亡, 成虫期第 3 天开始产卵, 各天的产卵是均匀分布的, 而在系统动力学的模型模拟中各虫期的死亡率、成虫期的产卵量都是均等的。



注：由右至左，曲线 1、2 和 3 分别代表稻田蜘蛛密度均为每百穴 12.623 头、鸭对稻纵卷叶螟卷苞捕食率分别为 60%、30% 和 0 的情景下稻纵卷叶螟成虫的密度动态

图 4 蜘蛛和鸭共同作用下稻纵卷叶螟成虫的密度动态变化曲线
Fig.4 Population dynamics of adult *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee under the control of spiders and ducks in rice paddy field

3.3 稻纵卷叶螟第三代卵量的预测

表 2 列出的是不考虑鸭对稻纵卷叶螟的捕食作用时，稻纵卷叶螟第三代虫卵的数量。可以看出，稻纵卷叶螟第二代成虫陆续羽化并相继产卵，在完成了为期 32 d 的发育历期后（第三代稻纵卷叶螟的历期从第 33 天开始），上述不同模拟情景所对应的卵量呈现了较大差异。在不同密度稻田蜘蛛的作用下，第三世代稻纵卷叶螟 4 d 后的虫卵数以二代蜘蛛的密度为每百穴 25.246 头时的数量为最低。如果第二代稻纵卷叶螟生长期没有蜘蛛的控制，到第三代卵期结束时，将会有近 13 倍的虫卵出现。

表 2 不同密度蜘蛛作用下稻纵卷叶螟第三代卵密度的动态
Table 2 Egg population of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee in 3rd generation under the control of spiders

时间/d	第三代卵量 1	第三代卵量 2	第三代卵量 3
1	100	100	100
2	56.114	56.114	56.114
3	12.227	12.227	12.227
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
32	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮
37	2.228	8.156	28.960
38	20.050	73.406	260.639
⋮	⋮	⋮	⋮

注：第三代卵量 1、第三代卵量 2 和第三代卵量 3 分别表示稻田蜘蛛密度为每百穴 25.246、12.623 和 0 头的情景下稻纵卷叶螟第三代虫卵的密度。

表 3 列出的是在蜘蛛、鸭共同捕食的作用下稻纵卷叶螟第三代虫卵的密度。可以看出，第二代稻纵卷叶螟由于鸭在稻田的捕食，使得成虫数量有所减少，从而降低了第三代卵期末的虫卵数。与无鸭捕食稻纵卷叶螟卷苞的情景相比，捕食率为 60% 情景下稻纵卷叶螟第三代卵期末的虫卵降低了 6.7% 左右。说明在一定的蜘蛛密度下，如果鸭的捕食率高，对下代稻纵卷叶螟的虫卵密度将会有较好的控制作用。

表 3 蜘蛛、鸭共同作用下稻纵卷叶螟第三代卵密度的动态
Table 3 Egg population of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee in 3rd generation under the control of spiders and ducks in rice paddy field

时间/d	第三代卵量 1	第三代卵量 2	第三代卵量 3
1	100	100	100
2	56.114	56.114	56.114
3	12.227	12.227	12.227
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
32	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮
37	8.156	8.156	8.156
38	68.512	70.959	73.406
⋮	⋮	⋮	⋮

注：第三代卵量 1、第三代卵量 2 和第三代卵量 3 分别表示蜘蛛密度均为每百穴 12.623 头、鸭对稻纵卷叶螟卷苞捕食率分别为 60%、30% 和 0 的情况下稻纵卷叶螟第三代虫卵的密度。

4 讨 论

根据研究过程和分析结果，总结出以下可供进一步探讨的内容：

1) 在稻鸭共作系统中利用鸭控制害虫时，不能忽视天敌，尤其是蜘蛛对害虫的控制作用。利用鸭的食性和生活习性，在一定程度上可以减轻稻纵卷叶螟的危害，但不能完全依靠鸭取食以控制全生育期虫量，特别是稻纵卷叶螟大面积发生或稻株上部发生稻纵卷叶螟危害时，鸭对稻纵卷叶螟的控制能力和程度十分有限。在实际中可根据稻田害虫发生和天敌消长规律、天敌密度及虫情等，适时放鸭或采用释放天敌等相关措施调控鸭对害虫的捕食率，使一定数量的天敌和鸭共同发挥防虫、控虫的作用。如在虫害发生初期，稻田害虫的密度相对较低，天敌的数量也维持在较低水平，不能充分发挥除虫作用，可向稻田投放一定数量的鸭或在早期补充散放少量天敌，提高对害虫的控制效能。

2) 在中国华南稻鸭共作生产区，早稻一般在 4 月初插秧，在插秧后 7 d 左右（4 月中旬）放雏鸭，齐穗前（一般在 5 月底 6 月初）将鸭收回圈养，稻鸭共作的时间为 50~55 d。当地稻纵卷叶螟第二代的发生时间在 4 月下旬至 5 月上中旬，正值鸭在稻田频繁活动觅食期，因而稻纵卷叶螟第二代的整个发育过程均会不同程度地受到鸭活动的影响。本研究仅选择了 3 龄幼虫期这一关键时段来研究鸭对稻纵卷叶螟种群的控制作用，如果考虑鸭全天候在田间的活动及对稻纵卷叶螟从卵至成虫期的连续影响，这种控制作用可能会更为明显。为此，还需要进一步明确鸭对稻纵卷叶螟各虫态发育历期及存活率产生的影响，并对其控制稻纵卷叶螟种群的功能进行总体评价。

3) 本研究将系统动态模拟软件 STELLA 引入到害虫种群生态学的研究中，在对稻田害虫种群进行逐日动态模拟的过程中，使用者只需熟悉模拟系统的结构、功能和行为之间的动态变化关系，即可设计系统动力学因果

反馈流程分析图,运行后由系统自动产生程序和运算公式等,因而这种模拟方法易为昆虫专业背景的初学者掌握。此外,通过 STELLA 软件的可视化环境对模型结构、运行参数和运行结果进行调整修正,可迅速、便捷地为害虫的优化管理提供丰富的信息,也为害虫防治工作进一步向着定量化、模型化和信息化的方向发展提供了科学参考。

5 结 论

借助系统工程的分析方法研究害虫种群系统的控制是近年来害虫种群生态学研究的重要途径之一。本研究分析了稻鸭共作系统中捕食性天敌蜘蛛及鸭对稻纵卷叶螟的影响,并根据稻纵卷叶螟不同虫态的转化和生长发育动态构成系统内部的反馈关系,构建了稻纵卷叶螟种群控制的系统动力学框架模型,对不同情景下稻纵卷叶螟种群的数量动态进行了模拟,同时对稻纵卷叶螟第三代卵密度进行了预测,得出以下结论:

1) 若第二代稻纵卷叶螟初始的百穴卵量为 100 粒,稻田蜘蛛密度为每百穴 12.623 头,稻纵卷叶螟成虫的密度将达每百穴 13.702 头;

2) 如果同时考虑了鸭对 3 龄幼虫期稻纵卷叶螟卷苞捕食率为 60%,稻纵卷叶螟成虫的密度可降至每百穴 9.129 头。上述两种情景下,稻纵卷叶螟三代卵期末的卵密度分别为每百穴 73.406 和 68.512 粒,鸭的捕食使虫卵降低了 6.7% 左右(表 3)。从而得知稻田蜘蛛和鸭的共同作用对稻纵卷叶螟的控制效果优于仅受同等数量蜘蛛控制时的情况。

【参 考 文 献】

- [1] 张孝羲. 稻纵卷叶螟迁飞规律和预测预报研究[EB/OL]. <http://www.caas.net.cn/caas/achievement/AgriAchievementText.asp?id=1482.html>, 2008-10-31
- [2] 庞雄飞. 昆虫种群生命系统研究方法概述[J]. 昆虫天敌, 1986, 8(3): 176—187.
Pang Xiongfei. On the methodology of the insect population life systems[J]. Natural Enemies of Insects, 1986, 8(3): 176—187. (in Chinese with English abstract)
- [3] 庞雄飞. 昆虫种群系统的研究概述[J]. 生态学报, 1990, 10(4): 373—378.
Pang Xiongfei. Review on population of insects[J]. Acta Ecologica Sinica, 1990, 10(4): 373—378. (in Chinese with English abstract)
- [4] 庞雄飞, 梁广文. 害虫的种群系统控制[M]. 广州: 广东科技出版社, 1995.
- [5] Shoemaker C. Applications of dynamic programming and other optimization methods in pest management[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(5): 1125—1132.
- [6] Watt K E F. Mathematical population models for five agricultural crop pests[J]. Memoirs of the Entomological Society of Canada, 1963, 32: 83—91.
- [7] Lewis E R. Network Models in Population Biology[M]. New York: Springer-Verlag, 1977.
- [8] 尹长民, 王洪全. 系统工程与害虫防治[J]. 系统工程, 1984, 2(1): 9—12.
- [9] 张孝羲, 耿济国, 顾海南, 等. 稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis* Guenee)种群生命系统模型的研究[J]. 生态学报, 1988, 8(1): 18—26.
Zhang Xiaoxi, Geng Jiguo, Gu Hainan, et al. Modeling population of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee[J]. Acta Ecologica Sinica, 1988, 8(1): 18—26. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王星, 曾爱平. 基于系统科学的害虫种群系统控制研究[J]. 广西植保, 2009, 22(3): 24—26.
Wang Xing, Zeng Aiping. Population control of insects based on system science[J]. Guangxi Plant Protection, 2009, 22(3): 24—26. (in Chinese with English abstract)
- [11] 庞雄飞, 侯任环, 梁广文, 等. 稻纵卷叶螟防治策略的探讨(一): 稻纵卷叶螟生命表及其主要死亡因子分析[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 1982, 3(2): 13—27.
Pang Xiongfei, Hou Renhuan, Liang Guangwen, et al. Strategies for population control of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee: Life table and key factors analysis[J]. Journal of South China Agricultural University: Natural Science Edition, 1982, 3(2): 13—27. (in Chinese with English abstract)
- [12] 庞雄飞. 种群数量控制指数及其应用[J]. 植物保护学报[J], 1990, 17(1): 11—16.
Pang Xiongfei. Population control index and its application[J]. Journal of Plant Protection, 1990, 17(1): 11—16. (in Chinese with English abstract)
- [13] 庞雄飞, 梁广文, 尤民生, 等. 昆虫种群生命系统研究的状态方程[J]. 华南农业大学学报, 1988, 9(2): 1—10.
Pang Xiongfei, Liang Guangwen, You Minsheng, et al. State-space approach to population life systems[J]. Journal of South China Agricultural University, 1988, 9(2): 1—10. (in Chinese with English abstract)
- [14] Leaver J D, Unsworth C P. System dynamics modelling of spring behaviour in the Orakeikorako geothermal field[J]. New Zealand Geothermics, 2006, 658: 1—14.
- [15] Voinov A A, Voinov H, Costanza R. Surface water flow in landscape models: 2. Patuxent watershed case study[J]. Ecological Modelling, 1999, 119(2/3): 211—230.
- [16] Mageau M T, Costanza R, Ulanowicz R E. Quantifying the trends expected in developing ecosystems[J]. Ecological Modelling, 1998, 112(2/3): 1—22.
- [17] Boumans R M, Villa F, Costanza R. Non-spatial calibrations of a general unit model for ecosystem simulations[J]. Ecological Modelling, 2001, 146(1/2/3): 17—32.
- [18] Sage Jr R W, Patten B C, Salmon P A. Institutionalized Model-Making and ecosystem-based management of exploited resource populations: A comparison with instrument flight[J]. Ecological Modelling, 2003, 170(2/3): 107—128.
- [19] 杭文, 李旭宏, 何杰, 等. 基于系统动力学模型的超载运输对策绩效仿真[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(2): 22—30.
Hang Wen, Li Xuhong, He Jie, et al. Overloading countermeasure performance simulation based on system dynamo model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5(2): 22—30. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈虎, 韩玉启, 王斌. 基于系统动力学的库存管理研究[J]. 管理工程学报, 2005, 19(3): 132—140.
Chen Hu, Han Yuqi, Wang Bin. Research of stock control based on system dynamics model[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2005, 19(3):

- 132—140. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王婷, 吴元宁, 张大伟, 等. 常用生态模拟软件探讨[J]. 农业网络信息, 2005, (11): 98—104.
- [22] 汤洁, 余孝云, 林年丰. 吉林省大安市生态环境规划系统动力学仿真模型[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1178—1183. Tang Jie, She Xiaoyun, Lin Nianfeng. A study on system dynamics model in eco-environment planning for Da'an of Jilin Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5): 1178—1183. (in Chinese with English abstract)
- [23] 齐国君, 秦冉冉, 肖满开, 等. 安徽安庆混作稻区稻纵卷叶螟第三、四代发生规律研究[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(5): 513—518. Qi Guojun, Qin Ranran, Xiao Mankai, et al. Occurrence of the third and fourth generations of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee in the mixed cropping rice region in Anqing, Anhui Province[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(5): 513—518. (in Chinese with English abstract)
- [24] 姚卫平, 施文, 陈国明. 稻田养鸭对水稻病虫害草害的控制效果研究[J]. 安徽农学通报, 2006, 12(5): 207—208. Yao Weiping, Shiwen, Chen Guoming. Controlling effects of rice diseases, pests and weeds in rice-duck integration system [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2006, 12(5): 207—208. (in Chinese with English abstract)
- [25] 禹盛苗, 金千瑜, 欧阳由男, 等. 稻鸭共育对稻田杂草和病虫害的生物防治效应[J]. 中国生物防治, 2004, 20(2): 99—102. Yu Shengmiao, Jin Qianyu, Ouyang Younan, et al. Efficiency of controlling weeds, insect pests and diseases by raising ducks in the paddy fields[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2004, 20(2): 99—102. (in Chinese with English abstract)
- [26] 朱凤姑, 丰庆生, 诸葛梓. 稻鸭生态结构对稻田有害生物群落的控制作用[J]. 浙江农业学报, 2004, 16(1): 37—41. Zhu Fenggu, Fen Qingsheng, Zhuge Zi. Control impact of rice-duck ecological structure on harmful biotic community of rice fields[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2004, 16(1): 37—41. (in Chinese with English abstract)
- [27] 庞雄飞, 梁广文, 尤民生. 稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟生命系统的控制作用[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 1988, 9(8): 15—23. Pang Xiongfei, Liang Guangwen, You Minsheng. Controlling effects of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee by spider in paddy rice field[J]. Journal of South China Agricultural University: Natural Science Edition, 1988, 9(8): 15—23. (in Chinese with English abstract)
- [28] 丁文斌, 陶吉平, 李勤凤, 等. 稻鸭共育对稻田杂草和病虫害生物防治效应研究[J]. 上海农业科技, 2006, (1): 99—100. Ding Wenbin, Tao Jiping, Li Qinfeng, et al. Study on efficiency of controlling weeds, insect pests and diseases in rice-duck integration system[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2006, (1): 99—100. (in Chinese with English abstract)

Population control modelling of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee in rice-duck integrated farming system

Qin Zhong^{1,2}, Zhang Jiaen^{1,2*}, Luo Shiming^{1,2}, Zhang Jin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ecological Agriculture of Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Key Laboratory of Agro-ecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To examine the application prospect of system dynamics approach in pest population optimal management and prediction, population dynamics of the 2nd generation of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee was investigated in this paper. Influences of the dominant predators including spiders and ducks in rice paddy field on *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee were analyzed and a frame model was established. Using the system dynamics method, population dynamics of the *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee was simulated and forecasted under different scenarios. Results indicated that with a number of 100 initial eggs and a defined spider density in 12.623 ind/100 hill, the estimated adult *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee population with ducks predation at a constant rate of 60% was 9.129 ind/100 hill. The activities of the ducks reduced the field ovum of 3rd generation by 6.7%. The main conclusion from the model results was that a more effective suppression of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee population could be implemented with optimum combining the function of the spiders and ducks in pest control. The results are expectative to provide worthy informations and scientific guides with rapid and convenient ways

Key words: pest control, population dynamics, biocontrol, *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee, population control, STELLA model, spider, duck