洞庭湖区东方田鼠种群生长与灾变过程建模与仿真分析

吕 欣，邓宏钟，李 勇，吴 俊，谭跃进
(信息系统与管理学院管理系，国防科技大学，长沙 410073)

摘 要：根据洞庭湖区东方田鼠的生物特性和周围生态环境的特点，**建立了具有年龄结构的洞庭湖区东方田鼠种群增长离散模型。通过模型的稳定性和仿真分析，探讨了洞庭湖区东方田鼠种群增长的一般性规律及其灾变过程。**研究结论对洞庭湖区东方田鼠历年频频爆发成灾给出了合理解释，并对鼠灾的最佳防治策略提出了建议。

关键词：东方田鼠；种群增长；年龄结构；离散模型；鼠灾
中图分类号：N94 **文献标识码：**A **文章编号** 1004-731X (2008) 23-6575-05

Modeling and Simulation Analysis on Growth and Catastrophe of Microtus Fortis in Dong Ting Lake Area

LV Xin, DENG Hong-zhong, LI Yong, WU Jun, TAN Yue-jin
(Department of Management, School of information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the biological characteristics of Microtus fortis and the entironment of Dong Ting Lake Area, *an age-structured discrete model for its population growth was constructed. The general rules and the catastrophe process of its population dynamics were discussed by stability analysis and simulation.* A reasonable explanation for the frequent explosion of Microtus fortis in DongTing Lake Area was given and some optimal control strategies of rat disaster were proposed.
Key words: Microtus fortis; population growth; age-structure; discrete model rat disaster

引 言

洞庭湖区东方田鼠的频频爆发成灾，一直是许多学者研究的热点问题。中国科学院亚热带农业生态研究所(原中国科学院长沙农业现代化研究所)的武正军、李波、王勇等[1-6]对洞庭湖区东方田鼠的生物特性进行了长年的研究，上海试验动物研究中心的柏熊、沈志敏等[7]对东方田鼠进行了人工繁育观察。郭永旺等[4]对洞庭湖区东方田鼠爆发原因进行了分析，认为围湖筑堤和蛇等大量天敌被捕杀是东方田鼠爆发的最主要原因，并建议采用阻断田鼠迁移路线和组织大面积统一化学灭鼠等措施控制鼠灾。这些方法在 2007 年鼠灾的控制中得到了充分应用。邹邵林、郭聪等[8]分析了环境演变及三峡工程对洞庭湖区东方田鼠种群的影响。对重大灾害尤其是火灾后鼠类群落的恢复及鼠类对生态系统恢复的作用，国外文献已有一些研究[9-12]报道，如 Simons L H 研究了北美沙漠火灾与鼠类种群数量动态变化的关系，Haim A 与 Izhaki I 研究了火灾后生态保护对鼠类群落恢复的影响.张美文等[13]通过长年的实地调查，总结鼠类数据变化的规律，研究了洞庭湖区洪灾淹没区鼠类群落结构恢复的生态过程，其研究结论认为，目前广泛采用的化学防治仅能作为降低害鼠密度的临时性措施，控制鼠害时，应加强和重视以改造生态环境为主的综合防治措施，这才是控制害鼠种群的根本出路。

然而，目前还没有研究者建立洞庭湖区东方田鼠的种群生长模型，这使得对其种群增长和爆发的理解都只能停留在经验的、感性的认识上。本文试图从系统动力学的角度，建立具有年龄结构的东方田鼠种群增长离散模型，并根据该模型进行仿真，分析鼠灾爆发原因及其控制对策。

1 洞庭湖区自然环境及东方田鼠生物特性

洞庭湖区位于湖南省北部，属中亚热带向北亚热带的过渡地区，气候温暖湿润。全区由洞庭湖湖泊河汊、河潮冲积平原及环潮岗地与低丘陵组成。全区共有防洪大堤 2900 *Km*，保护耕地 58.2 万 hm^2 [13]。洞庭湖区东方田鼠属于东方田鼠长江亚种(*Microtus fortis calamorum*)，该鼠喜欢低洼、草茂盛、土松软的环境，在洞庭湖它们主要生活在湖滩草地上面，啃食苔草、芦苇。洞庭湖每年 l1 月至 4 月为枯水期，一般在 5 月开始发生洪水，7-8 月水位涨至最高峰，9～10 月回落。随着水位上涨，东方田鼠被迫迁移到沿岸垸内稻田和岗地，若当年种群数量较多，则积聚成灾，危害农作物。汛期过后，东方田鼠重新迁回湖洲之中，其上丰富的食物和广袤的生活环境，加上近年来蛇等天敌被大肆捕杀，使得东方田鼠在湖洲上几乎没有天敌，种群数量增长极快。

研究表明，洞庭湖区东方田鼠平均寿命为一年左右(室内饲养稍长)，雌性比约为 43.0%，该鼠繁殖能力强，全年均能繁殖，盛夏 5-7 月怀孕率较低，冬季 12-2 月怀孕率比同域其它鼠种著偏高，平均怀孕率约为 29.2%。平均胎仔数为

收稿日期：2007-10-08 **修回日期：**2008-02-22
作者简介：吕欣(1984-)，男，湖南常德人，博士，研究方向为复杂网络理论及应用；**邓宏钟**(1974-)，湖南衡阳人，男，副教授，硕导，研究方向为复杂系统理论，分布式人工智能和遗传算法；**李勇**(1979-)，男，湖南长沙人，博士，研究方向为复杂保障网络仿真与评价；**吴俊**(1980-)，男，湖北荆门人，博士，研究方向为系统管理与综合集成，复杂网络理论；**谭跃进**(1958-)，男，湖南长沙人，教授，博导，研究方向为系统理论与综合集成。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5.13 士 12 只。雌鼠和雄鼠的繁殖强度随年龄增长而递增。室内饲养的东方田鼠妊娠期约 20 天[2]。且雌鼠产下幼仔后可在 24 小时内发情、交配、妊娠[14]。目前的研究表明东方田鼠的交配模式为乱交制[15]，张承德报道东方田鼠的交配模式属于#11 模式，即无限制抽动、多次插入和多次射精[16]。雌鼠约 50-60 天性成熟，雄鼠稍迟[2,3,14]。该鼠具有一定比例的杀幼行为，关于杀幼的比例和规律目前尚无定论，可参见沈志民和余家璜[17]的研究报道。

2 东方田鼠种群增长离散模型

借鉴于文[18]的研究方法，设湖区东方田鼠的最大寿命为 A(天)，将区间 $[0,A]$ 分成 n 个相等的子区间，每个子区间长度为 $h=A/n$，从 t_0 开始将时间也按长度分为 h 的间隔进行划分，记 $t_j=jh$，$j=0,1,2\cdots$。记 $t=t_j$ 时年龄在区间 $[(k-1)A/n,kA/n)$ 的田鼠数量为 $x_k(t_j)$，$k=1,2,\cdots,n$，$j=0,1,2\cdots$，则 t_j 时刻湖区田鼠总数为 $X(t_j)=\sum_{j=1}^{n}x_k(t_j)$。

根据第 1 节，东方田鼠的出生率受雌性比、怀孕率和胎仔数的影响，实际上随着种群规模的扩大，食物、配偶和空间等资源的限制导致种群出生率还要受种群规模的影响，因此定义湖区东方田鼠在 $[t_j,t_{j+1})$ 时间内年龄在 $[(k-1)A/n,kA/n)$ 内生育的幼鼠数为 $b_k(X(t_j))x_k(t_j)$，则有：

$$b_k(X(t_j))=\alpha_k(X(t_j))\beta_k(X(t_j))\gamma_k(X(t_j)) \tag{1}$$

其中 $\alpha_k(X(t_j))$，$\beta_k(X(t_j))$，$\gamma_k(X(t_j))$ 分别表示该年龄段的雌性比、怀孕率和胎仔数。

进一步考虑季节因素对湖区东方田鼠生育的影响，可定义生育率

$$b_k(X(t_j),t_0,t_j)=\alpha_k(X(t_j),t_0,t_j)\beta_k(X(t_j),t_0,t_j)\gamma_k(X(t_j),t_0,t_j) \tag{2}$$

类似地，定义在 $[t_j,t_{j+1})$ 时间内年龄在 $[(k-1)A/n,kA/n)$ 内死亡的东方田鼠数量为 $d_k(X(t_j),t_0,t_j)x_k(t_j)$，$d_k(X(t_j),t_0,t_j)$ 表示受种群数量和季节因素影响的死亡率。

注意到年龄随时间同步增长，于是得到如下东方田鼠种群增长离散模型：

$$\begin{cases} x_1(t_{j+1})=\sum_{k=1}^{n}b_k(X(t_j),t_0,t_j)x_k(t_j) \\ x_{k+1}(t_{j+1})=(1-d_k(X(t_j),t_0,t_j))x_k(t_j) \\ X(t_j)=\sum_{k=1}^{n}x_k(t_j) \\ j=1,2,\cdots \end{cases} \tag{3}$$

其中，$1-d_k(X(t_j),t_0,t_j)$ 称为年龄别存活率。

如果将出生率和死亡率视为与种群数量和季节无关的常量，则得到如下简化的线性模型：

$$\begin{cases} x_1(t_{j+1})=\sum_{k=1}^{n}b_kx_k(t_j) \\ x_{k+1}(t_{j+1})=(1-d_k)x_k(t_j) \quad k=1,2,\cdots,n-1 \\ b_k=\alpha_k\beta_k\gamma_k \\ X(t_j)=\sum_{k=1}^{n}x_k(t_j) \\ j=1,2,\cdots \end{cases} \tag{4}$$

3 仿真分析

为了观察洞庭湖区东方田鼠种群增长的一般性规律，首先考察方程(4)所描述的线性模型。

根据第 1 节的介绍，取自然条件下东方田鼠的平均寿命 A=360 天，由于其妊娠期约为 20 天而且可以在产仔后一小时内发情、交配和重新怀孕，故取 h=20 天，则 n=18，即将东方田鼠分为 18 个年龄段，对所有 k=1,2,… 18，雌性比 $\alpha_k=43\%$，怀孕率 $\beta_k=29.2\%$，平均胎仔数 $\gamma_k=5.13$(只)，则出生率 $b_k=\alpha_k\beta_k\varphi_k=0.6441$，由于性成熟需要 60 天，故又令 $b_1=b_2=b_3=0$。

设某次汛期过后，残留的东方田鼠迁移到洞庭湖的湖洲中，开始繁殖增长过程。洞庭湖区农田面积多达 400 万亩，2007 年鼠灾时每亩农田鼠的数量一度达到 500 只即总共约计 20 亿只。由于每亩 500 只的数量过大，本文将采用每亩 50 只即共约 2 亿只作为鼠灾爆发时的数量。下面从四方面进行仿真。

3.1 种群数量稳定性分析

模型(4)解的渐近性态可以通过构建 *Leslie* 模型[19-21]进行分析，由于求解 *Leslie* 模型中矩阵 L 的正特征值[22,23]不易计算，此处采用文[18]所定义的净生育率来对模型(4)所描述的东方田鼠种群数量解的渐近性进行分析定义

$$\begin{aligned} N&=b_1+b_2(1-d_1)+\cdots+b_{18}(1-d_1)\cdots(1-d_{17}) \\ &=0.6441\times(1-d)^3\times\frac{1-(1-d)^{15}}{1-(1-d)} \end{aligned} \tag{5}$$

为模型(4)的净生育率，则由[23,24]，有：当 $N>1$ 时，$\lim_{t_j\to+\infty}X(t_j)=0$；当 $N<1$ 时，$\lim_{t_j\to+\infty}X(t_j)=+\infty$；当 $N=1$ 时，$\lim_{t_j\to+\infty}X(t_j)=c$。

由于方程 $N=1$ 在 $(0,1)$ 上有一个实数解 $d^*=0.2591$，且不难证明，随着 d 取值的不断增大，N 的值是递减的。那么有：

当平均死亡率为 $d=0.2591$ 时，东方田鼠的种群数量会达到一个稳定状态(等于常量 c)；当 $d>0.2591$ 时，种群数量趋近于零，东方田鼠不会泛滥成灾；当 $d<0.2591$ 时，种群数量会出现无限增长，这也是发生鼠灾的原因。图 1 描述了上述过程。

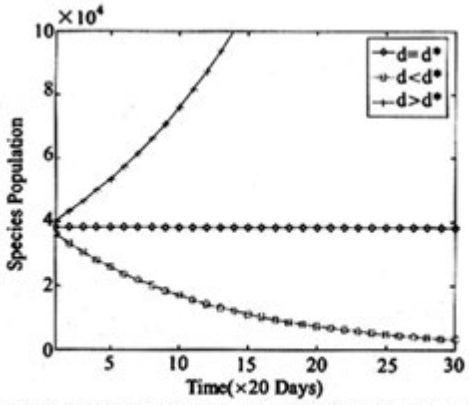

图 1 不同死亡率下东方田鼠种群数量的渐近性质(初始种群数量为每个年龄段各 1 万只，共 18 万只，出生率 $b=0.6441$)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2 初始种群数量对种群增长的影响

为了考察初始种群数量对种群增长的影响，取出生率 $b=0.6441$，死亡率为 $d=0.2$，作如下两方面的仿真分析：(1)在 30×20 天内，不同的初始种群数量对种群数量演化的影响；(2)比较能在 10×20 天到 30×20 天内使种群规模达到 2 亿只所需最小初始种群数量。

图 2 反映了不同的初始种群数量与种群规模达到 2 亿只所需要的时间(以下统称为成灾时间)。此处初始种群数量取最小为 4 万即每个年龄段 2222 只，到最大 4 千万即每个年龄段 222 万只，每隔 4 万作为一个新的初始种群数量，共计算了 1000 个不同初始种群数量下的成灾时间。分析图 1 可以发现，初始种群大小与成灾时间为对数意义下的线性关系，即只有当初始种群变化较大时，才能引起成灾时间的显著变化。比如，当初始种群 $S_0=248$ 万时，成灾时间为 18×20 天，然而当成灾时间为 17×20 天时，初始种群最小需达到 $S_0=392$ 万只，提高了 58%。可见初始种群的微小变化不会对东方田鼠种群规模从初始状态演化直至成灾所需要的时间产生很大影响，对鼠灾的控制，关键不在于控制初始种群，使用毒药毒杀始终是一时之计，不能起到长远的作用。

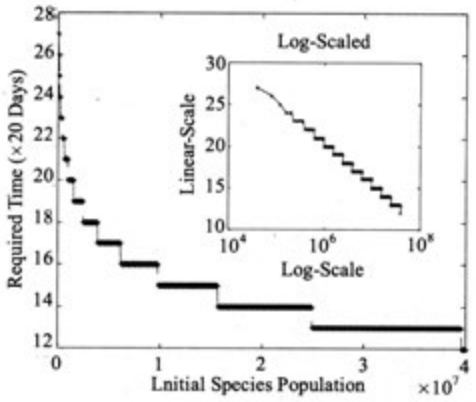

图 2 种群规模达到 2 亿只所需要时间。横轴为初始种群数量，纵轴表示所需时间(×20 天)。出生率 $b_k=0.6441$，死亡率 $d_k=0.2$。(小图是将横轴采用对数坐标的表示形式)

3.3 死亡率对东方田鼠种群增长的影响

3.2 节的仿真分析表明了初始种群数量与成灾时间的对数意义下的线性关系，为了探索能控制东方田鼠种群增长的有效措施，下面讨论天敌对东方田鼠种群增长的影响。

天敌对种群增长的影响主要从死亡率上来体现，不妨认为天敌的存在导致种群死亡数量增加一定比例，那么，可以通过死亡率的变化来体现。增加了天敌因素的种群增长模型的死亡率为：$\dot{d}_k=d_k+p_k$，p_k 表示 $x_k(t_j)$ 被天敌捕杀的比例。

图 3 描绘了在出生率 $b=0.6441$，初始种群取每个年龄段 1 万只共 18 万只时，(之所以取 18 万只是因为该规模的成灾时间约为 1 年左右)不同死亡率下的成灾时间变化情况。

可以很明显的看出，随着死亡率的增加，成灾时间是呈指数增长的(“J”型)，并在 $\dot{d}\to 0.2591$ 时趋于无穷。小坐标呈现了死亡率在 0.2 到 0.3 之间变化时成灾时间的变动情况：死亡率几乎每变动 0.001(对应于被天敌捕杀的比例每增加 1‰)，成灾时间就会延后一个周期(20 天)，而且，死亡率越高，其变动引起的成灾时间变动越大，如死亡率从 0.229 增加到 0.230 时，成灾时间即从 37×20 天增加至 39×20 天。

仿真结果表明，天敌因素对东方田鼠种群增长的影响是非常显著的，若在种群增长过程中引入天敌且捕杀比例为 1%，使死亡率从 0.20 增至 0.21，成灾时间将从 19×20 天增至 23×20 天，延缓了 4×20 天即两个月。

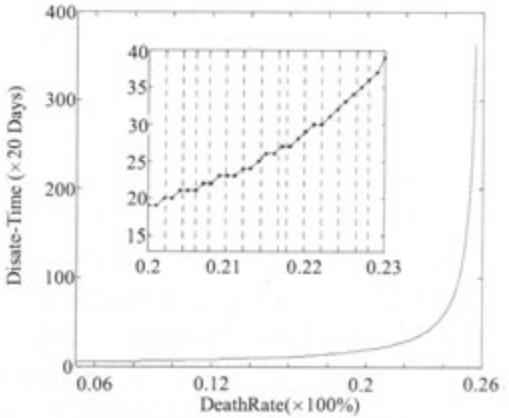

图 3 死亡率对成灾时间的影响

3.4 出生率对东方田鼠种群增长的影响

由 3.1 节的分析方法，解

$$b^*\times(1-0.2)^3\times\frac{1-(1-0.2)^{15}}{1-(1-0.2)}=1 \tag{6}$$

得到当死亡率 $d=0.2$ 时模型(4)的平衡解 $b^*=0.4049$，那么有：当平均出生率为 $b=0.4049$ 时，东方田鼠的种群数量会达到一个稳定状态(等于 c)；当 $b<0.4049$ 时，种群数量趋近于零，东方田鼠不会泛滥成灾；当 $b>0.4049$ 时，种群数量会出现无限增长，发生鼠灾。于是观察出生率在 0.41 至 1.00 之间变化时成灾时间的变动情况，如图 4 所示。

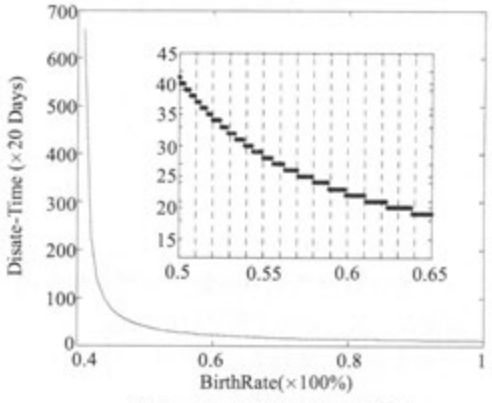

图 4 出生率对成灾时间的影响

仿真结果类似于 3.3 节的现象，随着出生率的增加，成灾时间是指数递减的(“L”型)，并在 $b\to 0.4049$ 时趋于无穷。小坐标呈现了出生率在 0.5 到 0.65 之间变化时成灾时间的变

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动情况：出生率每变动 0.01，成灾时间就会至少延后一个周期(20 天)，而且，出生率越低，其变动引起的成灾时间变动越大，如出生率从 0.51 降低为到 0.50 时，成灾时间即从 37×20 天增加至 41×20 天，延缓了 4×20 天即将近 3 个月时间。这一现象有效地支持了不育控制理论：使用不育药物降低出生率，比化学毒药灭鼠要更加有效。

4 进一步讨论

第 3 节讨论的是模型(4)所描述的东方田鼠种群增长的一般情况，对于(3)，由于进一步考虑了季节因素对种群增长的影响，使模型更加符合实际，其反映的种群增长模式也更加复杂。本节将对具有年龄结构的考虑了季节因素的东方田鼠种群增长离散模型即模型(3)进行仿真分析，以探讨更加符合实际的东方田鼠种群增长情况及其控制策略。

仍然取东方田鼠初始种群大小为每个年龄段 1 万只共计 18 万只，季节因素主要影响怀孕率和胎仔数量，而年龄因素主要影响雌性比，根据文[2]的数据，春夏秋冬四个季节的怀孕率分别取 0.45，0.1，0.2，0.3，由于胎仔数并无确切数据，不便妄拟，于是仍然取平均胎仔数为 5 只/胎，这样取值无碍于对种群数量增长规律的观察。由于随着年龄的增长，雌性比减少，各年龄段的雌性比可作 0.5 至 0.2[2]的均匀递减数列。仿真结果如图 5。

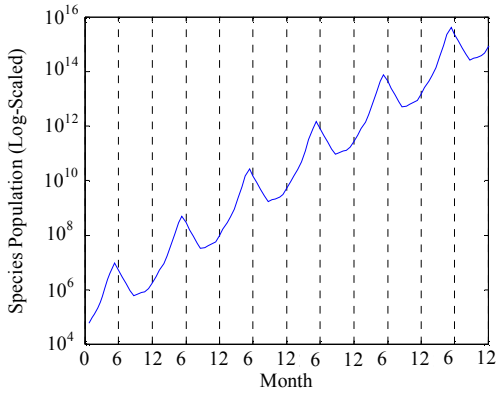

图 5 考虑季节因素和年龄结构的东方田鼠种群增长

从图 5 可以发现模型(3)与模型(4)所描述东方田鼠种群数量增长模式的差别。模型(3)体现出东方田鼠种群数量增长随季节波动的鲜明特性。即每年 5 月末到 6 月初存在一个种群数量高峰，然后种群数量开始下降，到 9，10 月出现一个低谷，然后经过冬春季节的繁殖，种群数量逐步增长，到次年 5 月末，又达到一个数量高峰。模型仿真的结果与武正军等[2]在岳阳县麻塘区观测的东方田鼠历年变化情况以及李波等[1]报道的情况一致，证明了模型的正确性。

图 5 中种群数量的大体趋势是指数增长的，图 6 则分析了模型(3)解的稳定性：当平均死亡率 $d=0.21$ 时，东方田鼠的种群数量会在一定的季节波动过程中总体呈指数增长，直到某个 5 月末泛滥成灾；；当 $d=0.22$ 时，种群数量会在一定的季节波动过程中总体呈指数衰减直至趋近于零；在 (0.21,0.22) 之间存在一个平衡解使种群数量稳定在一定范围内波动。如当 $d=0.215$ 时，历年同一时段的种群数量几乎没有变化。(注意，图 5 和图 6 中纵轴都取的对数坐标)

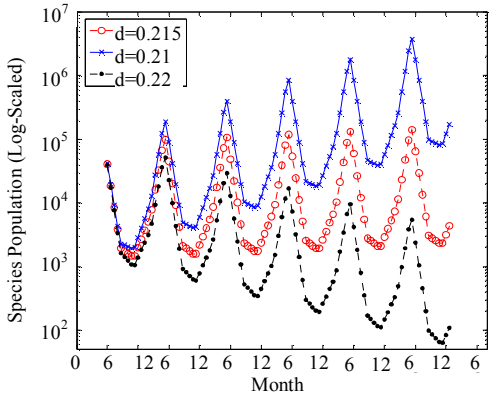

图 6 考虑季节因素的不同死亡率下的种群增长模式

5 结论和启示

通过上述仿真和讨论，可以总结出洞庭湖区东方田鼠种群增长的一般性规律：当死亡率 $d<d^*$ 时，种群数量呈指数膨胀，迅速达到成灾规模；当 $d>d^*$ 时，种群数量迅速下降直到消失；当 $d=d^*$ 时，种群数量将稳定在一定水平，不会随时间指数增长或衰减。d^* 为模型的平衡点。

东方田鼠种群增长的特殊规律是：由于季节因素的影响，东方田鼠冬春季节繁殖强度大，夏秋季节繁殖强度小，导致种群数量随季节波动，每年 5 月末到 6 月初存在一个种群数量高峰，然后种群数量开始下降，到 9，10 月出现一个低谷，然后经过冬春季节的繁殖，种群数量逐步增长，到次年 5 月末，又达到一个数量高峰。

文中讨论了初始种群数量、死亡率、出生率对成灾时间的影响，研究结果表明，初始种群数量对成灾时间的影响是微弱的，而死亡率和出生率对成灾时间存在很大影响，两者的微小变动都将导致成灾时间的提前或延迟。这给鼠灾防治控制工作的启示是：与其每年鼠灾爆发时全民皆兵地捕杀、毒杀鼠类，不如在湖区环境中引进东方田鼠的天敌，如蛇、猫头鹰等，适当提高东方田鼠的死亡率，即可极大程度地控制鼠灾的爆发。另外，化学不育剂和不育疫苗也是防治鼠灾的较好选择，这类药物通过影响出生率，亦能极大地限制鼠灾的爆发程度。

上述结论也从另一方面说明了生物链的破坏是洞庭湖区东方田鼠屡屡成灾的原因：如据金盆农场统计，1967-1981 年金盆商店收购蛇 12650kg，沅江县外贸五门闸收购站收购蛇 7250kg。湖区类似的收购站就有数百个，并且外地经常有人来湖区高价竞购，导致洲滩蛇类和鼬等东方田鼠的天敌数量大大减少[25]。人们每次在鼠灾爆发时会使用大量毒药，因此每次治理鼠灾之时也是蛇、猫等天敌面临灭顶之灾之时，由于误食了中毒田鼠，大量天敌亦被毒死，反而使得东方田鼠死亡率降低，来年爆发的更加凶猛。由于毒药作用时间短，相当于仅改变了初始种群规模，所以即使使用大量毒药，也只能短时间减少东方田鼠的数量，而不能从根本上控制鼠灾的爆发。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献:

[1] 李波, 王勇, 张美文, 等. 洞庭湖区东方田鼠种群数量预警[J]. 植物保护, 2007, 33(2): 134-136.
[2] 武正军, 陈安国, 李波, 等. 洞庭湖区东方田鼠繁殖特性研究[J]. 兽类学报, 1996, 16(2): 142-150.
[3] 武正军. 东方田鼠长江亚种 (Microtus fortis calamorum) 的生长与发育[J]. 动物学杂志, 1996, 31(5): 26-30.
[4] 郭永旺, 邵振润, 王勇. 洞庭湖区东方田鼠爆发原因分析及综合治理措施探讨[J]. 中国植保导刊, 2006, 26(5): 39-40.
[5] 郭聪, 王勇, 陈安国, 等. 洞庭湖区东方田鼠迁移的研究[J]. 兽类学报, 1997, 17(4): 279-286.
[6] 张美文, 王克林, 王勇, 等. 长江中游农区洪涝灾害后鼠类数量动态[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(2): 184-188.
[7] 柏熊, 邢正弘, 沈志敏, 等. 东方田鼠人工繁育观察[J]. 实验动物与比较医学, 2006, 26(4): 242-244.
[8] 邹邵林, 郭聪, 刘新平. 环境演变及三峡工程对洞庭湖区东方田鼠种群影响的评估[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 585-588.
[9] Haim A, Izhaki I. Changes in rodent community during recovery from fire: Relevance to conservation [J]. Biodiversity and Conservation (S0960-3115), 1994, 3(7): 573-585.
[10] Ford W M, Menzel M A, McGill D W. Effects of a community restoration fire on small mammals and herpetofauna in the southern Appalachians [J]. Forest ecology and management (S0378-1127), 1999, 114(23): 233-243.
[11] Higgs P, Fox B J. Interspecific competition: A mechanism for rodent succession after fire in wet heathland [J]. Australian Journal of Ecology (S0307-692X), 1993, 18(2): 193-201.
[12] Simons L H. Rodent dynamics in relation to fire in the Sonoran Desert [J]. Journal of Mammalogy (S0022-2372), 1991, 72(3): 518-524.
[13] 张美文, 王克林, 王勇, 等. 洞庭湖区洪灾淹没区鼠类群落结构恢复的生态过程[J]. 生态学报, 2004, 24(6).
[14] 刘宗传, 何永康, 张新跃, 等. 东方田鼠室内繁殖与生长发育观察[J]. 中国实验动物学报, 2001, 9(1): 49-54.
[15] 胡忠军, 王勇, 郭聪, 等. 中国东方田鼠生物生态学研究进展[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 307-312.
[16] 张承德. 几种田鼠行为的比较[J]. 东北林业大学学报, 1999, 27(4): 50-62.
[17] 沈志明, 余家璜. 东方田鼠的驯育与繁殖研究初报[J]. 上海实验动物科学, 1999, 19(2): 188-190.
[18] 马知恩, 周义仓, 王稳地, 等. 传染病动力学的数学建模与研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 335-341.
[19] P H Leslie. On the use of matrices in certain population mathematics [J]. Biometrica (S0006-3444), 1945, 33(3): 183-212.
[20] P H Leslie. Some further notes on the use of matrices in population mathematics [J]. Biometrica (S0006-3444), 1948, 35(3/4): 213-245.
[21] H Caswell. Matrix Population Model: Construction, Analysis, and Interpretation [M]. Sunderland, Massachusetts, USA: Sinauer Associates Inc., 1989.
[22] F R Gantmacher. Application of the Theory of Matrices [M]. New York, USA: Interscience Publisher Inc., 1959.
[23] J M Cushing, Zhou Yicang. The net reproductive value and stability in matrix population models [J]. Nature Resource Modeling (S0890-8575), 1994, 8(4): 297-333.
[24] J Impagliazzo. Deterministic Aspects of Mathematical Demography [M]. Biomathematics 13, Berlin, Germany: Springger-Verlag, 1985.
[25] 邹邵林, 郭聪, 刘新平. 洞庭湖区洲滩环境演变对东方田鼠爆发成灾的影响[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(2): 118-122.

(上接第 6574 页)

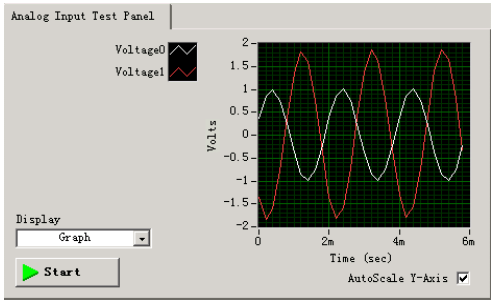

图 5 放大器输入输出信号波形图

通过实验电路和 HPVEE 软件的检验，按照表 2 中的 6 个变迁路径，进行任务调度，测试过程中均不会发生死锁现象，可以得到的信号波形图如图 5 所示。

3 结论

在自动测试系统并行测试中，利用本文提出的算法可以快速得到系统无死锁的任务调度序列即 Petri 网模型的发射序列。这些发射序列可以进一步应用于系统分析和优化，如可以将时间元素加入 Petri 网，在这些发射序列中找到任务完成时间最短的调度序列等。

参考文献:

[1] E G Coffman, M J Elphick, A Shoshani. System Deadlocks [J]. ACM Computing Surveys (S0360-0300), 1971, 3(2): 67-78.
[2] 夏锐, 肖明清, 朱小平, 苟新禹. 并行测试技术在自动测试系统中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13: 7-10.
[3] 蒋昌俊, 张兆庆, 乔如良. 基于 Petri 网的并发系统控制器设计[J]. 系统工程学报. 2001, 2(16): 116-120.
[4] 腾少华, 伍乃骐. 一种半导体自动化制造系统中的死锁避免[J]. 计算机集成制造系统. 2003, 9(1): 25-32.
[5] Murata T. Petri nets: properties, analysis and applications [J]. Proceedings of IEEE (S0018-9219), 1989, 77(4): 541-580.
[6] Mu D J, Wan D C, Yuan L W. Deadlock-free scheduling of flexible manufacturing systems based on heuristic search and Petri net structures [J]. Systems Man and Cybernetics (S0018-9472), 1988, 1(10): 26-31.
[7] S Starkweather, D Whitley, K Mathias, *et al.* Sequence sheduling with genetic algorithms [C]// G Fandel, T Gulledge, A Joneseds. Proc of the 1st Joint US/German Conf on New Directions for OR in Manufacturing. New York, USA: Springer Verlag, 1992: 130-148.
[8] 薛文涛, 王强. 基于特异性免疫策略的遗传算法及应用[J]. 系统仿真学报. 2008, 20(16): 4315-4322.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net