

异质生境中有害生物侵扰的随机扩散模型及分析*

齐艳红¹, 张文军¹, 张治国²

(1. 中山大学 生命科学学院, 广东 广州 510275; 2. 中山大学 计算机科学系, 广东 广州 510275)

摘要:依据随机化方法(Zhang and Schoenly, 1999, 2001), 根据有害生物侵扰扩散的基本特征, 建立了有害生物侵扰在异质生境中的一种随机扩散模型, 研制了网络计算软件PercoModel, 为进一步研究和应用提供一种工具。同时, 通过对模型的分析, 探明影响有害生物侵扰在异质生境中扩散的因素及其重要性, 为有害生物的防治决策和生物多样性保护利用提供一些依据和启示。

关键词:有害生物; 侵扰; 生境异质性; 随机扩散模型; 网络计算

生境异质性系某区域内土壤、气候、植物和植被覆盖类型、地形及土地利用等方面的多样性。生境异质性是自然界延缓有害生物扩散和毁灭性群体形成的重要机制。根据有害生物侵扰扩散的基本特征, 建立了有害生物侵扰在异质生境中的一种随机扩散模型, 研制了相应的网络计算软件PercoModel。该软件由七个Java类和一个HTML文件组成, 可运行于多种操作系统和网络浏览器上。该模型及软件可用于: ①分析生境多样性, 如不同生境的镶嵌格局和植物分布对有害生物扩散过程及其结局的影响; ②分析生境和植物镶嵌格局对植物和昆虫疾病流行的影响; ③研究生境和植物镶嵌格局对火灾蔓延的影响; ④确定有害生物造成的损失及分布, 以及探明最佳的生境和植物镶嵌格局等。分析结果表明, 该模型可以描述生物学过程的各种类型, 如单调上升、下降、波动, 以及周期性振荡等。被侵扰区域的恢复能力影响或决定着有害生物的侵扰动态, 提高区域被侵扰后的恢复能力是防治有害生物侵扰破坏的主要途径之一。有害生物侵扰在异质生境与均质生境中表现出显著差异。均质生境只要具有某种敏感性, 则被侵扰的比例将会在一段时间后达到很高的水平。区域的敏感性水平高, 则侵扰扩散快, 达到被侵扰比例上限的时间早, 上限也高。有无边界障碍对侵扰过程有重要影响, 边界障碍的存在可以有效地阻止有害生物的侵扰。边界障碍与恢复能力决定性地影响有害生物的侵扰。边界障碍布局方式将会大大影响有害生物侵扰的扩散过程及其结局。栅格式布局造成了较多的孤岛, 可更有效地阻止有害生物的侵扰扩散。人为增加边界障碍及其景观复杂性, 可防止有害生物的侵扰扩散, 维持更丰富的生物多样性。异质生境有助于形成复杂的、稳定的食物网和生态系统, 为有害生物侵扰扩散造成不同类型和自然的屏障(Zhang and Schoenly, 1999)。研究有害生物侵扰在异质生境中的扩散, 对有害生物的可持管理具有重要意义。

1 随机扩散模型

假设待研究的区域被划分为连续的、网格状的、等面积的长方格 a_{ij} , $i=1, 2, \dots, c; j=1, 2, \dots, f$ 。有害生物侵扰发生于该地域内。

给定每个长方格对有害生物的敏感性水平 q_i ($q_i \in R, k=1, 2, \dots, m$)及对应的被有害生物侵扰的概率 p_k ($p_k \in [0, 1], k=1, 2, \dots, m$)。已知有害生物侵扰的初始分布, 即已知模拟前($t=0$)每个长方格有无有害生物侵扰。初始分布为

$$\begin{aligned} v_{ij} &= 1 \text{ 若长方格 } a_{ij} \text{ 已被侵扰} \\ v_{ij} &= 0 \text{ 若长方格 } a_{ij} \text{ 未被侵扰} \quad i=1, 2, \dots, c; j=1, 2, \dots, f \\ &\text{且恒有} \\ v_{i0} &= v_{i,c+1} = 0 \quad i=1, 2, \dots, c+1 \\ v_{0j} &= v_{c+1, j} = 0 \quad i=1, 2, \dots, f+1 \end{aligned}$$

收稿日期: 2003-04-29; 修回日期: 2003-09-04

基金项目: 国家自然科学基金“农田有害生物可持续管理的生物多样性计算方法及软件”资助项目(30170184); 教育部留学回国人员科研基金“农田有害生物管理的生物多样性定量算法及计算机软件研制”资助项目(2000); 科技部“973”基金资助项目(G20000162209)

同时, 已知敏感性水平分布, 即

$$u_i = q_i \text{ 若长方格 } a_{ij} \text{ 的敏感性水平为 } q_i (k=1, 2, \dots, m) \quad i=1, 2, \dots, c; j=1, 2, \dots, f$$

由此得侵扰概率分布

$$p_k = p_k \text{ 若 } u_i = q_i (k=1, 2, \dots, m) \quad i=1, 2, \dots, c; j=1, 2, \dots, f$$

设每个侵扰事件以单位时间发生, 且侵扰向与长方格有公共边的长方格扩散。对任一尚未被侵扰的长方格, 有害生物从毗邻的已被侵扰长方格以该尚未被侵扰的长方格的侵扰概率 p_k 随机侵扰该长方格。对敏感性水平 k , 计算可供侵扰的长方格数 N_k 。

$$N_k = \sum b_{ij}$$

其中, $b_{ij}=1$ 若 $(v_{ij}=0) \wedge ((v_{i-1, j}=1) \vee (v_{i+1, j}=1) \vee (v_{i, j-1}=1) \vee (v_{i, j+1}=1))$ 为真

$b_{ij}=0$ 若 $(v_{ij}=0) \wedge ((v_{i-1, j}=1) \vee (v_{i+1, j}=1) \vee (v_{i, j-1}=1) \vee (v_{i, j+1}=1))$ 为假

敏感性水平 k 的实际被侵扰长方格数是

$$n_k = INT((100 \cdot p_k \cdot N_k + 0.5) / 100) \quad k=1, 2, \dots, m$$

由此, 可从 N_k 个长方格中随机产生 n_k 个实际被侵扰的长方格。

另一方面, 被侵扰后的长方格以恢复速率 r (单位时间可恢复的长方格比例) 恢复为未被侵扰的状态, 即

$$v_{ij} \text{ 不变 若 } 1-r+R \geq 1 \quad v_{ij} = 0 \text{ 若 } 1-r+R < 1$$

$i=1, 2, \dots, c; j=1, 2, \dots, f$

其中, R 为随机数, $1 \geq R \geq 0$ 。

对每时间段, 进行上述迭代过程, 直到预定时间。

2 软件组成与功能

PercoModel以Java Development Kit 1.1.8研制, 为一Internet Web在线工具。由七个类和一个HTML文件组成:

(1) PercoModel类。该类为主要计算类, 调用其他各类完成有关任务。该Applet被载入浏览器后, 显示输入界面, 其内容包括: 模拟终止时间、敏感性水平总数、恢复速率、横向长方格数、纵向长方格数、打开敏感性水平文件和初始侵扰文件(图1)。

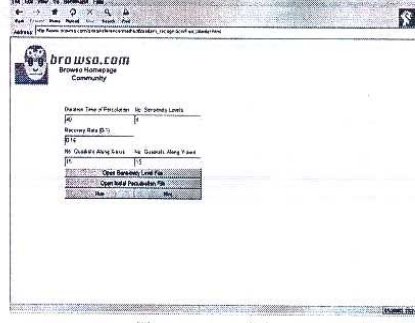


图1 PercoModel类窗口

(2) PercoGraphics类。该类用于输出侵扰扩散图形。弹出窗口时, 显示初始侵扰格局图和被侵扰比率动态曲线图。可用按钮向后或向前选择显示各时间的侵扰格局图和迄今为止被侵扰比率的动态曲线图, 也可用按钮选择连续快速地显示各时间的侵扰格局图和迄今为止被侵扰比率的动态曲线图(图2)。

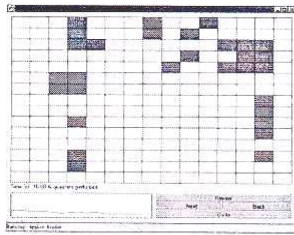


图2 PercoGraphics类窗口

(3) ResultShow类, Hint类, ParaInput类, 以及 WarningShow类参见参考文献所述。其中, 在PercoModel类窗口中输入敏感性水平总数并转移焦点后, 弹出ParaInput类窗口, 要求输入各敏感性水平及对应的侵扰概率(图3)。

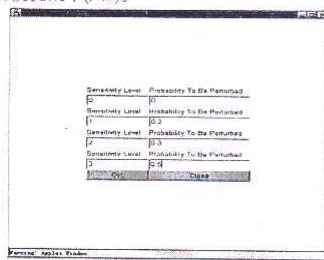


图3 ParaInput类窗口

(4) PercoModel.html文件。该文件将PercoModel类载入Web浏览器, 并传入窗口大小及组件大小参数。

在敏感性水平文件中, 其行、列数分别为纵向和横向长方格数, 其中数值为各长方格的敏感性水平值。初始侵扰文件中, 其行、列数分别为纵向和横向长方格数, 其中各长方格数值取值1或0; 该长方格为初始侵扰源时取值1, 否则取值0, 每行数据前应保留至少一个空格。原始数据文件为MS-DOS格式的文本文件(.txt)。可在MS-DOS的文本编辑器中编辑, 或在Windows中选开始→程序→附件→记事本, 在记事本中编辑文件。

软件运行后输出各时间的侵扰分布及侵扰比例, 以及侵扰分布和曲线图。

PercoModel的特点是: 以兼容性强和功能强大的网络程序设计工具开发, 网络分布式计算, 用户界面友好, 不依赖于平台, 可即时更新补充新模型, 稳定性和安全性好。

3 结果与分析

3.1 恢复能力对侵扰过程的影响

设有一区域, 纵向和纵向长方格数均为15, 模拟终止时间为40; 敏感性水平总数 $m=4$, 分别为 $q_1=0, q_2=1, q_3=2, q_4=3$; 敏感性水平 $q_1=0, 1, 2, 3$ 对应的侵扰概率分别为 $p_1=0, p_2=0.2, p_3=0.3, p_4=0.5$ 。敏感性水平文件(Sensitivity_Level.txt)和初始侵扰文件(Initial_Distribution.txt)分别如图4和图5。

设定恢复速率 $r=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$, 模拟有害生物的侵扰过程, 结果如图4所示。

文件(F)	编辑(E)	查看(V)	插入(I)	格式(O)	帮助(H)									
0	2	1	3	0	0	3	2	0	2	1	1	0	0	1
3	0	1	2	0	3	0	2	1	1	3	0	0	2	0
0	0	0	3	1	0	1	0	3	0	0	3	1	2	0
0	0	1	0	0	0	2	0	1	1	0	0	2	3	0
0	2	1	3	0	1	0	3	2	1	1	2	3	2	2
3	0	1	2	0	3	0	4	0	0	4	0	3	0	0
0	0	3	1	0	0	1	2	0	2	2	1	0	0	0
0	0	1	3	0	0	1	2	0	2	2	0	0	2	1
2	1	1	2	0	2	0	3	2	1	3	0	0	2	0
0	0	0	3	1	0	1	0	0	0	0	3	0	2	0
0	0	1	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	3	0
0	2	1	3	0	0	0	3	0	0	1	2	0	2	0
3	0	1	2	0	3	0	0	0	0	2	0	3	0	0
0	0	3	1	0	0	1	2	0	0	2	1	0	2	0
0	0	1	2	0	0	1	2	0	2	3	0	0	2	1

图4 敏感性水平文件

文件(F)	编辑(E)	查看(V)	插入(I)	格式(O)	帮助(H)									
0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0
0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	1
0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	3	0
1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1

图5 初始侵扰文件

显然, 若被侵扰的长方格无恢复能力, 则被侵扰的比例将随时间单调上升, 且此例中被侵扰的比例趋于一定值。原因之一在于有害生物对敏感性水平为0的那些地块的侵扰概率均为0, 即无法侵扰; 另一方面, 此敏感性水平并不容许全部长方格被侵扰。随恢复能力的提高, 被侵扰的比例逐渐下降, 恢复能力达到一定水平时, 被侵扰的比例将在一段时间后为0, 即侵扰在整个区域内消失。从图5可以看出, 该模型可以描述生物学过程的各种类型, 如单调上升、下降、波动, 以及周期性振荡等。例如, 图5中的周期性振荡可能会在 $0.10 \geq r \geq 0.05$ 的某个恢复速率值上发生。实际上, 恢复速率 $r=0.075$ 时就已呈现出这种周期性振荡(图6)。当然, 如同生物学过程经常描述的那样, 这种周期性振荡并不十分严格, 有一定的时间范围, 也不很规则。

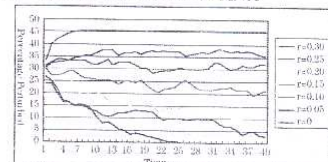


图5 恢复速率 $r=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ 时有害生物的侵扰动态(其他参数设置见正文)

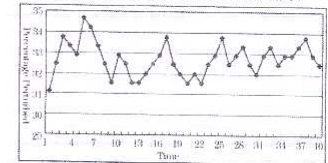
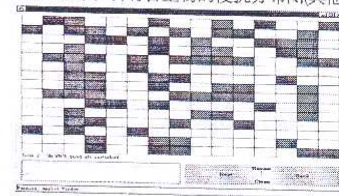


图6 恢复速率 $r=0.075$ 时有害生物侵扰的周期性振荡, 被侵扰比例基本上在一水平线(32.7%)上下波动

上述结果说明, 恢复能力影响或决定着有害生物的侵扰动态。提高区域被侵扰后的恢复能力是防治有害生物侵扰破坏的主要途径之一。这方面的具体实例多不胜数, 例如, 增强和利用植物受病虫害后的补偿恢复能力, 将会减少为害面积和为害率。试举一有趣的例子, 人们早就发现棉花(与木棉近亲)受一定程度的棉蚜或棉铃虫为害后, 有补偿恢复能力, 于是, 为节约农药和劳力费用, 往往对此不予理睬。某农业科学研究所为此进行摘蕾打杈试验以模拟虫害, 一农夫见状, 悄然归去并效而仿之, 将其玉米悉数摘芽打叶, 以观其变, 结果一片狼藉, 产量大减, 该农夫感而叹之, 百思不得其解。显然, 农夫的玉米并无补偿恢复能力, 正是他自己扮演了有害生物的角色。

图7是无恢复能力时, 有害生物的侵扰分布图(其他参数不变)。



(a) $t=2$ 时的

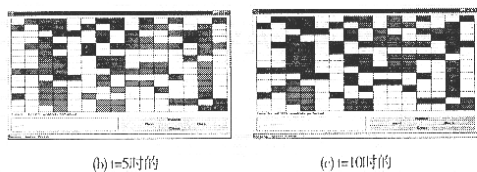


图7 无恢复能力的侵扰分布图

3.2 敏感性水平对侵扰过程的影响

敏感性水平对应于侵扰概率,其实是侵扰概率的一种代号值。习惯上,敏感性水平高,则认为侵扰概率大,反之亦然。因此,所谓敏感性水平对侵扰过程的影响,实际上就是侵扰概率对侵扰过程的影响。在前述例子中,有四个敏感性水平,代表区域抗侵扰能力的四个等级。现设恢复速率 $r=0$,对敏感性水平 $0,1,2,3$,取定七组侵扰概率值,即异质情形 $(0,0.1,0.2,0.3)$, $(0,0.2,0.3,0.5)$, $(0,0.3,0.4,0.6)$, $(0,0.4,0.5,0.7)$, $(0,0.5,0.6,0.8)$,以及均质情形 $(0.2,0.2,0.2,0.2)$ 和 $(0.1,0.1,0.1,0.1)$,分析敏感性水平对侵扰过程的影响。结果如图8所示。

根据图8,有害生物侵扰在异质生境与均质生境中表现出显著差异。均质生境只要具有某种敏感性,则被侵扰的比例将会在一段时间后达到很高的水平。敏感性水平高(侵扰概率大),则侵扰扩散快,达到被侵扰比例上限的时间早,上限也高。在异质生境中,被侵扰比例的上限在43.5%~47.6%之间。因此,在异质生境(或均质生境)中敏感性水平高低影响侵扰扩散,但其幅度并不具有决定性。

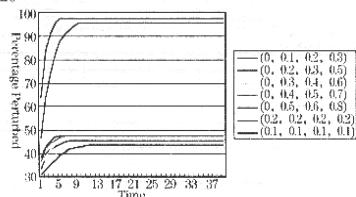


图8 敏感性水平对侵扰过程的影响

3.3 边界障碍的存在对侵扰过程的影响

边界障碍就是有害生物无法侵扰的区域。其侵扰概率为0,相应的敏感性水平值往往用0表示。取定四组侵扰概率值 $(0,0.2,0.3,0.5)$, $(0,0.3,0.4,0.6)$, $(0.1,0.2,0.3,0.5)$, $(0.1,0.3,0.4,0.6)$,其中,后两组代表区域内无边界障碍(但并非就是均质生境,因各长方格敏感性水平不同),且分恢复速率 $r=0,0.1$ 两种情形;前两组区域内有边界障碍,恢复速率 $r=0$,分析边界障碍的存在对侵扰过程的影响。结果如图9所示。

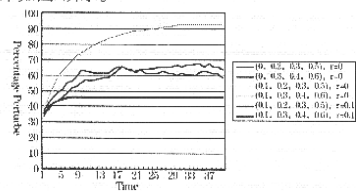


图9 边界障碍的存在对侵扰过程的影响

模拟结果显示,有无边界障碍对侵扰过程有重要影响,边界障碍的存在可以有效地阻止有害生物的侵扰。边界障碍与恢复能力决定性地影响有害生物的侵扰。在植物病虫害的扩散过程中,对不同种类的病虫,其边界障碍可以小到道路、植物隔离带、埂渠、甚至数寸宽的溪流,大到山脉、江河等。边界障碍在植物病虫害的防治中得到了广泛和深入的应用,例如,作物间作套种,多品种布局等。

3.4 边界障碍的布局对侵扰过程的影响

边界障碍的布局系指田间边界障碍的位置、形状、大小等景观特征,前述区域中边界障碍的布局就是一种自然情形。农田生态系统中边界障碍的布局往往比较规则、整齐。根据这种特征,设计两种常见的边界障碍布局,即平行式和栅格式进行分析。在平行式布局中,15列长方格中,每4~5列设1列边界障碍(0级),共3列边界障碍,其余1,2,3级均匀等数量分布。在栅格式布局中,第8行、第6列及第11列为边界障碍,其余1,2,3级大体上均匀并等数量分布。设恢复速率 $r=0$,敏感性水平 $0,1,2,3$ 的侵扰概率值分别为0(边界障碍), $0.3,0.4,0.6$ 。模拟结果如图10所示。

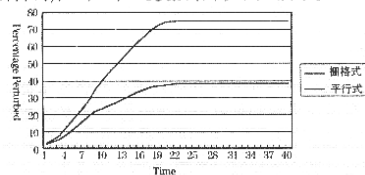


图10 边界障碍的布局方式对侵扰过程的影响

显然,边界障碍布局方式将会大大影响有害生物侵扰的扩散过程及其结局。平行式布局划分的田块数较少(四块),而同样条件下栅格式布局可划分出更多的田块(六块)。因此,栅格式布局造成了较多的孤岛,可更有效地阻止有害生物的侵扰扩散。在自然界,这种孤岛效应有助于防止有害生物巨型群体的形成和大规模大面积地侵袭,易形成和维持更多的生物多样性。从而可以得出这样的结论,人为增加边界障碍及其景观复杂性,可防止有害生物的侵扰扩散,维持更丰富的生物多样性。

图10中有害生物的侵扰扩散过程呈现出Logistic增长型,这说明在某些情况下存在着侵扰扩散最迅速的时段。在该时段之前采取措施防治侵扰扩散将会更加有效。

4 讨论

正如前述计算所示,由于不同生境和植物的镶嵌格局将会影响有害生物侵扰的扩散过程及其结局,而且所造成的总损失及损失分布也会不同,从而为利用PercoModel分析最佳的生境和植物镶嵌格局以便减少有害生物侵扰所造成的损失或限定损失范围提供了基础。该模型也可用于研究生境和植物镶嵌格局对植物和昆虫疾病流行,以及火灾蔓延的影响。

长方格划分的细度取决于对区域内各长方格有害生物侵扰的敏感性水平及侵扰概率的了解程度,以及研究要求的分辨率。长方格划分细致,即横向或(和)纵向长方格数多,则模拟的准确性就相对较高。随机数的产生方式因系统而异,因此,随机化检验的结果在不同的系统下会有轻微差异。总体上,随长方格划分的细致化,这种差异将会相对减小。

参考文献:

- [1] 齐艳红,张文军.有害生物侵扰在多样化生境中的一种随机扩散过程及网络计算软件.现代计算机,2002,133:16-19.
- [2] Zhang W J, Qi Y H, Schoenly K G. Randomization Tests and Computational Software on Significance of Community Biodiversity and Evenness. Biodiversity Science, 2002, 10(4):431-437.
- [3] Zhang W J, Schoenly K G. IRR1 Biodiversity Software Series(II). COLLECT1 and COLLECT2: Programs for Calculating Statistics of Collectors' Curves. IRR1 Technical Bulletin. Manila(Philippines): International Rice Research Institute, 1999, (2): 15.
- [4] Zhang W J, Schoenly K G. IRR1 Biodiversity Software Series(III). BOUNDARY: a Program for Detecting Boundaries in Ecological Landscapes. IRR1 Technical Bulletin. Manila(Philippines): International Rice Research Institute, 1999, (3): 17.
- [5] Zhang W J, Schoenly K G. IRR1 Biodiversity Software Series(IV). EXTSP1 and EXTSP2: Programs for Comparing and Performance-testing Eight Extrapolation-bascestimators of Total Taxonomic Richness. IRR1 Technical Bulletin. Manila(Philippines): International Rice Research Institute, 1999, (4): 13.
- [6] Zhang W J, Schoenly K G. A Randomization Test and Software to Compare Ecological Communities. Intl Rice Res Notes, 2001, 26(2):48-49.