

# 外来入侵物种的风险评估定量模型及应用

王雅男, 万方浩\*, 沈文君

(中国农业科学院植物保护研究所, 农业病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100094)

**摘要:** 预防生物入侵的一个重要手段是对外来物种进行风险评估, 应用模型则是定量评估的必备方法。本文简述了常用的适生性风险评估模型, 概述了诸如遗传算法、模糊包络模型、自组织特征映射网络等较新的理论方法, 它们使用环境变量和物种实际分布数据, 利用不同的机理模型预测物种潜在分布区。本文还综述了适用于研究物种扩散性的模型, 积分差分方程模型可以模拟物种扩散行为, 元胞自动机模型可以揭示种间竞争关系, 景观中性模型大多用于种群动态等生态过程的研究。

**关键词:** 外来入侵物种; 风险评估; 模型; 适生区; 扩散

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2007)05-0512-09

## Review of quantitative models for risk assessment of invasive alien species

WANG Ya-Nan, WAN Fang-Hao\*, SHEN Wen-Jun (The State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** It is widely acknowledged that risk assessment has become an indispensable part of controlling of biological invasion. Therefore, there is a pressing need to formulate scientifically sound methods and approaches of quantitative model in this emerging field. This paper reviewed a few new predictive modeling techniques, called genetic algorithm, fuzzy envelope model and self-organising map, which are used to predict potential distribution of organisms. Meanwhile, integrodifference equation models, cellular automata and neutral landscape models, which deal with the spread of populations, were also introduced and discussed.

**Key words:** Invasive alien species; risk assessment; models; potential distribution; dispersal

## 1 引言

为了防止外来物种演化成入侵种, 提高防治入侵种的损益比, 做好充分的物种风险分析预测, 会达到事半功倍的效果 (Stohlgren and Schnase, 2006)。风险评估 (risk assessment) 作为外来物种风险分析 (risk analysis) 过程中的一个重要环节, 最根本目的是判断物种的入侵性, 最直接的目的是决策优先防治对象 (Andersen *et al.*, 2004)。

由于某些重要入侵生物的生物学和生态学研究已较深入, 积累了大量的理论及基础数据, 使得分析者能够借助数学和计算机建立模型来预测和计算风

险的大小 (陈克等, 2002)。模型在综述复杂系统方面是一种有用的工具, 能揭示客观事物的数学规律。由于模型能模拟生态系统的反应, 并可与实测值作对比, 在检验科学假设中十分有用 (高亮之, 2004)。

风险评估主要包括物种适生性、扩散性及其危害影响等三方面内容 (FAO, 2003)。已有的一些文献报道以及笔者的实践经验表明, 这三方面内容的研究难度依次递增, 而技术方法有效性则为依次递减; 且由于危害影响复杂多变, 在定量评估上更是难以着手。本文仅针对前两项评估内容的定量模型进行综述。

基金项目: 国家基础研究发展规划 973 项目 (2002BC111400); 科技部工艺平台项目 (2003D1B3J108)

作者简介: 王雅男, 女, 1982 年生, 北京人, 硕士, 从事外来物种风险分析研究, E-mail: ilatl@tom.com

\* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: wanfangh@public3.bta.net.cn

收稿日期 Received: 2006-12-07; 接受日期 Accepted: 2007-04-11

## 2 适生性模型( models for potential distribution of species )

防止外来物种造成危害的重要手段之一是阻止可能造成入侵的物种进入适合其生存的地区,为此我们希望探明物种一旦引入将会在什么地方生存及其扩散范围(徐汝梅,2003)。要想获得物种分布区的系统资料往往是不可能的,因此,更多的是根据有限的数据,利用空间模型研究物种的潜在生存区。

### 2.1 生态气候评价模型

澳大利亚 CSIRO 研制了用于生态气候评价的微机分析模型——CLIMEX,能定量地表征生物种群在不同空间的生长潜力。该模型以气候做为影响物种分布的主要因素,用物种生物学参数与各地气候参数进行对比,整合出生态气候指数(eco-climatic index, EI),EI 值越大,物种适生性越强( Sutherst and Maywald, 1985; Sutherst, 2003 )。

自 CLIMEX 问世至今,得到了广泛的应用,如用于分析预测马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 和地中海实蝇 *Ceratitis capitata* 在新西兰的适生区分布( Worner, 1988 ), 酸模北短尾蚜 *Brachycaudus rumexicolens* 在世界范围内的分布区( Scott and Yeoh, 1999 ), 亚洲长角天牛 *Anoplophora glabripennis* ( Motschulsky ) 在欧洲的适生区( MacLeod *et al.*, 2002 ), 苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* ( L. )( 林伟, 1994 ), 豚草的天敌——豚草卷蛾 *Epiblema strenuana* ( 马骏等, 2003 ), 三叶草斑潜蝇 *Liriomyza trifolii*( 陈洪俊, 2005 ), 西花蓟马 *Frankliniella occidentalis*( 程俊峰等, 2006 ) 等在中国的适生区。

但该模型仍旧存在不足。首先,虽然最新版本的 CLIMEX 包括全球气象站点 2 000 余个,但其中发展中国家的站点较少。由于很多物种原产于南美洲发展中国家,位点的缺乏很不利于参数的调试,其中,包括中国的气象站点仅 80 多个,不足以进行针对我国的适生分析,需要大量扩充站点信息。第二, CLIMEX 设定每个位点有两个湿度参数,分别是上午 9 时代表空气最高湿度,下午 3 时代表空气最低湿度,由于湿度发生不规律,如此设置需进一步探讨,可考虑用平均相对湿度代替并对模型进行修改。第三,模型计算结果只能以“点”图的形式显示,缺乏直观性,必须结合 GIS 软件进行插值叠加等处理。

### 2.2 气候包络模型

气候包络模型( climate envelope models, CEMs )是

一类能宏观明确物种最可能分布范围的模型( Walker and Parnell, 1991 )。从大尺度区域来讲,气候因素是预测物种分布最好的环境变量( Rouget *et al.*, 2004 ),用被评估地区各个位点与物种原产地或者严重发生地进行气候相似性比较,相似性高即说明在原产地或严重发生地生存的物种在该位点也可能适生。以下 3 种度量距离的方法都可以应用到该模型中。

**2.2.1 欧氏距离:**欧氏距离是距离度量方法中常用的一种,可以计算各个数据对象之间的距离(董旭和魏振军,2005)。中国学者在此基础上提出了“生物气候相似距研究方法”(魏淑秋和刘桂莲,1994),采用多维空间相似距离  $d_{ij}$  来度量各地之间的气候,即将某一个地点的某种气候要素作为一维空间,  $m$  种要素即有  $m$  维空间,将每一个地点作为这  $m$  维空间上的一个点,计算世界上任意两个地点间的欧氏距离。

物种在 A 地适生,在同一时段 a, B 地与 A 地的生态气候相似性低,似乎该物种在 B 地就不能适生,但由于不同地区的气候差异和各地气候季节的交替,主要是太阳辐射在地球表面分布不均及其随时间变化的结果,同时太阳高度在不同纬度和不同时间上的差异造成辐射总量因地因时而不同(孙安健,1986),所以将 B 地的适生时段向前或向后滑移, A 地的 a 时段与 B 地的 b 时段生物生态气候相似性就可能很好,因此采用生物气候相似及其滑移相似理论,可以解决南北半球之间、海拔高低之间或局部时段之间的生物气候相似性问题,使得在全球范围内,任意两地间寻找生物最佳相似时段成为可能(魏淑秋和刘桂莲,1994;陈雷等,2005)。一般分段分布滑移相似距计算表达式为(魏淑秋等,1995):

$$d_{ij} = \min \left\{ d\theta_{ij} = \left[ \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{j(k+\theta)})^2 \right]^{1/2} \right\}$$

式中,  $d_{ij}$ : 空间第  $i$  点与第  $j$  点的气候相似距;  $X_{ik}$ : 空间第  $i$  点第  $k$  个要素值标准化后数据;  $X_{j(k+\theta)}$ : 空间第  $j$  点第  $(k+\theta)$  个要素值标准化后数据;  $k$ : 要素序号;  $m$ : 要素个数。

魏淑秋等(1995)应该此方法预测了小麦矮腥黑穗病 *Tilletia controversa* 在我国不同麦区定殖的潜在可能性。生物气候指标的确定是决定结果准确性的关键,要选择能够影响当地气候的主要因素,如有必要,还需对不同因素附以权重。此外,欧氏距离与各

指标的量纲有关,且没有考虑各变量之间的相关性和重要性。

**2.2.2 相似离度:**李开乐(1986)提出了既能分析样本之间形相似,又能体现它们之间值差异的相似离度法。这是一种比较全面的相似衡量标准,克服了简单相似分析方法(欧氏距离、相似系数)的不足(康绍军和余卫东,2002)。相似离度能客观地反映多维空间对象之间的相似性,它由相似值系数和相似形系数组成,相似值系数反映空间对象之间的离散程度,即靠近程度;相似形系数反映对象之间变化趋势的相似性,即空间位置方向的趋同性。陈雷等(2005)综合了相似离度和生物气候滑移相似距的优点,找到了作物引种区与最佳适宜种植区的生态气候相似程度和最佳相似时段。在外来生物适生性分析研究中,也可以借鉴这种思路,推算入侵区和原产地物种生存的最佳相似时段。

**2.2.3 马氏距离:**马哈拉诺比斯(Mahalanobis)距离,简称马氏距离(Krusińska,1987),不用考虑各个特征参数的量纲,是欧几里德空间中非均匀分布的归一化距离,它排除了样本之间的相关性影响而且也考虑到了各个观测指标取值的差异程度,能更好地描述样本间的相似程度(杨涛等,2005)。

应用马氏距离预测某物种分布的具体步骤为:首先确定气候特征参数( $X_p$ )和物种现有分布地记录样本( $n$ );然后计算气候特征参数均值向量( $\mu$ )以及由 $X_p$ 和 $n$ 组成矩阵的协方差( $C$ );之后,对于一个新样本 $x$ 做判断,计算它到这个总体( $G$ )的距离,距离越大则说明 $x$ 位点越适合物种生存。计算公式如下(司马云瑞等,2005):设 $x$ 来自均值 $\mu$ 、协方差 $C$ ( $>0$ )的集合 $G$ ,它们之间的马氏距离定义为:

$$D^2(x, G) = (x - \mu)C^{-1}(x - \mu)$$

该方法逐步得到人们的重视,Farber和Kadmon(2003)对以色列一些木本植物做为试材,强调说明了马氏距离法优于传统气候包络模型;Rouget等(2004)也用此方法分析了南非地区71种主要入侵植物的潜在分布。

应用气候包络模型(CEMs)的一个前提是物种的现有分布数据能为预测提供可靠的依据,并且其准确性高度依赖于气候因素,在选择气候要素时,还会用到主成分分析、判别分析等方法。此外,仅用气候因素判断物种潜在分布区,常会高估物种的分布范围,因为人为干扰、种间竞争等因素也可限制物种分布,这些因素有时比气候要素更加重要,但是

CEMs并不能对气候要素外的这些因素加以考虑。

### 2.3 模糊包络模型

模糊包络模型(fuzzy envelope model, FEM)可以预测物种的潜在分布区,判断生境被外来物种入侵的风险程度,该方法应用了基于模糊集合论的模糊分类法(Heuvelink and Burrough,1993)。经典集合论不能研究不具有明确界限的事物和现象,譬如“物种在某地适生性的高与低”等。为了研究这些模糊概念,需要用模糊集合论来描述(徐健华,2004),一个模糊子集完全由其隶属函数来刻画。

模糊包络模型(FEM)使用物种分布数据和一系列的环境变量,物种分布数据包括物种已分布数据(presence data)和物种未分布数据(absence data),由于物种的未分布数据获取困难并且可靠性较低,所以应用该模型时,一般只考虑物种现有分布数据或者用假未分布数据(pseudo-absence data,通过人为调查确定物种在某地无分布,但某些客观条件限制其准确性)代替。收集的分布数据用做模型的训练和检验,一般分配比例为3:1;然后选择环境变量,从气象站取值,制成点数字地图,通过插值方法把点数字地图转化成面地图。训练模型时,选择合适的模糊隶属函数,对各环境变量图层进行重新分类,生成各自的模糊分类地图层(即模糊子集),每个栅格取值在0~1之间;之后应用最小值叠加函数(minimum overlay function)把所有图层叠加,生成物种潜在分布图(即多元模糊集)(Robertson *et al.*, 2004)。

Robertson等(2004)利用FEM对非洲南部的南非、莱索托、斯威士兰地区的3种外来杂草和3种本地蝉进行潜在分布预测,通过Kappa检验,得到了较满意的结果。FEM最重要的一个特点是,构建模型时有多种模糊隶属函数可供选择,适用于物种对特定环境做出特定的反应,例如均衡函数(symmetrical)、单调增函数(monotonically increasing)、单调减函数(monotonically decreasing)等,其中单调增函数就比较适合描述物种增长率与海拔成正相关的情况。

BIOCLIM是应用包络模型的典型软件(Sindel and Michael,1992),与其明确包络模型(CEM)的明确集(crisp sets)相比,FEM采用了模糊集(fuzzy sets),更加适合建立包络分布模型(envelope distribution models),能对连续变量的分类比较敏感,预测结果更接近真实情况,误差较小。但FEM假设了每个环境变量对于预测物种分布是同等重要的,

这明显不符合实际并且会导致预测准确度下降。

## 2.4 遗传算法

遗传算法( genetic algorithm, GA )是由美国 Michigan 大学的 Holland 于上世纪 60 年代末提出并创立的( Holland, 1975 ),是概率搜索算法的一种。它通过模拟生物在自然界中遗传变异与生存竞争等遗传行为,让问题的解在竞争中得以改进,以求得最优解(艾丽容,1997),是解决非线性优化问题的一个重要方法(金舒,2002)。遗传算法的应用按其方式可分为基于遗传的优化计算、优化编程和机器学习(严武军,2002)。在研究物种适生区的软件中,GARP( genetic algorithm for rule-set production )是目前应用遗传算法机器学习比较成功的桌面系统( Underwood *et al.*, 2004 ),其原理是利用已有的物种分布资料和环境数据产生以生态位为基础的物种生态需求,探索物种已知分布区的环境特征与研究区域的非随机关系,用人工智能模型方法来建立预测模型(贾文明等,2005)。

遗传算法( GA )中机器学习的目的是构造一种能就现实环境的实际情况对自身进行调节,以适应环境变化的机器。事先给定机器的一些规则,机器通过反馈调整这些规则,使之更适应环境(甄文祥和王文田,1994)。目前在 GARP 中有 4 种规则,即粒子算法( atomic )、逻辑斯谛回归( logistic regression )、生物气候包络( bioclimatic envelope )和非生物气候包络( negated bioclimatic envelope )( <http://biodi.sdsc.edu/Doc/GARP/Manual/manual.html> ),通过使用不同的规则从而提高了模型的预测准确性。首先选择一种规则,利用训练数据生成一个模型,最终生成一个由不同规则组成的模型,用独立数据对模型检验后,产生一个复杂的“if-then”序列生态模型,模型再被投影到研究区域的地理空间,形成适合物种分布的数字地图(王瑞,2006)。

Peterson 和 Viegliasi (2001) 用基于 GARP 生态位模型对入侵到美国的光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motsch) 等物种的潜在分布区进行了预测; Peterson 等(2002) 和 Anderson 等(2002) 分别用该模型研究了墨西哥鸟类和多刺囊鼠 *Perognathus spinatus* Merriam 的地理分布情况; Papes 和 Peterson (2003) 以及 Wang 和 Wang (2006) 分别预测了紫茎泽兰 *Ageratina adenophora* (Asteraceae) 在中国入侵分布区; 李红梅(2005a, 2005b) 采用同种方法预测了日本松干蚧 *Matsucoccus matsumurae* (Kuwana) 和椰心叶甲 *Brontispa longissima* (Gestro) 在中国的潜在地理分布;

王瑞(2006) 选取 14 种在我国具有较强威胁性的外来入侵植物,通过标本和文献资料获得分布数据,用 GARP 模型分析它们的中国适生区。此生态模型在海洋环境也得到应用, Wiley 等(2003) 对美国堪萨斯州的 12 种淡水鱼的适生性进行探讨。

GARP 一般应用在大尺度范围(如一个国家),环境分辨率在 4.5 km 到 50 km 不等,使用物种分布数据大多为几十年的积累。其实,该模型应用在小尺度范围(如森林公园)和窄数据集(两年的数据累积)时也能达到令人满意的效果( Underwood *et al.*, 2004 )。GARP 预测准确性取决于物种分布信息的数量和质量,数据的获得对于研究者来说是一项艰巨的任务。此外,遗传算法与其他的算法的有效结合,也是 GA 理论研究的主要方向之一。

## 2.5 自组织特征映射网络

自组织特征映射网络( self-organising map, SOM )是由芬兰赫尔辛基大学神经网络专家 Kohonen (1995) 提出的一种人工神经网络( artificial neural network, ANN )。它可以模拟动物和人大脑皮层中具有自组织信号处理的特征,根据样本自身的规律,自动提取样本内在的重要统计特征,是一种无监督学习的神经网络(吴建生,2005)。目前广泛地应用于系统分析、统计模式识别和通信等领域,近几年也逐渐被生物领域的学者所重视( Wornor and Gevrey, 2006 )。

自组织特征映射网络( SOM )将非线性的高维数据投到一个预先定义好的二维拓扑网络中,通过学习算法达到了降维、聚类、可视化的目的,使得一个复杂系统从开始的完全混乱调整到最终的整体有序。学习算法包括竞争、合作和更新 3 个过程: 竞争是对每个输入模式,网络中的神经元计算它们各自的判别函数值,具有判别函数最大值的特定神经元成为竞争的胜利者; 合作是指获胜神经元决定兴奋神经元的拓扑邻域空间位置,从而提供给相邻神经元合作的基础; 更新是对兴奋神经元通过对它们权值的适当调节以增强它们关于该输入模式判别函数值,使得对以后相似模式输入的响应增强(程勳等,2005)。

SOM 的结构分为简单的两层,即输入层( input layer )和输出层( output layer )。设输入层有  $n$  个节点,输出层由  $m$  个神经元组成的二维平面阵列,两层之间完全连接,每个输入层节点通过连接权向量与每个输出层神经元连接(涂晓芝等,2005),具体步骤如下(晋琳琳等,2005):

(1) 输入层数据准备:  $N$  个向量  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , 每个  $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$  向量由  $n$  维组成, 即  $n$  个节点;

(2) 确定输出层神经元个数  $m$ , 一般  $m = 5\sqrt{N}$  (Gevrey *et al.*, 2006);

(3) 输出层神经元权向量  $W_j (j = 1, 2, \dots, M)$  的各元素在一定区间内随机产生, 并进行归一化处理成单位向量  $\hat{w}_j$ ;

(4) 将向量  $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$  施于输出层网络, 找出  $X_i$  与距离最近的权向量  $W_k$ , 式中下标  $k$  是当输入向量为  $X_i$  时取胜神经元的序号;

(5) 选择恰当的学习速率, 对获胜神经元权向量进行修改, 其原则是使以后同样或类似向量的输入时, 该神经元取胜的概率更大, 经过多次调整权值, 就能将取胜神经元的权向量不断推进输入向量  $X_i$ ;

(6) 将下一个向量  $X_i$  施于输出层网络, 循环第(4)到(6)步。

Gevrey 等(2006)运用 SOM 把 844 种( $n$ )植食昆虫在新西兰 459 个( $N$ )地点的分布信息作为输入层数据, 对 844 种昆虫进行适生区预测, 先对所有位点进行聚类分析, 确定每个输出层神经元所代表的具体国家或地区, 再将最终每个物种对应神经元的连接权重视为物种在该神经元所代表地区的适生程度, 该值越大, 适生性越高。他们以分析地中海实蝇 *C. capitata* 来对模型进行检验, SOM 预测的区域包括了大部分实际分布地区, 尽管此方法效果良好, 但应用 SOM 研究物种适生分布的例子相对匮乏, 国内研究学者涉及不多。

这种方法也存在一些局限, 比如该网络的学习结果是二维神经元阵列的输出层, 不能进一步更加详细地描述样本模式相互间的距离信息, 使样本在原始空间中的位置信息更加直观地显示。此外在 SOM 网络学习过程中, 如何调整学习效率, 以及充分利用连接权重, 以提高网络的收敛速度, 得到良好的拓扑保留效果, 仍未有能普遍使用的方法(涂晓芝等, 2005)。

### 3 扩散模型(models for species dispersal)

扩散是外来物种入侵过程中一个非常重要而且具有特色的环节, 只有通过扩散行为, 才能达到高密度和大尺度的空间分布。入侵种本身的特点和新环境的特点都能使扩散的形式和速度形成差异(徐

汝梅和成新跃, 2005)。通过建立模型我们可以预知种群在新生境的时空动态变化, 对追踪监测、防治铲除入侵物种都有着重要的作用。

#### 3.1 积分差分方程模型

外来物种以定殖地为中心, 向四周扩散, 这个阶段包括两个重要的过程——个体的繁殖和散布 (Neubert and Parker, 2004), 这两个过程在时间上是不连续的, 而积分差分方程很适合描述这种离散的过程。积分差分方程(integrodifference equation, IDE)模型包括两个部分: 积分方程说明种群扩散过程, 差分方程描述物种在景观尺度上每个位点种群增长状况, 方程如下:

$$N_{t+1}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x, y) [f(N_t(y))] dy$$

其中,  $N_{t+1}(x)$  为在  $(t+1)$  世代扩散终点( $x$ )的种群密度,  $[f(N_t(y))]$  是  $t$  世代在扩散起点( $y$ )的种群增长函数(Pysek and Hulme, 2005), 增长函数可选择补充曲线(stock-recruitment curve)和逻辑斯谛差分方程(logistic difference equation)等。在扩散阶段, 密度概率函数  $k(x, y)$  的形状决定种群个体从  $y$  地扩散到  $x$  地的运动规律, 它描述了分散核心(即父辈物种)所散布繁殖体的新的空间分布, 而分散核心的性质决定了物种进入新生境的扩散速度, 常用的  $k(x, y)$  可以是高斯分布(Gaussian)、拉普拉斯分布(Laplace)或柯西分布(Cauchy)(Kot *et al.*, 1996, 2004)。应用 IDE 的最大限制是, 很难判断  $k(x, y)$  的形状, 特别是长距离扩散时, 而 IDE 可以整合不同的分散核心, 也能在一定程度上弥补这个缺点(Pysek and Hulme, 2005)。IDE 已经越来越广泛地应用于各类物种的扩散行为模拟, 比如鸟类、植物、蜜蜂, 其中对一年生无世代重叠的植物模拟效果较为理想(Hastings *et al.*, 2005; Mistroa *et al.*, 2005)。

需要指出的是, IDE 模型是一类表征空间上连续分布的工具模型(Cuddington and Hastings, 2004), 不仅能模拟物种扩散行为, 也能对种间竞争、种群年龄组配、阿利效应、物种控制进行了描述(Kot *et al.*, 2004)。笔者认为, IDE 是建立生物入侵各阶段模型的重要基础。

#### 3.2 元胞自动机

元胞自动机(cellular automata, CA), 是一类模型的总称(Wolfram, 1984), 它是用一系列模型构造的规则构成, 是时间、空间和状态都离散的动力系统(傅伯杰等, 2001)。CA 由有限个相同而分立的元胞(cell)组成, 它们等间距地排列在一维直线上, 或

者分布在二维平面或多维空间中规则网格上,每一个元胞都有几种可能的状态(吕晓阳等,1996),各元胞单元下一时刻的转移状态根据相应的邻域函数规则和各时间阶的领域状态配置进行同步更新(张传武,2004)。

元胞自动机(CA)模型广泛地应用于植物群落动态研究(Wang *et al.*, 2003)。刘迎湖等(2006)对具化感作用的外来杂草对本地种群落的入侵过程和入侵规律进行模拟研究,模型由产生化感物质的外来种和两个对化感物质敏感性不同的本地种组合成不同类型的群落,利用化感物质作用下受体物种生物活性响应模型及种子扩散负指数分布模型,模拟外来杂草和本地种分布格局的时空动态变化。

Arii 和 Parrott(2006)应用元胞自动机(CA)分析了外来物种和本地种的扩散及竞争关系。该模型设计了二维  $50 \times 50$  规则网格,假设外来种和本地种均是一年生植物,每个元胞里只存在一个植株,其每个世代经历两个基本过程——种子扩散和竞争,两物种竞争结果取决于扩散种子的数量和竞争函数,竞争函数利用外来种与本地种扩散种子的数量比( $R_{e/n}$ )计算外来种占领元胞的概率( $P_e$ ),也就是外来种成功在新地区定殖(successful colonization)的概率或者竞争能力。

$$P_e = \beta + \alpha \log_{10}(R_{e/n})$$

其中  $\alpha$ 、 $\beta$  分别代表线性方程的斜率(slope)和截距(intercept)。

第一次传入模拟时元胞随机分布为 10 个外来物种,2490 个本地种,固定  $\alpha$  或者  $\beta$ ,变化  $\beta$  或者  $\alpha$ ,每个个体每个世代散播 5 粒种子,散播种子后个体立即死亡,不同  $\alpha$ 、 $\beta$  组合分别进行 200 个世代的拟合,但在到达 200 世代前,如果外来物种所占元胞数量已经为零或到达总数的一半,则停止拟合。该种模拟方式的结论表明, $\alpha$  的减少或者  $\beta$  的增大均有利于增加外来种的竞争力。Arii 等又提出,外来物种的成功定殖并不能说明其可以完全取代本地种,有可能与其共存。另一个模拟方式即说明了  $\alpha$ 、 $\beta$  组合对两类物种之间的关系的影响:分别固定  $\alpha$ 、 $\beta$  值,不同的  $\alpha$ 、 $\beta$  组合进行世代模拟直到其中一物种灭绝或者达到最大值,结果证明了竞争力强的外来种可能不能完全取代本地种,反之,竞争力弱的外来种也可能在新栖息地成功定殖。

需要强调的是该模型不针对某个物种,而是适用于外来和本地这两类物种。当然,该模型也存在一些问题,首先, $R_{e/n} = 1/1 = 1$  和  $R_{e/n} = 100/100 = 1$

这两种情况的竞争结果肯定是有所不同的,但模型并不能给予解释;第二,在实际的生态系统中,该模型不能充分分析多个物种参与竞争的情况,而在实际的生态系统中这类现象是普遍存在的(Arii and Parrott, 2006)。

### 3.3 景观中性模型

景观中性模型(neutral landscape models, NLMs)源于景观生态学渗透理论(percolation theory),作为在破碎化景观中评估外来物种入侵扩散风险的工具(With, 2004)。渗透理论认为当媒介的密度达到某一临界值时,渗透物突然能够从媒介的一端到达另一端,这种因为影响因子或环境条件到达某一阈值而发生的从一种状态过渡到另一种截然不同状态的过程称为临界阈现象,显示出由量变到质变的特征。生物多样性衰减与生境破碎化程度之间的关系就属于广义的临界阈现象,而外来物种入侵过程也表现出临界阈限特征(邬建国,2000)。

自 20 世纪 80 年代以来,渗透理论在景观生态学研究中的应用日益广泛,并逐渐地作为一种景观中性模型(NLM)而著称(邬建国,2000)。生态学中性模型是指不包含任何具体生态学过程或机理的,只产生数学上或统计学上所期望的时间或空间格局的模型(刘茂松和张明娟,2004)。其最大的作用是研究景观格局和过程的相互作用提供一个参照系统,通过比较真实景观和随机渗透系统的结构和行为特征,检验有关景观格局和过程关系的假设。渗透理论基于简单随机过程,并有显著的而且可预测的阈限特征,因此是非常理想的 NLM(肖笃宁等,2003)。它已经被用于研究景观连接度和干扰(如火)的蔓延,种群动态等生态学过程。

而景观结构的改变和外来物种入侵扩散的关系则少有人研究。With(2004)应用 NLMs 预测生境破碎化达到某一阈值后,入侵扩散程度就会加剧,这种生物群落在景观中“渗透”的现象不仅依赖景观被干扰后的格局情况,还取决于物种行为生态学特征(Wiens *et al.*, 1997),能力弱的扩散者在斑块聚集的空间更易扩散,能力较强的入侵者则可以跳过一个或几个非生境斑块,达到扩散的目的。这体现了渗透理论对实际研究的指导意义,而且会促进对景观格局和生态学过程之间的相互作用的理解。

## 4 结语

外来物种适生性模型研究中常考虑的因素可归

纳为三类:环境变量、物种实际分布和生物学数据。本文中的气候包络模型仅考虑环境中的气候因素,自组织特征映射网络着重应用物种分布信息,生态气候评价模型利用了气候因素和物种生物学数据,模糊包络模型和利用遗传算法的 GARP 则考虑了不同的环境变量和物种实际分布。三类因素中环境变量选择的典型性和物种现实分布调查的完整性很大程度上决定了模型运行结果的准确性。适生区预测一般可以认为气候决定物种的最大分布区,所以广泛借鉴不同层次的生态学模型(如景观中性模型)乃至非外来生物领域中发展得比较成熟模型(如元胞自动机),不仅可行且很有必要。而外来物种扩散性模型研究得比较少,笔者认为主要原因是扩散速率及方向等扩散研究中主要内容考虑更多的是环境与物种的关系、种间互作、人为干扰等一些不容易把握的因素。此外,外来物种产生的经济影响也是风险评估一项重要内容(万方浩等,2005),但涉及到生物经济这个比较新的领域,学科跨越性强,国内外学者研究得相对更少。

应用模型方法对外来物种入侵风险进行评估的目的是为防治决策提供科学依据,例如可以对物种的定殖扩散进行预测,围绕全球气候变化对物种适生区影响的进行预测以及对物种产生的经济影响进行分析等,通过模型对以上事件进行定量分析和描述,使得相关结论更具科学性和说服力。操作中除了需要确定建模的目的外,还需要确定预建模型的应用对象与范围,是针对某一类物种还是多个或全部生物物种建模,是应用于某一特定地区还是洲际范围。

建模目的明确后,开发有效的数学模型成为至关重要的一步。可以通过田间和室内的实验数据自行建立试探性模型,通过反复验证和修改,得到较为理想的数学模型;另一种办法从文献中寻找经过众多科学家认同的现成的数学模型。本文中介绍的现成数学模型都得到了实践的检验,可以应用到外来物种风险评估中。但由于各种模型的局限性,没有那个模型可以全面地解释物种的入侵性,如气候包络模型只能预测在气候因素影响下的物种适生区,不能考虑物种的实际分布与气候的关系。当然也没有必要追求一个模型的全局性,否则势必会降低其准确性。笔者认为,对一个事件高质量的定量评估需要一系列模型的整合,可以把多指标综合评价法作为风险评估的框架,针对每个指标研究其定量化方法,分别建立模型,得出各个指标的数值结果后再

考虑权重,最终整合出物种的某一类风险的概率值。

## 参 考 文 献 (References)

- Ai LR, 1997. Genetic algorithm. *Application Research of Computers*, 4: 3-6. [艾丽容, 1997. 遗传算法综述. 计算机应用研究, 4: 3-6]
- Andersen MC, Adams H, Hope B, Powell M, 2004. Risk assessment for invasive species. *Risk Anal.*, 24(4): 787-793.
- Anderson RP, Peterson AT, Marcela GL, 2002. Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice. *Oikos*, 98: 3-16.
- Arii K, Parrott L, 2006. Examining the colonization process of exotic species varying in competitive abilities using a cellular automaton model. *Ecol. Model.*, 199(3): 219-228.
- Chen K, Fan XH, Li WM, 2002. Qualitative and quantitative pest risk analysis. *Plant Quarantine*, 16(5): 257-261. [陈克, 范晓虹, 李尉民, 2002. 有害生物的定位与定量风险分析. 植物检疫, 16(5): 257-261]
- Chen HJ, 2005. Research on Risk Assessment and Management Strategy of *Frankliniella occidentalis* and *Liriomyza trifolii* in China. PhD Dissertation, Beijing Forestry University. 59 pp. [陈洪俊, 2005. 三叶斑潜蝇和西花蓟马在中国的风险评估及管理对策研究. 北京林业大学博士学位论文. 59 页]
- Chen L, Ba DH, Xue SL, Han YX, 2005. Climate characteristics of summer precipitation days in eastern part of northwest. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 23(3): 118-121, 140. [陈雷, 把多辉, 薛生梁, 韩永翔, 2005. 作物生态气候滑移相似高度分析及其应用. 干旱地区农业研究, 23(3): 118-121, 140]
- Cheng JF, Wan FH, Guo JY, 2006. Potential distribution of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae) in China by using combined CLIMEX and GIS tools. *Scientia Agricultura Sinica*, 39(3): 525-529. [程俊峰, 万方浩, 郭建英, 2006. 西花蓟马在中国适生区的基于 CLIMEX 的 GIS 预测. 中国农业科学, 39(3): 525-529]
- Cheng X, Yang YH, Chen WL, 2005. Application and analysis of selforganizing feature map. *Journal of Changchun Teachers College (Natural Science)*, 24(4): 55-59. [程勐, 杨毅恒, 陈薇伶, 2005. 自组织特征映射网络的分析与应用. 长春师范学院学报(自然科学版), 24(4): 55-59]
- Cuddington K, Hastings A, 2004. Invasive engineers. *Ecol. Model.*, 178: 335-347.
- Dong X, Wei ZJ, 2005. A clustering method of Euclid distance with weights. *Journal of Information Engineering University*, 6(1): 23-25. [董旭, 魏振军, 2005. 一种加权欧氏距离聚类方法. 信息工程大学学报, 6(1): 23-25]
- FAO, 2003. International standards for phytosanitary measures: pest risk analysis for quarantine pests including analysis of environmental risks. 7.
- Farber O, Kadmon R, 2003. Assessment of alternative approaches for bioclimatic modeling with special emphasis on the Mahalanobis distance. *Ecol. Model.*, 160: 115-130.
- Fu BJ, Chen LD, Ma KM, Wang YL, 2001. Theory and Application of Landscape Ecology. Beijing: Science Press. 228-229. [傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟, 2001. 景观生态学原理及应用. 北京:

科学出版社. 228 – 229 ]

- Gao LZ, 2004. Foundation of Agricultural Modeling Science. Hongkong : TianMa Book Corporation. 25 pp.[ 高亮之, 2004. 农业模型学基础. 香港 : 天马图书有限公司. 25 页 ]
- Gevrey M, Wornera S, Kasabov N, Pitt J, Giraudel JL, 2006. Estimating risk of events using SOM models : A case study on invasive species establishment. *Ecol. Model.*, 197 : 361 – 372.
- Hastings A, Cuddington K, Davies KF, Dugaw CJ, Elmendorf S, Freestone A, Harrison S, Holland M, Lambrinos J, Malvadkar U, Melbourne BA, Moore K, Taylor C, Thomson D, 2005. The spatial spread of invasions : new developments in theory and evidence. *Ecol. Lett.*, 8 : 91 – 101.
- Heuvelink GB, Burrough PA, 1993. Error propagation in cartographic modelling using Boolean logic and continuous classification. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 7 : 231 – 246.
- Holland JH, 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, University of Michigan Press.
- Jia WM, Zhou YL, Ding SL, Duan XY, 2005. The methods and technologies in pest risk analysis. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry ( Natural Science )*, 33( Suppl. ) : 195 – 200.[ 贾文明, 周益林, 丁胜利, 段霞瑜, 2005. 外来有害生物风险分析的方法和技术. 西北农林科技大学学报( 自然科学版 ), 33( 增刊 ) : 195 – 200 ]
- Jin LL, Hou GM, Li HY, 2005. Application of SOFM in human resources development. *Studies in Science of Science*, 23( Suppl. ) : 230 – 235. [ 晋琳琳, 侯光明, 李鸿雁, 2005. 自组织特征映射网在人力资源开发中的应用. 科学学研究, 23( 增刊 ) : 230 – 235 ]
- Jin S, 2002. Application of GA in development. *Techniques of Automation & Application*, 2 : 37 – 39.[ 金舒, 2002. 基于遗传算法的应用开发. 自动化技术与应用, 2 : 37 – 39 ]
- Kang SJ, Yu WD, 2002. The forecasting system of the similar discrete value analyzing. *Meteorology Journal of Henan*, 3 : 23 – 24.[ 康绍军, 余卫东, 2002. 基于相似高度的相似预报系统. 河南气象, 3 : 23 – 24 ]
- Kohonen T, 1995. Self Organizing Maps. Berlin : Springer.
- Kot M, Lewis MA, van den Driessche P, 1996. Dispersal data and the spread of invading organisms. *Ecol. Lett.*, 7 : 2 027 – 2 042.
- Kot M, Medlock J, Reluga T, Walton DB, 2004. Stochasticity, invasions, and branching random walks. *Theor. Popul. Biol.*, 66 : 175 – 184.
- Krusińska E, 1987. A valuation of state of object based on weighted Mahalanobis distance. *Pattern Recogn.*, 20 : 413 – 418.
- Li HM, Sun JH, Han HX, Xiao H, Xue DY, 2005a. Prediction of potential distribution of the coconut leaf beetle in China. *Forest Pest and Disease*, 24( 6 ) : 5 – 8.[ 李红梅, 孙江华, 韩红香, 肖晖, 薛大勇, 2005a. 椰心叶甲在我国潜在分布区的预测分析. 中国森林病虫害, 24( 6 ) : 5 – 8 ]
- Li HM, Han HX, Xue DY, 2005b. Prediction of potential geographic distribution areas for the pine bark scale, *Matsucoccus matsumurae* ( Kuwana )( Homoptera : Margarodidae ) in China using GARP modeling system. *Acta Entomologica Sinica*, 48( 1 ) : 95 – 100.[ 李红梅, 韩红香, 薛大勇, 2005b. 利用 GARP 生态位模型预测日本松干蚧在中国的地理分布. 昆虫学报, 48( 1 ) : 95 – 100 ]
- Li KL, 1986. A new similarity parameter and its application. *Acta Meteorologica Sinica*, 44( 2 ) : 174 – 183.[ 李开乐, 1986. 相似高度及其使用技术. 气象学报, 44( 2 ) : 174 – 183 ]
- Lin W, 1994. The Risk Analysis of Codling Moth *Laspeyresia pomonella* ( L. )( Lepidoptera : Tortricidae ) in China. PhD Dissertation, Beijing Agricultural University. 78 – 79.[ 林伟, 1994. 苹果蠹蛾在中国危险性评估的初步研究. 北京农业大学博士学位论文. 78 – 79 ]
- Liu YH, Xie L, Luo SM, Chen S, Zeng RS, 2006. Allelopathy of invasive weeds : A simulation study with cellular automata model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17( 2 ) : 229 – 232.[ 刘迎湖, 谢利, 骆世明, 陈实, 曾任森, 2006. 入侵杂草化感作用的细胞自动机模拟研究. 应用生态学报, 17( 2 ) : 229 – 232 ]
- Liu MS, Zhang MJ, 2004. Landscape Ecology : Theory and Method. Beijing : Chemical Industry Press. 186 pp.[ 刘茂松, 张明娟, 2004. 景观生态学——原理与方法. 北京 : 化学工业出版社. 186 页 ]
- Lu XY, Kong LJ, Liu MR, 1996. Cellular automaton evolution and computation theory. *Journal of South China Normal University ( Natural Science )*, 2 : 43 – 49.[ 吕晓阳, 孔令江, 刘慕仁, 1996. 细胞自动机的演化与计算理论. 华南师范大学学报( 自然科学版 ), 2 : 43 – 49 ]
- Ma J, Wan FH, Guo JY, You LS, 2003. Bio-climatic matching analysis for *Epiblema strenuana* ( Lepidoptera : Tortricidae ) in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 36( 10 ) : 1 156 – 1 162.[ 马骏, 万方浩, 郭建英, 游兰韶, 2003. 豚草卷蛾在我国的生物气候相似性分析. 中国农业科学, 36( 10 ) : 1 156 – 1 162 ]
- MacLeod A, Evans HF, Baker RHA, 2002. An analysis of pest risk from an Asian longhorn beetle( *Anoplophora glabripennis* ) to hardwood trees in the European community. *Crop Prot.*, 21 : 635 – 645.
- Mistroa DC, Rodriguesa LAD, Schmid AB, 2005. A mathematical model for dispersal of an annual plant population with a seed bank. *Ecol. Model.*, 188 : 52 – 61.
- Neubert MG, Parker IM, 2004. Projecting rates of spread for invasive species. *Risk Anal.*, 24( 4 ) : 817 – 831.
- Papes M, Peterson AT, 2003. Predicting the potential invasive distribution for *Eupatorium adenophorum* Spreng. in China. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 21( 2 ) : 137 – 142.
- Peterson AT, Vieglais DA, 2001. Predicting species invasions using ecological niche modeling : New approaches from bioinformatics attack a pressing problem. *Bioscience*, 51( 5 ) : 363 – 371.
- Peterson AT, Ball LG, Cohoon KP, 2002. Predicting distributions of Mexican birds using ecological niche modelling methods. *Ibis.*, 144 : E27 – E32.
- Pysek P, Hulme PE, 2005. Spatio-temporal dynamics of plant invasions : Linking pattern to process. *Ecoscience*, 12( 3 ) : 302 – 315.
- Robertson MP, Villet MH, Palmer AR, 2004. A fuzzy classification technique for predicting species' distributions : applications using invasive alien plants and indigenous insects. *Diversity Distrib.*, 10 : 461 – 474.
- Rouget M, Richardson DM, Nel JL, Maitre DCL, Egoh B, Mgidit T, 2004. Mapping the potential ranges of major plant invaders in South Africa, Lesotho and Swaziland using climatic suitability. *Diversity Distrib.*, 10 : 475 – 484.
- Scott JK, Yeoh PB, 1999. Bionomics and the predicted distribution of the aphid *Brach caudus rumexicolens* ( Hemiptera : Aphididae ). *Bull. Entomol. Res.*, 89 : 97 – 106.
- Sima YD, Liang YW, Shuai JJ, Cai P, 2005. Cuboid model based on

- Mahalanobis distance and its application in virus detection. *Application Research of Computers*, 8:198–200.[ 司马云瑞, 梁意文, 帅晶晶, 蔡萍, 2005. 基于马氏距离的方体模型及其在病毒预警中的应用. *计算机应用研究*, 8:198–200 ]
- Sindel BM, Michael PW, 1992. Spread and potential distribution of *Senecio madagascariensis* Poir. (fireweed) in Australia. *Aust. J. Ecol.*, 17: 21–26.
- Stohlgren TJ, Schnase JL, 2006. Risk analysis for biological hazards: what we need to know about invasive species. *Risk Anal.*, 26(1):1–11.
- Sun AJ, 1986. World Climate. Beijing: Meteorology Press. 8 pp. [ 孙安健, 1986. 世界气候. 北京: 气象出版社. 8 页 ]
- Sutherst RW, Maywald GF, 1985. A computerized system for matching climates in ecology. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 13:281–289.
- Sutherst RW, 2003. Prediction of species geographical ranges. *J. Biogeogr.*, 30:805–816.
- Tu XZ, Yan XF, Qian F, 2005. Self-organizing map networks and the progress of its application to chemistry and chemical technology. *Computers and Applied Chemistry*, 22(9):737–744.[ 涂晓芝, 颜学峰, 钱锋, 2005. 自组织映射网络及其在化工领域中的应用. *计算机应用化学*, 22(9):737–744 ]
- Underwood EC, Klinger R, Moore PE, 2004. Predicting patterns of non-native plant invasions in Yosemite National Park, California, USA. *Diversity Distrib.*, 10:447–459.
- Wan FH, Zheng XB, Guo JY, 2005. Biology and Management of Invasive Alien Species in Agriculture and Forestry. Beijing: Science Press. 44 pp.[ 万方浩, 郑小波, 郭建英, 2005. 重大农林外来入侵物种的生物学与控制. 北京: 科学出版社. 44 页 ]
- Walker C, Parnell T, 1991. HABITAT: a procedure for modelling a disjoint environmental envelope for a plant or animal species. *Global Ecol. Biogeogr.*, 1:108–118.
- Wang J, Kropff MJ, Lammert B, Christensen S, Hansen PK, 2003. Using CA model to obtain insight into mechanism of plant population spread in a controllable system: annual weeds as an example. *Ecol. Model.*, 166:277–286.
- Wang R, 2006. Historical Reconstruction of Invasion and Expansion and Potential Spread of Some Threatening Invasive Alien Species in China. PhD Dissertation, the Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. 21, 45–84.[ 王瑞, 2006. 我国严重威胁性外来入侵植物入侵与扩散历史过程重建及其潜在分布区的预测. 中国科学院植物研究所博士学位论文. 21, 45–84 ]
- Wang R, Wang YZ, 2006. Invasion dynamics and potential spread of the invasive alien plant species *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in China. *Diversity Distrib.*, 12:397–408.
- Wei SQ, Liu GL, 1994. A Study of Bioclimatic Analogy Between China and World. Beijing: Ocean Press. 17 pp.[ 魏淑秋, 刘桂莲, 1994. 中国与世界生物气候相似研究. 北京: 海洋出版社. 17 页 ]
- Wei SQ, Zhang Z, Zheng YS, 1995. Evaluation on the establishment potential of wheat dwarf bunt with bio-climatic analogical distance model. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis*, 21(2):127–131. [ 魏淑秋, 章正, 郑耀水, 1995. 应用物气候相似距对小麦矮化腥黑穗病在我国定殖可能性的研究. 北京农业大学学报, 21(2):127–131 ]
- Wiens JA, Schooley RL, Weeks RD, 1997. Patchy landscape and animal movements: do beetles percolate? *Oikos*, 78:257–264.
- Wiley EO, McNysset KM, Peterson AT, Robins CR, Stewart AM, 2003. Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine learning algorithm. *Oceanography*, 16: 120–127.
- With KA, 2004. Assessing the risk of invasive spread in fragmented landscapes. *Risk Anal.*, 24(4):803–815.
- Wolfram S, 1984. Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311(4):419.
- Worner SP, 1988. Ecoclimatic assessment of potential establishment of exotic pests. *J. Ecol. Entomol.*, 81(4):973–983.
- Worner SP, Gevrey M, 2006. Modelling global insect pest species assemblages to determine risk of invasion. *J. Appl. Ecol.*, 43:858–867.
- Wu JG, 2000. Landscape ecology-concepts and theories. *Chinese Journal of Ecology*, 19(1):42–52.[ 邬建国, 2000. 景观生态学——概念与理论. 生态学杂志, 19(1):42–52 ]
- Wu JS, 2005. Self-organizing feature map neural network and its application. *Journal of Liuzhou Teachers College*, 20(3):105–108.[ 吴建生, 2005. 自组织特征映射神经网络及其应用. 柳州师专学报, 20(3):105–108 ]
- Xiao DN, Li XZ, Gao J, Chang Y, Li TS, 2003. Landscape Ecology. Beijing: Science Press. 98 pp.[ 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 常禹, 李团胜, 2003. 景观生态学. 北京: 科学出版社. 98 页 ]
- Xu RM, 2003. Biological Invasion. Beijing: Science Press. 129–144.[ 徐汝梅, 2003. 生物入侵——数据集成、数量分析与预警. 北京: 科学出版社. 129–144 ]
- Xu RM, Cheng XY, 2005. Population Ecology of Insects. Beijing: Science Press. 140 pp.[ 徐汝梅, 成新跃, 2005. 昆虫种群生态学——基础与前沿. 北京: 科学出版社. 140 页 ]
- Xu JH, 2004. Mathematical Methods in Contemporary Geography. Beijing: High Education Press. 305 pp.[ 徐健华, 2004. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社. 305 页 ]
- Yan WJ, 2002. Application of genetic algorithm. *Journal of Taiyuan Teachers College*, 1:4, 16.[ 严武军, 2002. 遗传算法应用现状概述. 太原师范专科学校学报, 1:4, 16 ]
- Yang T, Luo JW, Wang Y, Wu JH, 2005. Missing value estimation for gene expression data based on Mahalanobis distance. *Computer Applications*, 25(12):2868–2871.[ 杨涛, 骆嘉伟, 王艳, 吴君浩, 2005. 基于马氏距离的缺失值填充算法. 计算机应用, 25(12):2868–2871 ]
- Zhen WX, Wang WT, 1994. Genetic algorithm and its application. *Application Research of Computers*, 9:9–10.[ 甄文祥, 王文田, 1994. 遗传算法及其应用. 计算机应用研究, 9:9–10 ]
- Zhang CW, 2004. Progress of cellular automata and its theory study. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 21(3):289–292, 306.[ 张传武, 2004. 细胞自动机及其理论研究进展. 贵州大学学报(自然科学版), 21(3):289–292, 306 ]