

软计算在生态模型中的应用

陈求稳^{1,2}, Arthur Mynett^{1,2}, 王 菲³

(1. 中国科学院生态环境研究中心; 2. WL| Delft Hydraulics; 3. 中国水利水电建设集团)

摘要: 由于生态系统的高度复杂性和非线性以及空间数据采集技术的快速发展, 近年来越来越多的软计算方法开始应用到生态模拟中来。软计算是个非常广泛的领域, 在模式上主要包括元胞自动机、基于个体和盒式模式等; 在方法上代表性的有人工神经网络、模糊数学、遗传算法、混沌理论等。重点介绍元胞自动机和规律方法在生态模型中的应用, 具体实例包括种群动态模拟、水华预警和生境栖息地模拟。

关键词: 软计算; 元胞自动机; 规律方法; 生态模型

文章编号: 1000-0933(2006)08-2594-08 **中图分类号:** F291 **文献标识码:** A

Applications of soft computation to ecological models

CHEN Qiu-Wen^{1,2}, Arthur Mynett^{1,2}, WANG Fei³ (1. RCEES China Academy of Sciences; 2. WL| Delft Hydraulics; 3. SINOHYDRO). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2594 ~ 2601.

Abstract: owing to the high complexity and the non-linearity of ecosystems and the rapid development of technology in spatial data survey, soft computation is more and more widely used in ecological models. Soft computation is a broad field which includes cellular automata (CA), individual based models and box-based model with respects to paradigms, and artificial neural networks (ANN), fuzzy logic (FL), genetic algorithm (GA), chaos theory and rules-based method with respects to techniques. This paper concentrates on the uses of CA paradigm and rule-based technique in ecological models. Application cases include population dynamics modeling, algal blooms forecasting and habitat simulation.

Key words: soft computation; cellular automata; rule-based method; ecological models

受计算容量和生物监测数据的限制, 长期以来生态模型主要以集合模式 (aggregated) 和概念方法 (conceptual) 为主, 如描述种群动力学的 Loteka-Volterra 模型^[1] 用生物量而不是生物体数目来表征系统的种群量, Michaelis-Menten 生长率模型以 Monod 曲线为基本概念描述藻类和植物的生长^[2]。这些模型根据牛顿第二定律和热力学第一、第二定律通过微分方程对研究对象的物理过程进行描述^[3], 模型的变量、时间和空间基本是连续的。这些模型模式和方法为生态系统的研究起到了很大的推动作用^[2], 并一直是生态模拟领域的重要手段。但是集合式模型几乎无法体现生物个体的相异性、空间的异质性和局部的相互作用, 甚至完全没有空间域 (如 Loteka-Volterra 模型), 而这些特性对生态系统的演变有重要影响^[4,5]。此外, 由于生态系统的高度复杂性和非线性, 人类对生态动力学机制的认识存在很大的限制^[6~8], 而且很多情况下这种认识是定性的而非定量的, 因此有时很难采用微分方程进行描述。

随着计算科学 (尤其是高性能并行运算) 和监测技术的高速发展, 越来越多的软计算方法开始应用到系统

基金项目: 国家 973 基础研究资助项目 (2005CB121107); 中国科学院“百人计划”资助项目

收稿日期: 2006-01-04; **修订日期:** 2006-05-10

作者简介: 陈求稳 (1974 ~), 男, 北京市人, 博士, 研究员, 主要从事内陆水及河口生态环境研究和模型系统开发应用

Foundation item: The project was supported by 973 National Basic Research Program of China (No. 2005CB121107); “100 Talents Program” of Chinese Academy of Sciences

Received date: 2006-01-04; **Accepted date:** 2006-05-10

Biography: CHEN Qiu-Wen, Ph. D., Professor, mainly engaged in eco-environmental research and modeling system development for inland and coastal waters. E-mail: qchen@cees.ac.cn

模拟中来,并相互融合产生了一些新兴的交叉学科,如 1991 年由 Abbott^[9] 在荷兰代尔夫特建立的水信息学 (Hydroinformatics) 和正在快速发展的生态信息学 (Ecoinformatics)。

软计算是个非常广泛的领域,在模式上主要包括元胞自动机 (cellular automata)、基于个体 (individual based) 和盒式模式 (box based) 等,与传统集合模式相比这些模式在系统变量、时间域和空间域上以离散为主^[4,5],它们以个体或者空间单元为对象,研究其时间演变和空间运动从而获得系统的时空格局。软计算在方法上代表性的包括人工神经网络、模糊数学、遗传算法、遗传编程、混沌理论和规律方法等,与通常的概念方法相比这些方法以定性的经验知识为参考,从大量的监测数据中获取系统的动力学规律^[10,11],从而弥补了人类对生态系统演变机制认识上的不足。

软计算在生态模型中也有广泛的应用,如利用元胞自动机模拟种群演变^[12]和沉水植物竞争性生长^[13],基于个体模式模拟鱼类和双贝生物的繁殖和扩张^[14]。Salski^[15]和 Chen^[16]运用模糊数学模拟藻类的生长取得很好的效果,Recknagel^[17]等将人工神经网络成功地应用到水华预测之中,Baptist^[18]率先利用遗传编程推导出水力糙率变化与河床植被格局之间的关系,混沌理论在生态系统研究中的应用也在快速发展^[2]。

但是比较而言,软计算在生态模型中的应用还处于初步阶段,随着计算能力的进一步发展,以离散和数据挖掘为特征的软计算将在生态系统研究中具有越来越重要的位置^[19-21]。本文将依据作者的研究背景,重点讨论元胞自动机和规律方法在生态模型中的应用。

1 元胞自动机

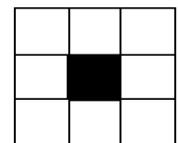
元胞自动机模式由 Von Neumann 于 1949 年提出^[22],其基本计算理论由 Wolfram 在 1984 年前后奠定^[23],但当时的研究几乎都集中在自组织和自修复机制上,而第一个真正具有生态意义的应用则是 Conway 的“生命游戏 (Game of Life)”。

元胞自动机是一个离散的数学系统,它根据研究对象的特征空间尺度将研究区域划分成大小完全一致的单元,每个单元有其特征和取值。单元的取值每过一个特征时间步长就进行更新,新的取值取决于该单元和其周围邻居当前的取值情况以及它们之间的相互作用规律,这种动态过程不断演进。元胞自动机模式类似于流体力学中的欧拉方法,但其演变过程基本是不可逆的。元胞自动机通常表现出明显的自组织特性,即使给予完全无序的初始结构,经过一定时间的演变,能产生有序的结构^[24]。

根据定义,一个元胞自动机模型一般包含一个规则的网格,每个网格单元具有一定的属性,其中要模拟的属性将依据定义的局部相互作用规律等时间步长进行演变。可以看出元胞自动机模型具有离散性、并行性、同步性和局部性。图 1 给出了 1 维和 2 维的元胞自动机结构,其演变规律的基本形式如方程 1 和方程 2,这些规律既可以是确定性的,也可以是随机的或者半经验的^[13]:



(a)



(b)

图 1 元胞自动机

Fig. 1 cellular automata

a 1 维 left: 1D; b 2 维 right: 2D

$$a_i^{t+1} = \phi(a_{i-1}^t, a_i^t, a_{i+1}^t) \quad (1)$$

$$a_{i,j}^{t+1} = \phi(a_{i,j}^t, a_{i-1,j-1}^t, a_{i-1,j}^t, a_{i-1,j+1}^t, a_{i,j-1}^t, a_{i,j}^t, a_{i,j+1}^t, a_{i+1,j-1}^t, a_{i+1,j}^t, a_{i+1,j+1}^t) \quad (2)$$

和基于个体模式相似,元胞自动机模式与面向对象编程 (object oriented programming, OOP) 存在完美的结合:元胞 (OOP 的 object)、属性 (OOP 的 properties) 和演变 (OOP 的 functions),并非常适合于并行运算,因此在大尺度生态系统模拟中得到越来越广泛的应用^[25,26]。以下介绍的 EcoCA 是运用元胞自动机开发的“猎食-被猎”种群动力学模型。

EcoCA^[27,28]是一个 2 维的元胞自动机种群动力学随机模型,每个元胞单元有 3 种可能的取值:空值、猎食者 (predator) 和被猎者 (prey),在任何时间段其取值是唯一的;值的变化取决于元胞当前的值 ($a_{i,j}^t$)、周围猎食者的数目 N_{pd} 和被猎者的数目 N_{py} ,模型的演变规律 ϕ 根据当前的取值条件计算元胞下一时段各种可能取值

的概率 $P(P_{pd}$ 和 P_{py}), 如方程 3 所示, 并考虑了繁殖、自然死亡、捕获、孤独、过度拥挤和食物可获得性等生理和生态特征。在计算出概率 p 值之后, 通过一个随机过程确定一次演变后元胞的最后取值。

$$P = \Phi(a'_{i,j}, N_{pd}, N_{py}) \quad (3)$$

图 2 是 EcoCA 模型的空间演变^[28], 可以看出虽然初始条件是完全随机的, 但系统经过一段时间演变之后形成了明显的斑块现象并具有显著的自组织特征; 图 3 给出了模型的时间演变以及相应的相动态^[28], 可以看出虽然存在随机信号, 但整个系统的种群变化具有明显的周期性。由于缺乏实际的种群变化监测数据, 为了更好的评价 EcoCA 模型, 研究中采用传统的 Lotka-Voterra 模型(方程 4)作为比较。

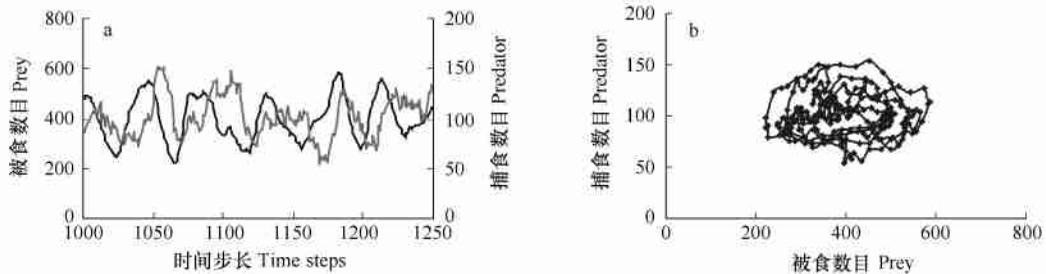


图 3 种群量的时间变化(a)和系统的相动态(b)

Fig. 3 population dynamics (a) and phase dynamics (b) simulated by EcoCA

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= aP - bP^2 - PQ \\ \frac{dQ}{dt} &= -cQ + PQ \end{aligned} \quad (4)$$

式中, P 为被猎物种生物量, Q 为猎食物种生物量, a 为被猎物种生长率(1/d), b 为生态容量; c 为猎食物种死亡率(1/d); PQ 为两物种间的响应系数。因为是非线性的微分方程组, 所以运用 4 阶龙格-库塔方法求解。图 4 给出了 Lotka-Voterra 模型的种群变化曲线和相变化^[28]。

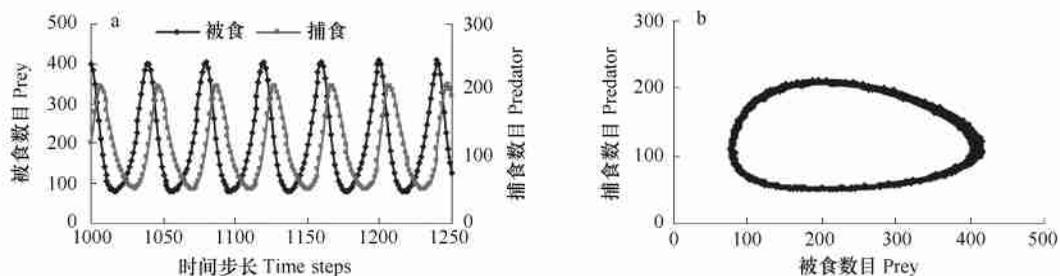


图 4 Lotka-Voterra 模型模拟的种群量时间变化(a)和系统的相动态(b)

Fig. 4 population dynamics (a) and phase dynamics (b) simulated by Lotka-Voterra model

比较图 3 和图 4, 可以看出除了随机信号之外, EcoCA 模型和 Lotka-Voterra 模型的种群量演变特征非常相近, 而 EcoCA 模型中的随机成分主要由于其随机过程引入, 这在确定性的 Lotka-Voterra 模型中完全没有, 所以不应作为模型的主要差别。但在 Lotka-Voterra 模型中没有空间域(x, y, z), 因此基本无法应用于研究系统的空间演变。

研究表明生态系统的空间格局对生物栖息地网络和生态系统的稳定性有重要影响^[29]。Chen 和 Mynett^[28]通过开发的 EcoCA 模型, 研究发现猎食-被猎生态系统的稳定性不仅与临界种群量有关, 而且与这些生物个体的空间布置有重要关系, 在相同的种群量条件下, 不同的空间布置可能导致系统出现共生、被猎种独生和两种物种共同消亡等 3 种结局, 而 Lotka-Voterra 模型只能从临界种群量角度分析这 3 种情况, 可见元胞自动机模式在模拟生态系统演变方面存在特殊优势。

运用开发的 EcoCA 模型模拟不同的收获策略 (harvest strategy), 从而为种群可持续管理提供支持。图 5 给出了 4 种管理模式下猎食者和被猎者的种群动态变化: (a) 无收获, (b) 收获 15% 的被猎者, (c) 收获 15% 的猎食者, (d) 同时收获各 15%。收获临界标准是种群密度不低于 25%, 也即在任何时间段, 如果某物种种群密度低于 25%, 在该时段放弃收获。

通过模拟和对种群量时间序列的分析发现: 适当收获猎食者可以同时提高被猎者和猎食者的生产力, 并有利于整个系统的稳定性; 而最不利于系统稳定的模式是仅收获被猎者, 因此对于该系统其种群管理模式优劣顺序为 $d > c > a > b$, 这些结论是采用传统的 Lotka-Volterra 模型^[30] 难以获得的。

在 EcoCA 模型中系统的演变采用了随机方法, 但通常根据需要也可以选用确定性方法^[13] 或者经验规律法^[31]。由于生态系统的复杂性和开放性, 往往难以通过物理模型进行室内实验, 对生态系统演变的认识主要是部分的野外观测数据和部分的经验规律, 因此如何综合利用这些监测数据和经验规律是生态模型当前的研究方向之一。

2 规律方法

规律方法 (rule based) 是介于模糊数学和数据驱动之间的一种方法, 它以人的定性认识为基础, 采用模糊数学建立初步的规律库, 然后从有限的监测数据中获取新的规律完善原有的规律库。规律方法在生态模型中有很多的应用, Chen 和 Mynett^[16] 运用该方法建立了太湖水华预测模型, Baptist 等人^[32] 运用该方法模拟莱茵河洪泛区植被的演变。由于描述生物生理和环境条件之间的关系十分困难, 规律方法是生物栖息地模型中的主要方法^[33, 34]。

为了建立这些规律, 通常需要完成 3 个步骤: 确定变量特征值、建立系统演变规律和精简建立的规律库。变量特征值的确定既可以来自控制实验, 也可以来自数据分析。如图 6a 实验所得的 $P \sim I$ 曲线: 当光照 I 为 I_1 时, 光照是限制因子; 当 I 为 I_2 时, 光照成为抑制因子, 因此对于变量 I , I_1 和 I_2 可以作为相应的特征值^[4]。但是在很多情况下缺乏这样的试验结果, 而具有一定的野外监测数据, 如图 6b 的总无机氮和磷酸盐, 可以先对数据进行聚类分析^[4, 35], 然后每一类中的均值可以作为变量的特征值。

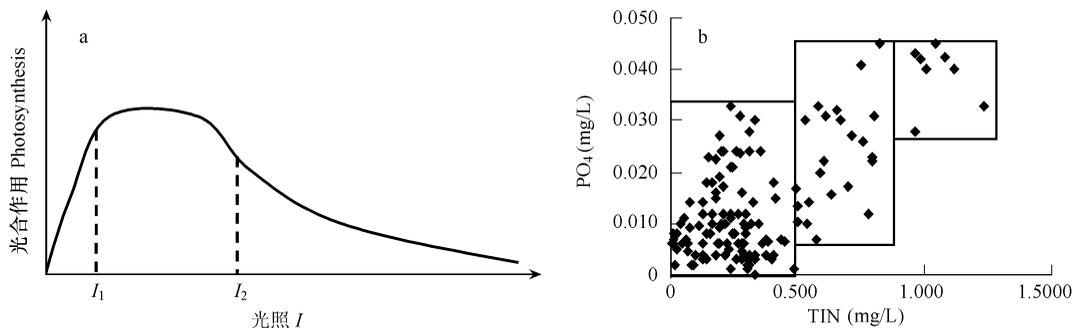


图 6 模型变量特征值确定方法

Fig. 6 Methods to determine characteristic values of model parameters

a 实验法 experiment; b 分类法 partitioning analysis

演变规律的建立: 首先是结构化分析对研究对象的经验认识, 并依照一定的格式表达为模型可识别的规律, 这些规律将作为参照形成模型的基础规律。从数据中提炼规律主要有两种手段, 即特征法 (feature reasoning) 和个例法 (case reasoning)。对于特征法, 先对数据进行聚类分析, 每一类代表系统的一个特征, 然后转换为模型的规律^[36, 16]。对于个例法, 先把每一条记录转换为一条中间规律, 然后剔除与基础规律相冲突的中间规律, 再进行显著性分析剔除非显著的中间规律, 对于剩余的显著但相互冲突的规律, 按照其出现的频率赋予权重, 从而形成模型需要的规律^[37]。

演变规律的精简: 当模型的变量较多或者变量的特征区间划分较细时, 模型的规律数目出现快速增长, 这既增加了模型的复杂性, 而且使模型的校正和检验变得十分困难, 因此需要对初步获得的演变规律进行精简。



图2 应用 EcoCA 模拟的猎食-被猎系统

Fig.2 Snapshots of spatial patterns of prey-predator population dynamics simulated by EcoCA

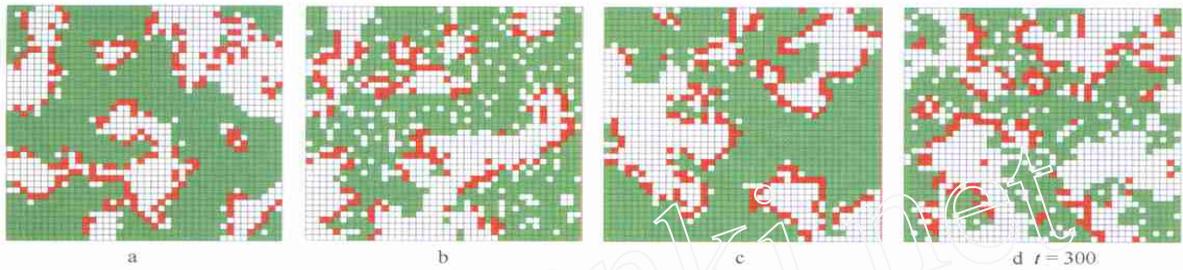


图5 不同收获模式下猎食-被猎者种群变化

Fig.5 Patterns of population dynamics under different harvest strategies

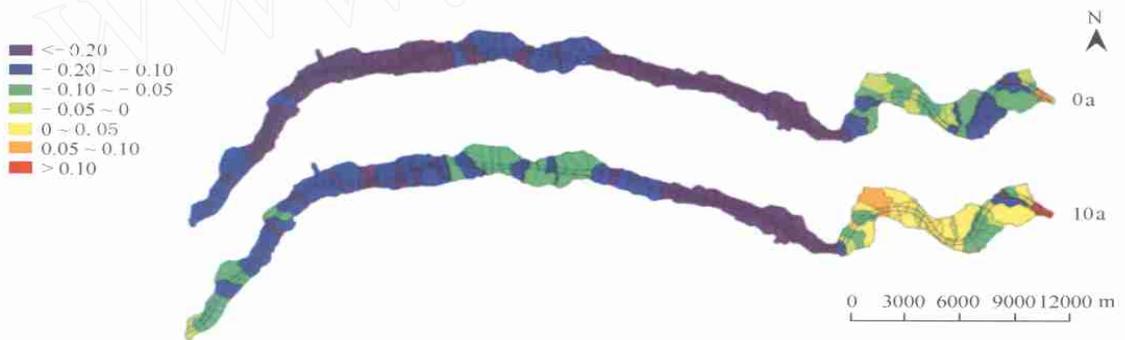


图7 当前的高水位和模拟 10a 后的高水位^[18]

Fig.7 The high water level at present and after 10 years^[18]

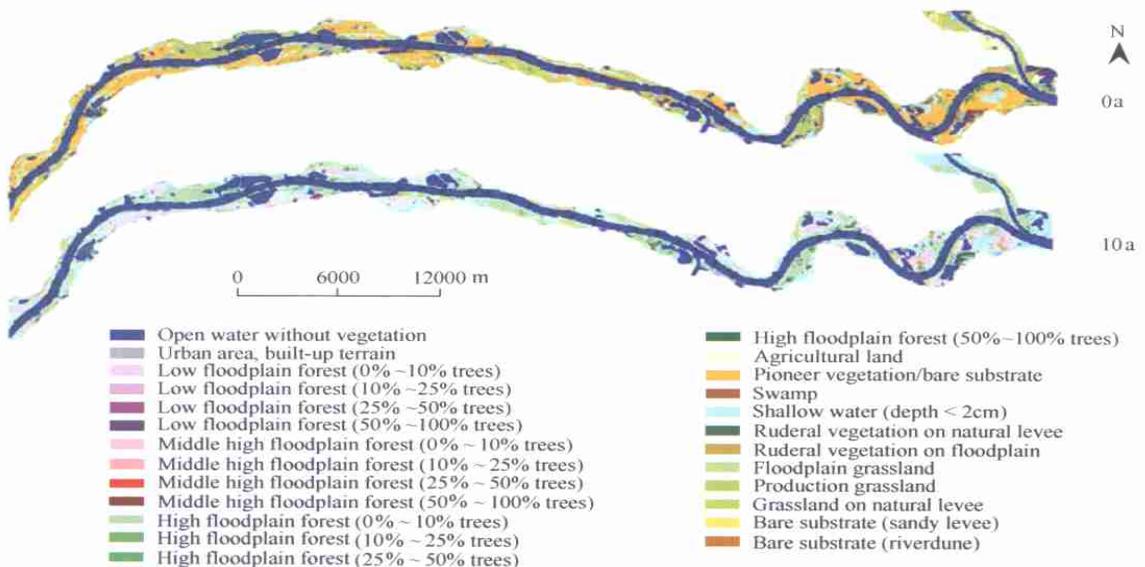


图9 当前的植被格局和模拟 10a 后的植被格局^[18]

Fig.9 Vegetation patterns at present and after 10 years^[18]

模型规律的精简一般可以通过合并相似规律和调高显著性标准来实现^[38]。以下就两个应用实例说明规律方法在生态模拟中的具体应用。

荷兰的北海因受莱茵河入流营养物的影响,经常在春末夏初发生 *Phaeocystis globosa* (*P. globosa*) 藻类爆发性生长事故,导致贝类死亡和海岸休闲场所丧失。在欧盟 HABES 项目基金的支持下,荷兰研究机构从 2002 年开始建立 *P. globosa* 水华专家系统。由于水华爆发机制的高度复杂性,以往采用的数字模拟方法一直效果不佳,为此该项目选用了经验规律法。

通过长期的试验研究和海上监测,发现 *P. globosa* 生长的基本规律如下:光照是水华的促发因子,要求 $> 100 \text{Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$;磷酸盐是其持续因子,要求 $> 0.0062 \text{mg/L}$;适宜的盐度和温度范围分别在 $20 \sim 35 \text{psu}$ 和 $7 \sim 22$ 之间^[39];硅藻是其竞争生物,但受可溶性硅酸盐含量的影响。通过对 1990~2000 年长序列监测数据的分析和提炼,并结合以上的试验规律,最后确定了 *P. globosa* 水华预报的规律模型^[40],如表 1 所示。

表 1 *P. globosa* 水华预报的规律模型

Table 1 The rule model				
规律 1 Rule 1	规律 2 Rule 2	规律 3 Rule 3	规律 4 Rule 4	默认 Default
$Z > Z_{cr}$	$Z < Z_{cr}$	$T > = 14.64$	$T > = 10.24$	不水华
$\text{SiO}_2 > 1.17$	$T < = 10.24$	$\text{PO}_4^{3-} < = 0.42$	$\text{SiO}_2 > 1.17$	Not bloom
水华[0.947]*	$\text{PO}_4^{3-} > = 0.42$	$\text{SiO}_2 < = 1.17$	$\text{PO}_4^{3-} > 0.42$	
Bloom[0.947]	水华[0.667]	水华[0.650]	不水华[0.958]	
	Bloom[0.667]	Bloom[0.650]	Not bloom[0.958]	

*方括号中的值表示发生的概率 the value in the bracket means the probability

表中 Z 为混合深度,通过 1 维垂向紊流模型求取^[41]; Z_{cr} 为临界水深,由光照强度 (I_0)、光在水体中衰减系数 (k_d)、*P. globosa* 的生长率 (u_{max})、自然死亡率 (l) 和光照半饱和强度 (k_s) 决定(方程 5); SiO_2 为硅酸盐浓度, T 为温度, PO_4^{3-} 为磷酸盐浓度,主要来源于监测。

$$f(z_{cr}) = \frac{I_0(1 - e^{-k_d z_{cr}})}{k_d z_{cr}} - \frac{k_s l}{u_{max} - l} \quad (5)$$

该模型的预报准确度达到 78%。由于混合深度主要受潮汐、光照和风的影响,存在很强的季节性,且年际间变化不大,因此可以计算出多种预案作为备用,而光照可以从气象部门获得,营养盐浓度已实现在线监测,所以该模型已经应用于实际^[41]。

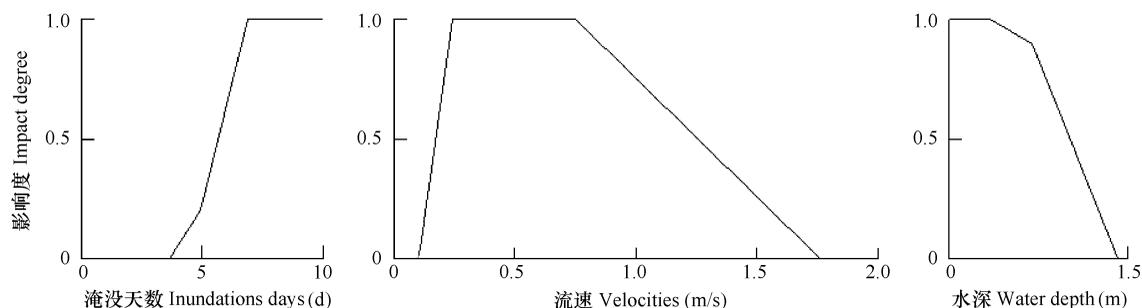
规律方法在生态模型中的另一个应用实例是生物栖息地模拟。由于受季节性淹没尤其是洪水脉冲的影响,河道两侧的洪泛区是动态变化很强的生态系统,因此洪泛区生物栖息地和生物多样性是河流生态系统研究的重点之一^[14,42]。本文将通过莱茵河下游河段植被演替模拟实例简单介绍规律方法在栖息地模型中的应用,在该实例中采用了 Delft3D 和 Delft-Habitat 软件。

模型的基本步骤如下:(1)普查研究区内的主要植被类型,如挺水植物、草地、灌丛等,选取需要模拟的植被类型;(2)分析这些植物的生理特性,确定对其生长和扩展有重要影响的环境因子,主要包括水位、流速、河床地貌、连续淹没时间、沉积物中可溶性氮和磷酸盐的浓度;(3)采用二维水动力模型模拟河段的流速和水位(如图 7),即对 Delft 3D 模型进行垂向平均;(4)运用 Delft 3D 模型中的泥沙模块和水质模块模拟研究区河床的冲淤以及沉积物中营养盐含量;(5)建立植被生境与环境因子之间的响应关系,如图 8 所示;(6)按照 Delft-Habitat 要求的格式建立植被类型在不同环境条件下的演变规律;(7)根据模拟出的环境条件以及响应关系,评价各植被类型的生境适应性,并分析其不确定性区间^[43],从而获得研究河段在未来不同水平年的植被格局,如图 9 所示。

模拟发现:未来 10a,该河段的高水位将有所上升,但上升幅度不大;由于一定的淹没深度和时间有利于挺水植物的生长,因此 10a 后该河段的浅水植被将出现扩张(图 9)。

3 讨论

虽然软计算在生态模型中的应用日益广泛,而且在某些条件下显示出一定的优势,但这不能说明软计算

图8 挺水植物与环境因子之间的响应关系^[34]Fig. 8 The functional responses of water plants on environmental conditions^[34]

可以替代传统的方法,而只能作为多种模型方法的一种选择,关键在于根据具体需要综合运用各种方法^[44]。通常对于任何一种模型模式或者方法的选择取决于3个关键因素:研究的目的、对研究对象的认识程度、数据的获得情况。

在模型方法上:当对研究对象的物理机制比较了解但缺乏监测数据时,通常采用概念模型加以描述;当对研究对象的物理机制了解很少,但却获得大量监测数据时,往往可以采取数据驱动模型;当对研究对象的物理机制只有一些经验性的认识,同时监测数据比较稀疏时,可采用规律模型。

在模型模式上:如果系统明显受空间异质性和局部相互作用的影响,且研究对象不发生主动性位移时,一般采用元胞自动机模式,如土地利用演变和植被生长扩展等;如果个体的差异对系统的演变存在显著影响或者个体发生主动性位移时,一般采用基于个体模式,如鱼类和陆生动物的种群变化;而在其他情况下可采用集合模式,以节约计算成本。

随着现代信息技术^[45,46]和测量技术的快速发展以及在各领域中的应用,获取大空间尺度的生态环境数据已成为可能;同时高性能运算的逐步普及为细致模拟创造了条件,因此空间显式(spatially explicit)模型和离散模式将成为未来生态模型发展的一个重要趋势^[47]。目前的主要研究工作是:(1)把规律方法和元胞自动机进行结合,运用规律法定义元胞自动机模型中的演变函数 ϕ ;(2)由于GIS中栅格数据格式(raster format)和元胞自动机存在天然的相融性,因此将实现直接在GIS环境下运行元胞自动机模型。

References:

- [1] May R M. Biological populations obeying difference equations: stable points, stable cycles and chaos. *Journal of Theoretical Biology*, 1975, 49: 511 ~ 524.
- [2] Jørgensen S E. *Fundamentals of Ecological Modelling* (2nd Edition). Elsevier Science B. V., 1994.
- [3] Abbott M B, Minns A W. *Computational Hydraulics* (2nd Edition). Ashgate Publishing Company, 1998.
- [4] Chen Q. *Cellular Automata and Artificial Intelligence in Ecohydraulics Modelling*, Taylor & Francis Group plc, London UK, 2004.
- [5] DeAngelis D L, Gross L J. *Individual Based Models and Approaches in Ecology: Concepts and Models*. Routledge, Chapman and Hall, New York, 1992.
- [6] Lee J H W, Huang Y, Dickman M, Jayawardena A W. Neural network modelling of coastal algal blooms. *Ecological Modelling*, 2003, 159: 179 ~ 201.
- [7] Recknagel F, Petzoldt T, Jaeke O, Krusche F. Hybrid expert system DELAQUA—a toolkit for water quality control of lakes and reservoirs. *Ecological Modelling*, 1994, 71: 17 ~ 36.
- [8] Recknagel F. ANNA—Artificial neural network model for predicting species abundance and succession of blue-green algae. *Hydrobiologia*, 1997, 349: 47 ~ 57.
- [9] Abbott M B. *Hydroinformatics—Information Technology and the Aquatic Environment*. Avebury Technical, Aldershot, UK, 1991.
- [10] Weiss S M, Indurkha N. *Predictive Data Mining, A Practical Guide*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc. 1998.
- [11] Witten I H, Frank E. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations*. Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
- [12] Gronewold A, Sonnenschein M. Event-based modelling of ecological system with asynchronous cellular automata. *Ecological Modelling*, 1998, 108: 37 ~ 52.
- [13] Chen Q, Mynett A E, Minns A W. Application of cellular automata to modelling competitive growth of two underwater species *C. aspera* and *P. pectinatus* in Lake Veluwe. *Ecological Modelling*, 2002, 147: 253 ~ 265.
- [14] Morales-Chaves Y. Analysis of mussel population dynamics in the Mississippi River. Ph.D. Thesis, Civil and Environmental Engineering, University of Iowa, Iowa City, 2004.
- [15] Salski A, Sperlbaum C. Fuzzy logic approach to modelling in ecosystem research, in: Bouchon-Meurier, Yager and Zadeh, eds. *Uncertainty in Knowledge Bases*, Springer LNCS 521, 1991.

- [16] Chen Q, Mynett A E. Integration of data mining techniques with heuristic knowledge in a fuzzy logic modelling of eutrophication in Taihu Lake. *Ecological Modelling*, 2003, 162: 55 ~ 67.
- [17] Recknagel F, French M, Harkonen P, Yabunaka K. Artificial neural network approach for modelling and prediction of alga blooms. *Ecological Modelling*, 1995, 96: 11 ~ 28.
- [18] Baptist M.J. Modelling floodplain biogeomorphology. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 2005.
- [19] Yue T, Fan Z. Research and Perspectives on Ecological Model Development. Review and Prospects of Ecology Research. Beijing, China Meteorological Press, 2004. 80 ~ 88.
- [20] Li D, Ma Z. Perspectives of Numerical Ecology and Ecological Modelling. Review and Prospects of Ecology Research. Beijing, China Meteorological Press, 2004. 89 ~ 99.
- [21] Yue T. Handbook of Numerical Models in Environment. Beijing: Scientific Press, 2003.
- [22] Von Neumann J. Theory of self-reproducing automata, Univ. of Illinois Lectures on the Theory and Organization of Complicated Automata. In: Burks, A. W. ed., Univ. of Illinois Press, Urbana, 1949.
- [23] Wolfram S. Computation theory of cellular automata. *Communication in Mathematical Physics*, 1984, 96: 15 ~ 57.
- [24] Wolfram S. Cellular automata as model of complexity. *Nature*, 1984, 311: 419 ~ 424.
- [25] Engelen G, White R, Uljee I. Integrating Constrained Cellular Automata Models, GIS and Decision Support Tools for Urban Planning and Policy Making. In Timmermans, H. eds., Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993.
- [26] Wootton J T. Local Interactions predict large-scale patterns in empirically derived cellular automata. *Nature*, 2001, 413: 841 ~ 844.
- [27] Minns A W, Mynett A E, Chen Q, Boogaard H F P van den. A cellular automata approach to ecological modelling. In: Odgaard, A.J., ed. Proceedings of Hydroinformatics Conference Iowa, USA, 2000.
- [28] Chen Q, Mynett A E. Effects of cell size and configuration in cellular automata based prey-predator modelling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2003, 11: 609 ~ 625.
- [29] Duel H, Lee G E M van der, Penning W E, et al. Habitat Modelling of Rivers and Lakes in the Netherlands: An Ecosystem Approach, Canadian Water Resources Journal, 2002, 28: 231 ~ 248.
- [30] Azar C, Hölmberg J, Lindgren K. Stability analysis of harvesting in a predator-prey model. *Journal of Theoretical Biology*, 1995, 174: 13 ~ 19.
- [31] Wu F. A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region. *Computer, Environment, and Urban Systems*, 1996, 20: 367 ~ 387.
- [32] Baptist M.J, Lee G E M, van der Kerke F, et al. Modelling of morphodynamics, vegetation development and fish habitat in man-made secondary channels in the river Rhine. In: King J ed. *Proceedings of the 4th Ecohydraulics Conference and Environmental Flows*. Cape Town, South Africa, 2002.
- [33] Jorde K, Schneider M, Peter A, et al. Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics.
- [34] Duel H, Baptist M.J, Ceerling G.J, et al. Cyclic Floodplain Rejuvenation as a strategy for both flood protection and enhancement of the biodiversity of the river Rhine, In King J ed. *Proceedings of the 4th Ecohydraulics Conference and Environmental Flows*. Cape Town, South Africa, 2002.
- [35] MacQueen, J. Some methods for classification and analysis of multivariable observation. Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley: University of California Press, 1967, 1: 281 ~ 297.
- [36] Boogaard H F P van den, Mynett A E, Ali Md S. Self organisation feature maps for the analysis of hydrological and ecological data sets. In: Babovic, V., and Larsen, L. C., eds. Proceedings of Hydroinformatics, 1998.
- [37] Chen Q, Mynett A E. A robust fuzzy logic approach to modelling algal biomass. *Journal of Hydraulic Research*, 2004, 42: 303 ~ 309.
- [38] Krone A, Taeger H. Data-based fuzzy rule test for fuzzy modelling. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 123: 343 ~ 358.
- [39] Peperzak L. The Wax and Wane of *Phaeocystis globosa* Blooms. Ph.D. dissertation, University of Groningen, 2002.
- [40] Chen Q, Mynett A E. Forecasting *Phaeocystis globosa* Blooms in the Dutch Coast by an Integrated Numerical and Decision Tree Model. *Aquatic Ecosystem Health and Management* (in press).
- [41] Blauw A N. Final Report: Harmful Algal Bloom Expert System. EVK2-2000-22091, 2004.
- [42] Chen Q, Ouyang Z. Watershed Ecology and Modeling System. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1153 ~ 1161.
- [43] Lee G E M, Aarts H P A, Boogaard, H F P, et al. Analysis of uncertainty in expert rules and input data for habitat suitability models. In: King J ed. Proceedings of the 4th Ecohydraulics Conference and Environmental Flows. Cape Town, South Africa, 2002.
- [44] Chen Q, Ouyang Z. Integrated Ecohydraulics Model and the Application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(11): 1273 ~ 1279.
- [45] Shao G, Yound D R, Porter J H, et al. An integration of remote sensing and GIS to examine the response of shrub thicket distributions to shoreline changes on barrier islands. *J. of Coastal Research*, 1998, 14: 299 ~ 307.
- [46] Shao, G. Application of GIS to Ecological Research. Review and Prospects of Ecology Research. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 100 ~ 109.
- [47] Xu H, Wang S, Wang W. Theory and Methodology of Stability in Numeric Ecological Models. Beijing: Scientific Press, 2004.

参考文献:

- [19] 岳天祥, 范泽孟. 生态建模研究与展望. 见: 李文华, 赵景柱主编. 生态学研究回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004. 80 ~ 88.
- [20] 李典谟, 马祖飞. 展望数学生态学与生态模型的未来. 见: 李文华, 赵景柱主编. 生态学研究回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004. 89 ~ 99.
- [21] 岳天祥. 资源环境数学模型手册. 北京: 科学出版社, 2003.
- [42] 陈求稳, 欧阳志云. 流域生态学及其模型系统. *生态学报*, 2005, 25(5): 1184 ~ 1190.
- [44] 陈求稳, 欧阳志云. 生态水力学耦合模型及其应用. *水利学报*, 2005, 36(11): 1273 ~ 1279.
- [46] 邵国凡. GIS在生态学中的应用. 见: 李文华, 赵景柱主编. 生态学研究回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004. 100 ~ 109.
- [47] 徐海根, 王顺庆, 王万雄. 数学生态学稳定性理论与方法. 北京: 科学出版社, 2004.