

张金晖, 王 凯, 胡静斐, 等. 人工生态系统内植物群落竞争演替的时空模式与品种筛选[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(4): 815-821.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.04.014

人工生态系统内植物群落竞争演替的时空模式与品种筛选

张金晖, 王 凯, 胡静斐, 胡大伟

(北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191)

摘要: 人工生态系统的研究理论和方法被广泛应用于地面设施农业和空间探索领域, 植物是人工群落的建群种和优势种, 决定着人工生态系统的基本结构与功能。目前, 人工生态系统中植物物种都是根据特定目的(如品质、产量和株型等)进行筛选的, 然而这种筛选方式并没有考虑植物之间的相互关系, 构成人工群落的稳定性往往较差。本研究利用元胞自动机理论和技术, 在原型试验的基础上, 运用数学建模与计算机仿真技术, 对人工生态系统中植物群落的竞争演替过程进行模拟。将 Lotka-Volterra 竞争模型离散化作为元胞自动机的更新规则, 经过大量的数值仿真试验, 得到基本的人工群落演替模式和演化信息熵的变化过程, 以及顶级群落的组成结构。本研究结果可为认识人工生态系统中植物群落的演替过程和植物品种的筛选提供理论依据。

关键词: 人工生态系统; 人工群落演替; 元胞自动机; 品种筛选; 数值仿真试验

中图分类号: Q948.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)04-0815-07

Spatial-temporal patterns of plant community succession in artificial ecosystem and species screening

ZHANG Jin-hui, WANG Kai, HU Jing-fei, HU Da-wei

(School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The artificial ecosystems are extensively used in ground facility agriculture and space exploration. Plant species like crops and vegetables are major and dominant in artificial community, and fundamentally determines the structures and functions of artificial ecosystems. The key screening criteria for plant species often include specific objectives such as quality, yield and shape, and exclude the relationship between species, resulting in the weak stability of artificial community. This study focused on the digital simulation of plant community succession in artificial ecosystem due to species competition based on the theory and technology of cellular automata (CA) and prototype experiments. By taking discretization of time-continuous Lotka-Volterra competition model as the updating rule of CA, the basic mode of plant community succession, the dynamics of information entropy and the climax community structure were achieved through a great amount of CA simulations and analyses. The results provided a theoretical basis for comprehension of plant community succession

and plant species screening in artificial ecosystem.

Key words: artificial ecosystem; community succession; cellular automata; plant species screening; digital simulation

收稿日期: 2017-02-13

基金项目: 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室
开放基金项目(BUAA-VR-14KF-07)

作者简介: 张金晖(1990-), 男, 甘肃漳县人, 硕士研究生, 主要从事生态系统的数学建模与仿真研究。(Tel) 13121951659; (E-mail) zhangjinhui0707@163.com

通讯作者: 胡大伟, (E-mail) dwu@163.com

人工生态系统模拟自然生态系统的结构和运行

机制,在一个封闭的环境中建立人工环境和人工生物群落,使其具有与自然生态系统类似的功能。人工环境,如光照、温度、水分、空气和肥料等,通常是相对恒定的,它们通常能够充分满足系统内生物群落的需求,使各物种能够完成正常的生活史,并在此过程中产生生物量,进而维持群落的生物多样性和系统的稳定运行。人工生物群落主要由作物等构成,与自然群落相比,在生物种类多样性、能流强度、生产力、演替特征、成熟度和营养变化方面均存在较大的差异^[1-3]。

目前构建人工生态系统的方法和技术已经被广泛应用在地面设施农业和航空航天领域。人工生态系统用于设施农业领域时,它被称为温室或植物工厂,例如,通过制造合适的人工环境,实现作物的高产、稳产、优产^[3],除了作物外,人工生态系统也可以用于培植名贵的花卉和药材等^[4]。人工生态系统用于航天领域时,它被称为受控生态生命保障系统或生物再生生命保障系统。近年来,世界各航天大国正如火如荼地开展相应研究,将它应用在空间探测领域,用于乘员的空间生命保障。该系统基于生态学原理和生态工程技术,为执行空间任务的乘员提供一个类似于地球生态系统的环境,例如,植物为乘员提供 O_2 和食物,而人的代谢废物(CO_2 和排泄物),可以作为植物利用的基质,从而使各种生命物质得以循环再生。这样的人工生态系统目前主要有俄罗斯的人造生物圈、美国的生物圈2号、美国的月球-火星生物再生生命保障系统、欧洲的微生态生命保障系统、日本的密闭生态试验系统和中国的生物再生生命保障系统^[2]。除此之外,人工生态系统还可用于地面的极端环境中,如深海、荒漠、极地和高原等,为人的活动提供生命保障。

关键植物作为人工群落的建群种和优势种,有关人工生态系统中相应品种筛选的探究,直接影响整个系统所具有的生态功能。针对地面应用植物品种的筛选原则主要有:第一,产量高,选择那些高产优质的植物品种;第二,生长周期短,为了节约运行成本,选择那些生长期短的品种;第三,经济价值高,为了获得较大的经济效益,选择那些较名贵的品种。针对空间应用植物品种的筛选原则主要有:第一,可食部分高,选择那些可食比高的植物品种,否则不仅废物处理困难,而且浪费能源;第二,矮株,由于系统内空间有限,通常选择那些矮株物种;第三,抗逆性

强,由于人工生态系统在空间的运行过程中可能会经历内部变化与外部扰动,所以通常选择抗逆性强的物种;第四,栽培工艺简单,通常要求所选物种只需简单的栽培制度,因为过于复杂的栽培工艺会增大操作失误的概率,危害系统运行的安全与可靠性^[5-7]。

虽然人工生态系统在地面和空间都被广泛应用,但系统的稳定性与可靠性仍不能满足要求。例如,在空间应用中,人工生态系统经常因植物群落演替失调而发生运行故障。一个重要的原因是,目前人工生态系统的植物筛选原则没有充分考虑物种之间的相互关系,人工顶级群落内部常常因为物种搭配不当导致功能失调^[2]。

自然生态系统是经过亿万年进化产生的,其中的生物群落也经过了长期自组织的演替,才形成今天的生物圈,其中生物与生物之间能够稳定共存,而人工生态系统的形成却没有经过这样的自然选择过程,完全是由人工选择的,并未考虑自然生物群落的演替过程及生物之间的相互作用(如竞争、捕食、共生、寄生、偏利和偏害等)。本研究是针对以下科学问题提出的:在人工生态系统中植物群落是如何自组织演替的,其时空变化基本模式是什么?在演替过程中群落的演化信息熵如何变化?最终形成的顶级群落有什么特点?目前,这些问题在国内外基本没有被系统地研究过。由于生物群落的演替过程是长期的、大空间尺度的,很难通过具体的原型试验进行研究。因此,本研究采用数学建模和计算机数值仿真试验的方法,对植物群落演替过程的时空模式进行再现,进行量化分析,得到具有普适意义的结果。传统的生态系统建模方法往往采用常微分方程(ODE)法,然而这种方法不能模拟生物之间的自组织作用和参数的空间变化。因此,ODE法无法对植物群落演替做长期的时空行为预测^[8-12]。上世纪80年代兴起的元胞自动机(Cellular Automata, CA)技术,是模拟复杂系统自组织时空行为的理想工具,CA的基本构成是元胞,它的动态只与自身及周围的少量邻居元胞有关,而与位置较远的元胞没有关系。CA没有中央控制器,没有监督者,元胞只有检测局部信息的能力,信息的获取和交换也只是在部分个体之间进行,而且是动态变化的,而一些元胞个体本身不具有CA具有的整体属性,其行为、功能和结构会自下而上地涌现出来,非常适合用于复杂系统

(自然生态系统、人工生态系统)的建模和仿真试验研究^[13-14]。

本研究拟利用 CA 模型,将 Lotka-Volterra 竞争模型离散化作为 CA 的更新规则,研究人工生态系统内植物群落的演替过程,建立其基本演替模式、生态热力学行为和顶级群落结构等,以期为人工生态系统植物群落演替过程和稳定性的研究以及植物品种的筛选提供科学的理论基础和方法依据。

1 材料与方法

1.1 人工生态系统内植物群落的元胞自动机模型

1.1.1 CA 的拓扑结构和边界条件 由于植物群落生长在二维平面上,因此本研究在二维平面上对其自组织演替行为进行 CA 建模与仿真。采用矩形的元胞自动机拓扑结构(图 1),每一个元胞代表 1 种植物。矩形结构简单直观,非常适合在现有计算机软硬件环境下表达^[14-15]。

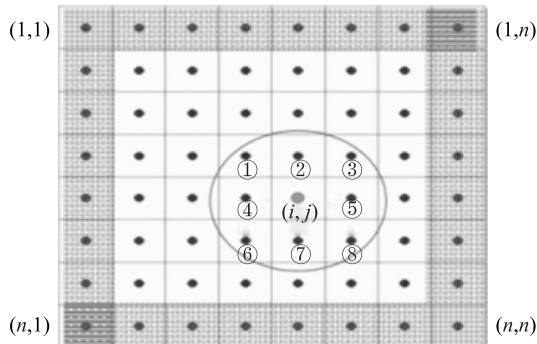


图 1 矩形 CA 拓扑结构、邻居关系及周期型边界

Fig.1 Topological structure, neighbors and periodic boundary of rectangular CA

本研究采用 Moore 型的邻居关系(图 1),即任一元胞 (i, j) 周围有 8 个空间距离最近(半径为 1)的邻居,编号为:① $(i-1, j-1)$ 、② $(i-1, j)$ 、③ $(i-1, j+1)$ 、④ $(i, j-1)$ 、⑤ $(i, j+1)$ 、⑥ $(i+1, j-1)$ 、⑦ $(i+1, j)$ 和⑧ $(i+1, j+1)$ 。在 t 时刻,此元胞的状态以及它的 8 个邻居的状态直接决定了此元胞在 $t+1$ 时刻的状态,而此元胞的状态变化与以它为中心且半径大于 1 的那些元胞无关。

从理论上来说,植物群落在人工生态系统内演替的元胞拓扑空间应该可以在二维空间上无限延展,以利于理论研究、分析和推理。但在实际的人工

生态系统建造中,不可能将人工生态系统的内部空间设计成无限大,同时也无法在计算机上实现这一理论的空间拓扑结构。对于实际应用(实际建造与工程计算)来说,CA 的拓扑空间必须是有限的,即有边界的。因此,当 CA 的二维拓扑空间确定之后,必须确定边界条件,才能使 CA 仿真试验顺利进行。为了充分模拟物种的演化过程,可以认为人工生态系统内部的空间是无穷大的,因此采用周期型边界条件,对于二维矩形的 CA 拓扑结构来说,该空间上下连接,左右相连,形成一个拓扑圆环面——类似于商拓扑,形状像车轮。因此,对植物群落在人工生态系统内的演替进行理论分析与探索时,这种结构可以进行充分的仿真试验研究。上下、左右边界上的元胞互为邻居,如图 1 中左上顶点元胞 $(1, 1)$ 的邻居为 $(1, 2)$ 、 $(1, n)$ 、 $(2, 1)$ 、 $(2, 2)$ 、 $(2, n)$ 、 $(n, 1)$ 、 $(n, 2)$ 和 (n, n) 。

1.1.2 CA 的演化规则 演化规则的确立是 CA 模型的核心,目前 CA 的演化是用一系列规则构成的模型进行模拟,这些规则通常是简单的,如生命游戏、兰顿蚂蚁等的逻辑规则,但这样建立规则的方法主观性比较强,通常难以量化^[16]。由于植物群落演替的动力学原因是物种之间的相互作用,即竞争关系,而 CA 的演化规则是要求其必须是离散的,因此本研究试图将经典竞争 Lotka-Volterra 连续 ODE 方程离散化作为人工生态系统植物群落演替的更新规则,这样可以有效避免规则的不确定性,得到更加有效的结果。

1.2 数值模拟与统计过程分析

1.2.1 Monte Carlo 试验 群落中各个植物群之间的经典竞争模型描述如下:

$$\frac{dx_i}{dt} = \mu_i x_i \left(1 - \frac{x_i + \sum_{j \neq i}^n \alpha_{ij} x_j}{K_i} \right) \quad (1)$$

其中 x_i 为第 i 个物种的数量, Lotka-Volterra 竞争模型有 4 个参数,包括种群的初始数量 $x_i(0)$ 、物种 i 的比生长速率 μ_i 、物种 i 的环境容量 K_i 以及第 j 个物种对第 i 个物种的竞争系数 α_{ij} 。本研究利用多年人工生态系统研究结果,采用 Monte Carlo 试验在这些参数取值范围内产生均匀分布的随机数,代表各个植物种。如人工生态系统的植物群落里有 N 个植物种群,那么每一个 $N+2$ 维的向量 $[x_i(0), \mu_i, K_i, \alpha_{ij} (1 < i \neq j < N)]$ 就代表 1 个植物种。

1.2.2 基于聚类分析的顶级群落研究 本研究采用聚类分析方法研究植物群落的内部结构关系,其基本原理是:将一定数量的样本分为一类,然后根据各类之间的亲疏程度,把关系最近的 2 类样本进行合并,然后对样本进行比较,再以此类推,直到合并为同一类^[17]。本研究利用系统聚类分析法,确定经生存斗争和竞争排斥后植物顶级群落的结构。

1.2.2.1 各植物种群之间的匹配距离 本研究计算种群相似性所采用的方法有欧氏距离、标准化欧氏距离、马氏距离、布洛克距离和明可斯基距离。

1.2.2.2 系统聚类树的创建 本研究创建系统聚类树所采用的方法主要有最短距离法、最长距离法、平均距离法、重心距离法以及平方和递增法。

1.2.3 植物群落的演化信息熵 生态系统是一个耗散系统,需要用生态热力学指标对植物群落的演替加以描述。本研究以熵为关键指标,对植物群落演替的生态热力学过程进行理论描述。熵是热力学宏观量,也是耗散系统的一个状态函数。孤立系统或绝热过程中熵总是增加的,而耗散系统可以从环境中吸收负熵,使自身的熵不断减少,从而使内部结构有序化,不断远离热力学平衡状态^[18],生态系统就是这样的耗散系统。本研究采用 CA 演化信息熵 (CAIE) 作为生态热力学的度量指标,反映 CA 在固定时刻构型空间上的复杂性,也体现出植物群落结构的复杂性^[16]。

2 结果与分析

2.1 Lotka-Volterra 离散化的 CA 更新规则

本研究将连续 Lotka-Volterra 竞争方程 (公式 1) 离散化,作为人工生态系统群落演替 CA 模型的更新规则 (公式 2)。

$$x_i(t+1) = x_i(t) e^{\mu_i \left[1 - \frac{x_i(t) + \sum_{j=1}^8 \alpha_{ij} x_j(t)}{K_i} \right]} \quad (2)$$

$x_i(t+1)$ 的含义是在人工生态系统的植物群落中,第 i 个种群在 $t+1$ 时刻的数量,其大小取决于它自身及周围 8 个邻居种群在 t 时刻的数量。因此,离散差分 Lotka-Volterra 方程作为 CA 的更新规则,成为驱动 CA 运行与演化的系统动力学原因。此外,在竞争演替过程中,有些元胞位置上的物种被排斥掉了 ($x_i = 0$),这时此位置会空出,模拟物种的迁移作用,这个空位会被其他物种的后代占

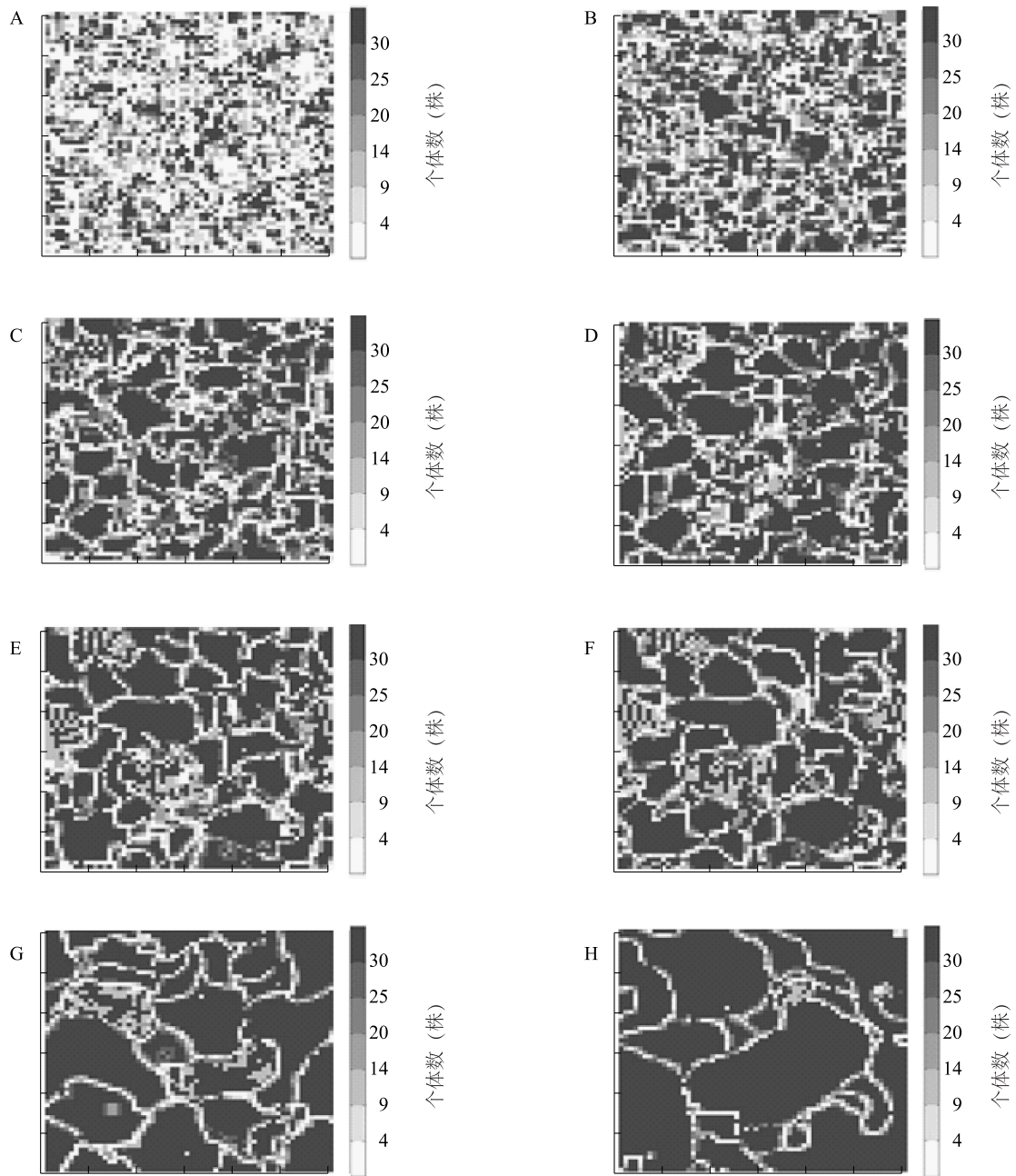
领,即从它周围的 8 个邻居物种当中,随机选取 1 株植物来填补这个空位,在此位置上继续繁殖并参与种间竞争。

徐春晓等^[19-20]通过前期的生物再生生命保障系统试验,确定公式 (2) 中参数的可能取值范围:物种的比生长速率 μ_i ,人工生态系统中植物的生长可能采取的是 r 对策或 K 对策,前者 μ_i 较大,而后者 μ_i 较小,根据试验辨识它们的范围是 1 m 0.5~5.0。关于各个物种的环境容量 K ,试验结果表明,在人工生态系统某一种植区域内,物种的最大个体数在 10~40 株。因此,可以认为在 CA 模型的每一元胞位点上物种的环境容量为 10~40。关于各个物种之间的竞争系数 α_{ij} ,根据生态学原理,物种之间可以通过不同的方式进行竞争,两两植物之间主要存在着利用竞争 (如,竞争光、热量、水、气和肥料等) 和干扰竞争 (如,对其他物种产生化感抑制作用等),因此可以认为物种之间的竞争系数是互不相关的,它们取值介于 0 和 1 之间。根据系统启动运行试验,各物种个体的初始值 $x_i(0)$ 在 0 株到 20 株之间。

2.2 人工生态系统中群落的竞争演替过程

由于计算机硬件所限,本研究采用 2D 60×60 的 CA,采用 Monte Carlo 法在 Lotka-Volterra 方程参数的可能取值范围内,随机生成 3 600 个物种,每个物种表示为向量 $[x_i(0), \mu_i, K_i, \alpha_{ij}]$,其中 $1 < i \neq j < 3\ 600$,远远大于构建人工生态系统所需要的实际物种数,能够满足研究需要。本研究总共进行了约 1×10^4 次仿真试验,得到了人工生态系统内群落演替的一些普适规律。

本研究所进行的 1×10^4 次仿真试验,都得到了相同的群落竞争演替模式,即在群落演替初期物种的分布是杂乱无章的,随着自组织演替过程的进行,优势种群聚集在一起,不断向外围辐射,逐渐把劣势物种竞争排斥掉,压缩它们的生存空间,从而使优势物种的空间呈现出集群化、斑块化的趋势,优势种群斑块不断扩大,最后形成稳定的顶级群落 (图 2)。顶级群落中的植物种群数量为 33~42,空间受控生态生命保障系统中的植物种类数通常也是这个量级,意味着绝大多数 (约 99%) 物种都会被竞争排斥掉。这种演替过程在自然生态系统中也广泛存在着,它可能是植物群落初生或次生演替中广泛存在的竞争演替模式^[21-23]。



A:CA 迭代 12 个月;B:CA 迭代 36 个月;C:CA 迭代 72 个月;D:CA 迭代 108 个月;E:CA 迭代 144 个月;F:CA 迭代 168 个月;G:CA 迭代 384 个月;H:CA 迭代 600 个月。

图 2 人工生态系统植物群落演替的时空模式

Fig.2 Spatial-temporal patterns of plant community succession in artificial ecosystem

2.3 人工生态系统植物群落的演化信息熵

在仿真试验过程中,实时计算 $CAIE$ 的变化,计算公式如下:

$$CAIE = -\frac{\sum_{i=1}^N P_i[x(t)] \ln P_i[x(t)]}{N} \quad (3)$$

其中, $P_i[x(t)]$ 表示种群 x_i 在演化过程 t 时刻出现的概率, N 为总元胞数目。由于元胞数目较多,所以本研究可以用频率 $F_i[x(t)]$ 代替概率 $P_i[x(t)]$, $CAIE$ 随时间的动态变化如图 3 显示,由于竞争排斥作用,系统的 $CAIE$ 是逐渐减小的。 $CAIE$ 随时间推进而不断减小的结果表明,人工生态系统内物种的多样

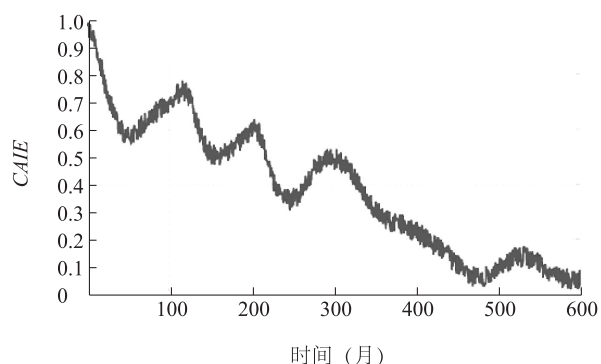


图3 演替过程中群落 CAIE 的变化过程

Fig.3 Time series of CAIE of artificial community

性在不断下降,但有序性在不断增强。

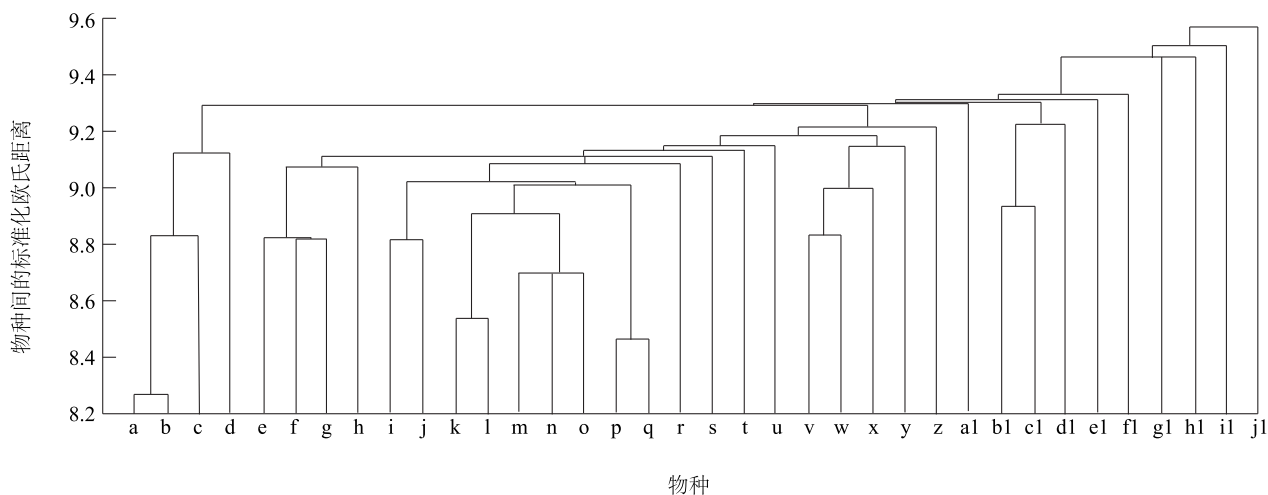
2.4 人工生态系统顶级植物群落结构

本研究通过聚类分析的方法,研究人工生态系

统中顶级植物群落结构在构建系统聚类树时的 Cophenetic 相关系数,Cophenetic 相关系数可以用来比较创建的系统聚类树与各植物种群之间匹配距离的关系。Cophenetic 相关系数的公式为:

$$C = \frac{\sum_{i < j} (Y_{ij} - \bar{y})(Z_{ij} - \bar{z})}{\sqrt{\sum_{i < j} (Y_{ij} - \bar{y})^2 \sum_{i < j} (Z_{ij} - \bar{z})^2}} \quad (4)$$

公式(4)中, Y_{ij} 为 Y 中对象 i 和对象 j 之间的距离, Z_{ij} 为聚类信息中对象 i 和对象 j 之间的距离, \bar{y} 和 \bar{z} 分别为它们的平均值。Cophenetic 相关系数越接近 1 越好,说明创建的系统聚类树与计算所得植物种群之间的距离是匹配的^[24]。经研究,采用标准化欧氏距离计算顶级群落各个种群之间的距离,采用最小距离法构建聚类树,可以得到最大的 Cophenetic 相关系数。经过仿真试验,获得了人工生态系统的顶级植物群落,它们由 36 种植物构成(图 4)。



a:物种编号 1233;b:物种编号 721;c:物种编号 2385;d:物种编号 1590;e:物种编号 3042;f:物种编号 1842;g:物种编号 2952;h:物种编号 1637;i:物种编号 814;j:物种编号 3453;k:物种编号 3312;l:物种编号 3095;m:物种编号 913;n:物种编号 2264;o:物种编号 2571;p:物种编号 1708;q:物种编号 3104;r:物种编号 1025;s:物种编号 2608;t:物种编号 313;u:物种编号 1675;v:物种编号 526;w:物种编号 229;x:物种编号 621;y:物种编号 2977;z:物种编号 1177;a1:物种编号 1195;b1:物种编号 108;c1:物种编号 390;d1:物种编号 2483;e1:物种编号 2716;f1:物种编号 3196;g1:物种编号 1364;h1:物种编号 2332;i1:物种编号 828;j1:物种编号 955。

图4 演替后形成的顶级植物群落结构

Fig.4 Climax community structure of plant species by succession

在人工生态系统顶级植物群落中,每一个物种都具有特定的参数向量 $[x_i(0), \mu_i, K_i, \alpha_{ij}]$,因此今后在构建人工生态系统时,它们将是需要重点参考的物种筛选指标,即选择具有特定比生长速率、环境容量和相互竞争系数的那些物种,并在系统运行启动时,按照设定的初始数量栽培。这样构建的植

物群落将具有高度的稳定性和可靠性,可满足人工生态系统长期运行的要求。

3 讨论

本研究所建立的人工生态系统植物群落演替 CA 更新规则,是通过将经典的多物种 Lotka-Volterra

竞争方程进行离散化获得的,这样做的优点是既可以避免朴素逻辑语言的模糊性,又可以使大规模的并行计算得以顺利进行。在自然生态系统中,生物与生物之间、生物与环境之间长期的相互作用关系(如竞争和捕食等)会使物种产生适应性并协同进化,今后在建立人工生态系统植物群落演替的CA更新规则时,必须考虑生物的进化特性,进一步提高系统模拟仿真的真实性。

本研究利用Monte Carlo法生成了采用虚拟的3 600种植物构成的植物群落,通过CA建模与仿真,模拟了竞争关系下,植物群落在人工生态系统内的自组织演替过程,仿真试验研究获得了植物群落的基本演替模式,分析结果表明顶级群落由约1%初始数量的物种构成。对群落演替过程中的热力学指标CAIE进行计算,结果表明CAIE随时间推进而不断减小,表明植物群落的多样性减小,结构趋于简单,同时有序性增强。利用系统聚类方法研究顶级群落结构及组成关系,可为地面设施农业和空间受控生态生命保障系统建造过程中候选植物品种的筛选提供有益的参考和指导。

参考文献:

- [1] 冯耀宗.人工生态系统稳定性概念及其指标[J].生态学杂志, 2002, 21(5): 58-60.
- [2] 刘红, GITELZON I I, 胡恩柱, 等.生物再生生命保障系统理论与技术[M].北京:科学出版社, 2009.
- [3] 贺冬仙.植物工厂的概念与国内外发展现状[J].农业工程技术(温室园艺), 2016, 36(10): 13-15.
- [4] 黄光昱, 戴清堂, 郭光耀, 等.农业高新技术产业示范园的建设成效及发展思考[J].中国农学通报, 2010, 26(24): 436-442.
- [5] 陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等.人工湿地植物应用现状与问题分析[J].中国农学通报, 2011, 27(31): 88-92.
- [6] 祝廷成, 钟章成, 李建东.植物生态学[M].北京:高等教育出版社, 1988.
- [7] 秦利锋, 郭双生, 艾为党, 等.受控生态生保系统中叶用蔬菜植物品种的筛选[J].航天医学与医学工程, 2006, 19(6): 417-421.
- [8] 张继义, 赵哈林.植被(植物群落)稳定性研究评述[J].生态学杂志, 2003, 22(4): 42-48.
- [9] 张伟平, 潘莎, 贾昕, 等.植物间正相互作用对种群动态和群落结构的影响: 基于个体模型的研究进展[J].植物生态学报, 2013, 37(6): 571-582.
- [10] 王震洪.基于植物多样性的生态系统恢复动力学原理[J].应用生态学报, 2007, 18(9): 1965-1971.
- [11] 金银根, 强胜, 王庆亚, 等.江苏省不同稻麦连作区野燕麦群体的多样性分析[J].江苏农业学报, 2003, 19(1): 18-22.
- [12] 伊力塔, 王君.群落演替动态研究综述[C]//国务院学位办. 2006年全国博士生学术论坛—林业及生态建设领域相关学科论文集.北京:北京林业大学出版社, 2006: 1148-1153.
- [13] ALONSO D, SOLE R V. The DivGame simulator: a stochastic cellular automata model of rainforest dynamics[J]. Ecological Modelling, 2000, 133(1): 131-141.
- [14] ITAMI R M. Simulating spatial dynamics: cellular automata theory[J]. Landscape and Urban Planning, 1994, 30(1/2): 27-47.
- [15] 于鑫.元胞自动机理论及其在计算机仿真模拟中的应用[D].沈阳:东北大学, 2005.
- [16] 李学伟, 吴今培, 李雪岩.实用元胞自动机导论[M].北京:北京交通大学出版社, 2013.
- [17] MCKENNA J E. An enhanced cluster analysis program with bootstrap significance testing for ecological community analysis[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(3): 205-220.
- [18] NIELSEN S N. Thermodynamics of an ecosystem interpreted as a hierarchy of embedded systems[J]. Ecological Modelling, 2000, 135(2): 279-289.
- [19] CHUNXIAO X, HONG L. Crop candidates for the bioregenerative life support systems in China[J]. Acta Astronautica, 2008, 63(7): 1076-1080.
- [20] DONG C, SHAO L, FU Y, et al. Evaluation of wheat growth, morphological characteristics, biomass yield and quality in Lunar Palace-1, plant factory, green house and field systems[J]. Acta Astronautica, 2015, 111: 102-109.
- [21] AMARASEKARE P. Competitive coexistence in spatially structured environments: a synthesis[J]. Ecology Letters, 2003, 6(12): 1109-1122.
- [22] DUNCAN R P, YOUNG J R. Determinants of plant extinction and rarity 145 years after European settlement of Auckland, New Zealand[J]. Ecology, 2000, 81(11): 3048-3061.
- [23] 叶飞, 陈求稳, 吴世勇, 等.空间显式模型模拟河流岸边带植被在水库运行作用下的演替[J].生态学报, 2008, 28(6): 2604-2613.
- [24] SARAÇLI S, DOĞAN N, DOĞAN İ. Comparison of hierarchical cluster analysis methods by cophenetic correlation[J]. Journal of Inequalities and Applications, 2013, 2013(1): 203-211.

(责任编辑:王妮)