

基于植物间互利作用的森林生长模型快速计算

董天阳 王 浩 陈巧红 於娇红

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 植物间互利作用的研究与探索有助于加强林业生产中的混交林建设,从而提高林分生产力。为了快速地模拟植物间互利作用下的生长情况,提出了一种利用植物间互利生长模型进行森林场景快速可视化的方法。该方法通过植物间互利指数、植物自身的生长率、植物当前生物量、环境条件等参数将 Lotka-Volterra 种间互利模型与植物个体生长模型进行融合,并采用像素化方法进行快速计算,以模拟互利植物的生长情况。通过水曲柳和落叶松混交林在不同的环境资源条件、分布密度、生长时间等条件下的可视化仿真,验证了基于植物间互利作用的森林生长模型快速计算方法的有效性和实用性。

关键词 互利,森林生长,影响圈,仿真技术,生物量

中图分类号 TP391.9,S126 **文献标识码** A

Rapid Calculation of Forest Growth Model Based on Reciprocity

DONG Tian-yang WANG Hao CHEN Qiao-hong YU Jiao-hong

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract The research and exploration of reciprocity between plants can strengthen the construction of mixed forest, so as to improve the productive forces of forest. In order to simulate the growth of plants under reciprocity, this paper presented a rapid method of forest scene visualization. This method considers the plant benefit index, growth rate, plant biomass, plant current environmental conditions and other parameters. It uses a pixel method for the rapid calculation of Lotka-Volterra model and individual plant growth model, and simulates the plant growth in 3D space according to the dynamic change. Through simulating the mixed forest of ash and larch, the experimental results demonstrate that the approach to simulating the plant growth based on reciprocity is effective and practical.

Keywords Reciprocity, Forest growth, Influence circle, Simulation technology, Biomass

1 前言

植物是整个生态系统的生产者,与人类的生存发展息息相关。利用计算机技术模拟植物群落的生长已经成为一个热门且极具挑战性的课题。植物个体之间产生的竞争和互利作用是维持植物群落稳定的重要因素,尤其是互利作用对于农林作物有着十分重要的意义^[1]。产生互利作用的主要原因是不同植物之间存在生态位差异,使它们在空间、时间和资源的利用上相互补充,从而促进生长^[2]。植物间互利作用和竞争作用的程度取决于植物自身及其相邻植物的大小、数量、可利用资源特性和空间区域等。人工混交林是植物互利作用的一个实际应用,多年的生产实践证明人工混交林较纯林有着显著的生长优势和改善环境条件的能力。因此,掌握植物间的互利作用对加强林业生产中的混交林建设、提高林分生产力有着十分重要的指导意义。

互利植物生长的可视化研究成果对农业、林业和城市规划等方面的发展有重要的推动作用^[3-5]。在农林业方面,利用基于植物间互利作用的森林生长模拟技术可以模拟特定实验

条件下的植物生长情况。可视化仿真结果将对物种混栽、种植密度和产量预测等起到指导作用,并达到缩短实验周期、降低人力物力成本、节省土地资源的目的。在城市规划方面,利用本系统的仿真结果可以为城市选择最适宜生长的植物物种,及时对城市园林及城市街道中的植物实施人工调控,减少植物间可能存在的竞争互斥现象,使其能够稳定共存并提高植物成活率。描述种群的生态模型中最著名的是 Lotka-Volterra 模型,由 Lotka 和 Volterra 在 Logistic 模型的基础上提出,用于研究种群密度和有限资源之间的关系^[6-8]。Lotka-Volterra 种间模型一般分为 3 种类型,即捕食-诱饵模型、竞争模型和互利模型,该模型以竞争共存理论为基础,强调有差别的资源利用,即许多物种生活在同一环境下而利用不同资源。目前,在植物群落生长和演替的研究中主要使用 Lotka-Volterra 竞争模型。然而,随着生态学理论的发展,许多学者提出竞争排斥规则不是绝对的,在一定条件下不能共存的竞争者也可以实现共存。如 2005 年,曲颖^[9]对竞争模型和互利进行比较分析,并以湿地植物为背景,首次将 Lotka-Volterra 互利模型应用于植物生长模型。从应用结果来看,其改进模型的

本文受国家自然科学基金(61672414,61572437)资助。

董天阳(1977—),男,博士,副教授,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为虚拟现实、计算机图形学,E-mail: dty@zjut.edu.cn;王 浩(1990—),男,硕士生,主要研究方向为计算机图形学;陈巧红(1989—),女,硕士生,主要研究方向为计算机图形学;於娇红(1988—),女,硕士生,主要研究方向为虚拟现实。

模拟值比较贴近实际观测结果。另外,从改进模型的参数分析中看到,合作更有利于系统的稳定,提高种群生物量水平。但是,这些植物相互作用模型对互利作用的表达和模拟都比较复杂,其计算过程十分耗时。

鉴于此,本文提出了一种基于互利作用的森林生长模型快速计算方法,并将其应用到森林场景的生长可视化仿真中。该方法以 Lotka-Volterra 种间互利模型为基础,采用像素化方法进行种间互利系数的快速求解。实验结果表明,该方法加快了森林生长模型的计算过程,可以在森林场景可视化仿真中得到较好的应用。

2 基于互利作用的植物生长模型

植物在生长过程中受到各种环境因素的影响,包括植物与植物间的相互作用及植物与环境间的交互,这种影响导致植物在形态结构和生态生理上具有多样性^[10,11]。因此,森林生长仿真过程中需要考虑影响植物生长的各种因素,把这些因素融入到虚拟植物生长的数学模型中,可以更真实地仿真植物生长过程中的各种生命现象。

2.1 植物互利作用模型的表达

植物间的相互作用关系较为复杂,在其生长的不同阶段表现为互利、竞争或相互独立,而且不同的植物具有不同的形态结构和生理特性。因此,单从植物群落水平分析植物生长状况,就会忽略植物个体的特性和局部交互性,掩盖个体水平上的相互作用^[6-8]。另外,目前描述植物生长的模型都着重强调植物对资源的竞争,却忽略了他们之间的互利作用。在 Lotka-Volterra 种间互利模型^[9]的基础上,结合植物学知识分析植物个体特性,通过植物间互利指数、植物自身的生长率、植物当前生物量、环境条件等参数将 Lotka-Volterra 种间互利模型与植物个体生长建立联系。这样不但可以较好地兼顾全局与个体的关系,又能为植物个体的生长过程添加互利因素。本文采用 Berger 提出的 FON 模型来描述植物的资源需求,把植物的资源需求定义为一个影响圈,通过判断影响圈是否相交来确定植物的邻体^[12,13]。

计算植物间的互利指数是构建互利植物生长模型的关键。本文以邻体干扰模型^[14]为基础计算相应的互利指数,综合考虑了植物胸径、植物自身资源大小、共享资源大小、空间位置信息,将多种影响植物生长的因素融入生长模型中,使计算结果更具真实性。

本文采用的植物生长模型以 Lotka-Volterra 模型^[9]为核心。该模型又依赖于 FON 模型和邻体干扰模型,FON 模型用于确定群落中每棵植物的邻体,邻体干扰模型用于计算每棵植物的互利指数,图 1 描述了三者之间的关系。

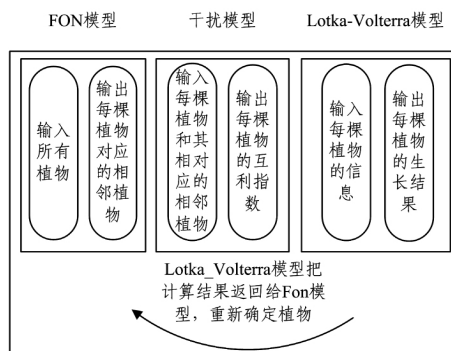


图 1 Lotka-Volterra 模型、FON 模型、邻体干扰模型三者之间的关系

在植物群落中,单株植物的生长受到资源的限制,有最大生物量,最大生长速率,并与其相邻植物相互影响,这些特性都符合应用种间互利模型的条件。因此,可以运用描述种间互利关系的 Lotka-Volterra 模型来研究植物个体间的相互作用。Lotka-Volterra 种间互利模型的研究对象可以从种群转变为植物个体,从而反映植物间互利的生长情况,模型如式(1)所示:

$$\frac{dN_i}{dt} = r_i N_i \left(1 - \frac{N_i}{K_i} + \sum_{j=1}^m a_{ij} \frac{N_j}{K_i} \right) \quad (1)$$

式(1)描述了植物 i 的生长情况,其中 N_i 表示植物 i 的当前生物量; $i=1,2,\dots,n$,表示 n 棵种植在一起的植物; $j=1,2,\dots,m(n>m)$,表示影响植物 i 生长的 m 株植物; K_i 表示植物 i 的最大生物量; r_i 表示植物 i 的在没有外界影响下的生长率; a_{ij} 表示植物 j 对植物 i 的互利指数。

2.2 确定互利影响圈和邻体

要计算植物 A 受其相邻植物的影响程度,首先要确定植物 A 的相邻植物。本文把研究的对象植物 A 称为基株,其周围所有对植物 A 生长有影响的植物个体被称为邻体。由于植物与植物之间会存在差异,确定植物的影响圈通常比较困难^[12,15]。Berger 提出的 FON 模型定义了如何确定植物影响圈的范围,以及如何判断植物的相邻植物。该模型描述了一个围绕植物的影响圈,影响圈大小代表了植物的可利用资源量^[13]。FON 模型在考虑环境因素和植物自身条件的基础上对植物间的相互作用做了定量的分析,能够较为准确地描述影响圈范围^[11]。影响圈相交的植物被定义为相邻植物,相邻植物发生交互作用。

FON 模型包含了植物自身大小信息和周围资源信息,因此影响圈范围会随着植物生长以及环境状况的改变而改变,符合实际植物的生长规律,能解决以往林业研究中影响圈大小不可改变的缺点。根据 FON 模型的定义,判断植物影响圈是否相交即可确定其是否为相邻植物。

根据 FON 模型定义,影响圈相交的植物存在交互作用,属于相关植物。因此,通过判断植物影响圈是否相交,可以确定哪些植物为基株的邻体。如图 2 所示,假设植物 A 为基株,其影响圈半径为 R_A ,植物 B 和植物 C 的影响圈半径为 R_B 和 R_C , D_{AB} 为植物 A 和植物 B 之间的距离, D_{AC} 为植物 A 和植物 C 之间的距离。由于 $D_{AB} < R_A + R_B$,说明影响圈相交,植物 B 是基株 A 的邻体;当 $D_{AC} > R_A + R_C$,说明 A 和 C 的影响圈不相交,植物 C 不是基株 A 的邻体。

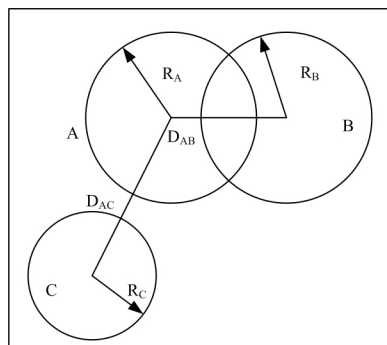


图 2 植物邻体确定示意图

种间互利作用模型的计算主要包括:影响圈的计算、互利植物的确定、互利指数的计算和模型的计算 4 部分,其中互利指数的计算对植物互利生长结果具有至关重要的作用。目

前,关于邻体干扰指数的研究有很多,传统的邻体干扰指数模型是 Weiner 在 1982 年提出的并在 1984 年改进的模型^[14]:

$$I = \sum_{i=1}^n D_i d_i^{-2} \quad (2)$$

其中, d_i 为基株到第 i 个邻体的距离, D_i 为邻体 i 的大小。

於娇红等人结合 Jan Leps 和 Pavel Kindlmann 的模型思想^[16]以及张大勇的模型^[17],更加全面地考虑了影响植物生长的条件,提出了包含环境因素、植物自身遗传因素、空间位置等方面的模型^[18]:

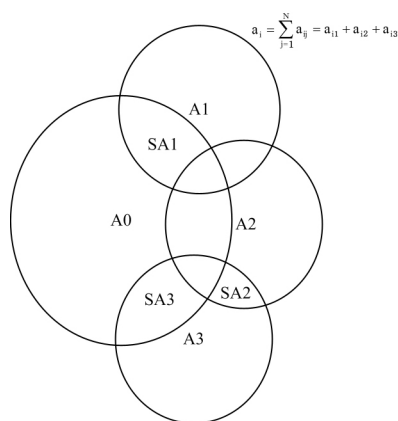
$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^m S_{shareij} \times \frac{D_j}{D_i}}{S_{Foni}} \quad (3)$$

其中, a_i 表示第 i 棵基株受到影响圈内所有邻体植物对它的影响指数, $S_{shareij}$ 表示第 i 棵基株和第 j 棵邻体的影响圈相交面积, S_{Foni} 表示第 i 棵基株的影响圈面积, D_i 和 D_j 分别表示植物 i 和 j 的胸径大小。

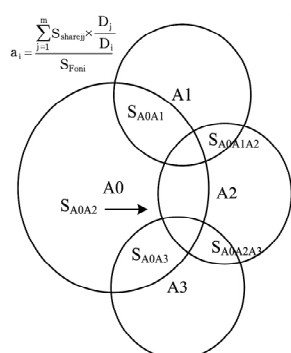
3 像素化的种间互利系数快速计算方法研究

3.1 像素化的影响圈计算方法

在混交林中,每棵基株可能有多个相邻植物,它们之间进行对光、水、空间等资源的争夺,也就是说在同一块区域内,可能有多棵邻体与基株发生对资源的竞争,这时邻体对基株的影响不再是单纯的两两相互影响。在计算邻体植物对基株产生的互利指数时,对于基株与多棵邻体的影响圈有同时重叠部分,如果分别将这部分区域对基株的影响力多次重复计算,当这种重叠次数无限时,邻体对基株的影响强度为无限大,这与同一空间邻体对基株的影响强度是有限的相符,如图 3(a)所示。本文将基株与多棵邻体的影响圈相交区域分开考虑,如图 3(b)所示,将重叠区域邻体对基株的影响强度根据邻体个数和邻体的自身遗传特性作为竞争指标的度量因素。



(a) 重复计算影响区域面积的互利指数



(b) 考虑影响强度的互利指数

图 3 重叠区域对互利指数的影响

本文根据植物各自的影响圈的重叠面积来度量互利指数,即基株与各个邻体的影响圈重叠面积与基株本身的影响圈面积之比,并加权求和作为互利指标。基株 i 受到在它影响圈范围内邻体的互利指数为:

$$a_i = \frac{\sum_{\phi=a}^m S_{\phi} \cdot \frac{D_{\phi} \cdot R_{\phi}}{D_i^{|\phi|}}}{S_{Foni}} \quad (4)$$

其中, $a, b, \dots, m$ 表示基株影响圈与它相关植物影响圈的各个相交区域,它的值为该区域被包含的所有邻体集合,例如 $a = \{1, 3, 5\}$ 表示基株与邻体 1、3、5 影响圈的共同重叠部分; D_{ϕ} 表示邻体集 ϕ 内所有邻体元素 j 的胸径之积,如 $D_{\{1,3,5\}} = D_1 * D_2 * D_3$; R_{ϕ} 表示邻体集 ϕ 内所有邻体元素 j 的资源剩余率之积,如 $R_{\{1,3,5\}} = R_1 * R_2 * R_3$; $|\phi|$ 表示邻体集的元素个数; D_i 表示基株 i 的胸径; S_{Foni} 表示基株的影响圈面积;

模型包含了植物遗传因素、空间位置、影响圈范围、基株和邻体的胸径 4 个因素,因此,该模型更加全面地考虑了基株受到邻体的干扰强度。其引入了植物对资源吸收的剩余率,即邻体利用了一部分资源之后所剩余的资源允许给基株,考虑到基株与邻体的影响圈重叠处由于资源的多方竞争,邻体剩余给基株的资源更少了,因此基株在这部分重叠面积受到各个邻体的互利强度也就更小了。

3.2 基株与多个邻体相交面积快速计算

本文在计算互利指数模型中,需要计算基株与所有邻体植物之间的相交面积,类似于计算一个圆与多个圆圈的各自相交面积和重叠面积。各个影响圈的重叠部分都是一个封闭区域,可以看作是由很多个像素点构成的,那么区域的面积可以通过内部像素点的个数来表示。本文采用像素遍历法计算这些面积,如图 4 所示。

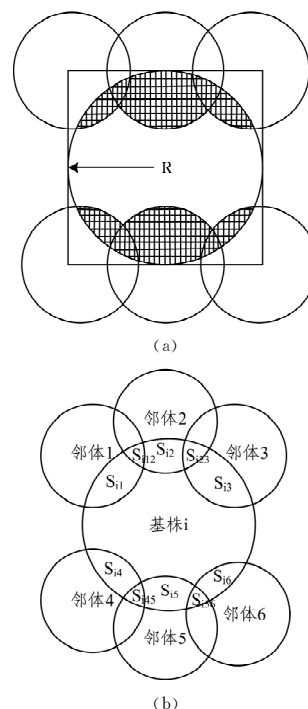


图 4 像素遍历法实现原理

利用像素遍历法求基株影响圈和邻体影响圈的相交面积的过程为:

Step1 以基株的影响圈为中心圆,记录与该圆相交的所有邻体的影响圈,称为邻体圆;

Step2 作中心圆的外切正方形,使得这个圆上的每个像

本文采用上述的像素遍历法计算基株植物与它的邻体植物的相交面积,并采用种间互利指数模型计算基株受到邻体的互利指数,像素遍历和相交面积统计的具体流程分别如图5(a)和图5(b)所示。

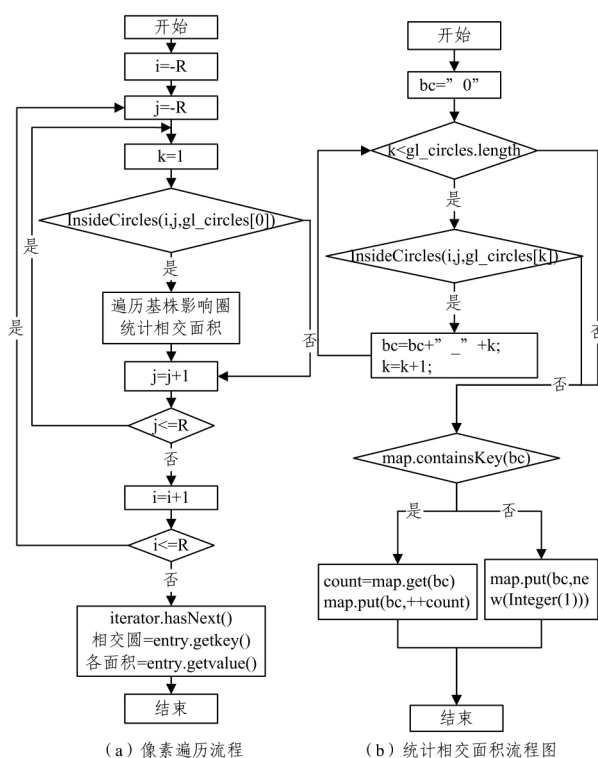


图 5 像素遍历法实现流程图

```

for (int i = -R; i <= R; i++)
for (int j = -R; j <= R; j++) {
    k = 1; // 次数 (2R+1)2
    if (InsiderCircle(i, j, gl_circles[0]) == 1) {
        bc = "0";
        while (k < gl_circles.length) {
            if (InsiderCircle(i, j, gl_circles[k]) == 1) {
                bc += "_" + k;
            }
            k++; // 次数 (2R+1)2 * f(n)
        }
        if (map.containsKey(bc)) { /* 判断 map 是否存在 key 为 bc
            的键值对 */

```

```
count=map.get(bc);/* 如果有,在 key 为 bc 的 value 上
加 1 */
map.put(bc,++count);
e {
map.put(bc,new Integer(1));/* 没有,新加入一个key=c,
value=1 的映射关系 */
```

由于 $f(n) < gl_circles.length$, 取最大值 $f(n) = gl_circles.length - 1$ 。则时间复杂度 $T(n) = (2R + 1)2 * (count - 1)$, 其中, R 表示基株的影响圈半径, $count$ 表示基株的邻体个数。

4 应用

本文选择两种典型的互利植物水曲柳和落叶松作为测试树木。水曲柳是中性树种,有一定的耐遮蔽性,而落叶松是阳性树种,二者对光资源的需求特性不同。图6为水曲柳和落叶松混交林的树木分布图,不同的颜色代表不同的树种,浅色代表水曲柳,深色代表落叶松,两者规则分布且隔行种植。水曲柳和落叶松各5000棵,每排种植100棵。

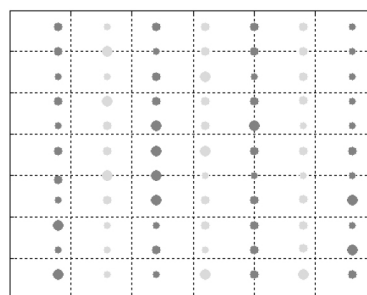


图 6 水曲柳落叶松混交林的树木分布情况

一般情况下,基株不可能有太多的邻体树木,因此其互利指数可以在较短的时间内完成。像素遍历法相对传统的计算

方法不再是单纯的两两计算,不仅提高了计算效率,对多个圆重叠部分的面积也能快速准确地计算出来。像素遍历法在计算植物间互利指数过程中避免了重叠部分面积的多次重复计算,而且系数计算更加精确,因此植物生长准确性更高。

从仿真结果看来,随着树龄的增长,树木胸径也随之增大,根据 FON 模型,基株与邻体影响圈相交面积也逐渐增大,由于同一块区域的资源有限,因此分配给基株的资源就越少。根据本文改进的互利指数模型,随着胸径的增大,基株与邻体之间影响圈重叠得越多,基株得到邻体剩余的资源就越少,即基株受到邻体的互利指数越小。

图 7 描述了树龄为 10 年的水落混交林的生长状态,图 8 描述了树龄为 20 年的水落混交林的生长状态,图 9 描述树龄为 30 年的水落混交林的生长状态。从可视化仿真结果发现,随着生长年份的推移,植物在形态上有明显的差异和变化。



图 7 树龄为 10 年的水落混栽林的生长状态



图 8 树龄为 20 年的水落混栽林的生长状态

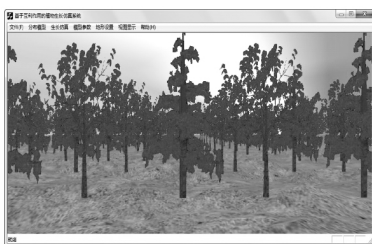


图 9 树龄为 30 年的水落混栽林的生长状态

结束语 本文在 Lotka-Volterra 种间互利模型的基础上提出了一种基于植物间互利生长模型的森林场景快速仿真方法。该方法首先考虑了植物间互利指数、植物自身的生长率、植物当前生物量和环境条件等参数,并将 Lotka-Volterra 种间互利模型与植物个体生长模型进行融合;然后,该方法采用像素化方法进行互利指数的快速计算,从而实现互利植物生长情况的快速仿真;最后,本文通过水曲柳和落叶松混交林的仿真实验,在不同的环境资源条件、分布密度、生长时间等条

件下进行树木生长可视化,验证了基于植物间互利作用的森林生长模型快速计算方法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 陈伟,薛立. 根系间的相互作用——竞争与互利[J]. 生态学报, 2004,24(6):1243-1251
- [2] 尚文艳,付晓,刘阳,等. 陆地植物群落物种多样性维持机制研究[J]. 应用生态学报,2005,16(3):573-578
- [3] Bao G, Li H, Zhang X, et al. Large-scale forest rendering: Real-time, realistic, and progressive [J]. Computers & Graphics, 2012,36(3):140-151
- [4] Bao G, Li H, Zhang X, et al. Realistic real-time rendering for large-scale forest scenes[C]// 2011 IEEE International Symposium on VR Innovation (ISVRI). New York: IEEE, 2011: 217-223
- [5] Gumbau J, Chover M, Remolar I, et al. View-dependent pruning for real-time rendering of trees [J]. Computers & Graphics 2011,35(2):364-374
- [6] 张炳根. 生态学数学模型[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1990:195-196
- [7] 江伟,李艳玲,闫炎. 一类互惠模型的全局分歧和稳定性[J]. 西北师范大学学报(自然科学版),2009,45(1):7-12
- [8] 刘彦辉. 竞争创新的一个动态模型[J]. 重庆师范大学学报, 2006,23(2):71-74
- [9] 曲颖. 湿地植物种间作用模型及计算机模拟分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2005
- [10] Lasky J R, Bachelot B, Muscarella R, et al. Ontogenetic shifts in trait-mediated mechanisms of plant community assembly [J]. Ecology, 2015,96(8):2157-2169
- [11] Alcántara J M, Rey P J, Manzaneda A J. A model of plant community dynamics based on replacement networks[J]. Journal of Vegetation Science, 2015,26(3):524-537
- [12] 段仁燕,王孝安. 植物邻体干扰的研究范畴、热点及意义[J]. 西北植物学报,2004,24(6):1138-1144
- [13] Alsweis M, Deussen O. Modeling and visualization of symmetric and asymmetric plant competition [J]. Eurographics Workshop on Natural Phenomena, 2005,83-88
- [14] Weiner J. Neighborhood interference amongst *Pinus rigida* individuals[J]. Journal of Ecology, 1984(72):183-195
- [15] 房味味,任鸿雁,凌隽,等. 北方草甸群落结构和组成分析及野花组合模拟构建[J]. 植物资源与环境学报, 2015,24(2):97-103
- [16] Lepš J, Kindlmann P. Models of the development of spatial pattern of an even-aged plant population over time[J]. Ecological Modelling, 1987,39(1/2):45-57
- [17] 张大勇,赵松龄,张鹏云,等. 青秆林恢复演替过程中的邻体竞争效应及邻体干扰指数的改进模型[J]. 生态学报, 1989,9(1):52-58
- [18] 於娇红. 基于互利作用的植物生长建模及仿真[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009