

基于免疫进化算法(IEA)的鹤望兰(*Strelitzia reginae*) 叶面积指数(LAI)模拟

杨怀金, 叶芝祥*, 朱克云, 钱妙芬, 杨迎春

(成都信息工程学院环境工程系, 成都 610225)

摘要:免疫进化算法(IEA)是基于遗传算法(GA)的一种“加强局部搜索, 兼顾全局搜索”的进化算法。利用免疫进化算法(IEA)对鹤望兰叶面积指数(LAI)进行模拟, 平均相对误差为 3.44%, 取得满意的结果, 对鹤望兰栽培管理有一定的实际意义。免疫进化算法用于鹤望兰叶面积指数模拟简便、易行, 为鹤望兰叶面积指数模拟模型的建立及参数优化开辟了一条新途径。

关键词:鹤望兰; 免疫进化算法(IEA); 叶面积指数(LAI); 模拟

文章编号: 1000-0933(2006)08-2744-05 中图分类号: Q948 文献标识码: A

The simulation of *Strelitzia reginae* LAI (Leaf Area Index) based on the optimization of Immune Evolutionary Algorithms(IEA)

YANG Huai-Jin, YE Zhi-Xiang*, ZHU Ke-Yun, QIAN Miao-Fen, YANG Ying-Chun (The Department of Environmental Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2744 ~ 2748.

Abstract: Immune Evolutionary Algorithm (IEA) was a kind of evolution arithmetic based on Genetic Arithmetic (GA), which could strengthen the local search, and also considered the global search simultaneously. The present work took advantage of IEA to simulate the leaf area index (LAI) of *strelitzia reginae*, being one of the tropical plant. A satisfactory result was obtained that the average relative error was 3.44%. Therefore, this kind of simulation would probably give rise to some guiding signification for the planting and manage of *Strelitzia reginae*. IEA was an easy and simple method for the simulation of *Strelitzia reginae* LAI. Furthermore, it could also carve out a new way to establish the simulation model and parameter optimization of *Strelitzia reginae* LAI.

Key words: *Strelitzia reginae*; Immune Evolutionary Algorithm (IEA); Leaf Area Index (LAI); simulation

绿色植被的叶面积指数(LAI)是定量分析地球生态系统能量交换特性的一个重要结构变量, 不仅可用于农作物产量预估和病虫害评价, 而且是描述林冠特性, 确定森林二氧化碳、水和氧气交换率的重要变量^[1]。叶面积是作物的光合性状之一, 叶面积大小和空间分布由品种遗传特性决定, 同时也受到栽培措施的影响。因此, 叶面积大小对农作物产量构成具有重要作用^[2-4]。关于植物叶面积的测定, 国内外许多学者作了大量尝试, 但根据植物的不同特点有不同的计算方法。目前测量 LAI 的方法有直接测量和间接测量两种方法^[1]。直接测量法^[4,5]有方格法、复印称重法、量测法、分级估计法、取样推算法、求积仪测定法和测定叶片长宽建立回归方程法。间接测量法^[1]有利用各种测量仪器进行测量和基于遥感技术的测量方法。

基金项目: 成都信息工程学院院选科资助项目(CRF200403)

收稿日期: 2005-10-12; **修订日期:** 2006-05-05

作者简介: 杨怀金(1979~), 男, 云南易门人, 硕士生, 主要从事环境监测与评价研究. E-mail: jakecrazy@cuit.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yzxiang@cuit.edu.cn

致谢: 本文在修改过程中得到了徐成华博士(副教授)的帮助和大力支持, 在此表示衷心感谢!

Foundation item: The project was supported by the Scientific Research Foundation of CUIT (No. CRF200403)

Received date: 2005-10-12; **Accepted date:** 2006-05-05

Biography: YANG Huai-Jin, Master candidate, mainly engaged in environmental monitoring and evaluation. E-mail: jakecrazy@cuit.edu.cn

鹤望兰(*Strelitzia reginae*)原产南部非洲,喜光和温暖湿润气候,根系粗壮,属肉质根系,茎仅 2~4 cm。叶从基部长出具革质光泽,长圆形,长 25~45 cm、宽~10 cm。花形独特(由数朵排列成蝎尾状聚伞花序),佛焰苞紫色呈舟状,花萼橙黄,花瓣天蓝。此花素有鲜切花之王的美誉,在国内外很受欢迎。目前,美国、德国、意大利、荷兰和菲律宾等国都盛产鹤望兰。我国自 20 世纪 90 年代以来,在广东、福建、江苏、成都等地建立了鹤望兰种苗和盆花的生产基地。但鹤望兰从幼苗至成苗开花需 3~4a,生长周期长和产花期长,故经济价值较高。

应用适宜的作物生长模拟模型科学合理地安排生产和调控作物生长环境的微气象要素,对充分发挥设施农业优质高效的生产功能具有重要作用。近年来,我国作物模式化栽培模型的研究取得了一些成果,主要集中于粮、棉等大田农作物方面,蔬菜设施栽培方面的模拟研究尚处于起始阶段^[6]。自 20 世纪 70 年代初期以来,美国、荷兰、以色列、澳大利亚、南非和瑞典等国就广泛开展了对鹤望兰的研究。我国从 20 世纪 80 年代开始也对鹤望兰的栽培管理、繁殖技术及病虫害防治进行了卓有成效的探索。钱妙芬^[7]研究了鹤望兰佛焰苞长度与总花梗长度、相关叶片面积关系。结果表明,鹤望兰花序的佛焰苞片长度与叶面积、花序的总花梗长度均有较好的秩相关,同时指出该项研究尚需进一步利用多种方法模拟和增加样本数。免疫进化算法是基于 GA 的一种“加强局部搜索,兼顾全局搜索”的进化算法,它用于鹤望兰叶面积指数模拟尚未见报道。本文采用免疫进化算法对鹤望兰叶面积指数进行模拟,为鹤望兰叶面积指数模拟模型的建立以及参数优化提供了一条全新的途径,为提高花的质量、改进鹤望兰栽培管理技术及其产业化生产提供理论依据。

1 免疫进化算法简介

遗传算法(Genetic Algorithm,简记 GA)是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的一种全局优化搜索算法,已广泛用于多个领域^[8,9]。免疫进化算法(Immune Evolutionary Algorithm,简记 IEA)是基于 GA 的一种“加强局部搜索,兼顾全局搜索”的进化算法。免疫进化算法中的最优个体即为每代适应度最高的可行解。从这个意义上讲,最优个体含有解决问题的关键信息,因此,在保持群体多样性的同时,子代群体的产生应加强寻找类似的优秀个体。

免疫进化算法的本质在于充分利用最优个体的信息,以最优个体的进化来代替群体的进化,把进化建立在最优个体的基础上,通过标准差调整把局部搜索和全局搜索有机结合起来。免疫进化算法的基本思想及实现步骤详见文献^[10,11]。具体求解步骤如下:

- (1)确定问题的表达式;
- (2)在解空间内随机产生初始群体 N ,并计算其适应度,确定最优个体 x_{best}^0 ;
- (3)根据下列两式操作,在解空间内生成子代群体 $t = t + 1$:

$$x^{t+1} = x_{best}^t + N(0, \delta^t)$$

$$\delta^{t+1} = \delta^t \times e^{-\frac{A}{T}}$$

式中, A 为标准差调整系数($A > 0$); T 为总的进化代数; δ^t 为第 t 代标准差, $N(0, \delta^t)$ 为标准正态分布随机数;

- (4)计算子代群体的适应度,确定最优个体;
- (5)反复执行步骤(3)和(4),直至满足终止条件。

2 试验材料与方法

供试验用的鹤望兰取自四川省成都市茶店苗圃园内,在现场将叶片形状描绘于坐标纸上,并给出实际面积(S_1),共 84 个样本,量取叶长(L)、叶片最大宽度(D),叶长为叶片基部至叶尖的距离。

3 鹤望兰叶面积指数模拟

3.1 鹤望兰叶面积指数模型建立

叶面积指数是描述作物群体结构的重要参数,实际应用中作物叶面积多采用长×宽值作因子进行回归估算。该方法基于叶片形状为近似矩形的假设,适用于小麦、玉米等叶片类似巨型形状的作物叶面积的计

算^[6,12]。

根据分类学关于鹤望兰生物学特性的描述和作者对鹤望兰叶片形态的观察,鹤望兰叶片呈长圆形。因此,本文采用长圆形面积模拟鹤望兰叶面积指数。利用量测法:矫正系数 $\times \pi \times \text{长} \times \text{宽}$ 作因子,建立鹤望兰叶面积指数模拟模型为:

$$LAI = a + b \cdot \pi \cdot L \cdot D \quad (1)$$

式中, a, b 为待优化的系数, LAI 为鹤望兰叶面积指数, L 为鹤望兰叶片长度, D 为鹤望兰叶片最大宽度。

3.2 鹤望兰叶面积指数模拟

利用试验得到的鹤望兰样本叶片长度(L)、叶片最大宽度(D)和实际面积(S_i)数据,用免疫进化算法(IEA)对模型(1)中参数 a, b 进行优化,最后再将 a, b 的最优值代入(1)即为鹤望兰叶面积指数模拟模型。对参数进行优化,需按照实验要求构造目标函数 $\text{Min} I$ 。目标函数有多种形式,可以是方差、误差、偏差、标准偏差等,本文选择目标函数为:

$$\text{Min} I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (LAI_i - S_{1i})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中, LAI_i 为鹤望兰叶面积指数模拟值, S_{1i} 为鹤望兰叶面积实测值, n 为样本数。

用免疫进化算法(IEA)对实验数据进行模拟,采用 Matlab 编程,具体程序如下:

```
clear all
L = [L1, L2, ..., Li](i = 1, 2, 3, ..., 84);
D = [D1, D2, ..., Di](i = 1, 2, 3, ..., 84);
SC = [SC1, SC2, ..., SCi](i = 1, 2, 3, ..., 84);
A1 = a0;
B1 = b0;
p = p0;
n = N;
c = 2;
T = 200;
A0 = 1.0;
Q0 = 1.0;
II = 0;
for i = 1:n
    LAI(i) = A1 + B1 * (pi) * L(i) * D(i);
    WC(i) = (LAI(i) - SC(i))^2;
    II = II + WC(i);
end
MINI = sqrt(II/(n-1));
G1(1) = MINI;
while c <= T
    A = rand(p, 1);
    B = rand(p, 1);
    A = Q0 * exp(A0 * c/T) * randn(p, 1) + A1;
    B = Q0 * exp(A0 * c/T) * randn(p, 1) + B1;
    while k <= p
        II = 0;
        for i = 1:n
            LAI(i) = A(k, 1) + B(k, 1) * (pi) * L(i) * D
            (i);
            WC(i) = (LAI(i) - SC(i))^2;
            II = II + WC(i);
        end
        MINI = sqrt(II/(n-1));
        AA(k) = MINI;
        if AA(k) <= SU
            SU = AA(k);
            k9 = k;
        end
        k = k + 1;
    end
    if min(AA) >= G1(c-1)
        G1(c) = G1(c-1);
    else
        A1 = A(k9, 1);
        B1 = B(k9, 1);
        G1(c) = min(AA);
    end
    c = c + 1;
end
```

k = 1;

SU = 100;

k9 = 0;

A1

B1

程序说明:程序的读取顺序为从上到下读完程序的左半部分,紧接着按从上到下的顺序读程序的右半部分; L_i 为鹤望兰叶片长度; D_i 为鹤望兰叶片最大宽度; LAI 为鹤望兰叶面积指数模拟值; SC_i 为鹤望兰叶面积实测值; $A1$ 为待优化的参数 a ; $B1$ 为待优化的参数 b ; p 为初始群体数; N 为样本数; c 为初始进化代数; $Q0$ 为父代的标准差; T 为进化总代数,取 200; $A0$ 为标准差调整系数,取 1.0。

程序运行结果为: $a = -4.8680$, $b = 0.2415$,即待优化的参数。把 a 和 b 的值代入(1)式得鹤望兰叶面积指数模拟模型为:

$LAI = -4.8680 + 0.2415 \cdot \pi \cdot L \cdot D$

(3)

3.3 模拟结果及误差分析

利用鹤望兰叶面积指数模拟值 LAI_i 和鹤望兰叶面积实测值 S_{i1} ,求取相对误差 $\Delta S = \frac{|LAI_i - S_{i1}|}{S_{i1}} \times 100\%$ (式中 $i = 1, 2, \dots, 84$) 及平均相对误差 $\overline{\Delta S}$ 对每个叶片进行分析。模拟结果及相对误差分析结果见表 1。

表 1 鹤望兰叶面积指数模拟值与实测值

Table 1 Measured and analog values of strelitzia reginae LAI

实测值(cm ²)	模拟值(cm ²)	相对误差(%)	实测值(cm ²)	模拟值(cm ²)	相对误差(%)	实测值(cm ²)	模拟值(cm ²)	相对误差(%)
Measured values	Analog values	Relative error	Measured values	Analog values	Relative error	Measured values	Analog values	Relative error
143.2	147.2	2.79	148.0	146.3	1.15	182.7	182.9	0.11
140.5	147.2	4.77	153.2	150.0	2.08	372.2	356.0	4.35
225.0	234.1	4.04	126.9	128.3	1.10	584.8	547.8	6.32
257.2	273.3	6.26	200.5	211.5	5.48	338.4	323.0	4.55
269.5	261.2	3.08	378.3	381.7	0.90	367.6	357.2	2.82
198.3	204.6	3.18	285.7	271.1	5.11	553.6	546.1	1.35
242.5	245.9	1.40	306.5	319.1	4.11	454.7	435.6	4.20
373.7	395.7	5.89	382.2	366.8	4.02	530.3	508.2	4.17
237.4	224.2	5.56	338.2	323.7	4.29	402.3	389.7	3.13
240.3	234.3	2.50	285.2	301.8	5.82	477.2	460.8	3.44
222.3	212.2	4.54	254.5	250.1	1.73	645.9	686.9	6.35
169.3	180.9	6.85	187.6	196.3	4.64	327.0	330.6	1.10
278.1	263.6	5.21	521.0	504.7	3.13	133.8	143.1	6.95
271.7	288.8	6.30	357.2	352.9	1.20	659.3	680.2	3.17
197.9	189.5	4.24	234.5	220.1	6.14	252.3	269.2	6.69
254.9	270.5	6.12	363.6	359.6	1.10	224.6	222.7	0.85
143.0	136.7	4.41	218.5	217.6	0.41	251.6	239.9	4.65
308.4	307.8	0.19	171.9	167.0	2.85	395.7	400.5	1.21
388.8	379.7	2.34	326.7	353.5	8.20	221.5	226.8	2.39
225.5	229.9	1.95	286.0	281.2	1.68	233.6	239.0	2.31
224.0	225.3	0.58	219.2	220.1	0.41	304.0	318.0	4.61
265.5	264.9	0.23	266.0	265.5	0.19	496.0	504.8	1.77
299.7	290.2	3.17	213.8	211.8	0.94	279.2	303.1	8.56
253.6	256.2	1.03	218.5	221.9	1.56	259.3	270.5	4.32
259.7	266.4	2.57	384.8	322.1	16.29	319.6	340.3	6.48
318.0	305.6	3.90	295.2	311.4	5.49	369.2	369.9	0.19
252.6	259.3	2.65	226.3	228.6	1.01	602.7	600.8	0.32
127.7	126.6	0.86	144.7	146.9	1.52	253.4	262.2	3.47

* 平均相对误差(Average relative error):3.44%

由表 1 可以看出,用(3)式模拟鹤望兰叶面积指数,平均相对误差为 3.44%,模型结果与实测值吻合较好,取得满意结果。

4 结论

本文利用免疫进化算法(IEA)对鹤望兰叶面积指数进行模拟,平均相对误差为 3.44%,取得满意的结果,对鹤望兰栽培管理有一定的实际意义。免疫进化算法用于鹤望兰叶面积指数模拟简便、易行,为鹤望兰叶面积指数模拟模型的建立及参数优化开辟了一条新途径。该课题尚需进一步研究的问题是:(1)利用其它方法对鹤望兰叶面积指数进行模拟,以便为提高花的质量、改进鹤望兰栽培管理技术及其产业化生产提供科学依据;(2)免疫进化算法用于其它作物叶面积指数模拟研究,以便为作物模式化栽培模型的研究开辟一条全新的途径,使生产经营者的栽培管理实现科学化、合理化和规模化。

References:

- [1] Li K L, Jiang J J, Mao R Z, *et al.* The modeling of vegetation through leaf area index by means of remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1491 ~ 1496.
- [2] Zhao C J, Wu H R, Wang J H, *et al.* Establishment and application of mathematical model of spatial distribution of wheat leaf area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(2): 196 ~ 200.
- [3] Yu F, Lin S. Development and application of computer image technology for the measurement of plant leaf area. *Computer Application and Research Sinica*, 2003, (12): 20 ~ 23.
- [4] Zhu D F, Kang Y J. On the methods of measurement of leaf area in rice. *Acta Agricultura Shanghai*, 1996, 12(3): 82 ~ 85.
- [5] Zeng X S, Zou D S, Sun H L, *et al.* A new method for estimation of leaf area in *Eulaliopsis binata*. *Crop Research*, 2004, 18(1): 31 ~ 32.
- [6] Li H L, Chen D S, Yang H F. Simulation of related parameters of cucumber leaf and fruit in sunlight greenhouse. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(adding): 76 ~ 79.
- [7] Qian M F. The dependency analysis of leaf area mathematic simulation, flower bud length, and flower stem length of *strelitzia reginae*. *Chinese Journal of ECO-Agriculture*, 2003, 11(4): 34 ~ 35.
- [8] Holland F H. Genetic algorithms. *Scientific American*, 1992, (4): 44 ~ 45.
- [9] Li Z Y, Yang H J, Yan P. Index formulae and verification of disaster evaluation based on the optimization of immune evolutionary algorithms. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(4): 553 ~ 557.
- [10] Wang L, Pan J, Jiao L C. The immune algorithm. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(7): 74 ~ 78.
- [11] Ni C J, Ding J, Li Z Y. Study on immune algorithm based on superior antibodies and its convergence property. *Systems Engineering*, 2002, 20(3): 72 ~ 76.
- [12] Zhang Y H, Chen D S, Huang W H. Analysis of architectural parameters and solar radiation distribution in cucumber canopy in sunlight greenhouse. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(1): 172 ~ 176.

参考文献:

- [1] 李开丽,蒋建军,茅荣正,等.植被叶面积指数遥感监测模型.生态学报,2005,25(6): 1491 ~ 1496.
- [2] 赵春江,吴华瑞,王纪华,等.田间小麦叶面积空间分布数学模型的建立与应用.中国农业科学,2004,37(2): 196 ~ 200.
- [3] 于峰,林杉.植物叶面积测定系统的研究及其应用.计算机应用研究,2003,20(12): 20 ~ 23.
- [4] 朱德峰,亢亚军.水稻叶面积测定方法探讨.上海农业学报,1996,12(3): 82 ~ 85.
- [5] 曾晓珊,邹冬生,孙焕良,等.龙须草叶面积测定方法的初步研究.作物研究,2004,18(1): 31 ~ 32.
- [6] 李化龙,陈端生,杨合法.日光温室黄瓜叶片和果实相关参数的模拟.中国农业大学学报,2003,8(增刊): 76 ~ 79.
- [7] 钱妙芬.鹤望兰叶面积数学模拟、花苞包片长度与花茎长度相关性研究.中国生态农业学报,2003,11(4): 34 ~ 35.
- [9] 李祚泳,杨怀金,燕鹏.基于免疫进化算法优化的灾情评估指数公式及效果检验.高原气象,2004,23(4): 553 ~ 557.
- [10] 王磊,潘进,焦李成.免疫算法.电子学报,2000,28(7): 74 ~ 78.
- [11] 倪长健,丁晶,李祚泳.基于优秀抗体的免疫算法及其收敛性问题研究.系统工程,2002,20(3): 72 ~ 76.
- [12] 张亚红,陈端生,黄晚华.日光温室黄瓜群体结构参数及群体内辐射分布分析.农业工程学报,2003,19(1): 172 ~ 176.