

无性系种子园最小近交配置研究

齐建东¹ 买晶晶¹ 刘春霞² 李伟³

(1. 北京林业大学信息学院, 北京 100083; 2. 中国科学院软件研究所, 北京 100190;
3. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 为避免无性系之间自交和近交繁殖,使种子园内无性系尽可能保持花期一致性,促进亲本有效授粉,提高种子产量和质量,以内蒙古红花尔基樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)国家良种基地中的樟子松为无性系材料,随机选取13株无性系樟子松,采用SSR(Simple sequence repeats)分子标记法,利用Gene Marker V2.2软件得到樟子松亲本间的遗传距离,设定花期和花粉传播范围作为实验数据,进行种子园无性系设计。提出双种群改进型自适应步长的果蝇优化算法(Two-population improved adaptive step-length fruit fly optimization algorithm, TIASFOA),并与改进果蝇优化算法(Improved fruit fly optimization algorithm, IFOA)、粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)、遗传算法(Genetic algorithm, GA)进行对比实验,从适应度、收敛性和1~3 m授粉范围内花期相邻或相同的无性系数量3方面进行对比分析。在遗传距离、花期和花粉量已知的条件下,在种群规模为20~60的范围内分别执行200次迭代实验,对适应度进行分析,结果显示,TIASFOA算法的平均值、最大值、最小值和方差比IFOA、PSO、GA算法都小;当种群规模为20时,TIASFOA算法相同或相邻花期的无性系数量之和的平均值分别为125和204,大于其他3种算法,TIASFOA算法可以得到较优适应度为133.016,与种群规模为50时的最小值132.733相差0.283;TIASFOA算法可以获得较优的适应度,并使无性系之间尽量保持花期一致。以遗传距离、花期和花粉量作为种子园设计的约束条件,更贴近生产环境,为无性系种子园优化设计提供了参考。

关键词: 无性系种子园设计; 遗传距离; 花期; 花粉; 果蝇优化算法

中图分类号: S72 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)03-0241-08 OSID: 

Minimum-inbreeding Configuration for Clonal Seed Orchard

QI Jiandong¹ MAI Jingjing¹ LIU Chunxia² LI Wei³

(1. College of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. College of Biological Science and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The optimal design of clonal seed orchard was carried out to determine a more reasonable ratio of clones, so as to avoid self-crossing and inbreeding between clones, and ensure the consistency of florescence of clones in seed orchard as far as possible, in order to promote effective parental pollination, improve seed yield and quality, and provide reference for the design of high-generation seed orchard. The genetic distance between the parents of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. in the National Production Base of Improved Seeds in Honghua'erji of Inner Mongolia Autonomous Region was determined by using SSR markers and Gene Marker V2.2 software. Florescence and pollen range were set, and 13 clones were randomly selected as experimental data. The two-population improved adaptive step-length fruit fly optimization algorithm (TIASFOA) was designed, and improved fruit fly optimization algorithm (IFOA), particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithm (GA) were compared and analyzed in three aspects: fitness value, convergence and the number of clones with adjacent or identical flowering period in pollination range. Under genetic distance, flowering and pollen counts were known, the population size of 20~60 was carried out 200 times respectively, the average, maximum, minimum and variance fitness values of TIASFOA were smaller than those of IFOA, PSO and GA. When the population size was 20, the mean value of the sum of number of clones in the same or adjacent florescence of TIASFOA was 125

and 204, respectively, which was larger than that of the other three algorithms. In this population size, TIASFOA can obtain the optimal fitness value of 133.016, which was 0.283 different from the minimum value of 132.733 when the population size was 50. Genetic distance, flowering period and pollen quantity were taken as constraints for optimal calculation, which were closer to the production environment and provided references for the optimal design of clonal seed orchard. In practical application, population scale of 20 can be used to obtain better seed orchard schemes in a short time and maintain the high genetic diversity of seed orchard.

Key words: clonal seed orchard design; genetic distance; florescence; pollen; fruit fly optimization algorithm

0 引言

无性系种子园是以优良无性系个体为材料、用无性繁殖的方式建立的种子园。无性系种子园中的亲本来源清楚,有利于保持树源的优良品质,便于集约经营管理,但容易产生自交现象。因此,需要通过

对种子园的无性系进行合理配置,以避免自交和近交现象。

20 世纪 60 年代,我国试建了第 1 批初级无性系种子园。20 世纪 70 年代末和 80 年代初,造林工作得到迅速发展。目前,很多初代林木树种的改良工作已经完成,正进入高世代改良阶段。在种子园设计方面,国内学者多采用传统的无性系配置方法进行配置设计,如贾乃光^[1]、程祥等^[2]选用顺序错位排列设计法,梁一池^[3]利用随机完全区组设计方法,许鲁平^[4]采用约束变换区组设计,申文辉等^[5]使用约束的随机完全区组设计,郑仁华等^[6]、谢汝根^[7]、苏顺德等^[8]均采用完全随机排列法进行种子园设计。现实中的种子园是一个庞大而复杂的交配系统,在进行设计工作时,以上学者没有考虑亲本的亲缘关系,仅有袁虎威等^[9]从分子水平上获取优良单株之间的亲缘关系,并采用不平衡、不完全固定区组方法将实验分析得到的亲缘关系结果应用于第 2 代种子园的无性系配置设计;王晴等^[10]引用无性系亲本间的遗传距离,设计了一种改进型自适应并行遗传算法,实现了田间设计。LSTIBUREK 等^[11]在 2010 年提出了最小化近交 (Minimum inbreeding, MI) 设计方案,在实验中设计了 5 种不同场景实验,考虑了更复杂的亲缘结构 (如无亲缘、半同胞和亲子关系等)。LSTIBUREK 等^[12]在 2015 年进一步提出将扩展全局 (遗传禁忌) 算法 (Extended global (genetic-tabu) algorithm, EGA) 用于解决经营林业的现实问题,其在 MI 的基础上添加了半同胞约束条件。CHALOUPKOVÁ 等^[13]将提出的最优近邻算法 (Optimum neighborhood algorithm, ONA) 应用于平衡和非平衡无性系规模的实验中。近几年来,在种子园设计方面的研究更侧重于无性系的亲缘关系,

而其他的影响因素 (如花期和花粉量等) 考虑较少,仅王强金^[14]提及的光泽华桥国有林场配置方案中考虑了物候期,但物候期的划分不够明确。LSTIBUREK 等^[12]在 2015 年提出,可以使用假设情景的方式引入开花同步、育种值、花粉产量等因素,但并没有提供相关实验。

种子园中无性系的花期和花粉量会影响种子园子代际的遗传结构。其中,开花同步数据会影响无性系之间的杂交繁殖,如果无性系之间花期不遇,可能导致大多数无性系之间的授粉期和散粉期错开,从而严重影响种子的产量和品种^[15]。花粉量只有达到有效值才能授粉成功,当花粉量传播不足时,会导致授粉失败,出种率降低,败育率升高^[16]。可见,花期和花粉量是设计各世代种子园内无性系配置的关键因素,只有种子园内的花期基本一致或者相邻无性系花期一致,并且花粉量足够,才能授粉成功,进行正常繁殖。目前,尚未见同时引入花期和花粉量作为种子园设计约束条件的相关报道。

齐建东等^[17]通过无性系之间的遗传距离作为亲缘关系的衡量标准,利用改进型果蝇算法实现了无性系种子园的遗传设计,本文在此基础上,加入花期和花粉量作为新的约束条件,并设计双种群改进型自适应步长的果蝇优化算法 (Two-population improved adaptive step-length fruit fly optimization algorithm, TIASFOA) 对无性系进行配置设计。

1 种子园设计问题

1.1 问题描述

依据 T 株亲本之间的遗传距离、花期和花粉传播量,合理选择亲本及其分株进行无性系遗传设计,在栽种过程中重点考虑近邻位置的近交繁殖现象、同一无性系不同分株的自交情况,以及花粉有效传播范围内的无性系花期同步性和花粉接收量。无性系之间的遗传距离越大,亲缘关系越远,更有利于杂交繁殖,配置时应该选择遗传距离较大的无性系作为近邻;此外,在配置过程中,需要优先考虑花期问题,只有当无性系的花期同步时,散粉和授粉才有意

义,应该将同一花期的无性系栽种距离尽量缩小^[15];其次考虑花粉量,根据经验易知花粉量传播与树的高度相关,花粉传播会随着距离增加而减少,当花粉量低于有效花粉传播量时,则无法成功授粉,因此,在有效传播距离内尽量接受更多的花粉量^[18]。

无性系的具体花期时间与花粉量,会受当年的气候影响(如风、温度和湿度等),也会受当地的地形和花粉自身特征等影响^[19],本文研究工作暂不考虑气候、地形和不同花粉自身特性等因素。

假设种子园是一个规模为 M 行 $\times N$ 列的规则的种子园,所有的树高均为 h ,行间距为 s ,花粉是在静风条件下进行传播,在有效范围的边缘处只能接受到 10% 的花粉量(即有效花粉量不能低于 10%),花粉量在静风条件下呈线性递减。种子园栽种示意图如图 1 所示,每一个方格代表一个可以栽种的位置,如 1-1 表示第 1 行第 1 列的位置。

1-1	1-2	1-3	...	1-N
2-1	2-2	2-3	...	2-N
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
(M-1)-1	(M-1)-2	(M-1)-3	...	(M-1)-N
M-1	M-2	M-3	...	M-N

图 1 种子园栽种示意图

Fig. 1 Schematic of seed orchard planting

1.2 目标函数

本文设计目标函数为

$$\left\{ \begin{aligned} d_{\min} &= w_1 \sum_{i=1}^M \left(\sum_{j=1}^N \frac{1}{G_{ij}} + \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{2}G_{ik}} + \sum_{t=1}^N \frac{1}{d_{it}} \right) + \\ &\quad w_2 \sum_{i=1}^M \left(\sum_{u=q}^Q \frac{1}{P_{iq}} \right) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} j, k, t = 1, 2, \dots, N \\ i \neq j, k, t \\ j \neq k \\ 1 < q \leq u \leq Q \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中

$$Q = \left[2 \left(\frac{R}{s} - 1 \right) + 1 \right]^2 + 3$$

$$P_{iq} = -\frac{0.9P_q}{R}d_{iq} + P_q$$

$$R = nh$$

式中 $d_{\min}$ ——所有植株的近邻距离和同一无性系所有分株距离之和与所有植株有效花粉量倒数和相加的最小值

G_{ij} ——第 i 株无性系和第 j 株无性系之间的遗传距离,且第 i 株无性系和第 j 株无性系为正对近邻

G_{ik} ——第 i 株无性系和第 k 株无性系之间的遗传距离,且第 i 株无性系和第 k 株无性系为斜角近邻

d_{it} ——第 i 株无性系和第 t 株无性系之间的物理距离,第 i 株无性系和第 t 株无性系为同一无性系亲本的分株

P_{iq} ——第 i 株无性系与第 q 株无性系之间传播的花粉量

q ——以第 i 株树为中心半径为 R 范围内的所有无性系的数量

w_1, w_2 ——限制因子

R ——花粉传播半径

P_q ——第 q 株树向第 i 株树传播的花粉量

h ——树高 s ——行距

n ——半径与树高的比值,本文设为 3

Q ——花粉传播半径为 R 的圆范围内的无性系数

u ——无性系数

d_{iq} ——第 i 株无性系与第 q 株无性系之间的物理距离

同时考虑花期的影响,添加以下约束条件

$$P_j = \begin{cases} P_{j-self} & (i \text{ 和 } j \text{ 花期为同一天}) \\ 0.5P_{j-self} & (i \text{ 和 } j \text{ 花期为相邻日期}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_j ——第 j 株树向第 i 株树传播的花粉量

P_{j-self} ——第 j 株树的花粉量

2 材料与方法

2.1 数据来源

从内蒙古红花尔基樟子松国家良种基地 1 代种子园、1.5 代种子园、2 代种子园采集的当年生针叶 3~5 针的樟子松无性系材料,由于单核苷酸多态性(Single nucleotide polymorphism, SNP)分子标记技术成本较高、分型技术不太成熟,因此本文通过简单、成熟、成本低的 SSR 分子标记法提取樟子松基因组 DNA,从 15 对 SSR 引物中选择多态性良好、稳定、清晰的 11 对 SSR 引物作为实验引物,利用 Gene Marker V2.2 软件对条带信息进行比对后,基于等位基因频率的 Nei 1983 距离计算得到樟子松无性系材料中不同无性系之间的遗传距离^[12],作为本文的实验数据。

2.2 研究方法

王晴等^[10]、LSTIBUREK 等^[12]均采用改进的遗

传算法对种子园内的无性系进行配置设计,齐建东等^[17]利用改进型果蝇算法实现了种子园设计,结果均表明改进智能优化算法优于传统设计方法。与较成熟的智能算法(如遗传算法(Genetic algorithm, GA)、粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)等)相比,果蝇优化算法(Fruit fly optimization algorithm, FOA)作为新型仿生智能算法,具有简单、易于实现等优点,获得了国内外众多学者的广泛关注和研究,在医学、生物、工程和科学等领域得到了应用,并且相对于计算量较大的启发式智能优化算法,如人工蜂群算法(Artificial bee colony algorithm, ABC)、GA算法的多种群策略,FOA算法计算简单,这使得FOA算法所消耗的资源更少。

2.2.1 标准果蝇算法

FOA算法利用果蝇(*Drosophila melanogaster*)个体嗅觉优势获取食物的味道,并将自身获取的味道与其他果蝇个体共享;果蝇个体通过视觉比较得出种群中获得最优食物味道的果蝇个体,然后向具有最优食物味道的果蝇位置聚集,并按照该搜索方式继续搜索食物,直到找到食物为止^[20]。FOA算法具有众多优点,但无法直接应用于离散问题,且算法稳定性较差^[21]。针对种子园遗传设计问题,齐建东等^[17]设计的IFOA算法可用于解决离散问题,但稳定性并没有得到提高。本文对FOA算法和IFOA算法的不足进行改进,设计了双种群改进型自适应步长果蝇优化算法(Two-population improved adaptive step-length fruit fly optimization algorithm, TIASFOA)。

2.2.2 TIASFOA 算法

在IFOA算法^[17]的基础上,本文进行了以下改进。

(1) 自适应步长

FOA算法的寻优过程中,步长是一个常量函数,从而导致迭代前期收敛速度慢,迭代后期其寻优精度低;IFOA算法步长变异因子的调节需要人为控制;参考文献[22-24],根据种子园特点,设计了一个自适应逐步递减的步长函数,计算公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} L = L_0 - \frac{L_0 g}{m_{axgen}} + 1 \\ \text{s. t. } \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq g \leq m_{axgen} \\ m_{axgen} \geq 1 \\ X_{orchard} \geq 1 \\ Y_{orchard} \geq 1 \\ g, m_{axgen}, X_{orchard}, Y_{orchard}, L, L_0 \in \mathbf{Z}^+ \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3)$$

其中
$$L_0 = \frac{X_{orchard} Y_{orchard}}{10}$$

式中 L ——步长 L_0 ——初始步长
 g ——当前迭代次序
 m_{axgen} ——最大迭代次数
 $X_{orchard}$ ——种子园 X 轴方向可栽种位置数量
 $Y_{orchard}$ ——种子园 Y 轴方向可栽种位置数量

(2) 多种群策略

在FOA算法和IFOA算法中均采用单种群寻优,种群多样性降低,算法易陷入局部最优。TIASFOA算法将整个种群划分为两个规模相同的子种群,分别对两个子种群进行独立寻优操作,利用种群之间的信息交流机制,增加精英个体,保留最优解和次优解,子种群的其他果蝇分别以最优解和次优解为标准值,形成两个新的子种群,按照该方法迭代寻优,直到满足最大迭代次数,合并两个子种群,输出最优解以及最优解位置上的其他信息。

(3) 寻优过程

为了在保留算法较优的收敛速度的同时,加强算法的随机效果,提高果蝇个体跳出局部最优点的能力,在每次觅食时同时采用最优和随机两种觅食行为。增添一个觅食概率,通过多次实验将其设置为0.8,使得果蝇个体在每次觅食(即寻优)时按照一定的概率采用最优觅食或随机觅食。即在每次觅食过程中随机生成一个随机概率,当随机概率小于觅食概率时,寻找果蝇个体的最差浓度基因位,进行最优觅食;当随机概率大于觅食概率时,采用随机机制。

2.2.3 TIASFOA 算法流程

TIASFOA算法流程如下:

- (1) 轮盘赌法初始化种群。设置实验相关参数:种子园规模 M 行 $\times N$ 列、种群规模 $sizepop$ 、最大迭代次数 m_{axgen} 、觅食概率 P 。
- (2) 确定初始浓度和位置。初始化时保留最优解和次优解果蝇的浓度和位置,记为全局最优解和次优解个体浓度和位置。
- (3) 将种群划分成2个相同规模的子种群。
- (4) 动态调整步长,分别对2个子种群进行独立寻优操作。每次觅食开始前,先随机生成概率 P_i ,然后判断 P_i 和 P 的大小,当 $P_i < P$ 时,采用种子园中浓度最差的基因位为觅食方向,当 $P_i \geq P$ 时,子种群进行随机觅食。
- (5) 对比2个子种群的解,保存所有解中的最优解和次优解个体以及他们对应的位置。
- (6) 对当前迭代中的最优解、次优解、全局最优解、全局次优解进行比较,判断是否需要更新全局最优解和次优解个体浓度以及他们对应的位置。
- (7) 进入迭代寻优,如果迭代次数 g 小于最大迭代次数,则循环执行步骤(3)~(6);否则合并2

个子种群输出最优种子园方案、该方案的最佳浓度以及其他相关信息。

TIASFOA 算法的基本流程图见图 2。

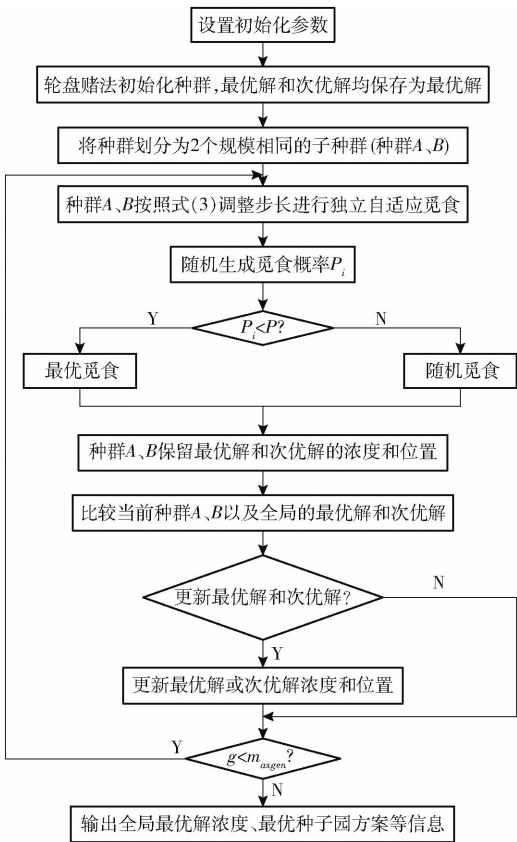


图 2 双种群改进型自适应步长的果蝇优化算法流程图
Fig. 2 Flow chart of two-population improved adaptive step-length fruit fly optimization algorithm

3 实验与结果分析

3.1 实验设置

种子园规模设定为 9 行 × 9 列;TIASFOA 算法最大迭代次数为 1 000,行间距为 1 m × 1 m,树高为 1 m(本文实验数据,可以自定义);将花期设定在 5 月 15—20 日,不同单株之间的相互接受花粉量的范围为 50 ~ 500 单位量之间,在此范围内,随机生成每株亲本的花期和花粉量;花粉最大的传播半径为 3 倍树高(即 3 m),在此基础上与 IFOA、GA、PSO 算法进行对比,其中 IFOA 算法的参数设置:迭代前期变异因子为 0.4,迭代后期变异因子为 0.02;GA 算法的参数设置:交配概率为 0.8,变异概率为 0.2;PSO 算法的参数设置:学习因子为 2,速度初始化为 1。

3.2 结果分析

3.2.1 不同种群规模下的适应度对比

对 TIASFOA、IFOA、PSO、GA 算法在种群 20 ~ 60 范围内以式(1)为目标函数计算近似最优适应度 $d_{\min}$,并分别执行 200 次循环后对平均值、最大值、最小值和方差进行比较分析。

观察表 1,在不同种群规模下,PSO、GA 算法的最小值、最大值、平均值、方差均大于 TIASFOA、IFOA 算法的对应值,且 PSO、GA 算法的最小值始终大于 TIASFOA 的最大值,说明 PSO、GA 算法表现较差;随着种群规模的增加,IFOA 算法的最大值减小,在种群规模为 50 的情况下 IFOA 算法取得最小值 137. 097,大于 TIASFOA 算法的最小值 132. 733,说明 IFOA 算法陷入了局部最优;在不同种群规模下,IFOA 算法最小值、最大值、平均值、方差均大于 TIASFOA 算法,说明 TIASFOA 算法优于 IFOA 算法。在种群规模为 60 的情况下,TIASFOA 算法取得了方差最小值 1. 288,小于其他算法。在种群规模为 50 的情况下,TIASFOA 算法取得最小值 132. 733。TIASFOA 算法从适应度和稳定性方面均优于其他 3 种算法。随着种群规模的增大,各算法的方差会有所减小,但时间代价更大,TIASFOA 算法可以在种群规模 20 下得到较优值,时间消耗少。

表 1 4 种算法在不同种群规模下的适应度对比
Tab. 1 Fitness values comparison of four algorithms under different population sizes

算法	统计值	种群规模				
		20	30	40	50	60
TIASFOA	平均值	136. 879	136. 821	136. 711	136. 580	136. 522
	最大值	140. 128	139. 687	139. 916	139. 957	140. 041
	最小值	133. 016	133. 213	133. 597	132. 733	132. 978
	方差	1. 304	1. 460	1. 723	1. 562	1. 288
IFOA	平均值	141. 628	143. 665	141. 299	141. 591	141. 459
	最大值	171. 964	162. 447	158. 350	155. 846	155. 275
	最小值	137. 714	137. 719	137. 562	137. 097	137. 194
	方差	8. 440	38. 407	5. 401	7. 67	5. 254
PSO	平均值	200. 840	197. 210	195. 307	195. 053	193. 134
	最大值	222. 953	222. 471	216. 741	210. 336	213. 385
	最小值	175. 687	168. 565	168. 665	169. 696	169. 867
	方差	92. 493	82. 229	87. 258	59. 082	67. 464
GA	平均值	191. 851	177. 722	172. 943	170. 710	170. 876
	最大值	273. 391	223. 285	235. 986	225. 298	217. 987
	最小值	160. 568	156. 975	156. 954	155. 208	154. 974
	方差	550. 767	223. 891	194. 050	154. 843	140. 867

3.2.2 算法收敛比较

为在较短的时间内获取较优的适应度,本文从种群规模为 20 的 200 次实验中随机选用 6 次结果进行收敛速度和效果对比(图 3)。从图 3 中可以看到,TIASFOA 算法的收敛效果均优于其他算法。IFOA 算法在迭代 250 次左右适应度达到最小值,而 TISFOA 算法在迭代 700 次左右达到最小值,说明 IFOA 算法收敛速度最快,但最优适应度仍大于 TIASFOA 算法,说明 IFOA 算法陷入局部最优,TIASFOA 算法可以跳出局部最优,得到更优解。

3.2.3 不同种群规模下的花期对比

表 2 给出了在种群规模 20 ~ 60 下,TIASFOA、

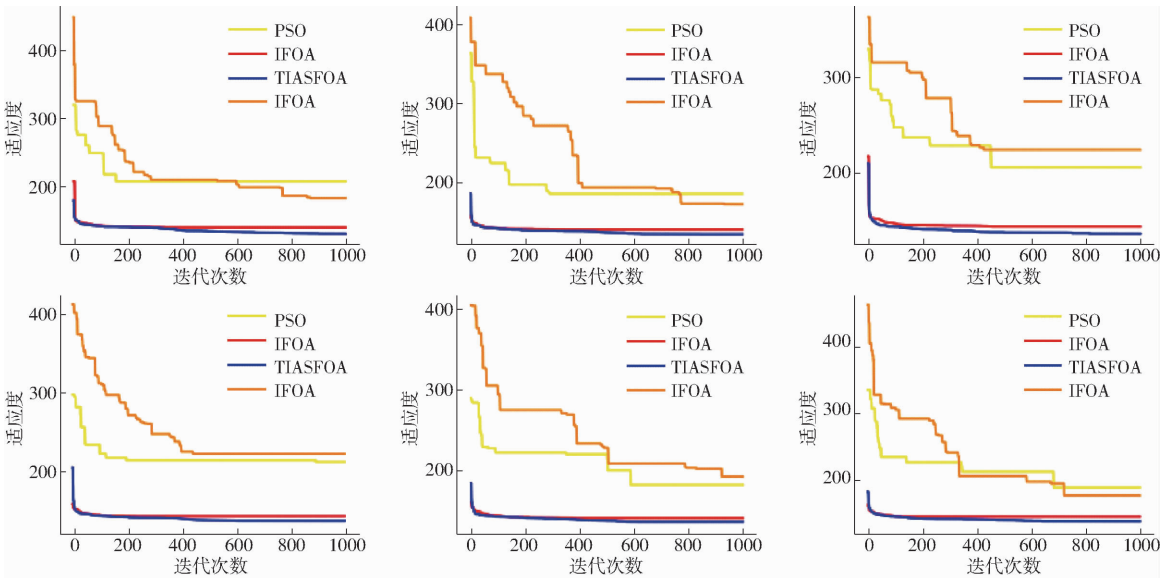


图 3 各算法收敛情况对比

Fig.3 Comparison of convergence of each algorithm

表 2 不同种群规模下 4 种算法分别执行 200 次的无性系数量对比

Tab.2 Comparison of four algorithms performed 200 times of clones under different population sizes

半径/ m	算法	花期	种群规模 20			种群规模 30			种群规模 40			种群规模 50			种群规模 60		
			最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
1	TIASFOA	相同	63	32	47	61	30	47	67	34	47	63	37	47	64	36	48
		相邻	101	48	74	107	58	74	93	45	74	104	49	73	105	52	74
	IFOA	相同	59	27	44	61	26	45	63	25	44	64	23	44	60	21	44
		相邻	99	46	70	100	43	71	89	47	71	94	49	71	92	39	71
	PSO	相同	43	19	34	52	21	34	51	18	33	54	19	34	54	21	33
		相邻	87	31	56	87	35	57	82	35	59	82	25	57	88	30	58
	GA	相同	59	23	35	50	21	35	46	24	35	48	24	35	48	20	35
		相邻	87	40	61	85	39	61	84	34	61	78	40	61	81	31	63
2	TIASFOA	相同	88	42	64	95	39	63	88	41	64	89	43	64	87	42	64
		相邻	142	61	104	147	71	105	159	71	104	153	72	105	137	66	106
	IFOA	相同	84	37	61	79	42	61	85	41	62	81	41	60	85	38	61
		相邻	145	63	101	130	75	101	135	73	100	128	66	101	126	57	101
	PSO	相同	80	35	53	80	30	53	80	30	52	77	35	53	78	32	53
		相邻	135	48	90	125	48	90	120	51	91	124	49	90	132	41	91
	GA	相同	74	29	52	73	33	53	78	36	53	72	36	53	80	37	52
		相邻	123	59	91	124	56	91	118	60	91	116	61	92	125	57	93
3	TIASFOA	相同	27	5	14	28	5	15	26	5	14	25	6	14	27	5	15
		相邻	40	14	26	42	13	27	43	14	26	37	17	26	38	16	26
	IFOA	相同	24	6	12	23	4	13	21	4	12	24	4	13	22	4	13
		相邻	41	14	25	36	15	25	39	14	25	37	13	25	36	11	25
	PSO	相同	20	4	13	26	4	12	23	4	13	22	4	12	24	4	13
		相邻	34	11	22	35	11	22	35	10	22	32	11	22	35	12	22
	GA	相同	22	4	12	24	4	13	22	5	13	23	6	13	22	3	12
		相邻	35	12	23	34	9	22	33	11	22	34	11	22	36	11	23
总计	TIASFOA	相同	178	79	125	184	74	125	181	80	125	177	86	125	178	83	127
		相邻	283	123	204	296	142	206	295	130	204	294	138	204	280	134	206
	IFOA	相同	167	70	117	163	72	119	169	70	118	169	68	117	167	63	118
		相邻	285	123	196	266	133	197	263	134	196	259	128	197	254	107	197
	PSO	相同	143	58	100	158	55	99	154	52	98	153	58	99	156	57	99
		相邻	256	90	168	247	94	169	237	96	172	238	85	169	255	83	174
	GA	相同	155	56	99	147	58	101	146	65	101	143	66	101	150	60	99
		相邻	245	111	175	243	104	174	235	105	174	228	112	175	242	99	179

IFOA、PSO、GA 算法分别执行 200 次,得出的无性系种子园方案在距离中心位置的半径为 1、2、3 m 的传播范围内,种子园花期相同或相邻无性系数量的平均值、最大值和最小值。

观察表 2,在不同种群规模下距离中心位置半径为 1、2、3 m 的传播范围内,种子园内花期相同或相邻的无性系数量,PSO 算法和 GA 算法始终劣于 TIASFOA 算法和 IFOA 算法;TIASFOA 算法计算出来的无性系数量的平均值均优于 IFOA 算法,IFOA 算法计算出来的无性系数量的最大值和最小值等于或略大于 TIASFOA 算法,例如表 2 总计中, TIASFOA 算法和 IFOA 算法在种群规模为 20 时,种子园内花期相邻的情况下,无性系数量的最小值都为 123;在种群规模为 40 时,种子园内花期相邻情况下,无性系数量的最小值 IFOA 算法结果为 134,大于 TIASFOA 算法的结果 130,这是受算法的随机

性影响产生的偶然值。整体来看, TIASFOA 算法在花期相同或相邻时平均值和最大值都更优,可以更好地使整个种子园维持较好的花期一致性。

4 结论

(1) 目标函数不仅考虑了无性系间的遗传距离,而且引入花期和花粉量作为约束条件,并考虑了花粉量在传播过程中不断减小的可能性,不局限于实验变量,灵活性较好。

(2) 设计的 TIASFOA 算法扩大了搜索空间,引入了多种群的信息交流机制,可以进一步跳出局部最优,得到较优的适应度和较好的花期一致性。

(3) 在实际应用中,可以根据现实种子园的树高规定花粉传播距离、设置真实行间距等,并使用种群规模为 20 的 TIASFOA 算法对无性系种子园进行设计。

参 考 文 献

[1] 贾乃光. 种子园无性系配置设计程序[J]. 北京林学院学报, 1985(3):24-27.
JIA Naiguang. A computer program for clone arrangements in seed orchard[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1985(3): 24-27. (in Chinese)

[2] 程祥, 张梅, 毛建丰, 等. 有限种群油松种子园的遗传多样性与交配系统[J]. 北京林业大学学报, 2016,38(9):8-15.
CHENG Xiang, ZHANG Mei, MAO Jianfeng, et al. Gene diversity and mating system of *Pinus tabulaeformis* in finite population seed orchard[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(9): 8-15. (in Chinese)

[3] 梁一池. 种子园配置设计的计算机处理系统[J]. 福建林学院学报, 1995,15(2):156-159.
LIANG Yichi. Computer-aided design for arrangement in seed orchard[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1995,15(2): 156-159. (in Chinese)

[4] 许鲁平. 杉木第一代生产性改良种子园高产配置设计及产量预测的研究[J]. 林业勘察设计, 2002(1):26-30.

[5] 申文辉, 项东云, 周国福. 尾叶桉第二代种子园亲本选择与配置研究[J]. 广西林业科学, 2006,35(3):113-116.

[6] 郑仁华, 刘芳, 欧阳磊, 等. 马尾松第二代无性系种子园营建技术试验研究[J]. 福建林业科技, 2006,33(4):1-4.
ZHENG Renhua, LIU Fang, OU Yanglei, et al. Study on the establishment technologies for the 2nd generation clonal seed orchard of Masson pine[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2006,33(4): 1-4. (in Chinese)

[7] 谢汝根. 杉木第三代种子园营建技术初探[J]. 林业科技开发, 2010,24(1):116-118.

[8] 苏顺德, 肖晖, 林文龙, 等. 马尾松第 2 代种子园营建关键技术[J]. 福建林业科技, 2013,40(4):45-50.
SU Shunde, XIAO Hui, LIN Wenlong, et al. Key techniques of establishment of the 2nd-generation seed orchard of *Pinus massoniana*[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2013, 40(4): 45-50. (in Chinese)

[9] 袁虎威, 梁胜发, 符学军, 等. 山西油松第二代种子园亲本选择与配置设计[J]. 北京林业大学学报, 2016,38(3):47-54.
YUAN Huwei, LIANG Shengfa, FU Xuejun, et al. Parental selection and deployment design in the second-generation seed orchard of Chinese pine in Shanxi Province[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(3): 47-54. (in Chinese)

[10] 王晴, 齐建东, 崔晓晖, 等. 改进型遗传算法在种子园无性系配置设计中的应用[J]. 林业科学, 2018,54(4):30-37.
WANG Qing, QI Jiandong, CUI Xiaohui, et al. Application of improved genetic algorithm in clonal deployment for seed orchard[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(4): 30-37. (in Chinese)

[11] LSTIBŮREK M, EL-KASSABY Y A. Minimum-inbreeding seed orchard design[J]. Forest Science, 2010,56(6):603-608.

[12] LSTIBŮREK M, STEJSKAL J, MISEVICIUS A, et al. Expansion of the minimum-inbreeding seed orchard design to operational scale[J]. Tree Genetics & Genomes, 2015,11(1):12.

[13] CHALOUPKOVÁ K, STEJSKAL J, EL-KASSABY Y A, et al. Optimum neighborhood seed orchard design[J]. Tree Genetics & Genomes, 2016,12(6):105-112.

[14] 王强金. 杉木第三代无性系种子园营建技术与效果初报[J]. 林业勘察设计, 2010(2):133-137.
WANG Qiangjin. Preliminary report on the construction technology and effect of the third generation clone of Chinese fir[J]. Forestry Prospect and Design, 2010(2):133-137. (in Chinese)

[15] 衣俊鹏, 王丽娟. 樟子松种子园花期观测[J]. 林业科技通讯, 1987(11):9-11.

[16] 赖焕林, 王章荣. 马尾松无性系种子园花期花量分析[J]. 浙江林学院学报, 1996,13(4):405-411.

- LAI Huanlin, WANG Zhangrong. Analysis of reproductive phenotogy and strobili number of clones from a clonal seed orchard of Masson's pine[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 1996,13(4):405-411. (in Chinese)
- [17] 齐建东, 刘春霞, 崔晓晖, 等. 基于改进型果蝇算法的无性系种子园设计[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(11): 195-200.
- QI Jiandong, LIU Chunxia, CUI Xiaohui, et al. Design of seed orchard based on improved fruit fly optimization algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 195-200. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181123&journal_id=jcsam. DOI:10.604/j.issn.1000-1298. 2018.11.023. (in Chinese)
- [18] 杨颖. 北京城区树木花粉飘散规律及影响因素研究[D]. 北京:北京林业大学, 2007.
- YANG Ying. Study on urban trees's pollen dispersal regulation and affecting factors in Beijing City[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007. (in Chinese)
- [19] 李希才, 郭承文, 王祥歧, 等. 樟子松种子园花粉的时空变化研究[J]. 东北林业大学学报, 1995,23(2):1-6.
- LI Xicai, GUO Chengwen, WANG Xiangqi, et al. Temporal and spatial changes of pollen in *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* seed orchard[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1995,23(2): 1-6. (in Chinese)
- [20] 潘文超. 应用果蝇优化算法优化广义回归神经网络进行企业经营绩效评估[J]. 太原理工大学学报(社会科学版), 2011,29(4):1-5.
- PAN Wenchao. Drosophila optimization algorithm was used to optimize the generalized regression neural network for business performance evaluation[J]. Journal of Taiyuan University of Technology (Social Science Edition), 2011, 29(4):1-5. (in Chinese)
- [21] 吴小文, 李擎. 果蝇算法和5种群智能算法的寻优性能研究[J]. 火力与指挥控制, 2013,38(4):17-20.
- WU Xiaowen, LI Qing. Research of optimizing performance of fruit fly optimization algorithm and five kinds of intelligent algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(4): 17-20. (in Chinese)
- [22] 郭晓东, 王丽芳, 张学良. 基于自适应步长的果蝇优化算法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2016,37(6):570-575.
- GUO Xiaodong, WANG Lifang, ZHANG Xueliang. Fruit fly optimization algorithm based on adaptive step size[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2016, 37(6): 570-575. (in Chinese)
- [23] 朱富占, 邹海, 丁国绅. 改进的变步长果蝇优化算法[J]. 微电子学与计算机, 2018,35(6):36-40.
- ZHU Fuzhan, ZOU Hai, DING Guoshen. An improved fruit fly optimization with changing step[J]. Microelectronics & Computer, 2018, 35(6): 36-40. (in Chinese)
- [24] 宁剑平, 王冰, 李洪儒, 等. 递减步长果蝇优化算法及应用[J]. 深圳大学学报(理工版), 2014,31(4):367-373.
- NING Jianping, WANG Bing, LI Hongru, et al. Research on and application of diminishing step fruit fly optimization algorithm[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2014, 31(4): 367-373. (in Chinese)