doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.023

基于改进型果蝇算法的无性系种子园设计

齐建东[1]　刘春霞[1]　崔晓晖[1]　李　伟[2]

(1.北京林业大学信息学院,北京 100083;2.北京林业大学生物科学与技术学院,北京 100083)

摘要:种子园的规划设计是林木育种的基础工作,在亲本数量不确定的前提下,最大限度避免种子园内无性系之间近交繁殖,保证种子园具有较高的遗传效益,是种子园设计的目标。以内蒙古红花尔基樟子松(*Pinussylvestris* var. *mongolica*)国家良种基地的 1、1.5、2 代种子园樟子松无性系通过 SSR 等技术分析得到的不同亲本之间的遗传距离为数据支撑,考虑复杂的亲本关系,通过改进的智能优化算法进行种子园设计,并将最终结果与其他智能优化算法和传统算法的结果进行对比分析。结果表明:改进型果蝇算法的收敛速度和效果优于其他算法,由所有算法分别执行 200 次之后的对比结果中可见,其最大值低于其他算法的最小值。在完全随机算法设计方案中存在多处同一无性系分株相邻出现,遗传算法和改进型果蝇算法设计方案并无同一无性系分株作为近邻出现且改进型果蝇算法设计方案的优先交配优于遗传算法设计方案。结果表明,基于遗传距离处理亲本复杂的亲缘关系,采用智能优化算法进行方案配置,可以为高世代种子园设计提供参考。

关键词:种子园设计;无性系;果蝇算法;遗传距离

中图分类号:S722.8+3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)11-0195-06

Design of Seed Orchard Based on Improved Fruit Fly Optimization Algorithm

QI Jiandong[1]　LIU Chunxia[1]　CUI Xiaohui[1]　LI Wei[2]

(1. *College of Information Science and Technology*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*

2. *College of Biological Science and Biotechnology*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The seed orchards design is the basic work for forest tree breeding. The goal of seed orchards design is to minimize the inbreeding between clones and guarantee the high genetic effects in seed orchards. The data source was genetic distance between the 1st, 1.5th and 2nd seed orchards of *Pinussylvestris* var. *mongolica* in Inner Mongolia Honghuaerji Sylvestris National Seed Areas by using SSR molecular marker technique. Considering the complex relationships between parents, the scheme of seed orchards was achieved by improved fruit fly optimization algorithm. The result was compared with other intelligent optimization algorithms and traditional algorithms, and it was showed that the speed and effectiveness of the improved fruit fly optimization were significantly better than those of other algorithms. After executing 200 times respectively, its maximum value was significantly lower than the minimum value of other algorithms. Finally, the improved fruit fly optimization design scheme was compared with the completely random design scheme and the genetic algorithm design scheme. Multiple same clones existed adjacent to each other in the completely random algorithm design, but the genetic algorithm and the improved fruit fly optimization design program did not appear as close neighbors of the same clonal ramets. However, the preferred mating of the improved fruit fly optimization design scheme was superior to the genetic algorithm design scheme. Based on the genetic distance to deal with the complex relationships of the parents, using the intelligent optimization algorithms to design seed orchard can provide reference for the design of high-generation seed orchards.

Key words: seed orchard design; clone; fruit fly algorithm; genetic distance

收稿日期:2018-06-25　修回日期:2018-07-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504660、2017YFD0600500)

作者简介:齐建东(1976—),男,教授,主要从事智能信息处理研究,E-mail:qijd@bjfu.edu.cn

0 引言

当前我国林业发展中,营林造林主要依靠林木育种。其中种子园是林业生产中使用的主要手段,种子园是由优树无性系或家系按营建设计要求,实现集约经营,以生产遗传品质和播种品质优良的林木良种为目的的特种人工林[1]。在种子园设计中,为了避免近交衰退的不利影响,需要尽量减少无性系之间的近交繁殖,以达到种子园遗传效益最大化的目标。

现今,我国大部分种子园已经结束了初级改良工作,正在向高世代育种发展,主要考虑的问题有种子园亲本材料选择、种子园设计、种子园植株管理、育种群体组建及长期育种计划制定等[2]。其中,种子园设计的常用方法有:系统设计(System design, SD)(又称为顺序错位排列)、完全随机设计(Complete random design, CR)、随机完全区组设计(Randomized complete block, RCB)等[3]。国内学者在种子园设计领域的研究较少,代表性的工作有:许鲁平[4]、申文辉等[5]和袁虎威等[6]将无性系材料分为不同区组,分别采用约束变换区组设计、约束分组结合随机完全分组设计和不平衡、不完全固定区组设计的配置方式;程祥等[7]采用无性系顺序错位排列的固定配置法进行设计,以上研究工作均未充分考虑亲本之间的不同亲缘关系以及最大化近交距离。国外学者对种子园设计研究更为深入,BELL 等[8]采用重置近邻设计,LSTIBUREK 等[9]提出了最小化近交(Minimum-inbreeding, MI)设计方案,EI-KASSABY 等[10]提出了随机、重复、交错的无性系行(Randomized, replicated, staggered clonal-row, R^2SCR)种子园设计方案,LSTIBUREK 等[11]通过遗传禁忌算法以及合并独立的 MI 算法改进了原有的 MI 方案,CHALOUPKOVA 等[12]提出最优近邻算法(ONA),以上学者在种子园设计方法上更注重考虑不同的亲缘关系和亲缘比例,研究工作的共同点是:无性系的分株数量以及非平衡设计比例均为已知条件;在固定的无性系种类和无性系分株比例中完成种子园设计。

在现有研究工作中,种子园无性系的亲缘关系、数量和比例都是研究者实验假设的前提条件,如:LSTIBUREK 等[9]在实验中假设种子园的无性系只存在半同胞亲缘关系或无亲缘关系等不同亲缘关系的场景,但是在现实种子园中亲缘关系和遗传多样性往往会比假设条件更复杂、更混乱。因此,明确种子园中的亲缘关系,可以有效控制近交,提高子代杂合率。

本文仅基于无性系种类和无性系之间的遗传距离,利用改进型果蝇算法来使种子园中的无性系在满足最小近亲繁殖的同时得到较高的遗传效益,以及种子园的较优配置方案和合理的亲本分株比例。最后将改进的果蝇算法与传统的种子园配置方法(CR、RCB)、遗传算法(GA)以及其他两个改进果蝇算法进行比较,以评估该设计方案的优越性,并为高世代种子园的设计提供参考。

1 种子园设计

1.1 问题描述

假设存在一个规模为 $M \times N$(M 行、N 列)的种子园,需要从已知遗传距离的 T 株亲本中挑选出合适的亲本比例进行栽种。在栽种过程中,除种子园的四周位置以外,每个中心位置由 8 个位置包围,这 8 个位置作为中心位置的近邻位置,分为两种情况:正对近邻和斜角近邻,易知种子园四角位置只存在 3 个近邻位置,剩下的周边位置都存在 5 个近邻位置。其中近邻位置作为中心位置计算近邻距离的重点考虑对象,因为亲本之间的遗传距离越小,则说明亲本之间的亲缘关系越近,所以应该选择遗传距离较大的植株作为近邻,更利于提高种子园的遗传效益。除此之外还需要考虑同一亲本的不同分株之间的距离影响,即同一亲本的不同分株应该栽种在适当远的距离,以避免自交现象以及优先交配亲本组合不断循环的现象。本文实验中,不考虑种子园地形、气候等客观因素。

1.2 目标函数

该问题的目标函数为

$$f_{\min} = \sum_{i=1}^{M\times N}\left(\sum_{j}\frac{1}{G_{ij}} + \sum_{k}\frac{1}{\sqrt{2}G_{ik}} + \sum_{t}\frac{1}{d_{it}}\right) \quad (i\neq j,k,t \text{ 且 } j\neq k) \tag{1}$$

式中 $f_{\min}$——所有植株的近邻距离与同一无性系所有分株距离之和的最小值

G_{ij}——第 i 株无性系和第 j 株无性系之间的遗传距离,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,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

1.3 不同目标函数对比

将本文设计的目标函数分别与现有 MI 算法[9]中的目标函数

$$d_{\min}=\sum_{l=1}^{N_c}\sum_{i=1}^{N_R}\sum_{j=i+1}^{N_R}\frac{1}{d_{il,jl}^2} \tag{2}$$

以及改进 MI 算法[11]中存在半同胞(half-siblings, h-s)关系时的目标函数

$$d'_{\min}=d_{\min}+\frac{1}{2}d_{\min}(h-s) \tag{3}$$

式中　$d_{il,jl}$——第 l 株无性系的第 i 株和第 j 株分株之间的距离

N_c——无性系的数量

N_R——同一无性系的分株数量

$d_{\min}$——所有种类的无性系中同一无性系的任何两个分株的所有可能距离的平方倒数和

$d'_{\min}$——在 $d_{\min}$ 目标函数的基础上引入半同胞关系的目标函数

$d_{\min}(h-s)$——所有具有半同胞关系的成对分株距离之和

进行对比。

本文提出的算法以及两个对比算法的最终目标都是为了最小化近亲繁殖,其中,式(2)只将同一无性系的不同分株之间的距离作为近亲繁殖的衡量标准,而同一无性系的不同分株间授粉称为自交,所以式(2)其实只考虑了自交繁殖现象,并没有考虑到不同无性系之间的遗传关系以及它们之间的交配现象。式(3)加入了半同胞情况,但是在现实的种子园中特别是高世代种子园中,无性系之间具有的亲缘关系往往更复杂,算法设计不能单纯只考虑同一无性系之间的自交和半同胞现象。

本文提出的目标函数不仅考虑了同一无性系的不同分株之间的影响,还引入了遗传距离作为不同无性系之间的亲缘关系的衡量标准,利用遗传距离计算种子园中所有不同无性系之间的近交繁殖距离。

2　材料与方法

2.1　材料与数据来源

实验材料是从内蒙古红花尔基樟子松(*Pinussylvestris* var. *mongolica*)国家良种基地中的初级种子园、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 SNP 分子标记技术成本较高、分型技术不太成熟,因此本实验材料是通过简单、成熟、成本低的 SSR 分子标记法提取的樟子松基因组 DNA,从 15 对 SSR 引物中选择其中多态性良好、稳定、清晰的 11 对 SSR 引物作为实验所用引物,利用 GeneMarker V2.2 软件对条带信息进行比对后,再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[13],作为本文的实验数据。

2.2　研究方法

种子园设计本质上是一个二次分配问题(Quadratic assignment problem, QAP),作为一个 NP 难问题,QAP 的解决方法有穷举法和智能算法等。受计算能力和时间制约,穷举法只适用于解决小规模的 QAP 案例,智能算法是解决大规模 QAP 案例的可行、有效手段。

较为成熟的智能算法有遗传算法(Genetic algorithms, GA)、禁忌搜索(Tabu search, TS)、粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)等,其中,LSTIBUREK 等[9]的 MI 算法利用了禁忌搜索算法,且 LSTIBUREK 等[11]在改进的 MI 算法中采用了遗传禁忌搜索算法,进一步优化了原有的 MI 算法,使该方案适用于更大更复杂的高世代种子园。虽然经典的智能优化算法已经得到了广泛的应用,但是各自都存在一些明显的不足,这与待解决领域问题相关。近些年新的仿生智能算法也不断出现,例如果蝇优化算法(Fruit fly optimization algorithm, FOA)、蚁群算法(Ant colony optimization, ACO)、鱼群算法(Fish swarm algorithm, FSA)、免疫算法(Immune algorithm, IA)等,相比其他优化算法,FOA 具有简单、参数少、易调节、计算量小、寻优精度较高等优点,易于实现,更适合解决结构复杂的现实问题[14-15]。

2.2.1　果蝇优化算法

果蝇优化算法主要分为嗅觉觅食环节和视觉觅食环节,然后对这两个觅食环节进行不断的迭代最终实现该果蝇种群的进化,获得该算法对问题的最优解。但是,到目前为止,果蝇算法多用于解决连续型目标优化问题,对于离散型目标函数研究还较少,用该算法解决的离散型目标函数最常见的有旅行商问题(Traveling salesman problem, TSP)[16-18]和调度问题[19-20],在解决 TSP 问题中王克甫等[16]引入局部最优概念并采用自适应步长策略抑制了早熟现象并提高了搜索效率,段艳明等[18]将果蝇算法和遗传算法以及 C2Opt 算子相结合加快了解决问题的局部搜索能力和收敛速度。基于不同学者对果蝇算法的改进方法,本文针对无性系种子园配置问题对传统果蝇优化算法的不足进行了改进,提出改进型果蝇算法(Improved fruit fly optimization algorithm, IFOA)。

2.2.2　改进果蝇优化算法

无性系种子园设计问题不同于连续型优化问题,对 T 株无性系按随机比例栽种到规模为 $M\times N$

的种子园的配置方案为一只果蝇,配置方案中的任意一个位置为一个基因位,其中,改变果蝇的任意一个基因位,称为一次觅食;在觅食过程中对基因位的选择行为称为觅食的方向选择,每只果蝇的浓度判定函数为式(1)。

为了使 FOA 能够更好地解决本文的无性系种子园配置问题,对 FOA 做了以下改进:

(1)轮盘赌法初始化种群。果蝇算法的初始值会在一定程度上影响果蝇算法的收敛速度,本实验采用轮盘赌法初始化果蝇种群,将所选的 T 株亲本的遗传距离的倒数作为轮盘赌法中的概率 $p(i)$,即

$$p(i)=\frac{G(i,j)}{\mathrm{sum}(G)}\quad(i,j\in 1,2,\cdots,T)\qquad(4)$$

式中 $\mathrm{sum}(G)$——候选亲本中所有遗传距离的和

$G(i,j)$——第 i 株无性系到第 j 株无性系的遗传距离

(2)过滤无效树种选择。在每次觅食过程中,获取种子园当前基因位的正对近邻的树种,为节约觅食搜索时间,加快搜索速度,过滤与正对近邻相同无性系的选择,避免无效的觅食。

(3)步长选择。FOA 的步长会影响算法的效率和精度,当步长较大时有利于全局搜索,加快搜索速度,但精度较低;步长较小时有利于局部搜索,提高算法精度,但搜索速度会下降。传统的 FOA 是采用固定步长进行觅食,因此很难平衡算法的效率和精度。为兼顾两者平衡,本文引入遗传算法中的基因变异对步长进行调整,在迭代前期可设置较大的变异因子,有利于加快算法的搜索和收敛速度;在迭代后期减小变异因子,在保证算法精度的同时也有助于算法跳出局部最优。

(4)觅食方向。在迭代前期为了加快搜索速度,将觅食方向定为种子园中浓度最差的基因位,在迭代后期为了避免算法陷入局部最优,将觅食方向改为随机方向。

在求解无性系种子园配置问题时需要把 FOA 的连续解空间对应到种子园配置方案,其主要步骤见图 1。

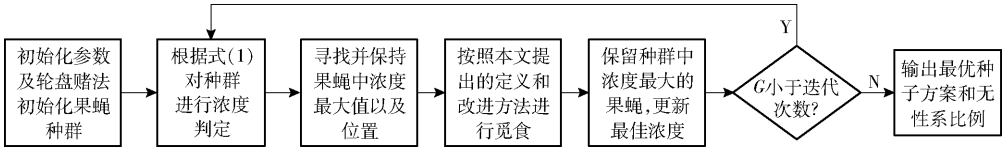


图 1 IFOA 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of IFOA algorithm

3 实验与结果分析

3.1 实验准备

3.1.1 数据材料

从内蒙古红花尔基樟子松国家良种基地中的 1 代种子园、1.5 代种子园、2 代种子园遗传距离的 Excel 文件中,随机选取其中 13 个无性系和它们的遗传距离作为实验数据。

3.1.2 参数设置

本实验中,种子园的规模假设为 9×9(即 9 行、9 列),初始种群大小为 25,迭代次数为 800,迭代前期变异因子为 0.4,迭代后期变异因子为 0.02,在此基础上将本实验与传统的种子园配置方法(CR、RCB)、遗传算法(GA)以及其他两个改进果蝇算法:MFFA[16]、ASFOA[18]进行了比较,以上所有算法均采用式(1)作为目标函数。

3.1.3 实验说明

该算法并不只针对数据材料中选取的 13 个无性系或参数设置中的 9×9 固定大小的种子园,它适用于任意无性系的种类和数量以及任意规模的种子园。

3.2 算法比较

3.2.1 综合对比

通常全局优化算法结果并不是问题的最小值,而是最小值的近似解,即最终的结果存在一定的误差。为了避免偶然事件出现影响对比结果,将各算法在以上参数设置条件下分别执行 200 次后得到对比结果,见表 1。

从表 1 可以发现,本文提出的 IFOA 的平均值、最大值、最小值分别为 1 169.780、1 198.153、

表 1 不同算法分别执行 200 次后适应度对比

Tab. 1 Comparison of fitness of each algorithm after 200 times respectively

算法种类	CR	RCB	GA	MFFA	ASFOA	IFOA
平均值	2 884.919	2 885.232	1 539.715	2 431.000	2 018.370	1 169.780
最大值	3 251.999	3 301.667	2 263.418	2 945.430	2 224.136	1 198.153
最小值	2 114.670	2 207.117	1 318.486	1 777.176	1 688.319	1 137.774

1 137.774，都明显低于其他算法，其中 IFOA 的最大值也明显低于其他算法的最小值，其次结果较好的为 GA。相对于传统算法而言，智能优化算法具有明显优势。

3.2.2　收敛速度比较

从 200 次试验中随机选择 6 次运行结果，作为各算法的收敛速度，见图 2，IFOA 的收敛速度以及效果明显优于其他算法。

3.2.3　不同方法设计对比

将本文的 IFOA 算法得出的设计方案，分别与效果较好的智能算法 GA 设计方案以及传统算法 CR 设计方案进行对比，如图 3 所示。

图 3a 存在多处同一无性系的分株作为直接邻居，如第 1 行第 3 个位置和第 4 个位置都是无性系 9 的分株；图 3b、3c 没有同一无性系的分株作为直接邻居出现；图 3c 无性系 3 和无性系 7 作为直接邻居出现的概率明显高于图 3b，原因是无性系 3 和无性系 7 之间的遗传距离是实验数据中遗传距离最大的组合，因此会优先交配，有利于杂交育种；图 3c 没有无性系 2，因为无性系 2 与其他无性系之间的遗传距离都较小，即无性系 2 与其他无性系都具有较近的遗传距离，因此不建议栽种。

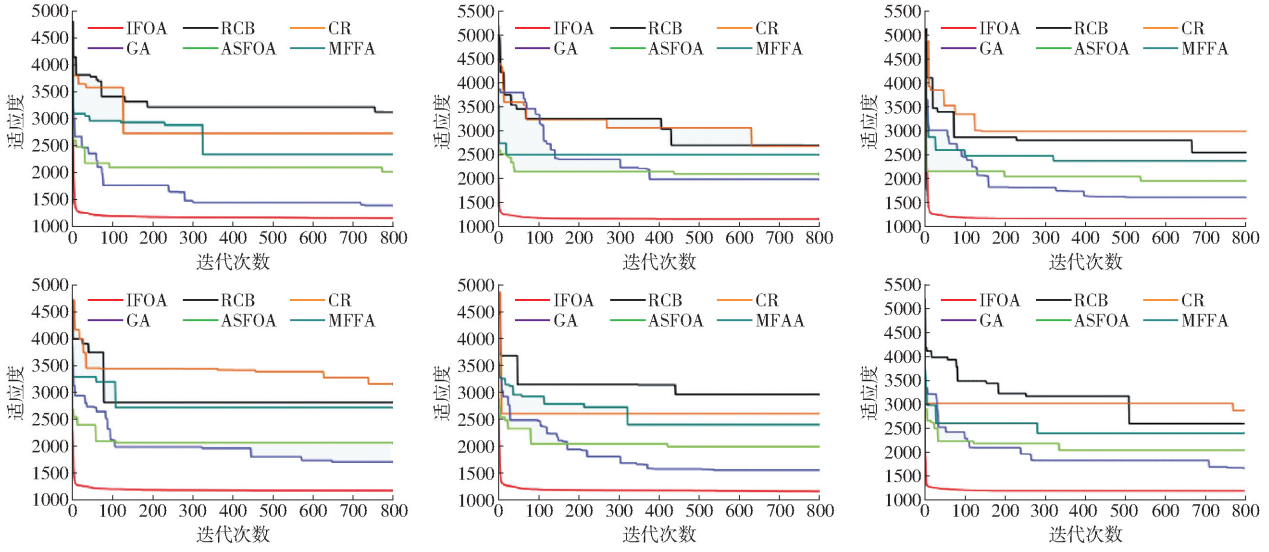
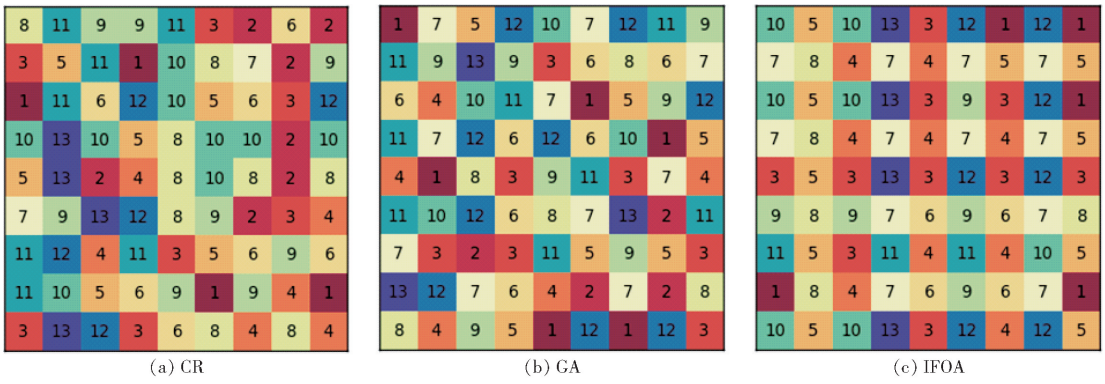


图 2　各算法收敛情况对比

Fig. 2　Comparison of convergence of different algorithms



(a) CR　(b) GA　(c) IFOA

图 3　13 个无性系在 9×9 种子园的设计方案

Fig. 3　Design of 13 clones in 9×9 orchard

4　结束语

将无性系的分株数量作为未知条件，基于无性系之间的遗传距离，不仅考虑了同一亲本的分株影响，也考虑了近邻之间的影响，使得种子园最终能够达到较优的遗传效益，通过改进型果蝇算法实现该目标，并得到较优的种子园设计方案和亲本分株比例。计算结果表明 IFOA 的收敛速度和效果优于其他算法，并且 IFOA 的设计方案中同一无性系分株不会作为近邻出现，当存在亲本组合的遗传距离明显大于其他组合时，即亲缘关系最远组合，该组合通常会作为优先交配组合。

参 考 文 献

1 王昊. 林木种子园研究现状与发展趋势[J]. 世界林业研究, 2013,26(4): 32 -37.
WANG Hao. Research progress and development trend of tree seed orchard[J]. World Forestry Research, 2013,26(4): 32 -37. (in Chinese)

2 王章荣. 高世代种子园营建的一些技术问题[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012,36(1): 8 -10.
WANG Zhangrong. Techniques on establishment and management of advanced-generation seed orchard[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),2012,36(1): 8 -10. (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, 1995,24(2): 156 -159.
LIANG Yichi. The computer processing system on the arrangement designs for seed orchard[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1995,24(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.
XU Luping. Study on high yield configuration design and yield prediction of first generation improved seed orchard of Chinese fir [J]. Forestry Prospect and Design, 2002(1): 26 -30. (in Chinese)

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.
SHEN Wenhui, XIANG Dongyun, ZHOU Guofu. Study on selection and configuration of parents of the second-generation seed garden of *Eucalyptus urophylla*[J]. Guangxi Forestry Science, 2006,35(3): 113 -116. (in Chinese)

6 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)

7 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 tabuliformis* in finite population seed orchard[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(9): 8 -15. (in Chinese)

8 BELL G D, FLETCHER A M. Computer organised orchard layouts (COOL) based on the permutated neighbourhood design concept[J]. Silvae Genetica, 1978,27: 223 -225.

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

10 EI-KASSABY Y A, FAYED M, KLAPSTE J, et al. Randomized, replicated, staggered clonal-row (R^2SCR) seed orchard design [J]. Tree Genetics & Genomes, 2014,10(3): 555 -563.

11 LSTIBUREK 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):1 -8.

12 CHALOUPKOVA K, STEJSKAL J, EI- KASSABY Y A, et al. Optimum neighborhood seed orchard design[J]. Tree Genetics & Genomes, 2016,12(6):1 -7.

13 苗禹博, 朱晓梅, 李志娟, 等. 不同世代樟子松育种资源遗传评价[J]. 北京林业大学学报, 2017,39(12): 71 -78.
MIAO Yubo, ZHU Xiaomei, LI Zhijuan, et al. Genetic evaluation of breeding resources of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* from different improved generations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017,39(12):71 -78. (in Chinese)

14 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)

15 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. Application of fruit fly optimization algorithm to optimize generalized regression neural network for enterprise performance evaluation[J]. Journal of Taiyuan University of Technology (Social Sciences Edition), 2011, 29(4): 1 -5. (in Chinese)

16 王克甫, 薛鹏, 黄全振, 等. 求解旅行商问题的改进果蝇算法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(8): 2789 -2792.
WANG Kepu, XUE Peng, HUANG Quanzhen, et al. Improved fruit fly optimization algorithm for TSP problems[J]. Computer Engineering and Design,2014, 35(8): 2789 -2792. (in Chinese)

17 王勇臻, 陈燕, 张金松. 求解TSP的学习记忆果蝇算法[J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(12): 2722 -2726.
WANG Yongzhen, CHEN Yan, ZHANG Jinsong. Novel fruit fly algorithm based on learning and memory for solving traveling salesman problem[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 37(12): 2722 -2726. (in Chinese)

18 段艳明, 肖辉辉. 一种新的自适应步长果蝇优化算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 161 -168.
DUAN Yanming, XIAO Huihui. A new adaptive step size of fruit fly optimization algorithm[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition),2016,44(1): 161 -168. (in Chinese)

19 郑晓龙, 王凌, 王圣尧. 求解置换流水线调度问题的混合离散果蝇算法[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(2):159 -164.
ZHENG Xiaolong, WANG Ling, WANG Shengyao. A hybrid discrete fruit fly optimization algorithm for solving permutation flow-shop scheduling problem[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(2): 159 -164. (in Chinese)

20 郑晓龙, 王凌. 随机资源约束项目调度问题基于序的果蝇算法[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(4): 540 -545.
ZHENG Xiaolong, WANG Ling. An order-based fruit fly optimization algorithm for stochastic resource-constrained project scheduling[J]. Control Theory & Applications, 2015,32(4):540 -545. (in Chinese)