

8-7-2020

Design and Realization of Optimization System for Rice Type

Weilong Ding

College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

Lifeng Xu

College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

Wei Yang

College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

Gao Nan

College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design and Realization of Optimization System for Rice Type

Abstract

Abstract: It is widely accepted that in traditional crop ideotype breeding, field trials are time-consuming, yet lacking appropriate ways to evaluate the target morphology to be optimal. In order to obtain ideal crop plant type quickly and automatically, meanwhile to reduce the side effects caused by manual operations in the processes of plant type design, e.g. the growing of labor costs and uncertainty of the outcome, a method based on genetic algorithms (GAs) and functional-structural plant model (FSPM) was proposed in this study to optimize plant type of virtual rice by dynamically adjusting phenotypical traits of rice plants. Based on this method, an optimization system for rice plant type was developed in the platform, by using C++, OpenGL and MFC framework. The main modules and key technologies as well as system implementation were introduced in detail. The optimization method for rice plant type based on Functional-structural model, could provide a reference for quantitative designing and optimizing plant type of different crops.

Keywords

functional-structural model, quantitative design, plant type, optimization system

Recommended Citation

Ding Weilong, Xu Lifeng, Wei Yang, Gao Nan. Design and Realization of Optimization System for Rice Type[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2467-2474.

水稻株型优化设计系统的设计与实现

丁维龙, 徐利锋, 危扬, 高楠

(浙江工业大学计算机科学技术学院, 杭州 310023)

摘要: 在理想株型研究中, 传统的基于田间试验的方法存在耗时长, 难以验证株型是否达到最优形态等问题。为减少作物株型设计过程中人工干预所带来的成本提高和结果的不确定性, 自动而又快速地获得作物高产株型, 基于水稻的功能结构模型, 将优化算法应用到虚拟水稻的株型优化上。在 VS2005 平台上, 使用 C++ 编程语言、OpenGL 图形渲染引擎以及 MFC 框架, 开发了水稻株型数字化设计与株型优化系统。介绍了系统的模块、系统构建的关键技术以及系统的实现。研究的基于虚拟模型的水稻株型优化设计方法, 可为作物株型的定量化设计提供新的思路。

关键词: 植物功能结构模型; 数字化设计; 水稻株型; 优化系统

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 10-2467-08

Design and Realization of Optimization System for Rice Type

Ding Weilong, Xu Lifeng, Wei Yang, Gao Nan

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

Abstract: It is widely accepted that in traditional crop ideotype breeding, field trials are time-consuming, yet lacking appropriate ways to evaluate the target morphology to be optimal. In order to obtain ideal crop plant type quickly and automatically, meanwhile to reduce the side effects caused by manual operations in the processes of plant type design, e.g. the growing of labor costs and uncertainty of the outcome, a method based on genetic algorithms (GAs) and functional-structural plant model (FSPM) was proposed in this study to optimize plant type of virtual rice by dynamically adjusting phenotypical traits of rice plants. Based on this method, an optimization system for rice plant type was developed in the platform, by using C++, OpenGL and MFC framework. The main modules and key technologies as well as system implementation were introduced in detail. The optimization method for rice plant type based on Functional-structural model, could provide a reference for quantitative designing and optimizing plant type of different crops.

Keywords: functional-structural model; quantitative design; plant type; optimization system

引言

水稻作为我国粮食安全的主要作物之一, 其株型和冠层结构的优劣对水稻产量的提高以及品质

的改良起着关键性的作用。因此, 如何优化配置水稻株型的各种有利性状, 进而获得能够高产或超高产的株型, 越来越受到水稻育种专家的重视和关注。在理想株型研究中, 以往田间试验的方法能最大限度地找到近似优化的株型, 但其耗时长, 难以验证株型是否达到最优形态, 且缺乏定量化培育目标^[1]。

随着信息技术和数字农业的发展, 近年来出现的植物模型可以模拟作物在田间的生长发育过程



收稿日期: 2015-03-06 修回日期: 2015-07-31;
基金项目: 国家自然科学基金项目(31471416, 31301230); 浙江省自然科学基金项目(LY14C130005);
作者简介: 丁维龙(1975-), 男, 安徽萧县, 博士, 教授, 研究方向为虚拟植物模拟; 徐利锋(1982-), 男, 浙江临安, 博士, 讲师, 研究方向为虚拟植物模拟。

<http://www.china-simulation.com>

• 2467 •

[2]以及作物和环境的交互情况^[3-5],使研究者能够快速进行试验并处理所遇到的问题。这种模型可以节省作物育种所需的时间和资源,但它不包含植物的形态信息,导致其无法结合植物的三维形态来研究植物与环境间的相互关系,且模型的建立大多依靠研究人员的经验^[6-7]。因此,作物理想株型的培育需要探索新的方法。将优化算法引入到株型研究中,利用其全局搜索功能,自动优化配置作物株型性状以寻找理想株型,将极大提高株型优化的效率^[8-10]。目前基于遗传算法的株型研究,优化的是描述冠层宏观结构的参数,如冠层总叶面积,多偏重于描述作物内在生理过程,难以作为量化的株型设计提供直观的参考信息。

本文以水稻为例,结合虚拟水稻研究了水稻株型数字化设计方法和株型优化方法。在此基础上,开发了交互式的水稻株型数字化设计与株型优化系统,实现了水稻株型的交互式设计和自动优化。

1 系统总体设计

系统的总体设计思路是:首先基于已有的植物形态建模方法,模拟水稻形态及其生长过程;通过人机交互调整株型信息,改变水稻植株形态;结合冠层对光的截获情况和光合产量计算,为用户提供株型优劣评价,供其参考;优化过程中,用遗传算法代替人工改变株型参数的工作,不断地改变株型信息,生成水稻植株并计算其光合产量,并找出可以获得最大光合产量的株型及其参数。系统不仅能够可视化模拟水稻的生长过程,还可以实现人工交互设计水稻株型以及基于遗传算法的水稻株型优化设计。

系统各模块功能如下:

(1) 数据载入模块

数据载入是整个系统最早运行的模块,包括品种选择单元和田间试验数据读取单元。品种选择单元从已加载的数据中选择株型数据,田间试验数据读取单元负责从.txt文件中读取株型数据。

(2) 株型模拟模块

水稻株型模拟模块利用上一模块提供的相关数据,模拟水稻的形态和生长过程,包括形态仿真单元和生长演示单元。形态仿真单元直接显示特定时期水稻的形态,生长演示单元以天为时间步长可视化模拟水稻生长过程。关于该模块的算法,在笔者发表的论文^[2,11-12]中有详细的描述,此处不再赘述。

(3) 株型数字化设计模块

株型数字化设计模块是人工设计水稻株型的模块,将水稻株型信息进行显示,用户可在此基础上对水稻株型进行人工调整,并利用株型模拟模块再现水稻形态和生长过程。

(4) 光照模块

光照模块包括光环境单元、冠层光分布单元和光合产量单元。光环境单元负责构建环境中光源的数量、位置、辐射量以及光线的方向等信息。冠层光分布单元负责计算水稻冠层截获的光辐射量。光合产量单元基于 Nikolov 等人^[13]提出的光合产量计算模型,利用水稻冠层每个叶片上的光截获量,计算出每个叶片的光合产量以及整个冠层的光合总产量。

(5) 株型优化设计模块

水稻株型优化设计模块利用遗传算法设计水稻理想株型,包括参数设置单元、遗传算法优化水稻株型单元。参数设置单元负责导入水稻株型因子变化范围和遗传算法控制参数(如种群规模、终止代数、交叉概率、变异概率)。遗传算法优化水稻株型单元利用参数设置模块的参数初始化遗传算法,并结合水稻的可视化模拟和光合产量计算,优化水稻的株型。

(6) 输出模块

该模块包括三维可视化单元、屏幕信息输出单元和株型保存单元。三维可视化单元结合株型模拟模块,利用 OpenGL 进行绘制输出。屏幕信息输出单元负责水稻生长过程中的信息输出(如株型信息、生长时期、光截获量和光合产量等)和优化信息输出(如优化进度、优化得到的株型信息等)。株

型保存单元将人工设计的株型或优化得到的株型保存到.txt 文件中, 该.txt 数据文件可作为株型数据载入模块的输入, 在计算机屏幕上再现所设计的株型。

2 系统构建的关键技术

2.1 光分布情况计算

太阳光辐射是植物进行光合作用的主要能量来源。植物的光合作用与其对光的截获量之间存在密切联系。为了更准确地模拟植物的生长状态, 需要建立精确的植物冠层内光辐射分布模型^[14]。本文采用虚拟半球模型^[15-16]来模拟光环境。将天空离散化为若干个辐射源, 每个辐射相当于一个方位角、高度角、辐射强度不同的天空光^[16]。辐射源的位置用高度角 h 和方位角 A 来表示, 如图 1 所示。每个辐射源向场景中发出光线, 采用光线跟踪方法^[17]模拟光线在场景中的传输过程, 从而获得冠层光分布情况。

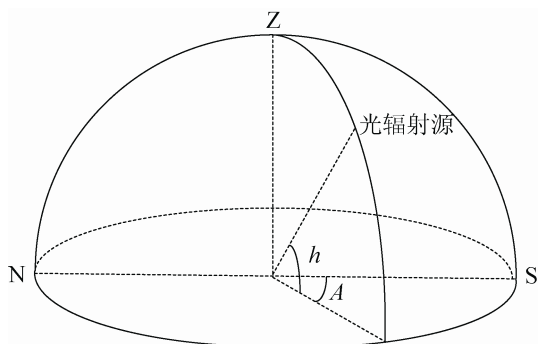


图 1 光辐射源位置定义

计算光分布情况的具体步骤如下:

Step 1: 计算辐射源位置。将天空离散化为 91×360 个辐射源, 辐射源按照半球体形状排列而成, 半球体分为 91 个高度角不同的同心圆环, 按照方位角将 360 个散射辐射源均匀的分布在圆环上。在辐射源半球外, 设置一个直射辐射源, 直射辐射源的位置随太阳位置的变化而变化^[18]。

Step 2: 计算辐射源辐射度。根据太阳光辐射度随太阳位置的变化规律^[19], 计算到达地球表面

的天空光辐射, 其中 85% 是直接光, 15% 为散射光^[20]。

Step 3: 设置光线。假设从辐射源发射出的光为平行光线, 均匀地投放到场景中。光线的投放密度通过光线数量这一参数来控制。光线的方向表示为 (x, y, z) , x 为水平向右方向的位置, y 为垂直向外方向的位置, z 为竖直向上方向的位置, 其计算公式为:

$$\begin{cases} x = -\cos A \\ y = -\sin A \\ z = -\sin h \end{cases} \quad (1)$$

Step 4: 冠层光分布计算。判断每条光线与水稻冠层中叶片的相交情况, 获得每一叶片上光截获量, 其伪代码如下所示:

```

1) 读取水稻植株 t_rice;
2) for(int i=1; i<=光线总数目; i++) {
   读取第 i 条光线 ray;
   设置总递归深度 depth;
   调用 oneRayTrace(ray, t_rice, depth);
}
3) oneRayTrace(Ray ray, Rice& t_rice, int depth)
{
  if(depth<=0) return;
  设置面片交点到光线起点的距离 distance 为无穷大;
  for(int j=1; j<=叶片总数目; j++) {
    for(int k=1; k<=叶片上面片数目; k++) {
      if(光线和面片相交) {
        if(交点到光线起点距离小于 distance)
        {
          将该距离值赋值到 distance;
          记录交点为 crossPoint 和交点处的法向量;
        }
      }
    }
  }
}

```

if(distance 为无穷大) return;

根据该光线的辐射量, 增加交点所在面片的光截获量;

构建反射光线 refRay;

调用 oneRayTrace(refray, t_rice, --depth);

}

4) 叶片截获的光辐射量为该叶片上所有面片截获光辐射之和。

2.2 株型优化设计

根据“理想株型”的定义^[21], 产量是衡量一个水稻品种优劣的主要标准。水稻株型模拟可以模拟水稻的形态, 再通过光分布和光合作用计算, 可以获得该株型当前的光合产量。设 f 表示株型因子组合 x 映射到光合产量的函数, 该约束优化问题可以描述为下述的数学模型:

$$\text{Maximize } f(x), x = (IL, LL, LW, LA) \quad (2)$$

$$IL = (I_1, I_2, \dots, I_{n+1}), u_i \leq I_i \leq v_i$$

$$LL = (L_1, L_2, \dots, L_n), u_{n+1+i} \leq L_i \leq v_{n+1+i}$$

$$LW = (W_1, W_2, \dots, W_n), u_{2n+1+i} \leq W_i \leq v_{2n+1+i}$$

$$LA = (A_1, A_2, \dots, A_n), u_{3n+1+i} \leq A_i \leq v_{3n+1+i}$$

其中: n 表示叶位号; IL, LL, LW 和 LA 分别表示节间长、叶长、叶宽和叶角; I_i 表示节间号为 i 的节间长, 其取值范围为 $[u_i, v_i]$; L_i, W_i 和 A_i 分别表示叶位号为 i 的叶长、叶宽和叶角, 其取值范围分别为 $[u_{n+1+i}, v_{n+1+i}]$, $[u_{2n+1+i}, v_{2n+1+i}]$ 和 $[u_{3n+1+i}, v_{3n+1+i}]$ 。

采用遗传算法来解决上述最优化问题, 将株型所对应的光合产量作为个体的适应度值进行株型优劣的度量, 即遗传算法中个体的适应度 $f(x)$ 。整个模型运行之前, 首先需要设置执行进化过程的控制参数, 如: 初始种群的规模 n_c 、进化过程中的交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 、最大进化代数 t_{max} 。采用二进制编码^[22]对种群个体进行编码, 在进化计算执行之前, 需要依据每个株型因子的取值范围产生初始种群 P_0 。在进化过程中, 子代的个体不断通过遗传操作产生。父代个体和子代个体共同参与生存竞争, 基于排序选择的方法进入到下一代。这个过程不断地迭代进行, 直到满足进化终止条件为

止。经过若干代进化, 可以在株型的解空间中得到最优或者次优解。遗传操作一般包括选择、交叉和变异三种形式。本文采用轮盘赌方法^[23]实现从当前种群中选择适应度高的个体进行交配。精英选择是群体收敛到优化问题最优解的一种基本保障^[23]。在种群中, 通过对精英个体和当前种群个体的适应度值进行比较, 若该最优个体的适应度值大于精英个体的适应度值, 用该最优个体替代精英个体; 否则, 用此精英个体替代当前种群中的最差个体。采用相异位交叉策略^[22]实现交叉操作, 将原有的优良基因遗传给下一代个体, 并生成包含更复杂基因结构的新个体。采用分层变异策略^[22]将变异操作划分为两个层次: 个体层和信息位层, 在个体层以一定的变异概率确定变异个体, 在信息位层以一定的变异概率随机翻转每个信息位。整个水稻株型优化模型用程序流程图描述如图 2 所示。

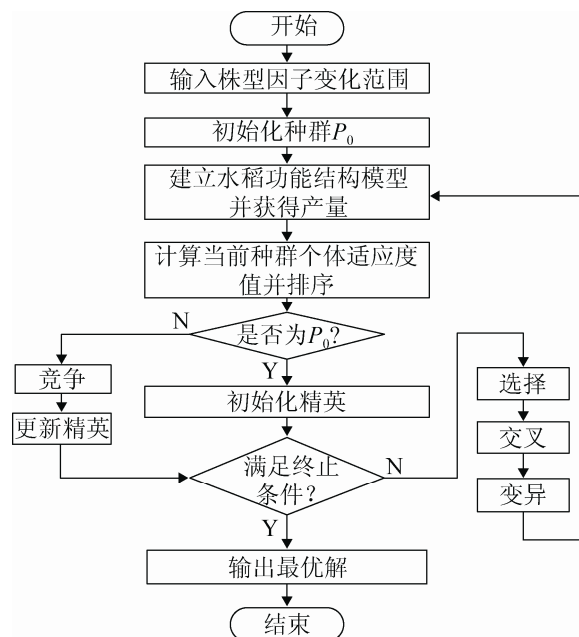


图 2 模型流程图

3 系统实现

依据上述算法思想, 研发了水稻株型数字化设计与株型优化系统。基于 Windows XP 系统, 在 Visual Studio 2005 集成开发环境中, 使用 C++ 编程语言、OpenGL 图形渲染引擎和 MFC 框架对该系

统进行了实现。系统开发所用计算机的硬件配置为 Intel(R) Core(TM)2 Duo E7300 2.66GHz CPU, 4GB 内存, NVIDIA GeForce 9300 GE 显卡。使用.txt 文件存储实验数据。

系统基于 MFC 中的 SDI, 利用窗口分割技术

把窗口分割成四个区域, 其主界面如图 3 所示, 左侧为株型数字化设计区, 中上部为株型三维显示区, 中下部为进度显示区, 右侧为株型优化操作区。

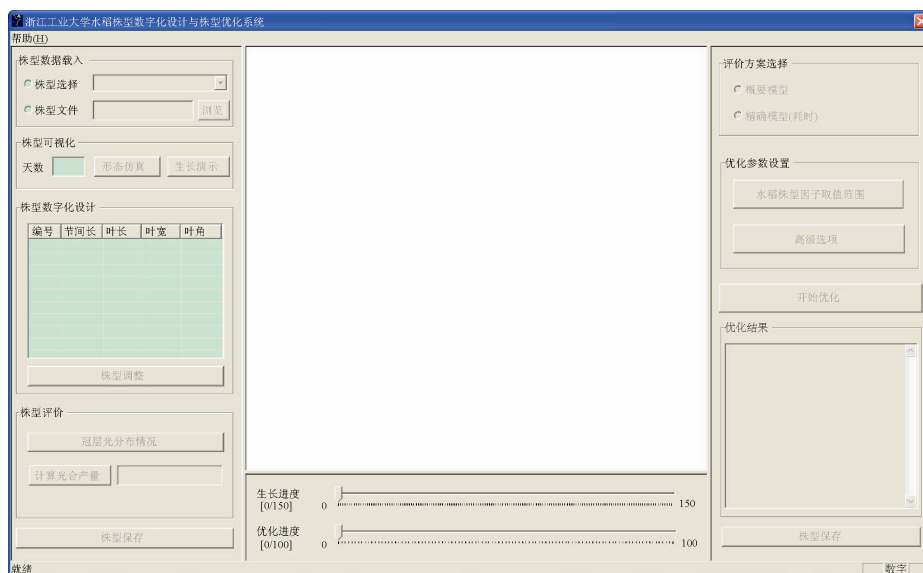
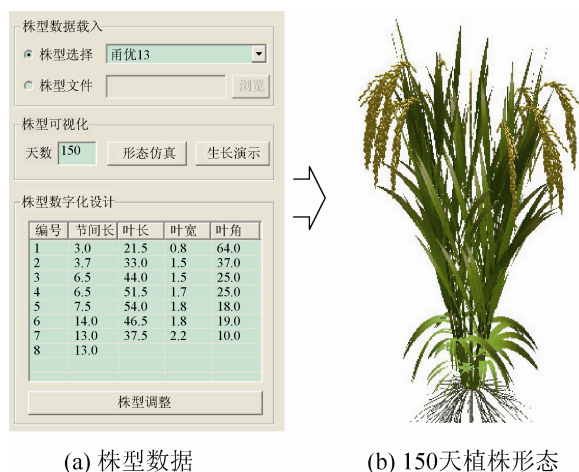


图 3 系统主界面

株型数字化设计区可进行的操作有: 株型选择、导入株型文件、形态仿真、生长演示、株型调整、冠层光分布计算、光合产量计算和株型保存。株型三维显示区将显示水稻的三维形态及其当前的生长状态信息。进度显示区显示当前水稻生长进度和优化进度。若需要模拟水稻形态, 输入水稻生长的天数, 然后点击“形态仿真”按钮, 即可在株型三维显示区直接显示水稻形态, 如图 4。若需要模拟水稻的生长过程, 输入水稻生长的天数, 然后点击“生长演示”按钮, 即可在株型三维显示区显示水稻植株生长的动画, 如图 5。在“株型数字化设计”区域, 输入相应株型因子的参数后, 点击“株型调整”, 即可将相应株型的水稻显示出来, 如图 6 所示。

载入株型数据后, 可开启评价方案选择按钮。系统选择评价方案的选项有两种: 概要模型和精确模型。若选择“概要模型”, 则光照量计算模型以层

为单位进行。系统将水稻冠层分为五层, 假设上一叶层基部的辐射量即为下一叶层的辐射输入量。基于 Goudriaan 等人^[24]提出的冠层光合产量计算的算法思想, 确定水稻生长的地理条件、生长日期、环境因素、自身生长情况等参数, 然后计算出各层的光合产量以及整个冠层的光合总产量。



(a) 株型数据

(b) 150天植株形态

图 4 形态仿真



图 5 水稻的生长

(a) 150天植株形态

编号	节间长	叶长	叶宽	叶角
1	3.0	21.5	0.8	64.0
2	3.7	33.0	1.5	37.0
3	6.5	44.0	1.5	25.0
4	6.5	51.5	1.7	25.0
5	17.5	54.0	1.8	28.0
6	14.0	46.5	1.8	19.0
7	13.0	37.5	2.2	30.0
8	13.0			

(b) 调整株型参数

(c) 调整株型后的植株形态

图 6 调整水稻株型

若选择“精确模型”，则利用光线跟踪方法计算冠层光分布情况，该过程中需要判断每一条光线与水稻冠层中叶片的相交情况，以获得水稻冠层每个叶片上的光截获情况，冠层光分布情况的计算较为精确，但耗时长。获得水稻冠层每个叶片上的光截获情况后，基于 Nikolov 等人^[13]提出的光合产量计算模型，计算出每个叶片的光合产量以及整个冠层的光合总产量。

点击“水稻株型因子取值范围”，弹出水稻株型因子取值范围的对话框。在该对话框中设置水稻株型因子的取值范围，系统对每个株型因子设置的默认取值范围如图 7 所示。点击“高级选项”，弹出高级选项的对话框，在该对话框中可以设置遗传算法控制参数，系统对每个控制参数设置的默认值如图 8 所示。

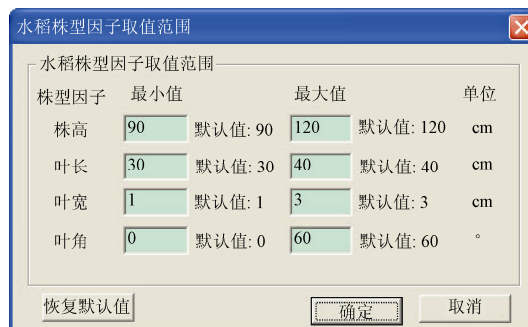


图 7 水稻株型因子取值范围

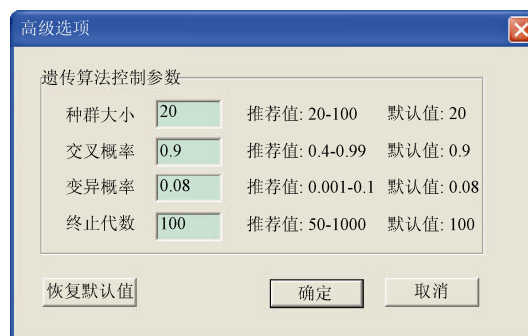
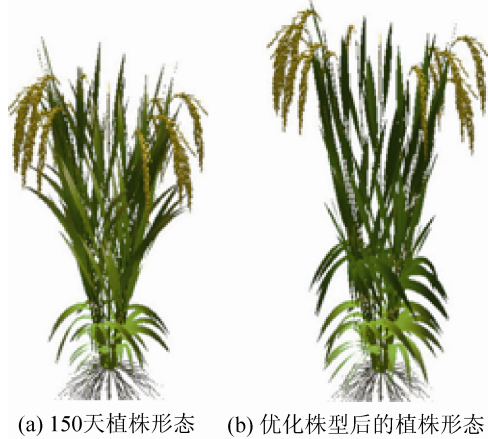


图 8 高级选项

点击“开始优化”按钮，株型三维显示区内的水稻株型不断改变。优化结束后，优化后的水稻株型显示在三维显示区内，其株型数据显示在“优化结果”显示框内。优化后优 13 所得水稻株型形态

如图 9 所示, 从结果可以看出, 优化得到的水稻株型上部接近直立, 中下部较为披散。披散的中下部有利于光线进入到冠层中下部, 冠层上部叶片接近直立, 有利于上部叶片两面受光, 同时有利于光线进入到冠层中下部。



(a) 150天植株形态 (b) 优化株型后的植株形态

图 9 甬优 13 优化前后的株型

4 结论

现有的研究大多关注模型本身的建模问题, 而关注其应用的较少。本文研发的系统将遗传算法同植物的结构功能模型紧密结合, 将模型系统中若干表现型性状的动态发育作为优化算法的遗传因子, 对虚拟水稻的形态和生理进程进行模拟, 从而最终得出对产量的预测。本研究初步实现了优化算法与模型系统在时间和空间 2 个纬度上的整合, 是对植物结构功能模型新应用领域的探索。

在未来的工作中, 将突破现有仅考虑植株形态结构的局限, 在株型优化模型中将田间配置方式以及植物生理学等方面的因素也考虑进来, 以设计出更为有效的高产株型。另外, 拟研究基于硬件加速的高效、低代价的结构功能模型、适应度函数设计以及遗传操作策略, 以增强算法的全局寻优能力和收敛性能。

参考文献:

- [1] 苏中滨, 战守义, 郑萍, 等. 作物高光效株型数字化设计方法研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 203-207.
- [2] 丁维龙, 朱元伟, 章谦元, 等. 水稻生长可视化模拟系

- 统的设计与实现 [J]. 浙江工业大学学报, 2012, 40(1): 46-49.
- [3] Cilas C, Bar-Hen A, Montagnon C, *et al.* Definition of architectural ideotypes for good yield capacity in *Coffea canephora* [J]. *Annals of Botany* (S0305-7364), 2006, 97(3): 405-411.
- [4] Barillot R, Combes D, Chevalier V, *et al.* How does pea architecture influence light sharing in virtual wheat-pea mixtures? A simulation study based on pea genotypes with contrasting architectures [J]. *AoB Plants* (S2041-2851), 2012, pls038; doi:10.1093/aobpla/pls038
- [5] Silva D D, Han L, Faivre R, *et al.* Influence of the variation of geometrical and topological traits on light interception efficiency of apple trees: sensitivity analysis and metamodelling for ideotype definition [J]. *Annals of Botany* (S0305-7364), 2014, 114(4): 739-752.
- [6] Guo Y, Ma Y T, Zhan Z G, *et al.* Parameter Optimization and Field Validation of the Functional-Structural Model GREENLAB for Maize [J]. *Annals of Botany* (S0305-7364), 2006, 97(2): 217-230.
- [7] Sarlikioti V, de Visser P H B, Buck-Sorlin G H, *et al.* How plant architecture affects light absorption and photosynthesis in tomato towards an ideotype for plant architecture using a functional-structural plant model [J]. *Annals of Botany* (S0305-7364), 2011, 108(6): 1065-1073.
- [8] Qi R, Ma Y, Hu B, *et al.* Optimization of source-sink dynamics in plant growth for ideotype breeding: A case study on maize [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*(S0168-1699), 2010, 71(1): 96-105.
- [9] Quilot-Turiona B, Ould-Sidib M M, Kadrani A, *et al.* Optimization of parameters of the 'Virtual Fruit' model to design peach genotype for sustainable production systems [J]. *European Journal of Agronomy* (S1161-0301), 2012, 42: 34-48.
- [10] Drewry D, Kumar P, Long S P. Simultaneous improvement in productivity, water use, and albedo through crop structural modification [J]. *Global Change Biology* (S1354-1013), 2014, 20(6): 1955-1967.
- [11] 丁维龙, 刘畅, 张玉屏, 等. 基于弯曲变形计算的水稻穗空间形态模拟研究 [J]. *中国水稻科学*, 2010, 24(3): 309-314.
- [12] 马培良, 丁维龙, 古辉. 基于 OpenGL 和双三次贝塞尔曲面的稻叶可视化建模 [J]. *浙江工业大学学报*, 2010, 38(1): 36-40.
- [13] Nikolov N T, Massman W J, Schoettle A W. Coupling biochemical and biophysical processes at the leaf level:

