

小麦生长模拟与三维可视化系统构建技术研究

李书钦¹, 诸叶平^{2*}, 刘海龙², 李世娟², 刘升平², 刘文超²

(1.北方工业大学信息中心, 北京 100144; 2.中国农业科学院农业信息研究所,
农业部农业信息服务技术重点实验室, 北京 100081)

摘要:作物生长过程的三维可视化是虚拟作物研究的关键技术之一,针对小麦形态结构复杂,小麦生长可视化不易实现的问题,以小麦作物为对象,在已有研究成果基础上,结合小麦生长模拟模型和形态结构模型,从系统结构与功能、系统设计与实现、真实感图形渲染技术(颜色渲染、纹理映射、光照处理)等方面入手,构建小麦生长模拟与三维可视化系统,实现了小麦生长模型和形态结构模型的有机结合,最终实现了小麦生长过程的三维可视化。小麦生长模拟与三维可视化系统将为小麦作物生长动态预测、栽培管理调控、作物株型设计等提供形象逼真的可视化工具,为小麦理想株型筛选,高产、高效、抗倒伏设计与优化等提供技术支撑。

关键词:小麦;三维可视化;生长模拟;形态结构

doi:10.13304/j.nykjdb.2017.0291

中图分类号:TP391.9,S126 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-0864(2018)02-0065-07

Wheat Growth Simulation and 3D Visualization System Construction Technology

LI Shuqin¹, ZHU Yeping^{2*}, LIU Hailong², LI Shijuan², LIU Shengping², LIU Wenchao²

(1.Information Center, North China University of Technology, Beijing 100144;

2.Key Laboratory of Agri-information Service Technology, Ministry of Agriculture; Agricultural Information Institute,
Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Crop growth process 3D visualization is one of the key technologies of virtual crop research, since morphological structure of wheat is complex and wheat growth visualization is not easy to realize. This study took wheat as the subject, on the basis of existing research results, combined with wheat growth simulation model and the morphological structure model, started with the system structure and function, system design and implementation, realistic graphics rendering technique (color rendering, texture mapping and light processing) and other aspects, built the wheat growth simulation and 3D visualization system, realized the combination of wheat growth model and morphological structure model, and finally realized 3D visualization of wheat growth process. Wheat growth simulation and 3D visualization system would provide visualization tools for wheat growth dynamic prediction, cultivation management control, crop plant type design, etc. and provide technical support for wheat ideal plant type selection, design of high yield, high efficiency, lodging resistance and optimization, etc..

Key words: wheat; 3D visualization; growth simulation; morphological structure

作物生长过程的三维可视化是虚拟作物研究的重点,若能将小麦生长模拟模型和形态结构模型有机结合,建立小麦生长可视化系统,真实表达

实际生产条件下小麦形态结构的动态变化,将有助于田间生产,为作物株型设计、种植规划、产量预测等提供全新技术手段。

收稿日期:2017-05-02; 接受日期:2017-07-11

基金项目:北方工业大学 2017 年教育教学改革和课程建设研究项目(NCUT2017JGZ022);“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0200601);中国农业科学院协同创新项目(CAAS-XTX2016006);中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-2016-AII-03);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(JBYW-AII-2017-34);国家 863 计划项目(2013AA102305)资助。

作者简介:李书钦,实验师,博士,主要从事虚拟现实和三维可视化研究。E-mail:lsq@ncut.edu.cn。*通信作者:诸叶平,研究员,博士生导师,主要从事农业信息技术研究。E-mail:zhuyeping@caas.cn

作物模型分为生长模型和形态结构模型,生长模型对作物生长管理调控、产量预测和经济效益分析等有重要指导作用,形态结构模型则为作物理想株型筛选、高产、高效、抗倒伏、作物群体设计与优化等提供有力技术支撑^[1~3]。在小麦生长模型研究方面,江苏省农业科学院高亮之等^[4]根据小麦生长发育和栽培技术的数量规律,研发出小麦栽培模拟优化决策系统(wheat cultivational simulation-optimization-decision making system, WCSODS),在应用中具有普遍的指导性。石春林等^[5]为了模拟渍害条件下小麦生长和产量变化,增加了过量土壤水对光合作用、干物质分配、叶片衰老等的影响模块,完善了 WCSODS。在小麦形态结构模型研究方面,雷晓俊^[6]和伍艳莲等^[7,8]利用 NURBS 曲面建模实现了小麦器官、个体和群体的三维可视化。诸叶平^[9]开发了小麦生长可视化系统,实现了各种环境条件的交互输入,通过改变每个生长日的生物量数据,来直观表达小

麦的生长过程。严定春等^[10]开发了小麦-玉米连作决策支持仿真系统,实现了连作的仿真模拟。

以上研究分别针对小麦生长模型和形态结构模型展开,但没有将二者结合起来,没有用生长模型驱动小麦的动态生长。本研究拟在已建立的小麦生长模拟模型基础上,用生长模型的输出数据构造小麦形态结构模型,构建小麦生长模拟与三维可视化系统,最终实现小麦生长过程的可视化,为小麦作物生长动态预测、栽培管理调控、株型设计等提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 系统结构与功能

本研究将小麦生长可视化系统划分为 3 层:系统输入层、系统模型库层和系统输出层,系统结构如图 1 所示:

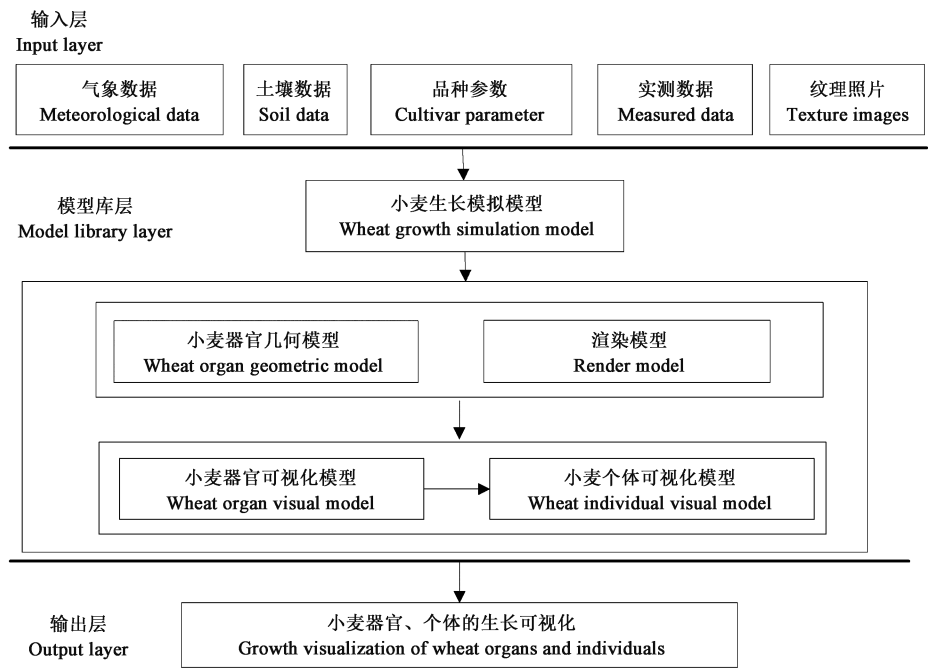


图 1 小麦生长模拟与三维可视化系统结构图

Fig.1 Wheat growth simulation and 3D visualization system structure diagram.

1.1.1 系统输入层 输入层为系统的输入部分,包括气象数据、土壤数据、小麦的品种参数、纹理图片、田间试验实测数据、生长模型模拟数据等。其中,气象数据包括日最高气温(℃)、日最低气温(℃)等;土壤数据包括 pH、土壤质地、有机质

含量(g/kg)、速效 N 含量(mg/kg)、速效 P 含量(mg/kg)、速效 K 含量(mg/kg)等;品种参数包括遗传参数、小麦品种、总叶片数、越冬前叶片数、出苗积温、叶热间距等;实测数据包括叶片长度、叶片最大宽度、茎叶夹角、叶片高度、茎节长度、茎秆

直径、株高等形态数据;生长模拟模型的输出数据为小麦逐日生长数据,将模拟数据输入小麦生长可视化系统,可动态表达小麦的生长过程。

1.1.2 系统模型库层 模型库层包括小麦生长模拟模型、小麦器官几何模型、小麦器官渲染模型以及小麦个体可视化模型。小麦生长模拟模型是小麦生长可视化的基础,本研究借助 Logistic 方程构造小麦叶长、最大叶宽、株高和叶片高度模拟模型;小麦器官几何模型根据小麦各器官形态特征,借助 NURBS 曲面建模和 OpenGL 图形库构造小麦叶片、叶鞘等器官几何模型,用圆柱体模拟小麦茎秆几何模型;小麦器官渲染模型借助计算机图形学技术,对小麦器官几何模型进行颜色渲染、纹理映射和光照处理,建立视觉效果逼真的小麦形态结构模拟模型;小麦个体可视化模型基于小麦生长模拟模型,通过计算小麦逐日形态数据,在小麦器官可视化模型的基础上模拟小麦逐日生长过程,动态表达小麦生长过程的三维可视化。

1.1.3 系统输出层 系统输出层为小麦生长模拟与三维可视化系统在计算机上的直观展现,可静态表达小麦器官和个体三维模型,也可动态表达小麦生长过程。输出层还包括用户与生长可视化系统的交互功能,用户可手工输入和改变小麦各器官形态特征参数,从而改变小麦器官可视化模型和个体可视化模型。

1.2 系统设计与实现

1.2.1 系统开发环境 本系统采用普通 PC 机开发,硬件配置为: Intel Pentium Dual-Core E5400 2.7G CPU, 2G 内存, 500G 硬盘, 1G Intel(R) G45/G43 Express Chipset 显卡;软件环境: Windows 7 操作系统, 采用 Microsoft Visual Studio 2010 作为开发工具, 以 C++ 为编程语言, 以 OpenGL 为 3D 图形库, 采用面向对象技术和模块化程序设计, 界面采用 MFC 开发。

1.2.2 系统功能模块设计 小麦生长可视化系统主要包括 4 个功能模块: 系统参数设置、小麦器官可视化、小麦个体可视化及系统交互控制。

结合田间试验实测数据和小麦生长模拟模型输出数据,“系统参数设置”模块设置系统运行参数,如生长日、小麦品种、氮处理和叶长、叶宽、茎叶夹角等小麦器官形态数据;根据设定的参数,“小麦器官可视化”模块可模拟小麦叶片、叶鞘、茎秆等器官的三维形态;结合小麦生长模拟模型

和小麦形态拓扑结构,“小麦个体可视化”模块可实现小麦植株在不同生长日的静态三维模拟,也可以实现小麦植株在整个生育期的动态生长可视化;“系统交互控制”模块借助键盘、鼠标等输入设备,对小麦植株进行平移、缩放、旋转等交互控制,可实现用户与小麦生长可视化系统的实时交互。

1.3 真实感图形显示技术

为真实模拟小麦器官表面细节,需要借助计算机图形学真实感图形显示技术(颜色渲染、纹理映射、光照处理等),对小麦器官进行真实感渲染,以生成逼真的小麦器官形态结构模型,本研究采用 3D 图形库 OpenGL 自带的函数来渲染小麦叶片、叶鞘、茎秆等主要器官。

1.3.1 颜色渲染 本研究采用 OpenGL 中的 glColor(TYPE r, TYPE g, TYPE b) 函数对小麦器官进行颜色渲染,根据小麦各生育期的颜色变化来调节 R、G、B 3 个颜色参数值,以保证模拟效果的逼真,叶片各个控制点的颜色分量值用颜色数组来存放,通过 OpenGL 中的 gluNurbsSurface() 函数调用该数组,该函数定义如下:

```
gluNurbsSurface ( theNurbs, ucount, uknot, vcount, vknot, 10 * 3, 3, array, 4, 4, GL_MAP2_COLOR_4)
```

其中, ucount、vcount 分别为 u、v 向节点个数, uknot、vknot 分别为 u、v 向节点序列, array 为颜色数组。

1.3.2 纹理映射 为了真实表达小麦器官表面的纹理细节,采用纹理映射(颜色纹理)来渲染小麦器官几何模型,通过田间试验采集小麦器官纹理照片,获取小麦不同生育期的器官纹理图片,建立小麦器官纹理库,为纹理映射提供丰富的纹理选择。按不同品种将小麦器官纹理库分为 3 组,每组再按叶片、叶鞘和茎秆等器官继续细分。纹理贴图对图片的大小要求,需满足 $2^n \times 2^n$, 本研究统一选取 64×64 大小的纹理图片,小麦器官纹理库如图 2 所示。

纹理映射首先需要将小麦器官模型三维坐标 (x, y, z) 与纹理图片坐标 (u, v) 相对应, OpenGL 中的纹理映射函数可以实现上述过程,具体步骤如下:

首先,从小麦器官纹理库中读取纹理数据,调用函数 AUX_RGBImageRec auxDIBImageLoad(LPCTSTR filename); 然后设定小麦叶片纹理映射到小麦器官几何模型表面的映射方式,调用函

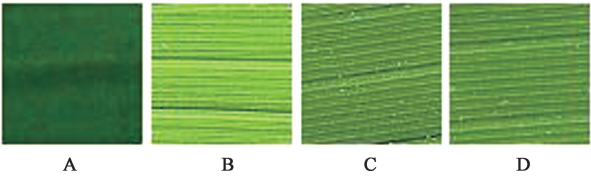


图 2 小麦叶片不同时期纹理图片

Fig.2 Wheat leaf texture images in different periods.

A. 出苗期;B.拔节期;C.返青期;D.孕穗期
A. Seeding stage; B. Elongating stage; C. Returning green stage; D. Booting stage

数 `glTexParameter * (GLenum target, GLenum pname, TYPE pname), glTexEnv * (GLenum target, GLenum pname, TYPEpname);`

其次,定义小麦器官纹理图片在三维模型上的纹理坐标,调用函数 `glTexCoord * (TYPE cords)`。对于小麦叶片、叶鞘等 NURBS 曲面模型的纹理映射,本研究采用 `gluNurbsSurface ()` 函数实现纹理映射效果,具体定义如下:

`gluNurbsSurface (g_nurbs, 4, GetKnots (4), 4, GetKnots (4), 4, 2, m_ctrPoints_Texture, 2, 2, GL_MAP2_TEXTURE_COORD_2)`

其中, `m_ctrPoints_Texture` 为小麦器官纹理数组,数组形式为 `{ 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1 }`。

1.3.3 光照处理 为模拟田间环境中的真实光照效果,采用 OpenGL 提供的光照模型来实现光照处理,OpenGL 的光照处理提供众多图形函数,且计算效率高,可以接近田间环境真实光照效果,本研究采用平行光源进行模拟,具体步骤如下:

- ①设定小麦植株相对于光源的位置,调用 `glLightfv ()` 函数实现;
- ②创建光源,并使光源有效,调用 `glEnable ()` 函数实现;
- ③根据全局环境光等设定 OpenGL 光照模式,调用 `glLightModelfv ()` 函数实现;
- ④设定小麦器官光照处理的材质属性,调用 `glMaterialfv ()` 函数实现。

2 结果与分析

2.1 小麦叶片纹理映射效果

小麦形态结构模型不仅应精确模拟小麦的三维形态,还要在细节表达上进行处理,从而表达更加逼真的视觉效果。参照已有研究基础^[11,12],对

小麦器官几何模型进行真实感图形渲染,从而生成形象逼真的小麦三维可视化模型,小麦叶片纹理映射效果如图 3 所示。从图 3 可以看出,在进行纹理映射前,小麦叶片形态模型距离田间环境真实效果差距较大,真实感效果有待加强,进行纹理映射后,叶片的细节信息得到表达,小麦叶片器官模型真实感强。但对于小麦茎秆、叶鞘等器官,不同生育期的纹理图片较难获得,因此,真实模拟田间环境中的小麦纹理变化存在较大难度。

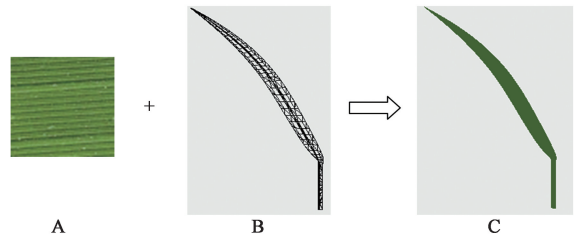


图 3 小麦叶片纹理映射效果

Fig.3 Effect of wheat leaf texture mapping.

A.小麦叶片纹理图片;B.小麦叶片网格模型;C.纹理映射后的小麦叶片三维模型
A. Texture image of wheat leaf; B. Mesh model of wheat leaf; C. 3D model of wheat leaf after texture mapping.

2.2 小麦叶片颜色渲染和光照处理效果

为更真实表达小麦不同器官的细节信息,本研究对小麦叶片采用纹理映射和光照处理的方式,对叶鞘和茎秆则采用颜色渲染和光照处理的方式,小麦叶片颜色渲染和光照处理效果如图 4 所示,采用颜色渲染和光照处理后,小麦叶片真实感更强。

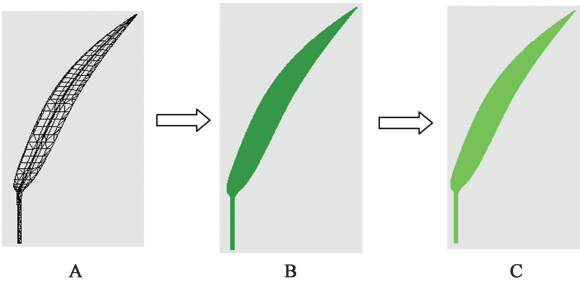


图 4 小麦叶片颜色渲染和光照处理效果

Fig.4 Effect of wheat leaf after color rendering and illumination treatment.

A.小麦叶片网格模型;B.颜色渲染后的叶片;C.颜色渲染后再进行光照处理的叶片
A. Mesh model of wheat leaf; B. Leaf after color rendering; C. Leaf after color rendering and illumination treatment.

本研究借助田间采集的小麦器官纹理照片,模拟小麦不同生育期的纹理细节,采用 OpenGL 光照模型,实现了较逼真的光照效果。结果表明,本研究采用的真实感图形显示技术(颜色渲染、纹理映射、光照渲染等)易于实现,绘制的小麦三维模型真实感较强。

2.3 小麦生长模拟与三维可视化系统运行效果

在已构建的小麦生长模拟模型和小麦形态结构模型基础上,开发小麦生长可视化系统,实现小麦生长过程的动态可视化,系统主界面如图 5

所示。

基于小麦生长模拟模型,可计算冬小麦每个生长日的形态数据,借助已有研究基础^[11~13],可逼真模拟种冬小麦逐日生长过程,分别选取三个小麦品种(衡观 35、济麦 22、衡 4399)6 个代表性的生长日进行模拟,模拟结果如图 6 所示。结果表明,利用小麦生长模拟模型输出数据,可动态模拟小麦逐日生长过程,将小麦生长模型与形态模型相结合,实现小麦生长过程的三维可视化表达。

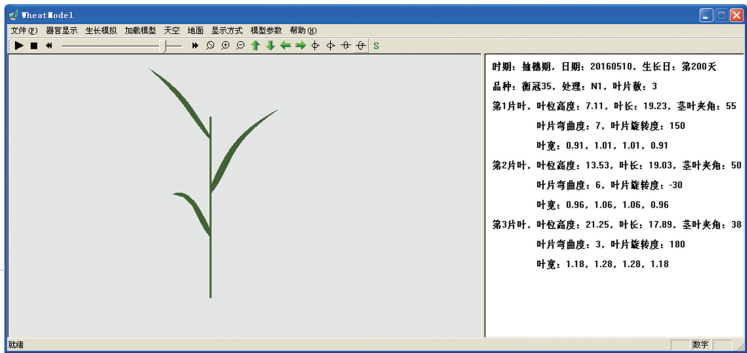


图 5 小麦生长可视化系统主界面

Fig.5 Main interface of wheat growth visualization system.

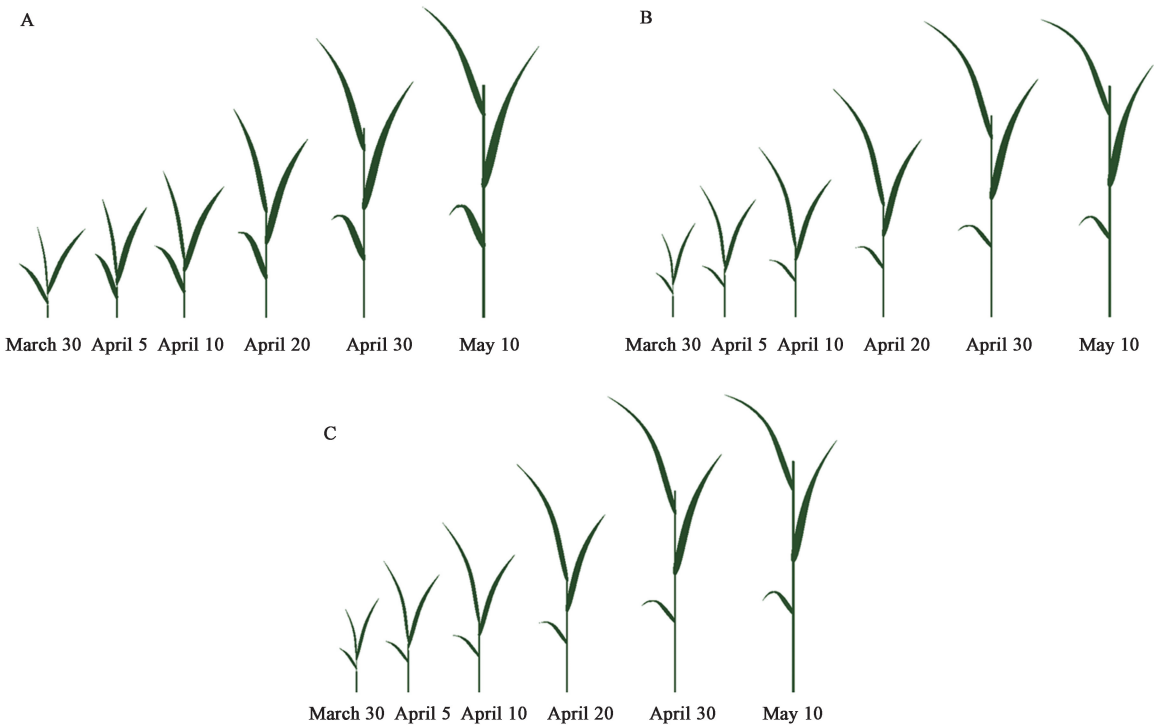


图 6 2016 年衡观 35(A)、济麦 22(B)和衡 4399(C)生长模拟与三维可视化

Fig.6 Growth simulation and 3d visualization of Hengguan 35(A) , Jimai 22(B) and Heng 4399(C) in 2016.

3 讨论

目前,国内外在作物生长可视化软件方面做了较多研究,法国基于自动机模型开发了 AMAP 系列软件^[14],加拿大基于 L 系统开发了 CPF^[15],德国 Karlsruhe 大学开发 Xfrog 软件实现植物器官的三维模拟^[16],米湘成等^[17]开发了水稻生长可视化模型系统 (rice growth models, RGM),陈国庆等^[18]借助小麦形态模型开发了小麦虚拟生长系统 (wheat visual growth models, WVGS)。上述作物可视化系统为虚拟农业研究拓展了思路,但是未能将作物生理生态特征与形态结构相结合,且实用性和易用性不够强,迫切需要既符合作物生长规律,又能真实模拟作物生长过程的生长可视化系统。

伍艳莲等^[7,8]利用 NURBS 曲面建模实现了小麦器官、个体和群体的三维可视化,但没有结合小麦生长模拟模型,用模型的输出数据驱动小麦植株的动态生长。本研究不仅实现了小麦的三维形态模拟,还结合小麦生长模拟模型的输出数据,逐日表达小麦动态生长过程,实现了小麦生长模型与形态结构模型的结合,构建了小麦生长模拟与三维可视化系统,模拟的小麦生长过程机理性更强,相较于前人的研究更为全面。

本研究借助已有研究成果^[11~13],在 Windows 7 操作系统上,采用 Microsoft Visual Studio 2010 作为开发工具,以 C++ 为编程语言,以 OpenGL 为 3D 图形库,构建了小麦形态几何模型,并采用计算机图形学真实感图形显示技术 (颜色渲染、纹理映射和光照处理) 对上述模型进行处理,最终构建出具有较高平滑度和真实感的小麦形态结构模型,构建了小麦生长模拟与三维可视化系统。该系统具有占用内存少、运行速度快等特点,在小麦作物生长动态预测、栽培管理调控、株型设计等方面具有重要指导作用。

本研究模拟了小麦的叶片、叶鞘和茎秆等器官,实现了小麦器官和个体的可视化,今后需要进一步完善小麦形态结构模型,对小麦根系和麦穗进行三维模拟,使小麦形态结构模型更加完整。还需利用不同环境、品种及栽培条件下的试验资料,实现小麦的群体可视化,同时,对小麦生长可视化系统进行广泛的测试和验证,不断提高系统

的精确性和可靠性,使小麦生长可视化系统能逼真模拟小麦的自然生长过程。

参 考 文 献

- [1] 曹宏鑫,赵锁劳,葛道阔,等.作物模型发展探讨[J].中国农业科学,2011,44:3520-3528.
Cao H X, Zhao S L, Ge D K, *et al.* Discussion on development of crop models [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2011, 44: 3520-3528.
- [2] 刘丹,诸叶平,刘海龙,等.植物三维可视化研究进展[J].中国农业科技导报,2015,17(1):23-31.
Liu D, Zhu Y P, Liu H L, *et al.* Research progress on 3D plant visualization [J]. *J. Agric. Sci. Technol.*, 2015, 17(1): 23-31.
- [3] 张红英,李世娟,诸叶平,等.小麦作物模型研究进展[J].中国农业科技导报,2017,19(1):85-93.
Zhang H Y, Li S J, Zhu Y P, *et al.* Research progress on wheat crop model [J]. *J. Agric. Sci. Technol.*, 2017, 19(1): 85-93.
- [4] 高亮之,金之庆,郑国清,等.小麦栽培模拟优化决策系统 (WCSODS) [J].江苏农业学报,2000,16(2):65-72.
Gao L Z, Jin Z Q, Zheng G Q, *et al.* Wheat cultivation simulation-optimization-decision making system (WCSODS) [J]. *Jiangsu J. Agric. Sci.*, 2000, 16(2): 65-72.
- [5] 石春林,金之庆.基于 WCSODS 的小麦渍害模型及其在灾害预警上的应用[J].应用气象学报,2003,14(4):462-468.
Shi C L, Jin Z Q. A WCSODS-based model for simulating wet damage for winter wheat in the middle and lower reaches of the Yangtse River [J]. *J. Appl. Meteorol. Sci.*, 2003, 14(4): 462-468.
- [6] 雷晓俊.基于组件的小麦生长可视化技术[D].南京:南京农业大学,硕士学位论文,2010.
Lei X J. Component-based visualization technology of wheat growth [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, Master Dissertation, 2010.
- [7] 伍艳莲.作物形态结构的可视化技术研究[D].南京:南京农业大学,博士学位论文,2009.
Wu Y L. Study on visualization technology of crop morphology [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, Doctor Dissertation, 2009.
- [8] 伍艳莲,曹卫星,汤亮,等.基于 OpenGL 的小麦形态可视化技术[J].农业工程学报,2009,25(1):121-126.
Wu Y L, Cao W X, Tang L, *et al.* OpenGL-based visual technology for wheat morphology [J]. *Trans. CSAE*, 2009, 25(1): 121-126.
- [9] 诸叶平.小麦模拟实验系统的可视化界面技术[J].计算机农业应用,1995(4):6-8.
Zhu Y P. Visual interface technology of wheat simulation experiment system [J]. *Agric. Network Inform.*, 1995(4): 6-8.
- [10] 严定春,诸叶平,李世娟.小麦-玉米连作协同模型系统研究[J].农业网络信息,2007(9):21-23.
Yan D C, Zhu Y P, Li S J. Coordination model system for wheat-maize continual cropping management [J]. *Agric.*

- Network Inform., 2007(9):21-23.
- [11] 李书钦, 诸叶平, 刘海龙, 等. 基于 NURBS 曲面的小麦叶片三维可视化研究与实现[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3):89-95.
- Li S Q, Zhu Y P, Liu H L, *et al.*. Research and realization of wheat leaf three-dimensional visualization based on NURBS surface [J]. J. Agric. Sci. Technol., 2016, 18(3):89-95.
- [12] 李书钦, 刘海龙, 诸叶平, 等. 基于实测数据和 NURBS 曲面的小麦叶片三维可视化[J]. 福建农业学报, 2016, 31(7):777-782.
- Li S Q, Liu H L, Zhu Y P, *et al.*. 3-D visualization of wheat leaves using measured data and NURBS surface [J]. Fujian J. Agric. Sci., 2016, 31(7):777-782.
- [13] 李书钦, 诸叶平, 刘海龙, 等. 基于有效积温的冬小麦返青后植株三维形态模拟[J]. 中国农业科学, 2017, 50(9):1594-1605.
- Li S Q, Zhu Y P, Liu H L, *et al.*. 3D shape simulation of winter wheat after turning green stage based on effective accumulated temperature [J]. Sci. Agric. Sin., 2017, 50(9):1594-1605.
- [14] Blasise F, Barczy J, Jaeger M, *et al.*. Simulation of the growth of plants Modeling of metamorphosis and spatial interactions in the architecture and development of plants [M]. Japan: Cyberworlds Tokyo Springer-Verlag, 1998, 81-109.
- [15] Prusinkiewicz P, Hanan J, Mech R. An L-system-based plant modeling language [J]. Appl. Graph Transform. Ind. Relevance, 2000, 1779:258-261.
- [16] Lintermann B, Deussen O. Interactive modeling of plants [J]. IEEE Comp. Graphics Appl., 1999, 19(1):56-65.
- [17] 米湘成, 邹应斌, 石纪成, 等. 用面向对象方法、Visual C++ 研制水稻生长模型(RGM)系统[J]. 中国农业科学, 2002, 35(10):1197-1203.
- Mi X C, Zou Y B, Shi J C, *et al.*. Rice growth models (RGM) system by object-oriented programming with visual C++ [J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(10):1197-1203.
- [18] 陈国庆, 朱 艳, 刘 惠, 等. 基于形态模型的小麦器官和单株虚拟生长系统研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3):126-130.
- Chen G Q, Zhu Y, Liu H, *et al.*. Morphogenesis model-based virtual growth system for organs and plant of wheat [J]. Trans. CSAE, 2007, 23(3):126-130.

(责任编辑:温小杰)