

# 冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测\*

杜文勇<sup>1</sup> 何雄奎<sup>1</sup> Shamaila Z<sup>2</sup> 胡振方<sup>1</sup> 曾爱军<sup>3</sup> Muller J<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 霍恩海姆大学农业工程研究所, 德国斯图加特 70599;  
3. 中国农业大学理学院, 北京 100094)

**【摘要】** 以华北地区冬小麦为研究对象, 将 AquaCrop 作物生长模型应用到滴灌、喷灌、漫灌中, 对模型主要参数如气象、土壤、作物特性等进行调整, 并对作物产量和生物量模拟的有效方法进行了研究。模拟结果表明, 产量和收获时地上部分生物量的模拟值与实测值较为接近且略高于实测值, 模型性能指数均高于 0.95。产量模拟效果优于生物量, 滴灌模拟效果最好。

**关键词:** 冬小麦 产量 生物量 预测 灌溉 AquaCrop 模型

**中图分类号:** S311; S512.1<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)04-0174-05

## Yield and Biomass Prediction Testing of AquaCrop Model for Winter Wheat

Du Wenyong<sup>1</sup> He Xiongui<sup>1</sup> Shamaila Z<sup>2</sup> Hu Zhenfang<sup>1</sup> Zeng Aijun<sup>3</sup> Muller J<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Institute of Agricultural Engineering (440), University of Hohenheim, Stuttgart 70599, Germany

3. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

### Abstract

Using the winter wheat in North China as research object, AquaCrop model was applied in different technology of irrigation, included drip irrigation, sprinkler irrigation and furrow irrigation. The main parameters like soil and crop characteristics and so on, were adjusted. In addition, the effective simulation method for crop yield and biomass was researched. The study showed that some simulated values like yield and biomass of soil were significative. The relative error (RE) was low. Simulated data was a little higher than the observed one. All of the modeling efficiency (EF) was more than 0.95. The modeling was better for yield than that for biomass. The modeling was also the most efficient for drip irrigation in the three kind of irrigation technology.

**Key words** Winter wheat, Yield, Biomass, Prediction, Irrigation, AquaCrop model

### 引言

目前国内外有很多作物产量和灌溉量模拟模型, 为灌溉以及农业管理提供决策。如 CROPWAT 模型<sup>[1-4]</sup>、DSSAT 模型等<sup>[5-8]</sup>。国内也有许多学者对这些模型有所研究<sup>[9-11]</sup>。然而, 大部分模型(即应用软件)需要购买。AquaCrop 模型是由 FAO 主持并研发, 免费提供给广大用户的一种新的作物生长模型<sup>[12-13]</sup>。FAO 设计该模型的主要目的是为解

决现存作物模型复杂、透明度不足、设计不平衡及输入数据要求详细等问题。AquaCrop 模型只需要少量参数就可用于预测产量和生物量, 如农业气象技术参数(作物需水量、降雨量和气温)、土壤类型、灌溉制度、土壤初始条件、种植密度、作物种类等; 由于其所需参数少, 也极大地减少了模型运行工作时间<sup>[12-14]</sup>。另外, 模型使用过程中, 所需调整参数也非常少, 使用简单。

国外对 AquaCrop 模型的开发和应用研究较多,

收稿日期: 2010-08-12 修回日期: 2010-09-09

\* 中德国际合作项目(IRTG1070)

作者简介: 杜文勇, 博士生, 主要从事灌溉与施药技术研究, E-mail: duxli1222@163.com

通讯作者: 何雄奎, 教授, 博士生导师, 主要从事植保机械与施药技术研究, E-mail: xiongui@cau.edu.cn

涉及模型内容的综述、模块设计开发、参数调整及验证、模拟应用等<sup>[15]</sup>。通过查阅文献获知, AquaCrop 模型在中国的研究处于起步阶段, 目前仅庄严等对玉米进行了初步的研究, 且都是基于漫灌模式。本文以华北平原冬小麦为研究对象, 分别应用喷灌、滴灌、漫灌, 对参数进行调试, 并验证模型的可靠性。

## 1 AquaCrop 模型原理及应用过程

### 1.1 AquaCrop 模型原理

Doorenbos 和 Kassam 在 1979 年提出了求解获取大田作物生产力的基本方程

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = k_y \frac{E_{T_x} - E_{T_a}}{E_{T_x}} \quad (1)$$

式中  $Y_x$ 、 $Y_a$ ——作物最大和实际产量

$E_{T_x}$ 、 $E_{T_a}$ ——土壤最大和实际蒸发量

$k_y$ ——作物产量和土壤蒸发量相关系数

将作物需水量分离为土壤蒸发量  $E_r$  和作物蒸发量  $T_r$ , 从而分离为生物量  $B$  和收获指数 (harvest index, 简称 HI)。把作物需水量区分为土壤蒸发量和作物蒸发量的目的是为了混淆非生产性用水的效应, 这一点在不完全地面覆盖特别重要。环境和生物量、收获指数两者之间的作用机制有本质的区别, 将产量区分为生物量和收获指数的目的是避免混淆水分胁迫对生物量和收获指数的影响。这些变化推广出 AquaCrop 模型中增长机制的核心方程

$$B = W_p \sum T_r \quad (2)$$

式中  $W_p$ ——生物量水分生产效率, 其演化过程和模型核心方程见文献 [14 ~ 16],  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$

### 1.2 AquaCrop 模型运算过程

AquaCrop 模型应用过程中, 涉及 3 大模块的建立和计算, 分别是 Climate 2.0 for Cropwate 模块 (确定作物种植地域以及获取该地域前 30 年的各个时期的平均降雨量、温度等气象参数)、ET<sub>0</sub> Calculator 模块 (确定作物种植地域后, 获取该地域前 30 年的各个时期 (月) 的参考蒸发量) 和 AquaCrop 模块; 各个模块作用及具体计算过程见文献 [14 ~ 15]。

作物参数: 作物名称、生长天数、作物冠层覆盖率等; 灌溉制度: 灌溉次数、灌溉时间、灌溉量; 地块信息: 种植作物地理基本参数; 土壤参数: 土壤种类, 如沙壤土、粘土等; 生长期: 主要指作物生长的天数, 各个阶段成长的天数, 如冬小麦主要分起身、拔节、出穗、灌浆等; 初始条件: 主要指播种后, 土壤各层的土壤含水率。

在运行 AquaCrop 模块前, 必须首先应用 Climate 2.0 for Cropwate 模块和 ET<sub>0</sub> Calculator 模块。Climate 2.0 for Cropwate 模块有两个作用: 确定作物种植地点和获得该地气象参数; ET<sub>0</sub> Calculator 模块则是根据 Climate 2.0 for Cropwate 模块中的气象数据和 Penman-Monteith 公式计算得到该地域各月/每天 (可选) 的参考蒸发量。

在应用 Climate 2.0 for Cropwate 模块和 ET<sub>0</sub> Calculator 模块后, 下一步就是对作物参数、灌溉制度、地块信息、种植作物地理基本参数、土壤参数、生长期、初始条件的修改或输入实际参数值, 同时输入收获指数 HI, 从而得到产量和生物量值。

### 1.3 AquaCrop 模型的关键参数调整

由于 AquaCrop 是由 FAO 开发并面向全球推广, 因此其关键参数需要调整, 调整方法如下:

作物参数: 作物参数最主要的特征有初始冠层覆盖率、适宜生长极限温度、根深。冬小麦在拔节前, 冠层覆盖率都极低, 所以必须对其进行修改, 否则将严重影响模型精度; 最大根深决定了冬小麦在不同时期所能生长到的根部深度。

生长期: 最主要的特征生长天数。冬小麦在有些国家其生长期可能不到 180 d, 所以必须对其进行修改。

土壤参数: 模型默认的土壤为沙壤土, 因此必须对其进行修改。土壤类型确定后, 其最大田间持水率、萎蔫点、渗透率都将确定 (表 1)。本文所研究的冬小麦, 土层可分为 3 层, 每层为 30 cm, 对其进行划分。

初始条件: 主要指播种后, 各层土壤含水率。

## 2 AquaCrop 模型应用和检验

### 2.1 材料与方法

#### 2.1.1 试验材料及设计

试验于 2008 ~ 2010 年在河北省中国农业大学吴桥实验站进行。冬小麦种子为济麦 22, 每年 10 月 10 日前后播种, 播种前浇底墒水至饱和, 试验设计为漫灌、喷灌、滴灌 (地块大小为 7 m × 40 m)。滴灌: 采用以色列 Netafim 公司生产的内镶式滴灌管, 滴头间距 50 cm, 滴灌间距 50 cm, 滴头工作压力为 70 ~ 400 kPa; 喷灌: 喷头射程 7 m, 最大工作压力低于 400 kPa, 旋转式, 转角 180°, 矩形组合。

每种灌溉方式分别进行 3 种处理 (浇水 120、90、60 mm), 每个处理 3 次重复。

产量和生物量测定在每年 6 月 10 ~ 15 日进行。产量测定: 每个地块选取面积为 1 m<sup>2</sup> 的 2 个小区, 计算小区小麦质量、穗数、穗粒数, 即得到产量。生

物量的测定:小区选取如产量测量,并将小麦放入干燥箱中,75℃恒温条件下,干燥 48 h,测量其所余部分质量,即为生物量。

### 2.1.2 数据来源及数据库的建立

气象数据来源于中国农业大学吴桥实验站的 HOBO 气象站,包括温度、大气压、风速、光照、降雨量等;土壤含水率采用美国产 Diviner 2000 型进行测量;利用这些数据对 AquaCrop 模型参数进行调整。

### 2.1.3 模型参数调整和可靠性分析

应用 AquaCrop 模型并利用往年气象数据分析,为了预测产量、生物量,采用浇两水,且 4 月 1 至 10 日灌一水,4 月 25 日到 5 月 10 号灌二水较好。由于模型所默认的参数数据是针对全球主要地区的,实际应用中需要对模型相关参数调整。其调整参数及模块主要有气象模块、降雨量、温度、参考蒸发量、作物性质等。

#### (1) 气象数据调整

HOBO 气象站为自动测量气象站,每隔 2 min 测量一次气象数据,1 h 记录 1 次该时段内的平均值。从而可通过 Penman-Monteith 公式,由蒸发量计算得到作物需水量  $E_{T_0}$ ,并将数据导入 AquaCrop 模型对其进行调整。

$$E_{T_0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中  $R_n$ ——作物表面的净辐射量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$G$ ——土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$T$ ——平均气温,℃

$u_2$ ——2 m 高处的平均风速, m/s

$e_s$ ——饱和水气压, kPa

$e_a$ ——实际水气压, kPa

$\Delta$ ——饱和水汽压与温度曲线的斜率, kPa/℃

$\gamma$ ——干湿表常数, kPa/℃

#### (2) 初始土壤资料输入

AquaCrop 模型所需初始特性数据一般包括:机械组成(砂粒、粉粒和粘粒含量)、各土层厚度、土壤永久萎蔫点、田间持水率、容积密度、饱和含水率、播前土壤含水率,表 1 为输入模型的土壤参数。中国农业大学农业部设施农业工程重点开放实验室采用压力膜法为本项目检测土壤永久萎蔫点、田间持水率、容积密度和饱和含水率。

初始土壤含水率测量采用 Diviner 2000FDR 传感器测量,播种结束后第 2 天测量,测量时间是 2008 年 10 月 13 日和 2009 年 10 月 16 日。

表 1 土壤初始参数

Tab.1 Initial parameters of soil in AquaCrop model

参数	土层/cm		
	0~30	30~60	60~90
砂粒含量/%	66.53	57.36	43.57
粘粒含量/%	2.83	3.57	4.88
粉粒含量/%	30.64	39.07	51.55
永久萎蔫点/m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	12.98	10.12	9.83
土壤容积密度/g·cm <sup>-3</sup>	1.50	1.52	1.47
饱和含水率(体积)/%	43.20	42.26	41.40
田间持水率(体积)/%	28.76	34.11	35.83

#### (3) 模型其他参数输入

AquaCrop 模型提供了冬小麦典型作物特性及相关生长参数;但针对具体地区时,模型相关参数校正是非常有必要的。根据前人研究以及试验观察,模型部分调整参数如表 2 所示<sup>[16]</sup>。

表 2 模型部分参数

Tab.2 Parts of parameters in AquaCrop model

模型参数	数值
收获指数	0.48
植物生长最适宜温度/℃	20
植物生长最低温度/℃	2
最大根深/m	1.7
植物生长速率降低最高温度/℃	30
生长总天数/d	245
初始冠层覆盖率	最低

#### (4) 模型可靠性分析

由 AquaCrop 模型得到冬小麦产量和生物量模拟值,将模拟值与实测值进行比较,得到相对误差,并用残差聚类集系数  $R_{CRM}$  和模型性能指数  $R_{EF}$  对模拟结果进行检验。残差聚类集系数和模型性能指数计算公式分别为<sup>[1,17]</sup>

$$R_{CRM} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \quad (4)$$

$$R_{EF} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 - \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

式中  $Y_i$ ——模拟值  $X_i$ ——观测值

$\bar{X}$ ——观测平均值  $n$ ——试验对比个数

## 2.2 结果与分析

### 2.2.1 冬小麦产量和生物量模拟

应用 AquaCrop 模型分别对滴灌、喷灌、漫灌进

行模拟,表 3 模拟值表明,整体上 3 种灌溉方式产量和生物量由高至低依次为:滴灌、喷灌、漫灌;3 种处理均为浇 120 mm 水时的产量和生物量最高,符合作物需水规律以及灌溉规律。

2.2.2 模型验证

为验证模型的模拟效果,以田间小区小麦试验数据为基础,实测得到不同灌溉技术条件下冬小麦产量和生物量值。实测值与模拟值之间的线性回归关系如图 1 和图 2 所示。

表 3 AquaCrop 模拟冬小麦产量和生物量

**Tab.3 Yield and biomass of winter wheat simulated by the model of AquaCrop** t/hm<sup>2</sup>

灌溉方式	产量			生物量		
	灌溉量/mm			灌溉量/mm		
	60	90	120	60	90	120
滴灌	7.47	8.10	8.93	13.97	15.02	16.89
喷灌	6.97	7.89	8.70	13.93	14.37	16.36
漫灌	7.14	7.54	8.63	12.84	14.05	16.17

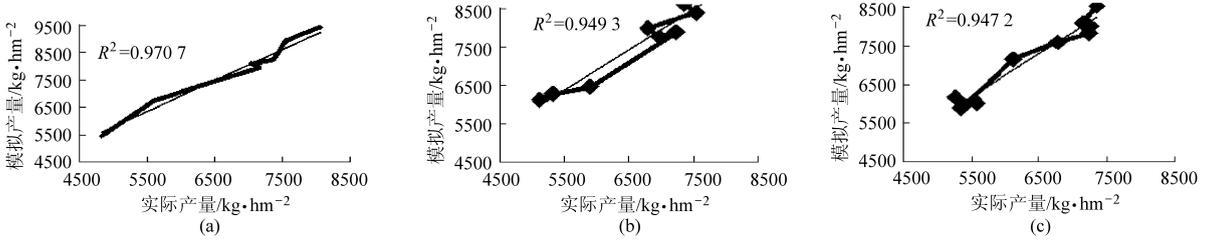


图 1 不同灌溉方式下产量模拟值与实测值

Fig.1 Simulated and observed values of winter wheat yield under different irrigation methods

(a) 滴灌 (b) 喷灌 (c) 漫灌

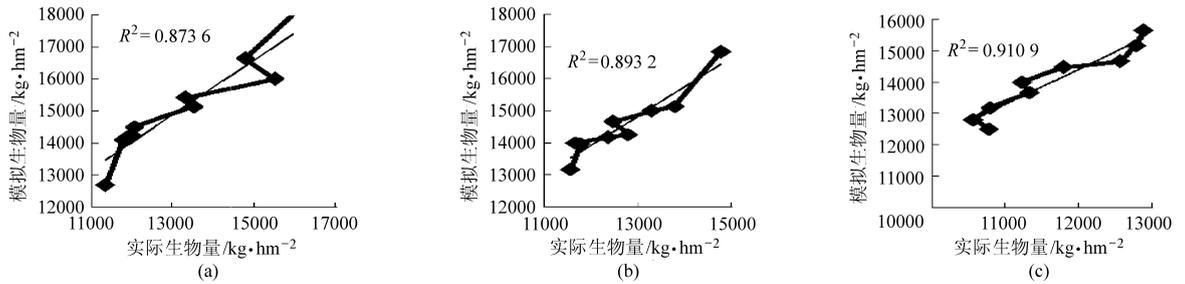


图 2 不同灌溉方式下生物量模拟值与实测值

Fig.2 Simulated and observed values of winter wheat biomass under different irrigation methods

(a) 滴灌 (b) 喷灌 (c) 漫灌

从图 1、图 2 可以看出,对于产量的预测模拟效果较理想,确定系数分别为:0.9707(滴灌)、0.9493(喷灌)、0.9472(漫灌);而生物量确定系数分别为:0.8736(滴灌)、0.8932(喷灌)、0.9109(漫灌);同时得到产量和生物量的模拟值均高于实际值,这是由于 2009 年为干旱年、2010 年其气温较往年都低,从而使这两年大部分小麦作物减产。

2.2.3 模型结果精度分析

为了更全面分析模型精度及可靠性,对模拟值

进一步以统计参数平均误差、残差聚类系数、模型性能指数<sup>[17]</sup>进行分析。统计分析结果如表 4 所示。表 4 显示滴灌模拟效果最好,产量和生物量平均误差分别为 12.39%、14.10%,3 种灌溉模拟其模型性能指数均较高,达到 0.95 以上,残差聚类系数都小于零,即实际产量均低于模拟产量;以上结果表明 AquaCrop 模型可以应用到华北平原的冬小麦灌溉管理及产量和生物量预测。

表 4 模型模拟结果精度分析

Tab.4 Accuracy analysis of simulated results by AquaCrop model

灌溉方式	检验项	模拟平均值/kg·hm <sup>-2</sup>	实测平均值/kg·hm <sup>-2</sup>	平均误差/%	模型性能指数	残差聚类系数
滴灌	产量	7.83 × 10 <sup>3</sup>	6.79 × 10 <sup>3</sup>	12.39	0.97	-0.15
	生物量	1.52 × 10 <sup>4</sup>	1.34 × 10 <sup>4</sup>	14.10	0.98	-0.14
喷灌	产量	7.63 × 10 <sup>3</sup>	6.68 × 10 <sup>3</sup>	14.50	0.98	-0.14
	生物量	1.46 × 10 <sup>4</sup>	1.27 × 10 <sup>4</sup>	14.85	0.98	-0.15
漫灌	产量	7.27 × 10 <sup>3</sup>	6.44 × 10 <sup>3</sup>	12.81	0.98	-0.13
	生物量	1.40 × 10 <sup>4</sup>	1.16 × 10 <sup>4</sup>	20.52	0.95	-0.20

### 3 结论

(1) AquaCrop 模型较准确地预测冬小麦产量和生物量,平均相对误差最低为 12.39% 和 14.10%,模型性能指数均高于 0.95。

(2) 残差聚类集系数小于零,即产量和生物量模拟值略高于实际值,模拟值偏高的原因是 2009 年

上半年旱灾以及 2010 年较往年冷,导致作物减产。

(3) 对于滴灌、喷灌、漫灌的模拟中,滴灌模拟效果最好。

(4) Sam Geerts 等应用 AquaCrop 模型,得到最低误差仅为 0.7%<sup>[16]</sup>,在华北平原应用该模型,其误差与国外学者尚有很大差距,因此,需进一步对模型加以研究,使之日益完善。

### 参 考 文 献

- 商磊,赵军,祁广云,等. 黑土农田大豆产量形成过程的模拟验证[J]. 中国生态农业学报,2008,16(4):869~873.  
Shang Lei, Zhao Jun, Qi Guangyun, et al. Simulation and validation of soybean yield formation process in black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008,16(4):869~873. (in Chinese)
- 宋春雨,韩晓增,于莉,等. CROPWAT 模型在调亏灌溉研究中的应用[J]. 农业系统科学与综合研究,2003,19(3):214~218.  
Song Chunyu, Han Xiaozeng, Yu Li, et al. Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2003,19(3):214~218. (in Chinese)
- 孙芳,林而达,李剑萍,等. 基于 DSSAT 模型的宁夏马铃薯生产的适应对策[J]. 中国农业气象,2008,29(2):127~129.  
Sun Fang, Lin Erda, Li Jianping, et al. Study on adaptation measures of potato production by using DSSAT crop model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008,29(2):127~129. (in Chinese)
- 雷水玲. 应用 DSSAT3 模型研究宁夏红寺堡灌区小麦生长过程及产量[J]. 干旱地区农业研究,2000,18(3):98~103.  
Lei Shuiling. Using DSSAT3 model to simulate growth and yield of wheat in Hongsibao irrigation area in Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2000,18(3):98~103. (in Chinese)
- Rogério Teixeira de Faria, Walter Truman Bowen. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology,2003,46(4):489~498.
- Garry O'Leary, Muhuddin Anwar. Simulation of wheat grain yield under elevated CO<sub>2</sub> conditions in the Victorian Wimmera [C]//Proceedings of the 14th Australian Agronomy Conference. Australian Society of Agronom, 2008.
- Jones J W, Hoogenboom G, Poter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003,18(3~4):235~265.
- 王纯枝,宇振荣,辛景峰,等. 基于遥感和作物生长模型的作物产量差估测[J]. 农业工程学报,2005,21(7):84~89.  
Wang Chunzhi, Yu Zhenrong, Xin Jingfeng, et al. Yield gap estimation by combining remote sensing and crop growth model [J]. Transactions of the CSAE,2005,21(7):84~89. (in Chinese)
- 吴绍洪,靳京,戴尔阜. 基于 PS123 作物生长模型的黑龙江海伦市玉米生产潜力计算[J]. 农业工程学报,2005,21(8):93~97.  
Wu Shaohong, Jin Jing, Dai Erfu. PS123 crop growth model based method to calculate potential maize productivity in Hailun, Heilongjiang[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(8):93~97. (in Chinese)
- 陈研,胡克林,冯凌. 基于土壤-作物系统模拟模型的冬小麦田间水氮优化管理[J]. 农业工程学报,2007,23(6):55~60.  
Chen Yan, Hu Kelin, Feng Ling. Optimal management of water and nitrogen for winter wheat based on simulation model in soil-plant system in agricultural field[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(6):55~60. (in Chinese)
- 杨鹏,吴文斌,周清波,等. 基于作物模型与叶面积指数遥感影像同化的区域单产估测研究[J]. 农业工程学报,2007,23(9):130~136.  
Yang Peng, Wu Wenbin, Zhou Qingbo, et al. Assimilating remotely sensed LAI into GIS-based EPIC model for yield assessment on regional scale[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(9):130~136. (in Chinese)
- Raes D, Steduto P, Hsiao T C, et al. AquaCrop-the FAO crop model for predicting yield response to water: II. main algorithms and software description[J]. Agronomy Journal,2009,101(3):438~447.
- Steduto P, Hsiao T C, Raes D. AquaCrop-the FAO crop model to predict yield response to water [M]. 2008,80:285~292.
- Steduto P, Hsiao T C, Ferers E. On the conservative behavior of biomass water productivity[J]. Irrigation Science, 2007,25(3):189~207.
- 庄严,梅旭荣. 不同基因型作物水分-产量响应关系及生理生态学研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.

控制器能实现喷药量随杂草密度及车速变化实时变化,可实现9级不同喷药量。

计了田间除草机器人平台,运行喷药系统对杂草进行喷药,室内试验测得对靶率为90%。

(3)在室内搭建了模拟棉田环境的试验台,设

#### 参 考 文 献

- 1 Tian L. Development of a sensor-based precision herbicide application system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002,36(2~3):133~149.
- 2 Astrand B, Baerveldt A J. A vision based row-following system for agricultural field machinery [J]. Mechatronics, 2005, 15(2):251~269.
- 3 Torii T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1~2):133~153.
- 4 Bakker T, Asselt K, Bontsema J, et al. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding [J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(2):63~73.
- 5 Lamm R D, Slaughter D C, Giles D K. Precision weed control system for cotton[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1):231~238.
- 6 Sogaard H T, Lund I. Application accuracy of a machine vision-controlled robotic micro-dosing system [J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(3):315~322.
- 7 葛玉峰,周宏平,郑加强,等. 基于机器视觉的室内农药自动精确喷雾系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3):86~89.  
Ge Yufeng, Zhou Hongping, Zheng Jiaqiang, et al. Indoor pesticide smart spraying system based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3):86~89. (in Chinese)
- 8 陆建,毛罕平,陈树人. 基于 ARM7 的精确对靶喷施除草嵌入式控制系统[J]. 农机化研究, 2009, 31(12):76~79.  
Lu Jian, Mao Hanping, Chen Shuren. Embedded weed control system for target precision spraying based on ARM7 [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12):76~79. (in Chinese)
- 9 邵陆寿,戴之祥,韦韪,等. 植保机械变量施药系统模糊控制器研究与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11):3 224~3 226.  
Shao Lushou, Dai Zhixiang, Wei Yun, et al. The research and simulation of fuzzy controller based on variable applying pesticide of sprayer [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11):3 224~3 226. (in Chinese)
- 10 陈勇,郑加强. 精确施药可变量喷雾控制系统研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5):69~72.  
Chen Yong, Zheng Jiaqiang. Control system for precision pesticide application based on variable rate technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(5):69~72. (in Chinese)

(上接第 178 页)

- 16 FAO. Reference manual, chapter 1-AquaCrop[M]. FAO, 2009.
- 17 王宗明,张柏,宋开山,等. CropSyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 47~50.  
Wang Zongming, Zhang Bai, Song Kaishan, et al. Calibration and validation of crop model CropSyst in typical black soil zone of Songnen Plain [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5):47~50. (in Chinese)
- 18 李全起,陈雨海,周勋波,等. 不同种植模式麦田水资源利用率及边际效益分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 90~95.  
Li Quanqi, Chen Yuhai, Zhou Xunbo, et al. Effects of different planting patterns on water use efficiency and marginal profits of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):90~95. (in Chinese)

控制器能实现喷药量随杂草密度及车速变化实时变化,可实现9级不同喷药量。

计了田间除草机器人平台,运行喷药系统对杂草进行喷药,室内试验测得对靶率为90%。

(3)在室内搭建了模拟棉田环境的试验台,设

#### 参 考 文 献

- 1 Tian L. Development of a sensor-based precision herbicide application system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002,36(2~3):133~149.
- 2 Astrand B, Baerveldt A J. A vision based row-following system for agricultural field machinery [J]. Mechatronics, 2005, 15(2):251~269.
- 3 Torii T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1~2):133~153.
- 4 Bakker T, Asselt K, Bontsema J, et al. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding [J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(2):63~73.
- 5 Lamm R D, Slaughter D C, Giles D K. Precision weed control system for cotton[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1):231~238.
- 6 Sogaard H T, Lund I. Application accuracy of a machine vision-controlled robotic micro-dosing system [J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(3):315~322.
- 7 葛玉峰,周宏平,郑加强,等. 基于机器视觉的室内农药自动精确喷雾系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3):86~89.  
Ge Yufeng, Zhou Hongping, Zheng Jiaqiang, et al. Indoor pesticide smart spraying system based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3):86~89. (in Chinese)
- 8 陆建,毛罕平,陈树人. 基于 ARM7 的精确对靶喷施除草嵌入式控制系统[J]. 农机化研究, 2009, 31(12):76~79.  
Lu Jian, Mao Hanping, Chen Shuren. Embedded weed control system for target precision spraying based on ARM7 [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12):76~79. (in Chinese)
- 9 邵陆寿,戴之祥,韦韪,等. 植保机械变量施药系统模糊控制器研究与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11):3 224~3 226.  
Shao Lushou, Dai Zhixiang, Wei Yun, et al. The research and simulation of fuzzy controller based on variable applying pesticide of sprayer [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11):3 224~3 226. (in Chinese)
- 10 陈勇,郑加强. 精确施药可变量喷雾控制系统研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5):69~72.  
Chen Yong, Zheng Jiaqiang. Control system for precision pesticide application based on variable rate technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(5):69~72. (in Chinese)

(上接第 178 页)

- 16 FAO. Reference manual, chapter 1-AquaCrop[M]. FAO, 2009.
- 17 王宗明,张柏,宋开山,等. CropSyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 47~50.  
Wang Zongming, Zhang Bai, Song Kaishan, et al. Calibration and validation of crop model CropSyst in typical black soil zone of Songnen Plain [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5):47~50. (in Chinese)
- 18 李全起,陈雨海,周勋波,等. 不同种植模式麦田水资源利用率及边际效益分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 90~95.  
Li Quanqi, Chen Yuhai, Zhou Xunbo, et al. Effects of different planting patterns on water use efficiency and marginal profits of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):90~95. (in Chinese)