

# 防虫网覆盖塑料大棚小白菜采收期与产量预测模型

韩娴博<sup>1</sup>, 戴剑锋<sup>1</sup>, 徐蕊<sup>1</sup>, 李军<sup>1,2</sup>, 罗卫红<sup>1\*</sup>, 张红菊<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学农学院, 南京 210095; 2. 上海市气象科学研究所, 上海 200030)

**摘要:** 为准确预测防虫网覆盖塑料大棚栽培小白菜的采收期和产量, 本研究通过不同品种、播期试验, 定量分析了出叶速率、单叶伸长速率与温度和辐射的关系, 建立了基于辐热积的小白菜叶面积预测模型, 并将该模型与通用的光合作用与干物质生产模型相结合, 建立了防虫网覆盖塑料大棚栽培小白菜采收期与产量预测模型。并用与建立模型相独立的试验资料对模型进行检验, 结果表明, 对小白菜展开叶数、叶长、叶面积指数、采收期、产量的预测与实测值之间基于 1:1 直线的决定系数 ( $R^2$ ) 分别达到 0.93、0.95、0.97、0.91、0.97, 相对预测误差 ( $RE$ ) 分别为 10.9%、8.7%、11.4%、3.4%、12.5%。本模型预测精度较高, 模型参数容易获取, 具有较强的实用性。

**关键词:** 防虫网, 塑料大棚, 叶长, 产量预测

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup>1, S165<sup>+</sup>.27

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-12-0155-06

韩娴博, 戴剑锋, 徐蕊, 等. 防虫网覆盖塑料大棚小白菜采收期与产量预测模型[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 155-160.

Han Xianbo, Dai Jianfeng, Xu Rui, et al. Prediction model for harvest date and yield of *Brassica chinensis* L. in plastic tunnels covered with insect-proof screens[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 155-160.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

小白菜 (*Brassica chinensis* L.) 又称青菜, 中国北方俗称油菜, 是中国常年消费的主要叶菜之一。长江以南为中国小白菜的主产区, 种植面积占秋、冬、春播蔬菜面积的 40%~60%, 20 世纪中期在北方地区推广发展以来, 目前已成为北方春早熟栽培和秋冬季保护地栽培的重要种类之一。小白菜适应性强, 生长周期短, 且产品绝大多数是小苗上市, 一般播种后 20~45 d 即可收获, 可周年多茬种植。每年 7~10 月, 小白菜生产过程中, 光照强、温度高、易遭受害虫的危害, 生产上多采用防虫网覆盖栽培来进行虫害防治。防虫网是防止害虫入侵的有效物理方法, 无化学农药污染问题, 是生产无公害蔬菜的重要技术措施, 被广泛地应用于园艺设施生产中<sup>[1,2]</sup>。小白菜不耐贮存和运输, 采收期与产量因生产季节不同而异, 其经济效益直接受产品上市期和产量的影响。准确预测产品上市期和产量, 是优化小白菜生产茬口安排、实现防虫网覆盖塑料大棚小白菜生产经济效益最大化的前提。因此, 建立防虫网覆盖塑料大棚小白菜采收期与产量预测模型, 对实现防虫网覆盖塑料大棚小白菜生产的优化管理, 提高经济效益具有重要意义。

关于蔬菜生长发育模拟模型的研究, 国内外已有许多研究报道<sup>[3-12]</sup>。在防虫网覆盖对塑料大棚小白菜采收期和产量的影响研究方面, 已有的研究主要是通过栽培效果试验<sup>[13-15]</sup>对蔬菜生长和产量进行定性分析<sup>[16]</sup>。关于防虫网覆盖塑料大棚栽培蔬菜采收期与产量预测模型的研究, 国内外尚鲜有报道。

本研究首先以综合光温指标—“辐热积”<sup>[17]</sup>作为预测指标, 建立防虫网覆盖塑料大棚小白菜叶面积预测模型, 并将其与通用的光合作用与干物质生产模型相结合, 建立以棚外温度和辐射为驱动变量, 以大棚结构和覆盖材料信息为参数的小白菜采收期与产量预测模型, 为防虫网覆盖大棚小白菜生产的茬口合理安排与栽培管理提供理论依据和决策支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验基本情况

试验为 4 个分期播种试验, 均在上海市松江区叶榭蔬菜园艺场的单栋无地膜覆盖的塑料大棚中进行。大棚为上海市农业机械研究所生产, 南北走向, 南北长 32 m, 跨度 8 m, 顶高 3.3 m, 肩高 1.6 m, 南北各有一个门, 门高 2.1 m, 门宽 2.0 m, 拱间距 0.8 m。大棚两侧各有南北走向的侧通风, 试验期间侧通风口从地面到 1 m 高处用白色防虫网覆盖。按防虫网目数的不同设 3 个大棚, 分别为 20 目、25 目和 28 目。防虫网的目数是指 1 平方英寸 (2.54 cm×2.54 cm) 内的网眼数。每个大棚防虫网覆盖部分的面积占大棚总覆盖面积的 15.7%。试验分 4 个部分进行, 每个试验棚内种植的作物为小白菜 (*Brassica chinensis* L.)。每个棚内小白菜沿南北方向分 3 畦种植, 畦间距为 0.5 m。

试验 1 于 2006 年 7 月 13 日播种, 供试品种为抗热

收稿日期: 2008-06-03 修订日期: 2008-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30771262); 江苏省自然科学基金重点项目 (BK2007720); 上海市科技兴农重点攻关项目 (沪农科攻字 (2005) 第 5-1 号); 上海市气象局项目 (2005M3, YJ200705)

作者简介: 韩娴博 (1982-), 女, 江苏无锡人, 从事设施农业环境模拟与调控方面的研究。南京 南京农业大学, 210095。

Email: hanxianbo-129@163.com

\*通讯作者: 罗卫红 (1962-) 女, 湖南江永人, 教授, 博士生导师, 从事设施农业环境模拟与调控方面的研究。南京 南京农业大学农学院, 210095。

Email: lwh@njau.edu.cn

605, 间苗后密度为 212.1 株/m<sup>2</sup>。

试验 2 于 2006 年 8 月 2 日播种, 供试品种为华王青梗菜, 间苗后密度为 227.3 株/m<sup>2</sup>。

试验 3 于 2006 年 8 月 29 日播种, 供试品种为华王青梗菜, 间苗后密度为 210.5 株/m<sup>2</sup>。

试验 4 于 2006 年 9 月 22 日播种, 供试品种为特矮青, 间苗后密度为 233.3 株/m<sup>2</sup>。

### 1.2 环境参数的获取

大棚环境数据由数据采集器 Datalogger (Campbell Scientific, CR10X) 自动采集, Datalogger 置于大棚正中间, 记录大棚内空气温度、湿度与太阳辐射, 频率为 10 s 一次, 存储 30 min 的平均值。采集的大棚内部环境数据包括: 冠层上方 1.5 m 处空气的温度和湿度, 冠层上方 1.5 m 处太阳总辐射。空气温度和湿度采用热电偶装置测量 (具体描述见参考文献[18])。太阳总辐射传感器为北京华创 tbp-2-b 总辐射仪。

### 1.3 作物数据的获取

#### 1.3.1 叶数、叶长叶宽的测定

第 1 片真叶出现后, 随机选取有代表性的 20 株每 2 d 进行一次定株观测, 观测项目包括叶数、各叶位的叶长和叶宽。当长到 6~7 片真叶时, 收获并停止观测。每张叶片长度达到 1 cm 时定义为出叶和展开叶。

#### 1.3.2 叶面积的测定

对每次取样的植株测量其所有叶片的叶面积。单张叶片面积的测量采用描叶法来确定<sup>[9]</sup>。

#### 1.3.3 植株干、鲜质量的测定

在长出第 1 片真叶时定株, 其后每 2 d 进行破坏性取样, 随机选取生长健康均匀一致的植株样本, 每次每棚 20~30 株。称量植株的叶片、茎、根的鲜质量 (精确到 0.01 g), 然后在烘箱中 105℃ 杀青 15 min, 80℃ 烘至恒质量, 称量叶片、茎、根的干质量 (精确到 0.01 g)。

#### 1.3.4 光合速率的测定

在小白菜 6~7 叶龄时, 用 LI-6400 便携式光合仪 (美国 LI-COR 公司生产) 在正午前后用不同强度的人工光源测定功能叶片 (倒数第 3、第 4 叶) 的光合作用速率, 每棚每次测 3~5 株, 每个播种季测一天。根据测定的数据制作功能叶的光响应曲线, 从而确定小白菜最大光合作用速率 (PLMX) 的值。

## 2 模型的描述

### 2.1 叶面积的模拟

#### 2.1.1 辐热积的计算

温度和辐射是影响植物叶片生长的两个最重要的环境因子<sup>[19]</sup>。本模型采用辐热积 (product of thermal effectiveness and PAR, PTEP) 来量化温度和辐射对小白菜生长发育的影响。辐热积定义为相对热效应与光合有效辐射的乘积<sup>[17]</sup>。因此可建立辐热积与单株展开叶数、叶长及叶面积的动态关系, 通过小白菜生长期间的温度和辐射资料来预测第一片真叶出现后任意一天的小白菜单株展开叶数、叶长及叶面积。相对热效应 (RTE)<sup>[20]</sup>可用式 (1) 计算:

$$RTE(T) = \begin{cases} 0 & (T < T_b) \\ (T - T_b)/(T_{ob} - T_b) & (T_b \leq T < T_{ob}) \\ 1 & (T_{ob} \leq T \leq T_{ou}) \\ (T_m - T)/(T_m - T_{ou}) & (T_{ou} < T \leq T_m) \\ 0 & (T > T_m) \end{cases} \quad (1)$$

式中 RTE(T) ——棚内温度为 T 时的相对热效应; T<sub>b</sub> ——生长温度下限, °C; T<sub>m</sub> ——生长温度上限, °C; T<sub>ob</sub> ——生长最适温度下限, °C; T<sub>ou</sub> ——生长最适温度上限, °C。实际上白菜甘蓝类蔬菜不同类型品种间, 发育的三基点温度有较大的差异, 本文主要参照耐热品种的相关值, 取小白菜的生长的下限温度为 4℃, 上限温度为 40℃, 最适温度上下限白天分别为 35℃ 和 20℃, 夜间分别为 25℃ 和 15℃<sup>[21, 22]</sup>。

日平均相对热效应为一天内各小时相对效应的平均值, 可计算为:

$$RTE_i = (1/24) \sum_{j=1}^{24} RTE(T_j) \quad (2)$$

式中 RTE<sub>i</sub> ——第 i 天的日平均相对热效应; T<sub>j</sub> ——一天中第 j 小时的棚内离地面 1.5 m 高处气温, °C。

则日辐热积 PTEP 可计算为:

$$PTEP = RTE_i \times PAR_i \quad (3)$$

式中 PTEP ——日辐热积, MJ/m<sup>2</sup>; RTE<sub>i</sub> ——第 i 天的日平均相对热效应, MJ/m<sup>2</sup>; PAR<sub>i</sub> ——第 i 天的日总光合有效辐射, MJ/m<sup>2</sup>, 可计算为<sup>[23]</sup>:

$$PAR_i = 0.5 \times Q_i \quad (4)$$

式中 PAR<sub>i</sub> ——第 i 天棚内的日总光合有效辐射, MJ/m<sup>2</sup>; Q<sub>i</sub> ——第 i 天到达棚内作物冠层上方的太阳总辐射日总量, MJ/m<sup>2</sup>; 0.5 ——光合有效辐射在太阳总辐射中所占的比例<sup>[23]</sup>。

小白菜在一定生长阶段内的累积辐热积可计算为:

$$TEP = \sum PTEP \quad (5)$$

式中 TEP ——小白菜某生长阶段的累积辐热积, MJ/m<sup>2</sup>。

#### 2.1.2 单株展开叶数、叶长及叶面积的模拟

利用试验 1 的温度、辐射资料及单株展开叶数观测数据, 建立从第一片真叶出叶开始起累积的辐热积与单株展开叶数的关系 (图 1)。小白菜从第一片真叶出叶开

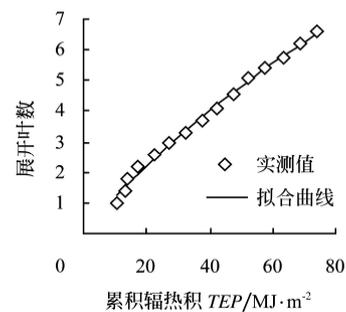


图 1 展开叶数与累积辐热积的关系

Fig.1 Relationship between the number of unfolding leaves and thermal effectiveness and PAR

始后任意一天的单株展开叶数（包括第一片真叶）可计算为：

$$N = 15.24 - 16.10 \times \exp(-TEP / -133.56) \quad (6)$$

$$R^2 = 0.99 \quad SE = 0.13$$

式中  $N$ ——植株上已展开的叶片数； $TEP$ ——从第一片真叶出叶开始起累积的辐热积， $MJ/m^2$ 。

利用试验 1 的温度、辐射资料及叶长观测数据，建立不同叶位叶长与出叶后累积辐热积的关系（图 2）：

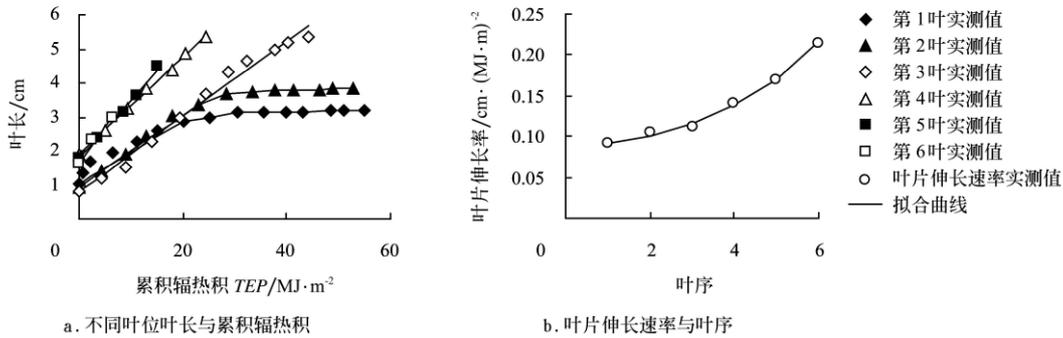


图 2 不同叶位叶长与累积辐热积的关系和叶片伸长速率与叶序的关系

Fig.2 Relationship between the leaf length of different leaf rank and  $TEP$  and that between leaf elongation rate and leaf rank

$$LL_i = \begin{cases} k_i \times \Delta TEP_{ij} + LL_{i,0} & LL_i < LL_{max,i} \\ LL_{max,i} & LL_i \geq LL_{max,i} \end{cases} \quad (i=1, 2) \quad (7)$$

$$LL_i = k_i \times \Delta TEP_{ij} + LL_{i,0} \quad (i \geq 3) \quad (8)$$

$$k_i = 0.067 + 0.016 \times \exp(i/2.72) \quad (9)$$

$$R^2 = 0.99 \quad SE = 0.0028$$

$$\Delta TEP_{ij} = TEP_j - TEP_i \quad (10)$$

式中  $LL_i$ ——第  $i$  叶的叶长， $cm$ ； $k_i$ ——第  $i$  叶的叶片伸长速率， $cm/(MJ \cdot m^2)$ ，定义为到达大棚内作物上方每  $1 MJ/m^2$  辐热积所产生的叶片长度的增加量， $cm$ ； $\Delta TEP_{ij}$ ——第  $i$  叶从刚展开至第一真叶展开  $j$  天后的累积辐热积， $MJ/m^2$ ； $LL_{i,0}$ ——第  $i$  叶出叶时的叶长， $cm$ ； $LL_{max,i}$ ——第  $i$  叶 ( $i=1, 2$ ) 的最大叶长， $cm$ （当叶长日增长小于  $0.1 cm$  时视为达到最大叶长），根据试验 1 实际观测数据， $TEP \geq 25 MJ/m^2$  时，第  $i$  叶 ( $i=1, 2$ ) 达到最大叶长； $TEP_j$ ——第一真叶展开  $j$  天后的累积辐热积， $MJ/m^2$ ，可依据棚外温度和辐射资料由式 (1) ~ (5) 计算得到； $TEP_i$ ——从第一真叶展开至第  $i$  叶展开所需的累积辐热积， $MJ/m^2$ ，将叶序  $i$  ( $= N$  叶数) 代入式 (6) 中求得。

对试验 1 中的观测数据进行曲线拟合，得到小白菜叶面积与叶长的关系（图 3）：

$$LA_i = 0.509 \times LL_i^2 \quad R^2 = 0.98 \quad SE = 0.72 (cm^2) \quad (11)$$

式中  $LA_i$ ——第  $i$  叶的面积， $cm^2$ ； $LL_i$ ——第  $i$  叶的叶长， $cm$ 。

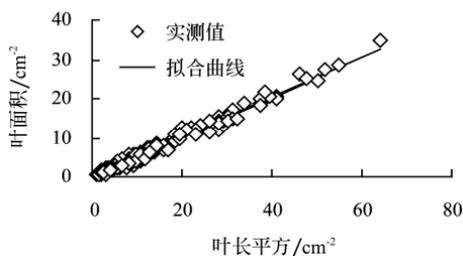


图 3 叶面积与叶长的关系

Fig.3 Relationship between leaf area and leaf length

真叶出现后任意一天的单株叶面积可计算为：

$$LA = \sum_{i=1}^N (0.509 \times LL_i^2) \quad (12)$$

式中  $LA$ ——单株叶面积， $cm^2$ ； $i$ ——叶序； $N$ ——出叶数。则叶面积指数可计算为：

$$LAI = LA \times d \times 10^{-4} \quad (13)$$

式中  $LAI$ ——叶面积指数； $d$ ——种植密度，株/ $m^2$ ； $10^{-4}$ —— $cm^2$  换算成  $m^2$  的单位换算系数。

### 2.2 单叶光合速率和冠层光合作用

单叶的光合速率可用负指数模型来描述<sup>[23]</sup>：

$$FG = PLMX \times [1 - \exp(-\epsilon \times PAR / PLMX)] \quad (14)$$

式中  $FG$ ——单叶光合速率， $kg/(hm^2 \cdot h)$ ； $PLMX$ ——单叶最大光合速率， $kg/(hm^2 \cdot h)$ ，根据实际观测数据（图 4）取值为  $30.2 kg/(hm^2 \cdot h)$ ； $\epsilon$ ——光合作用-光反应曲线的初始斜率，即初始光能利用效率， $kg/(hm^2 \cdot h)/J/(m^2 \cdot s)$ ，根据实际观测数据（图 4）取值为  $0.41 kg/(hm^2 \cdot h)/J/(m^2 \cdot s)$ ； $PAR$ ——冠层吸收的光合有效辐射， $J/(m^2 \cdot s)$ 。

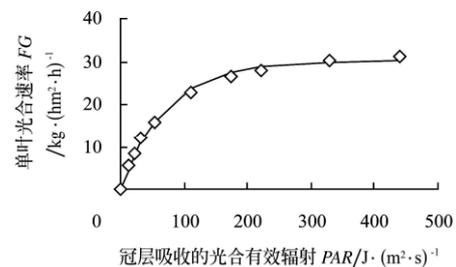


图 4 小白菜单叶光合作用—光反应曲线

Fig.4 Response curve of gross photosynthesis of a single leaf versus the intensity of absorbed radiation ( $PAR$ )

冠层光合作用是指所有叶片光合速率的总和。根据 Goudriaan<sup>[24]</sup>的研究，采用高斯积分法将叶片冠层分为三层，将每层的瞬时同化速率加权求和得出整个冠层瞬时的同化速率，在此基础上再计算每日的冠层光合速率，具体可计算为：

$$LGUSS(i) = DIS(i) \times LAI \quad (i = 1, 2, 3) \quad (15)$$

$$I_L(i) = PAR \times k \times \exp(-k \times LGUSS(i)) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (16)$$

$$FGL(i) = PLMX \times (1 - \exp(-\epsilon \times I_L(i) / PLMX)) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (17)$$

$$TFG = (\sum (FGL(i) \times WT(i))) \times LAI \quad (i = 1, 2, 3) \quad (18)$$

$$DTGA = (\sum (TFG(i) \times WT(i))) \times DL \quad (i = 1, 2, 3) \quad (19)$$

式中  $LGUSS(i)$ ——高斯分层的冠层深度;  $DIS(i)$ ——高斯三点积分法的距离系数(表 1);  $I_L(i)$ ——冠层中第  $i$  层所吸收的光合有效辐射量,  $J/(m^2 \cdot s)$ ;  $k$ ——冠层消光系数, 取值 0.8<sup>[23]</sup>;  $FGL(i)$ ——冠层中第  $i$  层的瞬时光合速率,  $kg/(hm^2 \cdot h)$ ;  $TFG$ ——整个冠层的瞬时光合速率,  $kg/(hm^2 \cdot h)$ ;  $WT(i)$ ——高斯三点积分法的权重(表 1);  $DTGA$ ——每日冠层总光合量,  $kg/(hm^2 \cdot d)$ ;  $TFG(i)$ ——整个冠层第  $i$  时刻的瞬时光合速率,  $kg/(hm^2 \cdot h)$ ;  $DL$ ——日长,  $h$ 。

若记录每天每小时的辐射值, 根据式 (13)~(18), 第  $i$  天的日总光合量  $DTGA(i)$  可计算为:

$$DTGA(i) = \sum (TFG(j)) \quad (j = 1, 2 \dots 24) \quad (20)$$

式中  $TFG(j)$ ——第  $j$  小时的冠层总光合量,  $kg/(hm^2 \cdot h)$ 。

表 1 高斯积分三点法的权重值 ( $WT$ ) 和距离系数 ( $DIS$ )<sup>[24]</sup>  
Table 1 Weights and distances for gaussian integration three points

$i$	1	2	3
$WT(i)$	0.277778	0.444444	0.277778
$DIS(i)$	0.112702	0.500000	0.887298

### 2.3 呼吸作用和干物质生产

呼吸作用一般分为维持呼吸和生长呼吸。维持呼吸是指活的有机体维持其现有的生化和生理状态所消耗的能量。维持呼吸的强度与生物量或蛋白质含量成正比, 且与温度有关, 可计算为:

$$RM = R_{m,25} \times W_j \times Q_{10}^{(T-25)/10} \quad (21)$$

式中  $RM$ ——维持呼吸消耗量,  $kg/(hm^2 \cdot d)$ ;  $R_{m,25}$ ——25℃时小白菜的维持呼吸系数, 本文取值为 0.015  $kg/(kg \cdot d)$ <sup>[26]</sup>;  $W_j$ ——模拟前一天的小白菜总干质量,  $kg/hm^2$ ;  $Q_{10}$ ——呼吸作用的温度系数, 取  $Q_{10} = 2$ <sup>[25]</sup>, 表示温度每升高 10℃, 维持呼吸增加一倍;  $T$ ——气温, ℃。

生长呼吸是指作物在有机质合成、植株体增长以及新陈代谢活动中消耗的能量, 即由  $CO_2$  转化为  $CH_2O$  过程中所消耗的光合产物, 在干物质增长速率的计算过程中考虑。

干物质生产由每日干物质增长速率计算所得, 干物质增长速率可计算为<sup>[25]</sup>:

$$\Delta W = (30/44 \times DTGA - RM)ASRQ \quad (22)$$

式中  $\Delta W$ ——干物质增长速率,  $kg/(hm^2 \cdot d)$ ;  $ASRQ$ —— $CH_2O$  转化为干物质时的转换系数, 取值为 1.45  $kg/(kg \cdot d)$ <sup>[25]</sup>; 30/44—— $CO_2$  与  $CH_2O$  相对分子量的比值。

由初始干物质与每日干物质增长速率, 可计算任

意一天的总干物质质量  $Biomass$ :

$$Biomass_{i+1} = Biomass_i + \Delta W \quad (23)$$

式中  $Biomass_{i+1}$ ——第  $i+1$  天的总干物质质量,  $kg/(hm^2 \cdot d)$ ;  $Biomass_i$ ——第  $i$  天的总干物质质量,  $kg/(hm^2 \cdot d)$ 。

### 2.4 产量预测

由于小白菜的产量是以鲜质量来计量的, 因此要通过干物质含量将干质量换算为鲜质量。鲜质量与干质量的关系如图 5 和式 (24) 所示:

$$FW = DW/0.0768 \quad R^2 = 0.96 \quad SE = 0.018(g) \quad (24)$$

式中  $FW$ ——小白菜鲜质量,  $g$ ;  $DW$ ——小白菜干质量,  $g$ ; 0.0768——小白菜干物质含量,  $g/g$ 。

则小白菜的产量可计算为:

$$YIELD = Biomass/0.0768 \quad (25)$$

式中  $YIELD$ ——小白菜的产量,  $kg/hm^2$ ;  $Biomass$ ——小白菜模拟总干物质质量,  $kg/hm^2$ 。

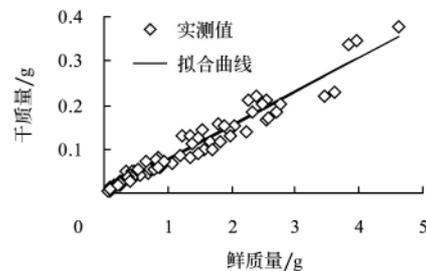


图 5 小白菜鲜质量与干质量的关系

Fig.5 Relationship between fresh weight and dry weight of *Brassica chinensis* L.

### 2.5 模型检验方法

采用相对预测误差 (relative prediction error,  $RE$ ) 对预测值和实测值之间的符合度进行分析,  $RE$  可用下列公式计算:

$$RE = \frac{\text{回归估计标准误}}{\text{实测样本平均值}} \times 100\% \quad (26)$$

式中, 回归估计标准误 (root mean squared error,  $RMSE$ ) 的计算见参考文献[17]。

## 3 模型的检验

### 3.1 展开叶数、叶长和叶面积指数的模拟结果

利用试验 2~4 的温度和辐射资料, 按式 (1)~(13) 计算出试验 2~4 任意一天各棚的单株展开叶数、叶长和叶面积指数, 与实测值进行比较, 结果如图 6 所示。模型对单株展开叶数、叶长和叶面积的模拟值与实测值基于 1:1 直线的  $R^2$  分别为 0.93、0.95、0.97,  $RE$  分别为 10.9%、8.7%、11.4%。

### 3.2 采收期和产量的预测结果

利用大棚内的温度和辐射资料, 按公式 (6) 计算出单株展开叶数, 反演出播种至采收所需的天数 (叶数  $N \geq 4$ ), 与实测值进行比较 (图 7a)。同样利用大棚内的温度和辐射资料, 按式 (1)~(13) 模拟得出的叶面积指数  $LAI$  作为光合作用和干物质生产模型的输入数据, 结合式 (14)~(25), 计算出与试验 2、3 小白菜在任

意一天的总产量，与实测值进行比较（图 7b）。模型对采收期和产量预测值与实测值基于 1:1 直线的  $R^2$  为

0.91、0.97，RE 为 3.4%、12.5%。

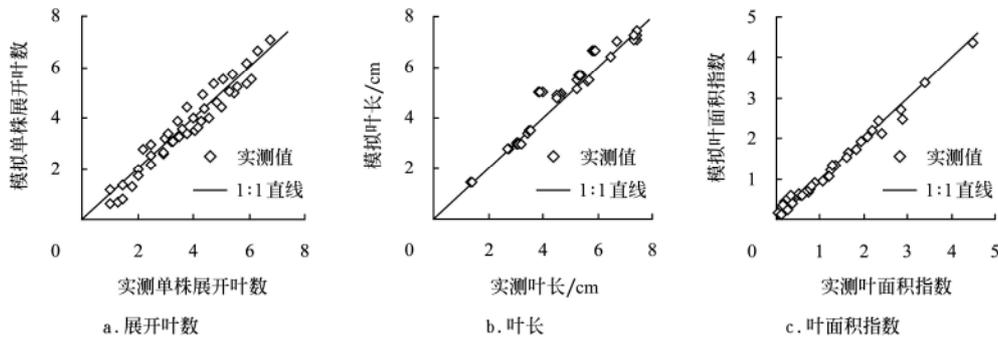


图 6 小白菜展开叶数、叶长和叶面积指数模拟值和实测值的比较

Fig.6 Comparison between simulated and measured unfolding leaf number, leaf length and leaf area index of *Brassica chinensis* L.

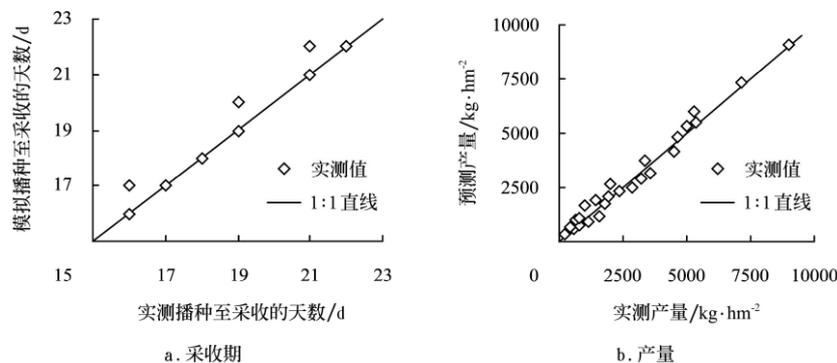


图 7 小白菜采收期和产量预测值和实测值的比较

Fig.7 Comparison between predicted and measured harvest date and yield *Brassica chinensis* L.

#### 4 结论与讨论

小白菜的经济效益由产量和产品上市期决定，反季上市的小白菜价格是正常季节上市价格的2~3倍。本研究在定量分析温度和辐射对小白菜叶片生长影响的基础上，建立了基于棚内太阳辐射和气温的防虫网覆盖大棚小白菜采收期与产量预测模型。模型可以根据播种期和种植密度、棚内太阳辐射和气温，预测防虫网覆盖大棚栽培小白菜植株在不同大小（展开叶数和叶长）采收时的采收期和产量，从而为防虫网覆盖大棚栽培小白菜生产的茬口安排和采收期的优化提供决策支持。今后，在定量分析防虫网覆盖大棚内外辐射和温度的基础上，进一步建立利用棚外气象资料预测防虫网覆盖大棚内辐射和温度的模型，并将其与本研究建立的模型相结合，则可以根据棚外气象资料和大棚结构信息（覆盖材料透光率、大棚跨度、肩高、脊高、大棚朝向等）来预测小白菜的采收期与产量。将会大大提高本研究建立模型的实用性。

在长江三角洲地区，防虫网覆盖大棚小白菜生产季节主要集中在夏、秋的菜淡季。针对此问题，本研究建立的模型对在夏秋季节种植的小白菜采收期与产量的预测效果较好。模型在其他季节的应用尚需进一步的试

验资料对模型进行校正和检验。

大棚小白菜采收期和产量不仅受温度、光照、种植密度的影响，还受肥水条件、品种特性等因子的影响。本研究的试验是在肥水充足的条件下进行的，采用的是经济价值较高的华王青梗菜等耐热品种，模型在其他类型的小白菜品种和其他地点的适用性还需进一步多品种多点试验来校正和检验。

#### [参 考 文 献]

- [1] Montero J I, Anton A. Analysis of thermally driven ventilation in tunnel greenhouses using small scale models[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 79(2): 213–222.
- [2] Mears D R, Both A J. A positive pressure ventilation system with insect screening for tropical and subtropical greenhouse facilities[J]. *Acta Horticulturae*, 2002, 578: 125–132.
- [3] Hugo Challa, Ep Heuvelink. Photo synthesis driven crop growth models for greenhouse cultivation: advances and bottle-necks[J]. *Acta Horticulturae*, 1996, 417: 9–22.
- [4] Dayan E, Keulen H, Joness J W, et al. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: I. Description of the model[J]. *Agricultural Systems*, 1993, 43 (2): 145–163.
- [5] Dayan E. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: II. Field calibration and

- validation[J]. *Agricultural System*, 1993, 43 (2): 165—183.
- [6] Heuvelink E. Dry matter production in a tomato crop: measurements and simulation[J]. *Annals of Botany*, 1995, 75: 369—379.
- [7] Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review[J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 74: 83—111.
- [8] 李萍萍, 王多辉, 邓庆安. 温室中生菜生长动态及生产潜力的模拟模型[J]. *生物数学学报*, 1999, 14(1): 77—81.
- [9] 李娟, 郭世荣, 罗卫红. 温室黄瓜光合生产与干物质积累模拟模型[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 241—244.
- [10] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1629—1635.
- [11] 袁昌梅, 罗卫红, 张生飞, 等. 温室网纹甜瓜叶面积与光合生产模拟模型研究[J]. *南京农业大学学报*, 2006, 29(1): 7—12.
- [12] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 温室黄瓜干物质分配与产量预测模拟模型初步研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 116—121.
- [13] 徐坚, 刘辉, 黄承贤, 等. 不同目数防虫网覆盖栽培小白菜效果试验[J]. *浙江农业科学*, 1999, (4): 179—182.
- [14] 王海峰, 张德琴, 杨志春, 等. 防虫网在夏季小白菜上的应用效果[J]. *南京农专学报*, 1999, 15(1): 37—39.
- [15] 杨自保, 丁祖明, 聂立田. 防虫网覆盖在蔬菜栽培上的应用效果[J]. *安徽农学通报*, 2001, 7 (6): 55—56.
- [16] 张鹏, 沈善铜, 陈敏, 等. 大棚覆盖不同颜色防虫网小气候效应及对蔬菜生长的影响[J]. *江苏农业科学*, 2000, (4): 56—57.
- [17] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 用辐热积分法模拟温室黄瓜叶面积光合速率与干物质产量[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(12): 131—136.
- [18] 汪小岳, 罗卫红, 丁为民, 等. 南方现代化温室黄瓜夏季蒸腾研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1390—1395.
- [19] Heuvelink E, Marcelis L F M. Influence of assimilate supply on leaf formation in sweet pepper and tomato[J]. *Journal of Horticultural Science*, 1996, 71(3): 405—414.
- [20] 袁昌梅, 罗卫红, 张生飞, 等. 温室网纹甜瓜发育模拟模型研究[J]. *园艺学报*, 2005, 32(2): 262—267.
- [21] 胡繁荣. 蔬菜栽培学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [22] 刘宜生主编. 蔬菜生产技术大全[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [23] Goudriaan J, van Laar H H. Modeling potential crop growth processes[M]. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1994: 29—118.
- [24] Goudriaan J. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38: 249—254.
- [25] Gijzen H. Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops[J]. Amsterdam: Simulation Report CABO—TT, 1992, 28: 1—22.

## Prediction model for harvest date and yield of *Brassica chinensis* L. in plastic tunnels covered with insect-proof screens

Han Xianbo<sup>1</sup>, Dai Jianfeng<sup>1</sup>, Xu Rui<sup>1</sup>, Li Jun<sup>1,2</sup>, Luo Weihong<sup>1\*</sup>, Zhang Hongju<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. Shanghai Meteorological Institute, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The aim of this study was to predict the harvest date and yield of *Brassica chinensis* L. in plastic tunnels covered with insect-proof screens. A leaf area prediction model for *Brassica chinensis* L. was developed based on the relationship between leaf area per plant and the product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation (TEP). Then a harvest date and yield prediction model was developed by integrating the conventional photosynthesis and dry matter production model and the leaf area model mentioned before. Experimental data of different varieties and sowing dates were used to validate the model. The results show that the determination coefficient ( $R^2$ ) and the relative estimation error (RE) between the predicted and the measured number of unfolding leaves, individual leaf length, leaf area index harvest date and yield based on the 1 : 1 line were 0.93, 0.95, 0.97, 0.91, 0.97 and 10.9%, 8.7%, 11.4%, 3.4%, 12.5%, respectively. The model developed in this study can give satisfactory predictions of harvest date and yield of *Brassica chinensis* L. in plastic tunnels covered with insect-proof screens and has strong practicality. Model parameters can be obtained easily.

**Key words:** insect-proof screens, plastic tunnels, leaf length, yield prediction