

基于光温效应的杨梅生育期模型的建立与验证

杨再强^{1,2,*}, 黄海静¹, 金志凤³, 李永秀¹, 黄川容¹, 费玉娟¹

(¹南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; ²南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044;
³浙江省气候中心, 杭州 310017)

摘 要: 根据杨梅发育对光温的反应过程, 利用不同的地点、年份和品种试验资料, 建立了以光温效应(Photo-thermal effectiveness, PTE)为尺度参数的杨梅生育期模拟模型, 并运用独立的数据对其进行验证。结果表明, 模型对杨梅雌花序出现、雌花开放、展叶、坐果、果实成熟等生育期所需天数的模拟值与实测值之间的回归估计标准误差(RMSE)分别为 2.51、1.83、2.68、2.70 和 2.45 d; 与以有效积温法(RMSE 分别为 8.02、7.81、5.46、5.40 和 11.83 d)和 PAR 日积分法(RMSE 分别为 8.28、11.0、8.52、5.56 和 6.87 d)为尺度的发育模型相比, 模拟精度分别提高了 8.6%和 10.2%。

关键词: 杨梅; 光温效应; 发育; 模型

中图分类号: S 667.6

文献标识码: A

文章编号: 0513-353X (2011) 07-1259-08

Development and Validation of a Photo-thermal Effectiveness Based Simulation Model for Development of *Myrica rubra*

YANG Zai-qiang^{1,2,*}, HUANG Hai-jing¹, JIN Zhi-feng³, LI Yong-xiu¹, HUANG Chuan-rong¹, and FEI Yu-juan¹

(¹Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; ²College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; ³Climate Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310017, China)

Abstract: Based on the photo-thermal reactions of *Myrica rubra*, experimental data from different sites, years and varieties were used to develop a simulation model for development of *Myrica rubra*. Then the model was validated by independent experimental data. The results showed that the root mean squared error (RMSE) between simulated and observed days needed for reaching the development stage of female inflorescence emergence, female inflorescence flowering, leaf extending, fruit-setting and fruit ripening, respectively, were 2.51, 1.83, 2.68, 2.70 and 2.45 days. Compared with the growth degree days (GDD) based model (RMSE was 8.02, 7.81, 5.46, 5.40 and 11.83 days) and the PAR integral base model (RMSE was 8.28, 11.0, 8.52, 5.56, 6.87 days), the photo-thermal effectiveness based model developed in this study increased the simulation accuracy by 8.6% and 10.2%, respectively.

Key words: *Myrica rubra*; photo-thermal effectiveness; development; model

收稿日期: 2010-12-21; 修回日期: 2011-05-25

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项[GYHY (QX) 200906023, GYHY (QX) 201006028]; 江苏省科技支撑计划(社会发展)项目(BE2010734)

* E-mail: yzq@nuist.edu.cn; Tel: 025-58731129

杨梅 (*Myrica rubra*) 是中国特产果树, 浙江省是中国杨梅的主产区 (陈志银 等, 1993; He, 2003), 2010 年杨梅种植面积达 $8.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 产值达 32 亿元。杨梅成熟期较为集中, 采收期较短, 果实不耐储藏, 严重影响了杨梅产业的发展 (康志雄 等, 2002)。要解决这一问题, 一方面要发展杨梅的设施栽培, 通过调节设施小气候来改变杨梅的成熟期, 使上市期与露地杨梅错开; 另一方面, 提前做好采收、储存、加工等准备工作, 缩短从生产到销售之间中间环节的时间。然而, 上述措施的实施都必须以杨梅生育期准确预测为基础。

国内外关于园艺作物生育期模拟研究有一些报道, 目前已经建立温室黄瓜 (李永秀 等, 2005)、温室菊花 (Lee & Goudriaan, 2003; 杨再强 等, 2007)、温室甜瓜 (施泽平 等, 2005)、温室番茄 (王冀川 等, 2008), 厚朴 (涂育合 等, 2003)、茶叶 (朱秀红, 2008)、桃 (姚小英 等, 2008) 等作物发育模型。杨再强等 (2007) 利用生理辐射积 (Physiological product of thermal effectiveness and PAR, PTEP) 预测温室标准切菊花发育进程; 李永秀等 (2005)、王冀川等 (2008) 以生理发育时间 (Physiological development days, PDD) 为发育尺度建立了黄瓜和番茄的发育模型; 施泽平等 (2005) 利用生长度日 (Growth degree days, GDD) 模拟温室甜瓜发育进程。

杨梅是多年生果树, 其生物学特性与一年生的园艺作物不同, 已有园艺作物发育模型无法模拟杨梅的发育进程。作者在多年、多点、多品种试验资料基础上, 分析杨梅发育与温度、辐射等环境因子的定量关系, 进而建立基于光温效应的杨梅发育模型, 以模拟杨梅的发育进程和收获期, 为进一步调控杨梅的上市期和生产决策提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验一于 2004—2009 年在浙江仙居 ($28^\circ 51' \text{ N}$, $120^\circ 44' \text{ E}$) 的露地进行, 供试杨梅品种为 ‘荸荠’ 和 ‘东魁’, 树龄 15~20 年。光照和温度数据来自附近 2 km 的仙居气象台站。

试验二于 2010 年在温州茶山 ($28^\circ 36' \text{ N}$, $120^\circ 38' \text{ E}$) 的露地和大棚内分别进行, 供试品种为 ‘丁岙’, 树龄 15~20 年。试验大棚为长 25 m, 宽 8 m, 高 6 m 的竹木结构塑料大棚。大棚内外气象数据用自动气象站 (Watchdong 2000, USA) 采集。

1.2 杨梅生育期的划分和观测

试验期间观测和统计杨梅发育过程中的主要生育期包括雌花序出现、雌花开花、展叶、坐果和果实成熟, 划分标准见表 1 (李兴军 等, 1999; 陈守智 等, 2007)。

表 1 杨梅生育期及划分标准
Table 1 Phenophase and dividing standard of *Myrica rubra*

生育期 Phenophase	划分指标 Dividing standard
雌花序出现 Female inflorescence emergence (FE)	花芽分化, 雌花序出现 The flower bud differentiation and female inflorescence emergence
雌花开花 Female inflorescence flowering (FF)	顶端雌花序开花 Top female inflorescence bloom
展叶 Leaf extending (LE)	50% 的春梢叶片展开 50% of spring sought leaf expansion
坐果 Fruit setting (FS)	50% 的果实坐果 50% of fruits fruit
果实成熟 Fruit ripening (FR)	果实成熟且开始采收 Fruit mature and began to harvest

1.3 模型构建

温度对杨梅发育的影响用热效应来表示, 每日热效应 $F(T)$ 指作物在实际温度条件下一天的发育速率与在最适宜温度条件下一天的发育速率的比例; 辐射对杨梅发育的影响用辐射效应来表示, 每日辐射效应 $F(R)$ 指作物在实际辐射条件下一天发育速率与在最适宜辐射条件下一天发育速率的比例; 每日光温效应就是杨梅在实际光温条件下一天发育速率与最适宜光温条件下一天发育速率的比例。对于特定的杨梅品种, 其完成某一特定发育阶段所需的累计光温效应是恒定的, 以累计光温效应 (Accumulated Photo-thermal effectiveness, $APTE$) 为尺度, 可以建立基于光温的杨梅生育期模拟模型 (Larsen et al., 1998; Marcelis et al., 1998; Margit et al., 2004; 徐国彬 等, 2006)。光温效应 (PTE) 计算方法如下:

$$R = \sum_{i=1}^{24} PAR(i) \quad (1)$$

$$F(R) = 1 - \exp^{-\alpha R} \quad (R > 0) \quad (2)$$

$$F(T) = \begin{cases} 0 & (T < T_b) \\ (1 - \exp^{-\beta(T-T_b)})(1 - \exp^{-\gamma(T_m-T)}) & (T_b \leq T \leq T_m) \\ 0 & (T \geq T_m) \end{cases} \quad (3)$$

$$PTE = F(T) \times F(R) \quad (4)$$

其中 $PAR(i)$ 为第 i 小时内的太阳光合有效辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); R 为每日日出到日落期间的太阳光合有效辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 每日辐射效应的值界于 0~1 之间, 每日辐射效应与光强呈负指数关系; α 为模型参数, 其生物学意义代表光合有效辐射增加 $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 相对光效应增加 $e^{-\alpha}$, 当光强接近 0 时, (2) 式中的 $F(R)$ 为 0, 当 R 接近饱和点时, $F(R)$ 接近 1。 T 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), T_b 、 T_m 分别为杨梅发育的下限温度和上限温度, 参考相关文献, $T_b = 3.4^{\circ}\text{C}$, $T_m = 32^{\circ}\text{C}$ (顾浩 等, 2008)。当日平均气温小于 T_b 或大于 T_m 时, (3) 式中每日热效应 $F(T)$ 为 0; 当日平均气温 (T) 介于 T_b 与 T_m 之间时, 每日热效应界于 0 和 1 之间, 每日热效应与日平均温度关系呈负指数函数; β 、 γ 为模型待定参数, 分别表示日均温度 (T) 与最低温度 (T_b) 之间、最高温度 (T_m) 与日均温度 (T) 之间相差 1°C , 每日热效应分别增加 $e^{-\beta}$ 和 $e^{-\gamma}$ 。

累计光温效应 ($APTE$) 为杨梅在某一生育期内每日光温效应 PTE 的总和。为了统一不同基因型杨梅品种完成特定生育阶段所需的累计光温效应, 引入基本发育因子来调节, 从而使得累计光温效应在不同基因型之间恒定不变 (刘洪和金之庆, 2003; 张培新 等, 2006; 王冀川 等, 2008)。则累计光温效应的计算公式为:

$$APTE = B \times \sum PTE_i \quad (5)$$

式中 $APTE$ 为某一生育期内的累计光温效应; B 为基本发育因子 (Basic development factor), 是品种特定的遗传参数, 最早熟的品种基本发育因子为 1, 其余品种的基本发育因子由早熟品种与该品种完成全生育期所需的累计光温效应相比得到, 本研究中, 将杨梅早熟品种荸荠的基本发育因子定为 1; PTE_i 为某一生育期内第 i 天的光温效应。

1.4 模型检验方法

采用回归估计标准误差 (Root mean squared error, RMSE) 对模型的模拟值和观测值之间的符合度进行检验 (Katharine et al., 1993; Ortega et al., 2007; 倪季恒 等, 2009):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \tag{6}$$

式中 OBS_i 为实际观测值, SIM_i 为模型模拟值, n 为样本容量。

利用试验一中 2004—2006 年的观测资料和试验二中 2010 年的露地试验资料建立‘荸荠’、‘东魁’和‘丁岙’杨梅的生育期模型, 用 2007—2009 年的露地试验资料及 2010 年大棚试验数据验证模型。

2 结果与分析

2.1 模型拟合结果与模型参数确定

利用试验一中 2004—2006 年的观测资料和试验二中露地试验资料, 采用统计软件(Spss 11.0)中“曲线拟合”功能对公式(2)、(3)、(4)中的模型参数进行拟合, 其方法是将公式(2)、(3)、(4)进行转换, 将指数方程两边取对数, 变换成线性函数, 再进行拟合。拟合结果见图 1, ‘荸荠’、‘东魁’和‘丁岙’杨梅从雌花出现到果实成熟的拟合值与实际观测的决定系数分别为 0.960, 0.980 和 0.980, RMSE 分别为 2.16、2.36 和 2.50 d, 结果表明模型拟合精度较好。‘荸荠’、‘东魁’和‘丁岙’杨梅生育期模型中的待定参数值 α 、 β 、 γ 和基本发育因子 B 的值见表 2。由表 2 可知‘东魁’发育因子 B 为 0.83, 其发育速率最快, ‘丁岙’其次, ‘荸荠’发育速率最慢。

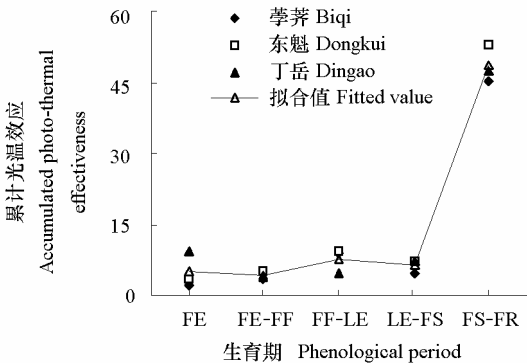


图 1 不同杨梅品种不同生育期的光温效应
Fig. 1 The accumulated photo-thermal effectiveness of phenophase of *Myrica rubra*

表 2 杨梅生育期模拟模型的参数

Table 2 Parameters for phenophase simulation model of *Myrica rubra*

品种 Varieties	α	β	γ	B
荸荠 Biqi	0.26	0.49	0.68	1
东魁 Dongkui	0.26	0.49	0.68	0.83
丁岙 Dingao	0.16	0.45	0.56	0.88

2.2 累计光温效应的确定

根据公式(1)~(5), 利用试验一中 2004—2006 年的观测资料和试验二中露地试验资料计算得到荸荠、东魁和丁岙杨梅完成各生育期所需的累计光温效应, 结果如表 3 所示。

表 3 杨梅各个生育期所需的累计光温效应

Table 3 Accumulated photo-thermal effectiveness for different phenophase of *Myrica rubra*

品种 Varieties	雌花序出现 FE	雌花序出现—雌花开放 FE-FF	雌花开放—展叶 FF-LE	展叶—坐果 LE-FS	坐果—果实成熟 FS-FR
荸荠 Biqi	2.3	3.5	9.0	4.5	45.2
东魁 Dongkui	3.2	5.0	9.3	7.2	53.0
丁岙 Dingao	9.4	4.0	4.6	7.3	47.2

注: 各个生育期所需累计光温效应计算起始时间为物候期划分标准所定时间, 其中雌花序出现的起始时间为每年的第 1 天。

Note: The starting time of calculation accumulated photo-thermal effectiveness for each development stage are the standard time of division phenophase of *Myrica rubra*, and the start time of the female inflorescence appear is the first day of the year.

2.3 模型检验

利用试验二中 2007—2009 年的气象资料及试验二中大棚内气象资料, 根据公式 (1) ~ (5), 计算荸荠、东魁和丁岙杨梅生育过程中每天的光温效应, 然后依据表 3 中各品种对应的完成各生育期所需的累计光温效应, 反推各个生育期的持续天数, 从而确定各生育期的起止时间, 并与实际生育期观测资料进行对比, 结果如表 4 和图 2 所示。可以看出, 模型能较好地模拟杨梅生育期出现时间, 模拟的各生育期持续天数与实测值误差不超过 3 d。将模拟的和实测的到达各生育期的天数代入公式 (6), 计算得出模型对雌花序出现、雌花开花、展叶、坐果、果实成熟等各生育期模拟的回归估计标准误差 RMSE 分别为: 2.51、1.83、2.68、2.71、2.45 d, 基于 1:1 线的决定系数 R^2 为 0.973。

表 4 不同品种杨梅达到各生育期天数模拟值与实测值
Table 4 Simulated and observed phenophase days of different varieties of *Myrica rubra*

生育期 Phenophase	项目 Item	2007		2008		2009		2010
		荸荠	东魁	荸荠	东魁	荸荠	东魁	丁岙
		Biqi	Dongkui	Biqi	Dongkui	Biqi	Dongkui	Dingao
雌花序出现 FE	实测值 Observed	57	57	71	74	69	73	36
	模拟值 Simulated	55	59	74	72	67	69	41
	误差 Error	2	-2	-3	2	2	4	-5
雌花序出现—雌花 开花 FE - FF	实测值 Observed	12	14	13	15	14	12	9
	模拟值 Simulated	16	12	13	14	14	13	8
	误差 Error	-4	2	0	1	0	-1	1
雌花开花—展叶 FF - LE	实测值 Observed	23	18	14	14	15	15	26
	模拟值 Simulated	22	22	16	18	14	15	22
	误差 Error	1	-4	-2	-4	1	0	4
展叶—坐果 LE - FS	实测值 Observed	6	15	2	4	2	2	12
	模拟值 Simulated	7	12	6	5	3	6	15
	误差 Error	-1	3	-4	-1	-1	-4	-3
坐果—果实成熟 FS - FR	实测值 Observed	65	71	63	71	65	67	68
	模拟值 Simulated	63	69	59	69	63	65	68
	误差 Error	2	-2	4	2	2	2	0

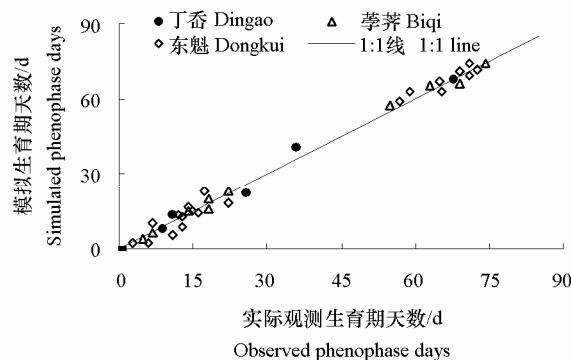


图 2 不同杨梅品种到达各生育期天数模拟值与实测值比较

Fig. 2 Comparison between simulated and observed days of different varieties of *Myrica rubra*

2.4 模型与有效积温法 (GDD)、PAR 日积分法的比较

为比较基于光温效应的发育模型与常用的有效积温法 (GDD) 和 PAR 日积分法模拟杨梅生育期的效果, 同时采用有效积温法和 PAR 日积分法进行了模拟研究, 结果如图 3。由图 2 与图 3 相比较可知, 本研究建立的基于光温效应的杨梅生育期模拟模型的精度 (图 2) 明显高于有效积温法 (GDD) 和 PAR 日积分法 (图 3)。

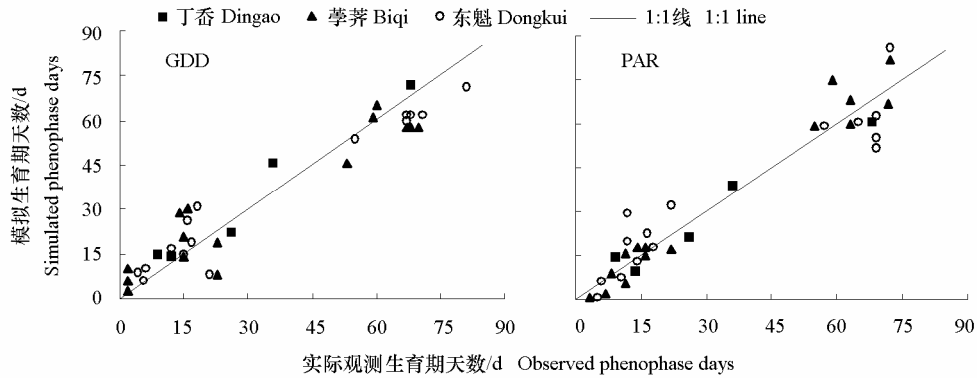


图 3 不同品种杨梅到达各生育期天数模拟值与实测值比较

Fig. 3 Comparison between simulated and observed phenophase days of different varieties of *Myrica rubra*

用 3 种方法预测杨梅生育期的模拟结果与实际观测值间基于 1 : 1 线的回归标准误差 (RMSE) 和决定系数 R^2 如表 5 所示。结果表明, 基于光温效应的模型 (PTE) 模拟杨梅生育期的精度比有效积温法 (GDD) 和 PAR 日积分法分别提高了 8.6% 和 10.2%。

表 5 不同模型模拟杨梅生育期的 RMSE 和 R^2

Table 5 RMSE and R^2 between simulated and observed phenophase of *Myrica rubra*

模拟方法 Simulated methods	RMSE/d					R^2
	雌花序出现 FE	雌花序出现—雌花开花 FE - FF	雌花开花—展叶 FF - LE	展叶—坐果 LE - FS	坐果—果实成熟 FS - FR	
光温效应模型 PTE	2.51	1.83	2.68	2.71	2.48	0.973
有效积温法 GDD	8.02	7.81	5.46	5.40	11.83	0.930
PAR 日积分法 PAR	8.28	11.0	8.52	5.56	6.87	0.918

3 讨论

本研究在多年观测资料的基础上, 综合考虑影响杨梅生长发育的两个主要环境因子光照和温度, 建立了基于累计光温效应的杨梅生育期模拟模型。利用不同年份、品种和栽培方式下的杨梅生育期实测资料对模型的模拟效果进行了检验, 并与基于有效积温 (GDD) 和 PAR 日积分的生育期模型进行了比较, 结果表明本模型的模拟精度显著高于其他两种模型。有效积温法 (GDD) 是最常用的模拟作物发育的方法, 有效积温法模拟作物生育期的前提是发育速率与气温在发育的上下限温度之间遵循同一线性关系, 没有考虑高温对发育的迟滞作用。实际上, 杨梅发育的后期常会出现高于发育上限温度的时候, 从而导致有效积温法的模拟效果不够理想。PAR 日积分是基于温度主要由太阳辐射决定这一条件建立, 然而在浙江南部, 杨梅发育的后期常出现高温连阴雨天气, 这种情况导致了温光不同步, 因而用 PAR 日积分模拟杨梅生育期误差较大。

本模型在模拟杨梅展叶前生育期精度不如成熟期, 这是由于试验地点在展叶之前平均气温较低, 在计算每日热效应时, 当温度低于杨梅生长的下限温度时, 热效应为 0, 而实际上, 杨梅在春梢展叶之前需要一定的有效低温, 适当的低温不仅不会抑制其发育, 反而有一定的促进作用 (高东升 等, 2001; 王力荣 等, 2003; 赵海亮 等, 2007)。今后需要进一步定量研究杨梅展叶之前对低温的要求, 确定不同品种的需冷量指标。此外, 本研究中所观测的温度资料是日平均温度, 而实际上在晴天时温度的日变化较大, 用日平均温度会低估了高温和低温对发育的抑制作用, 影响模型的精度。因此, 在今后的研究中, 要提高气象资料观测的频率, 进一步完善模型。

杨梅是多年生木本植物, 不同于一年生植物, 发育速率除受当年的气候条件外, 还与上一年的环境条件及树体的营养状况及树体的碳氮比 (C/N) 有关, 今后应该深入研究杨梅的发育与它们之间的关系。此外, 本研究中建立基于光温效应的杨梅生育期模拟模型主要针对浙江温州、仙居地区的荸荠、东魁和丁岙 3 个品种, 对其它品种和其它地区的应用尚需要试验获得杨梅的发育数据和气象数据, 调整模型参数 α 、 β 、 γ 和基本发育因子 B 。

References

- Chen Zhi-yin, Li San-yu, Ye Ming-er, Yu Zhong-wei. 1993. Climate ecological regionalization of bayberry in Zhejiang Province. Journal of Zhejiang Agriculture University, 19 (2): 139 - 144. (in Chinese)
- 陈志银, 李三玉, 叶明儿, 俞忠伟. 1993. 浙江省杨梅气候生态区划的研究. 浙江农业大学学报, 19 (2): 139 - 144.
- Chen Shou-zhi, Wu Xing-en, Zhang Mei-fang, Zhong Rui-fang, Li Zheng-li. 2007. Statistical analysis on ecological and climatic adaptability for cultivation of *Myrica rubra* in Yunnan. Journal of Yunnan Agricultural University, 22 (4): 566 - 569. (in Chinese)
- 陈守智, 吴兴恩, 张梅芳, 钟瑞芳, 李正丽. 2007. 云南杨梅种植气候生态适应性的统计分析. 云南农业大学学报, 22 (4): 566 - 569.
- Gu Hao, Jing Yuan-shu, Shen Shuang-he, Jin Zhi-feng. 2008. The study of the Chinese bayberry climatic potential productivity in Zhejiang. Chinese Journal of Agrometeorology, 29 (3): 290 - 293. (in Chinese)
- 顾浩, 景元书, 申双和, 金志凤. 2008. 浙江杨梅气候生产潜力研究. 中国农业气象, 29 (3): 290 - 293.
- Gao Dong-sheng, Shu Huai-rui, Li Xian-li. 2001. A study on bud chilling requirements of fruit trees in greenhouse. Acta Horticulturae Sinica, 28 (3): 284 - 289. (in Chinese)
- 高东升, 束怀瑞, 李宪利. 2001. 几种适宜设施栽培果树需冷量的研究. 园艺学报, 28 (3): 284 - 289.
- He X H, Chen L G, Asghar S, Chen Y. 2004. Red bayberry (*Myrica rubra*), a promising fruit and forest tree in China. Journal of American Pomological Society, 58 (3): 163 - 168.
- Kang Zhi-xiong, Luo Wen-jian, Lü Ai-hua, Yang Zai-juan, Chen You-wu. 2002. On the climatic regionalization for growing *Myrica rubra* in China. Journal of Fruit Science, 19 (2): 118 - 122. (in Chinese)
- 康志雄, 骆文坚, 吕爱华, 杨在娟, 陈友吾. 2002. 杨梅栽培区划与应用研究. 果树学报, 19 (2): 118 - 122.
- Katharine B P, Sanders D C, Granberry D M, Thomas G J, Decoteau D R, Russell T, Robert J D, Dean B K, Wayne J M. 1993. Heat units, solar radiation and day length as pepper harvest predictors. Agricultural and Forest Meteorology, 65 (3 - 4): 197 - 205.
- Larsen R U, Persson L. 1998. Modeling flower development in greenhouse chrysanthemum cultivars in relation to temperature and response group. Scientia Horticulturae, 80: 73 - 89.
- Lee J H, Goudriaan H C. 2003. Using the expolinear growth equation for modeling crop growth in year-round cut chrysanthemum. Annals of Botany, 92: 697 - 708.
- Li Yong-xiu, Luo Wei-hong, Ni Ji-heng, Chen Yong-shan, Xu Guo-bin, Jin Liang, Dai Jian-feng, Chen Chun-hong. 2005. Simulation of leaf area, photosynthetic rate and dry matter production in greenhouse cucumber based on product of thermal effectiveness and photo synthetically active radiation. Transactions of the CSAE, 21 (12): 131 - 136. (in Chinese)
- 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 陈永山, 徐国彬, 金亮, 戴剑锋, 陈春宏. 2005. 用辐射积分法模拟温室黄瓜叶面积、光合速率与干物质产量. 农业工程学报, 21 (12): 131 - 136.
- Li Xing-jun, Lü Jun-liang, Li San-yu. 1999. Advances in bayberry of China. Journal of Sichuan Agricultural University, 17 (2): 224 - 229. (in Chinese)
- 李兴军, 吕均良, 李三玉. 1999. 中国杨梅研究进展. 四川农业大学学报, 17 (2): 224 - 229.
- Liu Hong, Jin Zhi-qing. 2003. A phonological model to simulate rape development. Journal of Applied Meteorological Science, 14 (5): 634 - 640. (in Chinese)
- 刘洪, 金之庆. 2003. 油菜发育动态模拟模型. 应用气象学报, 14 (5): 634 - 640.
- Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: A review. Scientia Horticulturae, 74: 83 - 111.
- Margit N, Andrea K, Larsen R U. 2004. Predicting the effect of irradiance and temperature on the flower diameter of greenhouse grown

- Chrysanthemum. *Scientia Horticulturae*, 99: 319 – 329.
- Ni Ji-heng, Chen Xue-hao, Chen Chun-hong, Xu Qiang, Zhao Da-qiu. 2009. Simulation of cucumber fruit growth in greenhouse based on production of thermal effectiveness and photosynthesis active radiation. *Transactions of the CSAE*, 25 (5): 192 – 196. (in Chinese)
- 倪纪恒, 陈学好, 陈春宏, 徐 强, 赵大球. 2009. 用辐射积分法模拟温室黄瓜果实生长. *农业工程学报*, 25 (5): 192 – 196.
- Ortega F S O. 2007. Model for predicting apple diameter by using growing degree days, cultivar Royal Gala. *Acta Hort*, 584: 163 – 167.
- Shi Ze-ping, Guo Shi-rong, Kang Yun-yan, Yin Han-wen, Gao Jie-jing, Xu Gang, Zhang Chang-wei. 2005. Simulation of greenhouse muskmelon development based on growing degree days. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 28 (2): 129 – 132. (in Chinese)
- 施泽平, 郭世荣, 康云艳, 尹汉文, 高洁静, 徐 刚, 张昌伟. 2005. 基于生长度日的温室甜瓜发育模拟模型的研究. *南京农业大学学报*, 28 (2): 129 – 132.
- Tu Yu-he, Ye Gong-fu, Lin Zhao-shou, Tian You-chuan, Huang Jin-tao. 2003. Predictive models of bark production of *Magnolia officinalis* var. *biloba*. *Journal of Anhui Agricultural University*, 30 (3): 312 – 315. (in Chinese)
- 涂育合, 叶功富, 林照授, 田有圳, 黄金桃. 2003. 凹叶厚朴树皮产量预测模型的研究. *安徽农业大学学报*, 30 (3): 312 – 315.
- Wang Ji-chuan, Ma Fu-yu, Feng Sheng-li, Chen Yuan-liang, He Wei, Pang Sheng-qun. 2008. Simulation model for the development stages of processing tomato based on physiological development time. *Chinese Journal of applied ecology*, 19 (7): 1544 – 1500. (in Chinese)
- 王冀川, 马富裕, 冯胜利, 陈远良, 何 为, 庞胜群. 2008. 基于生理发育时间的加工番茄生育期模拟模型. *应用生态学报*, 19 (7): 1544 – 1500.
- Wang Li-rong, Zhu Geng-rui, Fang Wei-chao, Zuo Qin-yuan. 2003. Estimating models of the chilling requirement for peach. *Acta Horticulturae Sinica*, 30 (4): 379 – 383. (in Chinese)
- 王力荣, 朱更瑞, 方伟超, 左覃元. 2003. 桃品种需冷量评价模式的探讨. *园艺学报*, 30 (4): 379 – 383.
- Xu Guo-bin, Luo Wei-hong, Chen Fa-di, Li Yong-xiu, Wei You-gang, Chen Dong. 2006. Effects of temperature and solar radiation on *Euphorbia pulcherrima* development and main quality indices. *Acta Horticulturae Sinica*, 33 (1): 168 – 171. (in Chinese)
- 徐国彬, 罗卫红, 陈发棣, 李永秀, 魏猷刚, 陈 冬. 2006. 温度和辐射对一品红发育及主要品质指标的影响. *园艺学报*, 33 (1): 168 – 171.
- Yao Xiao-ying, Zhang Yan, Ma Jie, Li Xiao-he, You Zhi-gang. 2008. Responses of peach yields to climate change in Tianshui. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 29 (2): 202 – 204. (in Chinese)
- 姚小英, 张 岩, 马 杰, 李晓鹤, 尤志刚. 2008. 天水桃产量对气候变化的响应. *中国农业气象*, 29 (2): 202 – 204.
- Yang Zai-qiang, Luo Wei-hong, Chen Fa-di, Gu Jun-jie, Li Xiang-mao, Ding Qi-feng, Zhao Cai-biao, Lu Ya-fan. 2007. A simulation model for predicting the development stage and harvesting date of standard cut chrysanthemum in greenhouse. *Scientia Agriculture Sinica*, 40 (9): 2028 – 2035. (in Chinese)
- 杨再强, 罗卫红, 陈发棣, 顾俊杰, 李向茂, 丁琪峰, 赵才标, 陆亚凡. 2007. 温室标准切花菊发育模拟与收获期预测模型研究. *中国农业科学*, 40 (9): 2028 – 2035.
- Zhu Xiu-hong, Ma Pin-yin, Cheng Zhao-jin, Yao Wen-jun. 2008. The relationship between tea production and climatic conditions in the southeast of Shandong. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 24 (8): 340 – 343. (in Chinese)
- 朱秀红, 马品印, 成兆金, 姚文军. 2008. 鲁东南地区茶叶产量与气候条件的关系研究. *中国农学通报*, 24 (8): 340 – 343.
- Zhang Pei-xin, He Chao-xing, Zhang Zhi-bin, Zhang Bai-hai. 2006. A simulation model for tomato plant growth and development in solar greenhouse based on physiological development time. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 27 (4): 314 – 317. (in Chinese)
- 张培新, 贺超兴, 张志斌, 张百海. 2006. 基于生理发育时间的日光温室番茄发育模拟模型. *中国农业气象*, 27 (4): 314 – 317.
- Zhao Hai-liang, Zhao Wen-dong, Gao Dong-sheng, Yu De-lin, Sun Ling-jun, Gao Sheng-hua. 2007. Advance in research of chilling requirement and estimating model on deciduous fruit trees. *Northern Fruits*, (6): 1 – 3. (in Chinese)
- 赵海亮, 赵文东, 高东升, 于德林, 孙凌俊, 高圣华. 2007. 落叶果树需冷量及其估算模型研究进展. *北方果树*, (6): 1 – 3.