

基于生理发育时间和生长期度日的烤烟生育期预测模型^{*}

张明达¹ 朱勇^{1**} 胡雪琼¹ 李蒙¹ 李晓燕²

(¹云南省气候中心, 昆明 650034; ²云南省昭通农业气象试验站, 云南昭通 657000)

摘要 利用2010—2011年在云南具有代表性的植烟县开展烤烟种植试验数据, 建立基于生理发育时间和生长期度日的生育期模型, 再利用农业气象观测资料进行模型验证。结果表明: 在移栽期之前, 两种预测模型都有很好的模拟效果, 平均误差日数较低, 移栽期之后, 受移栽、打顶等农事活动的影响, 误差日数增大; 使用生理发育时间法进行模拟的预测值与实测值符合度较好, 尤其是在移栽期之前, 平均误差日仅为2 d, 预测精度明显高于生长期度日法; 受光周期效应的影响, 生理发育时间模型在较低纬度地区的模拟效果偏差, 而在较高纬度地区模拟精度较高。

关键词 烤烟 生育期模型 生理发育时间 生长期度日

文章编号 1001-9332(2013)03-0713-06 **中图分类号** S162.5 **文献标识码** A

Simulation model of the development stages of flue-cured tobacco based on physiological development period and growing degree days. ZHANG Ming-da¹, ZHU Yong¹, HU Xue-qiong¹, LI Meng¹, LI Xiao-yan² (¹*Yunnan Climate Center, Kunming 650034, China*; ²*Agrometeorological Station of Zhaotong, Zhaotong 657000, Yunnan, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(3): 713–718.

Abstract: Based on the 2010–2011 experimental data of planting flue-cured tobacco in its representative production counties of Yunnan Province, Southwest China, the models of the tobacco plant physiological development period and growing degree days were established, and validated by the observation data from local agro-meteorological stations. The two models had good performance at pre-transplanting stage, and the errors of the estimated dates were smaller. After transplanting stage, the errors of the estimated dates were larger, because of the disturbances from farming activities such as transplanting and topping. The simulated values based on the tobacco plant physiological development period had a higher coincidence with the observed values, especially at the pre-transplanting stage, with the errors of the estimated dates being smaller than two days. As affected by the photoperiod effect, the model of tobacco plant physiological development period fitted better in high latitude regions than in low latitude regions.

Key words: flue-cured tobacco; development stage model; plant physiological development period; growing degree days.

烟草产业是云南省的支柱产业, 全省烤烟种植面积和生产收购总量占全国的40%, 总产量占全球的20%, 烤烟生产在云南经济和国家烟草贸易中都具有举足轻重的地位^[1]。烤烟全生育期长短与烟叶品种及种植地的光、温条件密切相关, 而光、温条件又与纬度、经度和海拔有密切关系^[2-3]。生育期预测

是烤烟生长模拟研究的重点, 在烟草育种、栽培管理和生理生态研究中, 都需要对生育期进行预测, 同时也可为烤烟生产的农事活动、气象灾害防护、病虫害防控及品质评价和产量模拟等提供理论基础。国内关于烤烟生育期预测的研究较少, 且多缺乏生物学意义, 部分国外烤烟发育模型多借鉴其他农作物发育模型, 普适性较差, 并因参数过多、方法复杂、调试繁琐, 不适用于烤烟大田生产^[4-6]。

作物生长模拟模型遵循农业生态系统物质平衡、能量守恒原理和物质能量转换原理, 以光、温、水

* 公益性行业(农业)科研专项(GYHY200906021, GYHY200906023)资助。

** 通讯作者. E-mail: zhuyong78@hotmail.com
2012-06-05 收稿, 2012-12-19 接受.

等条件为驱动,运用数学物理方法和计算机技术,对生育期内主要生理生态过程及其与气象条件的关系进行逐日动态数值模拟,实现生育期预测^[7-8]。本文采用生理发育时间法和生长期日法进行烤烟生育期模拟,并通过两种方法的对比,建立了适用于云南烤烟种植及生产的生育期模型,为准确预测各烟区烤烟生育期进度、合理安排大田生产提供理论依据和决策支持,对提高烤烟生产的经济和生态效益都具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 建模数据 建模资料取自玉溪市大营街镇和昭通市布嘎镇烤烟种植示范园,两地均为云南省具有典型代表性的烤烟种植区,地形地貌差异及独特的气候条件使两地具有不同的代表性^[9-10]。供试烤烟品种为K326(*Nicotiana tabacum*),该品种于1989年被审定为全国推广良种,目前为云南省的主栽烤烟品种^[11]。试验时间为2010、2011年连续两年烤烟生长季,试验期内每天观测记录烟株生长发育状况、各生育期出现时间、气象灾害、病虫害及田间管理活动,定期进行叶面积及干物质测定,温度数据来自附近几千米外的气象站。

试验1及试验2为玉溪(24°18' N, 102°29' E, 海拔1630 m)烤烟田间试验,试验地土壤质地为中壤土,土壤肥力中等,耕作制度为“油菜-水稻-烟草”轮作,种植密度为1.5株·m⁻²;试验3及试验4为

昭通(27°14' N, 103°44' E, 海拔1960 m)烤烟田间试验,试验地土壤质地为沙壤土,土壤肥力中上等,耕作制度为“玉米-烟草”轮作,种植密度为1.7株·m⁻²。各试验的生育期进度见表1。

1.1.2 验证数据 验证资料取自云南省气象局提供的2010—2011年烤烟观测农气报表(烤烟生育状况观测记录年报),供试烤烟品种为K326,种植地点均为距离气象站1 km范围内。其中,2010年气象站为陆良(25°02' N, 104°40' E, 海拔1841 m)、保山(25°07' N, 99°11' E, 海拔1652 m)、临沧(23°53' N, 100°05' E, 海拔1502 m)3站,2011年为玉溪(24°20' N, 102°33' E, 海拔1841 m)、保山(25°07' N, 99°11' E, 海拔1652 m)、昭通(27°21' N, 103°43' E, 海拔1949 m)3站,各站点的生育期进度见表2。

1.2 研究方法

1.2.1 生理发育时间法 生理发育时间(physiological developmental time, PDT)指在最适温、光条件下,作物完成发育各阶段所需的最短时间。作物在最适温光条件下生长一日定义为一个生理发育日,当温光条件非最适时,1个生理发育日小于1个自然日^[12],某一特定发育阶段所需的生理发育时间为该阶段每日相对生理发育效应的累加。生理发育时间法用恒定的生理尺度可解决不同气候条件种植区因生育期长短不同而无法开展大尺度的生育期模拟和预测的困难,在国内外广泛用于大田作物和温室作物的生育期预测^[13-15]。

表1 玉溪和昭通试验点烤烟发育期实测值

Table 1 Observed dates of tobacco development stages in Yuxi and Zhaotong

试验点 Site	年份 Year	播种 Sowing	出苗 Seedling	二真叶 Second true leaf	四真叶 Four true leaf	七真叶 Seven true leaf	移栽 Transplant	团棵 Rosette	现蕾 Flowering	工艺成熟 Technical maturity
玉溪 Yuxi	2010	01-29	02-22	03-01	03-16	03-29	04-25	05-18	06-23	07-08
昭通 Zhaotong	2011	02-01	02-20	03-01	03-15	03-25	04-20	05-10	06-14	07-11
玉溪 Yuxi	2010	01-28	02-26	03-10	03-17	04-01	05-09	06-17	07-03	07-25
昭通 Zhaotong	2011	02-07	02-28	03-24	04-03	04-13	05-04	06-18	07-18	08-03

表2 云南省部分植烟代表站的生育期

Table 2 Developmental stages of typical tobacco-producing counties in Yunnan

站点 Site	年份 Year	播种 Sowing	出苗 Seedling	二真叶 Second true leaf	四真叶 Four true leaf	七真叶 Seven true leaf	移栽 Transplant	团棵 Rosette	现蕾 Flowering	工艺成熟 Technical maturity
陆良 Luliang	2010	02-22	03-12	03-27	04-02	04-16	05-05	06-20	07-10	07-20
保山 Baoshan	2010	02-04	02-22	03-12	03-24	04-06	04-21	06-30	07-14	08-12
临沧 Lincang	2010	02-02	02-22	03-06	03-14	04-12	05-11	06-24	07-4	07-31
玉溪 Yuxi	2010	02-02	02-22	03-01	03-16	03-29	04-25	05-18	06-24	07-08
玉溪 Yuxi	2011	02-12	03-04	03-14	03-28	04-14	04-28	06-02	06-16	07-22
保山 Baoshan	2011	02-07	02-25	03-10	03-20	04-16	05-05	06-10	07-09	08-07

烤烟是典型的短日照植物,K326对光周期的反应具有一定的短日性,烟叶经短日照处理后,现蕾期提前、主茎叶数减少、生育期明显缩短^[16].烤烟从播种到工艺成熟的生理发育时间进程(RPDT)主要由热效应(relative thermal effectiveness, RTE)和光周期效应(relative photoperiod effectiveness, RPE)共同决定,光周期效应主要在移栽到现蕾期产生影响。

1.2.1.1 热效应 生理热效应指作物在实际温度条件下生长单位时间与在最适温度条件下生长单位时间的比例,由作物在生育过程中对温度的非线性反应决定。由于云南地处低纬高原区,烤烟生长季内各烟区的气温差异很大,各生长季内的最高气温及最低气温都会超出最适温度范围,因此模型采用三段线性函数计算每日RTE:

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

式中: $RTE(T)$ 为温度为 T 时的相对热效应; T_b 为发育的下限温度,低于该温度时,烟叶的发育速率为0; T_m 为发育的上限温度,超过该温度,烟叶停止发育; T_{ob} 为发育的最适温度下限; T_{ou} 为发育的最适温度上限。烤烟各生育时期的三基点温度见表3^[17]:

1.2.1.2 光周期效应 光周期效应指作物在实际光照条件下生长与在相对光照条件下生长的比例,其值在0~1,从烤烟移栽到现蕾期,光周期效应对烤烟生长影响较大。每日相对光周期效应可根据日长、临界日长和最适日长来计算,日长大于临界日长时,相对光周期效应为1;日长介于临界日长与最适日

表3 烤烟各主要生育期的三基点温度

Table 3 Minimum, optimum and maximum temperature of tobacco at different developmental stages (°C)

生育期 Development stage	最低温度 Maximum temperature	最适温度 下限 Optimum minimum temperature	最适温度 上限 Optimum maximum temperature	最高温度 Maximum temperature
播种-出苗 Sowing-seedling	10	20	25	30
出苗-成苗 Seedling-survival	10	20	25	30
移栽-团棵 Transplant-rosette	13	20	25	35
团棵-现蕾 Rosette-flowering	13	20	28	35
现蕾-采收 Flowering-harvesting	17	20	24	35

长之间时,相对光周期效应随日长增加而线性增加;日长小于最适日长时,相对光周期效应为1^[18]:

$$RPE = \begin{cases} 0 & (DL \geq DL_c) \\ (DL_c - DL) / (DL_c - DL_o) & (DL_c > DL > DL_o) \\ 1 & (DL \leq DL_o) \end{cases} \quad (2)$$

式中: DL_c 为临界日长,取值为14 h; DL_o 为最适日长,取值为10 h; DL 为实际日长,一年中任一天的 $DL(h)$ 公式如下:

$$DL = 12 \times [1 + (2/\pi) \times \sin^{-1}(a/b)] \quad (3)$$

式中: $a = \sin\lambda \sin\delta$, $b = \cos\lambda \cos\delta$. 其中, $\sin\delta = -\sin(23.45\pi/180) \cos[2\pi(DAY + 10)/365]$, $\cos\delta = 1 - \sin\delta \sin\delta$, DAY 为一年中的日序, λ 为地理纬度, δ 为太阳赤纬($\pm 23.45^\circ$).

1.2.1.3 生理发育时间 生理发育时间(PDT)由每日的RPDT累积得出。烤烟播种至工艺成熟,每日生理效应由每日RTE、每日RPE互作决定。每日生理效应的累积形成了PDT,公式如下:

$$RPDT = \begin{cases} RTE & (\text{播种期}-\text{移栽期}) \\ RTE \times RPE & (\text{移栽期}-\text{现蕾期}) \\ RTE & (\text{现蕾期}-\text{工艺成熟期}) \end{cases} \quad (4)$$

1.2.2 生长度日法 生长度日(growing degree days, GDD)指作物在实际环境条件下,完成某一生育阶段所获得的累积有效积温值。生长度日法适用于各生育期生长度日密集、离散度小、趋势一致的作物,近年来常被用于作物发育期模型研究^[19-20]。生长度日是烤烟在实际温度条件下,完成某一生育阶段所要经历的累积有效积温值。根据作物生长发育阶段生长度日恒定的原理,计算烤烟生长不同生育期内的累积有效积温,建立烤烟发育阶段的动态模拟模型。GDD(°C·d)的计算公式如下:

$$GDD = \sum (T_d - T_b) \quad (5)$$

式中: T_b 为烟叶发育的基点温度,随着生育阶段的变化而不同,不同生育期内的取值为表3中各发育期的最低温度; T_d 为日均温度。各生育阶段有效积温的计算公式如下:

$$A_i = \sum (T_d - T_b) \quad (6)$$

式中: A_i 为第*i*个生育阶段的有效积温,分别为出苗期、二真叶期、四真叶期、七真叶期、移栽期、团棵期、现蕾期和工艺成熟期。

1.2.3 模型检验方法 采用回归估计标准误差(root mean square error, RMSE)和相对误差(relative estimation error, RE)对模拟值与观测值的符合度进行分析。RMSE值越小,表明模拟值与实测值的一致性越好,模型预测精度越高,结果越准确。RE值

<10%, 表明模拟值与预测值一致性非常好, 在10%~20%为较好, 在20%~30%模拟效果一般, >30%表明模拟值与实际值偏差大, 模拟效果较差. RMSE和RE的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2 / N} \quad (7)$$

$$RE = RMSE / \bar{O} \times 100\% \quad (8)$$

式中: SIM_i 、 OBS_i 分别为完成某个生育期 i 的模型模拟天数和实际观测天数; N 为总样本容量; i 为观测值和模拟值的样本序号; \bar{O} 为实测值的平均值.

2 结果与分析

2.1 模型建立

针对云南烟叶种植特点和烤烟生产现状, 基于气象站的日平均气温数据, 利用试验1~4的观测数据, 对不同生育期内的模型参数进行计算, 主要计算从播种到出苗、二真叶、四真叶、七真叶、移栽、团棵、现蕾和工艺成熟8个生育期的参数^[21]. 由表4可以看出, 进入移栽期之前, 各发育阶段所需的生理时间较短, 移栽期后各发育阶段所需的生理时间较长, 尤其是移栽到团棵期内, 所需生理时间最多.

表4 烤烟各生育期的生长度日(GDD)和生理发育时间(PDT)

Table 4 GDD and PDT for each developmental stage of tobacco (d)

生育期 Development stage	生长度日 GDD		生理发育 时间 PDT		生育期 Development stage		生长度日 GDD		生理发育 时间 PDT			
	出苗 Seedling	88.6	7.4	移栽	126.6	46.4	二真叶 Second true leaf	74.5	13.9	团棵	289.1	71.4
四真叶 Four true leaf	75.5	19.6	现蕾	137.7	87.7							
七真叶 Seven true leaf	123.6	32.5	工艺成熟	138.1	108.7							

2.2 模型检验

利用6站次烤烟生育期观测记录及气象站的逐日平均气温数据, 根据式(1)~(6), 分别计算各站次不同生育期的生理发育时间及生长度日, 并由计算结果反推得出各站次烤烟到达各生育进度所需的实际日期(从播种期开始计算), 对比模拟值与实测值的差异, 对两个模型的预测效果进行检验, 其中, 预测生育期提前记为负, 预测生育期推后记为正.

由表5可以看出, 生理发育时间法对不同植烟区的烤烟生育期模拟效果较好, 尤其在移栽期前的模拟效果更好, 平均误差日仅2 d, 生长度日法的模拟效果较差, 移栽期之前的平均误差值为7 d. 从地理分布来看, 在纬度和海拔较高的陆良、玉溪地区, 生理发育时间法的误差天数较小, 在较低纬度低海拔的临沧地区偏差较大, 而生长度日法模拟的地区差异并不明显. 生理发育时间法和生长度日法在各生育期模拟值与观测值间的决定系数(R^2)分别为0.97和0.85, 生理发育时间法的相对误差较小, 生长度日法的相对误差较大, 尤其在移栽期之后, 离散度很高, 预测结果的一致性差, 致使预测精确度下降, 说明模型的预测性偏差(图1).

从模型模拟值与实际观测值之间的RMSE值和RE值可以看出, 生理发育时间法的烤烟各生育期天数模拟效果总体好于生长度日法, 生理发育时间法从播种至出苗、二真叶、四真叶、七真叶、移栽、团棵、现蕾、工艺成熟期的RMSE分别为2.1、1.2、2.3、3.1、2.7、2.4、3.7、3.3 d, RE值为11.4%, 达到了较好的模拟效果; 生长度日法分别为1.2、4.3、5.6、6.2、6.7、8.5、9.6、9.1 d, RE值为28.7%, 模拟效果较差. 由于移栽受人为因素控制, 在移栽期前两种方法的预测误差均较小, 平均误差为2~3 d; 移栽期之后, 预测误差扩大至3~10 d.

表5 两种发育模型在不同研究地区发育期预测误差日数表

Table 5 Prediction errors of two models with different developmental stages in study areas (d)

生育期 Development stage	陆良 2010 Luliang 2010		保山 2010 Baoshan 2010		临沧 2010 Lincang 2010		玉溪 2010 Yuxi 2010		保山 2011 Baoshan 2011		玉溪 2011 Yuxi 2011	
	GDD	PDT	GDD	PDT	GDD	PDT	GDD	PDT	GDD	PDT	GDD	PDT
出苗 Seedling	-1	1	3	-2	-1	1	5	0	3	-2	2	0
二真叶 Second true leaf	-4	2	7	0	-1	2	7	-2	8	-2	6	-1
四真叶 Four true leaf	5	-1	5	1	-1	2	4	3	9	-1	7	-2
七真叶 Seven true leaf	4	-2	9	-2	-10	3	5	-3	11	2	9	-2
移栽 Transplant	2	-3	10	-3	-12	3	-6	3	9	-3	11	-3
团棵 Rosette	-6	-3	-7	-2	-20	5	6	2	7	-4	14	-2
现蕾 Flowering	-8	-2	-10	-2	-15	5	-7	4	-4	-5	13	2
工艺成熟 Technical maturity	7	-3	11	3	-18	6	-6	3	-6	-4	17	3

GDD: 生长度日 Grawing degree days; PDT: 生理发育时间 Plant physiological developmental period.

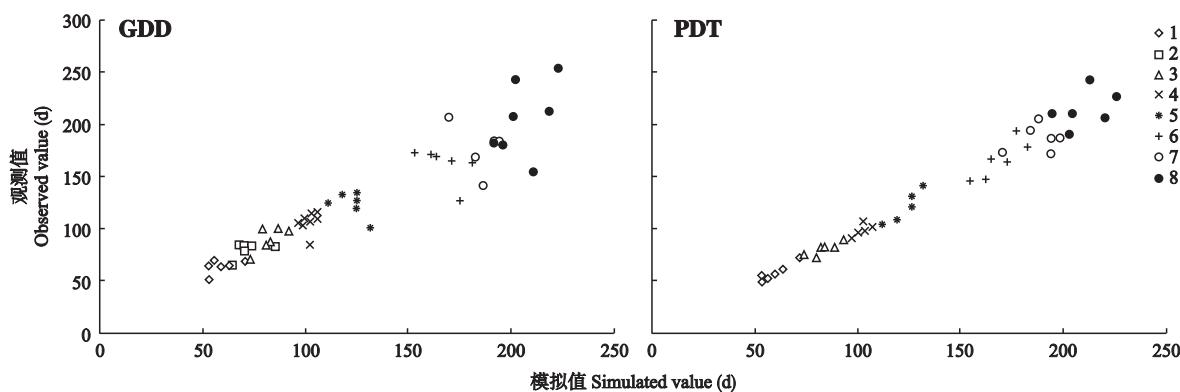


图1 烤烟各生育期天数模拟值与观测值比较

Fig. 1 Comparison between simulated and observed days during each developmental stage for tobacco.

GDD: 生长期度日 Growing degree days; PDT: 生理发育时间 Plant physiological development period.

3 讨 论

烤烟几乎在云南全省都有种植,但由于独特的地理条件,植烟区的光、温、水等气象条件各异,致使烤烟生育期差异较大,对烟草产业的管理和发展不利^[22]. 在以往的烤烟生长发育研究中,常常根据烟株的形态而确定一些静态的、定性的指标对生育期进行预测,过多地依赖人为经验,忽略了品种因子和环境因子的影响,表现出经验性和滞后性。

由于烤烟生产普遍采用人工温室育苗(飘浮育苗、托盘育苗和塑料小弓棚育苗等)的方式,烟株发育的小气候受到温室和水的调节,避免了苗床受高温或低温的影响,因此,在烤烟进入移栽期之前,两种方法的模拟值与实测值的误差都很小。烤烟进入移栽期之后,在光温变化同步的大田环境条件下,利用生理发育时间作为烤烟的发育尺度,综合了不同温度的热效应影响,考虑到高温影响下烤烟生长发育的迟滞作用,同时融入了光周期效应对短日照作物的抑制作用,模型的机理性和解释性更强,达到了理想的模拟效果。对全省不同烟区的模拟结果表明,生理发育时间模型在不同烟区的预测效果也有差异,尤其在纬度和海拔较低的临沧,由于光抑制突出,使该区预测偏差较大。团棵期之后,临沧烟区日照时间偏长,对短日作物抑制明显,导致预测生育进度大大推迟于实际生育进度。这种偏差在纬度和海拔较高的烟区就不明显。

生长期度日法作为一种更简便和实用的预测作物生育期的方法,数据获取便利,更适合于大田生产需要,但由于其假定发育速度与温度之间呈线性关系,忽略了温度适宜性,特别是当环境温度在各界限温度之间时,发育速率恒定,而当环境温度在适宜温度

范围之外时,未计算高温的迟滞作用,同时未考虑光周期效应的抑制作用,导致了误差的扩大^[23]。

本文根据生理发育时间恒定和生长期度日恒定的原理,结合云南烤烟种植特点,建立了两套生育期预测模型。结果表明,利用生理发育时间模型预测烤烟生长发育期,能达到更准确的模拟效果,生理发育时间法的模拟效果优于生长期度日法,这与国内外大多相关研究结果基本一致^[24-26]。生长期度日法对品种基因型要求低,模型参数少,使用简便,可增加观测数据对模型参数进行适当修正,以求达到更理想的模拟效果^[27]。误差的产生主要是因为建模过程中使用的光、温数据精度较低,以及人为因素影响了生育期观测和移栽期时间,导致模型参数的精度降低。

参考文献

- [1] Department of Rural Social and Economic Survey of the National Bureau of Statistics of China (国家统计局农村社会经济调查司). China Rural Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2008 (in Chinese)
- [2] Huang Z-Y (黄中艳). Dynamic area-partition evaluation of flue-cured tobacco planting climates in Yunnan based on GIS. *Geographical Research* (地理研究), 2011, **30**(8): 1440-1448 (in Chinese)
- [3] Hu X-Q (胡雪琼), Huang Z-Y (黄中艳), Zhu Y (朱勇), et al. Climatic division and suitability for tobacco cultivation in Yunnan. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (南京气象学院学报), 2006, **29**(4): 563-568 (in Chinese)
- [4] Xiong S-P (熊淑萍), Ma X-M (马新明), Shi Y-Y (石媛媛), et al. Study on dynamic simulation model for relationship between growth and environmental factors at different tobacco growth and development stage. *Journal of Henan Agricultural University* (河南农业大学学报), 2005, **39**(3): 321-325 (in Chinese)
- [5] Liu T-M (刘铁梅), Xie G-S (谢国生). Agricultural

- Systems Analysis and Simulation. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)
- [6] Diepen CA, Wolf J, Keulen H, et al. WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 1989, **5**: 16–24
- [7] Wang S-L (王石立), Ma Y-P (马玉平). The progress in application of crop growth simulation models to agrometeorological services in China. *Meteorological Monthly* (气象), 2008, **34**(6): 3–10 (in Chinese)
- [8] Heulen H, Diepen CA. Crop growth models and agro-ecological characterization. Proceedings of the First Congress of the European Society of Agronomy, Paris, 1990: 1–16
- [9] Li X-Y (李晓燕), Huang W (黄 韶), Ni X (倪霞), et al. Analysis of ecological and climatic suitability of cured tobacco in Zhaotong City. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2008, **29** (2): 197–201 (in Chinese)
- [10] Yu C-F (于川芳), Li X-H (李晓红), Luo D-S (罗登山), et al. Relationships between appearance quality and major chemical components of flue-cured tobacco grown at Yuxi. *Tobacco Science* (烟草科技), 2005 (1): 5–7 (in Chinese)
- [11] Zhong C (钟 楚), Wang Y (王 谷), Chen Z-Y (陈宗瑜), et al. Responses of *Nicotiana tabacum* morphology and photosynthetic physiology to reduced ultraviolet-B radiation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2358–2366 (in Chinese)
- [12] Ni J-H (倪纪恒), Luo W-H (罗卫红), Li Y-X (李永秀), et al. Simulation of the develop of tomato in greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(6): 1219–1225 (in Chinese)
- [13] Liu T-M (刘铁梅), Cao W-X (曹卫星), Luo W-H (罗卫红), et al. Calculation of physiological development time and prediction of development stages after heading. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2000, **20**(3): 29–34 (in Chinese)
- [14] Wang J-C (王冀川), Ma F-Y (马富裕), Feng S-L (冯胜利), et al. Simulation model for the development stages of processing tomato based on physiological development time. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(7): 1544–1550 (in Chinese)
- [15] Cao W, Moss DN. Modeling phasic development in wheat: A conceptual integration of physiological components. *Journal of Agricultural Science*, 1997, **129**: 163–172
- [16] Yan H-H (颜合洪), Zhao S-Y (赵松义). Influence of main ecological factors on development character of flue-cured tobacco variety. *Chinese Tobacco Science* (中国烟草科学), 2001(2): 15–18 (in Chinese)
- [17] He S-H (贺升华), Ren W (任 炜). *Tobacco Meteorology*. Kunming: Yunnan Technological Press, 2001 (in Chinese)
- [18] Zhang L-Z (张立祯), Cao W-X (曹卫星), Zhang S-P (张思平), et al. Simulation model for cotton development stages based on physiological development time. *Cotton Science* (棉花学报), 2003, **15**(2): 97–103 (in Chinese)
- [19] Shi Z-P (施泽平), Guo S-R (郭世荣), Kang Y-Y (康云艳), et al. Simulation of greenhouse muskmelon development based on growing degree days. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2005, **28**(2): 129–132 (in Chinese)
- [20] Hu Q-X (胡清秀), Guan D-P (管道平), Yang X (杨昕), et al. Study on the developmental simulation model of *Pleurotus eryngii*. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2011, **27**(25): 147–152 (in Chinese)
- [21] Agricultural Institute of Yunnan Academy of Tobacco Science (云南省烟草农业科学研究院农业研究所). Planting Division of Flue-cured Tobacco in Yunnan Province Based on GIS. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)
- [22] Huang Z-Y (黄中艳), Zhu Y (朱 勇), Wang S-H (王树会), et al. Relationship between tobacco quality and climates in Yunnan. *Resources Science* (资源科学), 2007, **29**(2): 83–89 (in Chinese)
- [23] Ye Q (叶 清), Yang X-G (杨晓光), Li Y (李勇), et al. Change of China agricultural climate resources under the background of climate change. VIII. Change characteristics of heat resources during the growth period of double cropping rice in Jiangxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(8): 2021–2030 (in Chinese)
- [24] Yuan C-M (袁昌梅), Luo W-H (罗卫红), Zhang S-F (张生飞), et al. Simulation of the development of greenhouse Muskmelon. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2005, **32**(2): 262–267 (in Chinese)
- [25] Yang Z-Q (杨再强), Luo W-H (罗卫红), Chen F-D (陈发棣), et al. A simulation model for predicting the development stage and harvesting date of standard cut chrysanthemum in greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(6): 1229–1235 (in Chinese)
- [26] Zhu Y (朱 艳), Cao W-X (曹卫星), Dai Y-B (戴延波), et al. A dynamic knowledge model for wheat target yield design and variety selection. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(2): 231–236 (in Chinese)
- [27] Liu S-Y (刘淑云), Gu W-G (谷卫刚), Feng W-J (封文杰), et al. Study of simulation model of sweet potato plants development based on growing degree days. *China Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2010, **26**(23): 130–133 (in Chinese)

作者简介 张明达,男,1982年生,工程师。主要从事农业气象及气候变化研究,发表论文2篇。E-mail: rockerdada@163.com

责任编辑 杨 弘