

基于不同温光尺度的烟草叶片发生模拟模型的建立与验证

王德权¹ 刘中庆¹ 赵清海¹ 赵洪军¹ 孙刚¹
王毅¹ 孙延国² 石屹² 姜滨³ 吴开成³

(¹山东潍坊烟草有限公司, 261061, 山东潍坊; ²中国农业科学院烟草研究所/农业农村部烟草生物学与加工重点实验室, 266101, 山东青岛; ³中国烟草总公司山东省公司, 250101, 山东济南)

摘要 为准确模拟烟草叶片发生进程、为烟叶生产精准管控提供参考依据, 2022-2023年连续2年设置不同移栽期田间对比试验, 建立基于不同尺度的烟草叶片数目变化动态模型, 分析不同模型的模拟精度。结果表明, 叶片发生速率随移栽期推迟而加快, 达到最大叶片数的时间缩短, 不同移栽期最终叶片数目基本一致; 烟草叶片发生模型为无稳定增长期的非典型“S”型生长曲线; 生长度日模型精度高于生长天数模型, 在温度变化处于适宜范围时具有一定的实用性, 温光效应模型精度高于生长度日模型, 但预测精度在年度间存在波动, 生理发育时间模型精度高于其他模型; 山东烟区在4月下旬至5月下旬的移栽时间范围内, 烟草叶片数目达到最大值的时间为37.63~46.62, 生长度日为440.06~483.04, 温光效应值为30.17~34.36, 生理发育时间为29.13~31.80。基于生理发育时间的烟草叶片发生模型具有更高的可靠性与普适性, 可准确表征植株发育进程, 为烟叶生产精准管理提供支撑。

关键词 烟草; 叶片发生; 温度; 光照; 模拟模型

叶片通过光合作用、蒸腾作用及气体交换等功能为植物提供生长动力, 是植物地上部分最重要的器官^[1]; 以叶片数目表征作物生育进程的叶龄模式已在多种作物中广泛应用^[2-3], 是建立各项调控技术指标精准化的数字化生产技术体系基础^[4]。烟草是一种特殊的经济作物, 以收获叶片为生产目标, 叶片数与烟叶产量和品质密切相关^[5-6], 因此研究叶片发生规律, 模拟叶片数目动态变化曲线, 对于精准预测生育进程和有效叶片数, 进而实施精准栽培管理具有重要意义。

作物生长发育模拟模型主要对生育期内的生理生态过程及其与生态条件的关系进行动态模拟与预测^[7], 是现代农业生产信息化和数字化的基础^[8], 在诸多农业领域得到应用, 成为农业生产定量评价的重要手段^[9], 其中, 叶片数目动态模拟是作物生长模型的重要组成部分。温度和光照是影响作物生长发育进程的主要环境因素, 关于作物叶片数目动态及叶龄发育的模拟前人开展较多研究, 分别以有效积温、热时间、辐热积和生理发育时间等为变量, 在水稻^[4]、玉米^[10]、棉花^[11]和番茄^[3]等

多种作物上建立叶龄发育模拟模型, 为烟草叶片数目发育模型的研究提供有益借鉴。

研究^[12-13]表明, 温光条件是影响烟草生长发育、产量和品质形成的最重要环境因子, 因此, 建立烟草叶片生长发育模型必须考虑温度和光照因素。前人^[14-16]针对烟草叶片生长规律模拟模型构建已开展了较多研究, 但对于烟草叶片发生过程的量化描述研究较少。陈钊等^[17]利用 Logistic 方程构建烟草叶片数目变化模型, 该方程以生长时间为尺度, 是固定拐点的方程。为了精准模拟烟草叶片发生进程, 本研究在山东烟区设置不同移栽期大田对比试验, 设置不同的温度和光照条件, 建立基于不同温光尺度的烟草叶片发生动态模型, 并分析各模型的模拟预测精度, 明确山东烟区适宜的烟草叶片数目动态模拟模型, 为烟草生长预测与智慧管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于2022-2023年在山东省诸城市贾悦镇琅埠

作者简介: 王德权, 主要从事烟草栽培研究, E-mail: wdq_0418@163.com

孙延国为通信作者, 主要从事烟草栽培研究, E-mail: sunyanguo@caas.cn

基金项目: 山东潍坊烟草有限公司科技项目(2023-48); 中国烟草总公司山东省公司重点项目(202001); 中国烟叶公司烟叶技术改进项目(3032307); 中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-TRIC03)

收稿日期: 2024-08-21; 修回日期: 2024-09-27; 网络出版日期: 2025-01-24

村 (36.0021° N, 119.1242° E) 开展大田试验, 供试土壤为褐土。2022 年供试土壤理化性质为 pH 7.5、有机质 12.15 g/kg、碱解氮 62.86 mg/kg、有效磷 24.40 mg/kg、速效钾 185.84 mg/kg; 2023 年供试土壤理化性质为 pH 7.7、有机质 11.50 g/kg、碱解氮 58.72 mg/kg、有效磷 26.81 mg/kg、速效钾 195.09 mg/kg。

2 年供试烟草品种均为中川 208。2 年均设置不同移栽期试验, 其中 2022 年试验设置 4 个移栽处理, 分别为 4 月 21 日 (A1)、5 月 1 日 (A2)、5 月 11 日 (A3) 和 5 月 21 日 (A4); 2023 年试验设置 3 个移栽处理, 分别为 4 月 25 日 (B1)、5 月 5 日 (B2) 和 5 月 15 日 (B3)。各试验均采用随机区组排列, 设置 3 次重复, 其他田间管理措施均按当地优质烟叶生产方案执行, 保持各小区一致性。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 气象数据 通过试验田周边的小型气象站, 采集烟草生育期内气温和太阳总辐射数据, 利用 BYT-DRT-2-2 直接辐射式日照计 (北京中慧天试科技有限公司) 测量烟草生育期内日照时数。

1.2.2 叶片数 2022 年, 各处理在移栽时以及移栽后每隔 7 d, 于每个小区选取 3 株烟苗, 自第 1 片真叶起测量叶片数及每片叶的叶片长、宽; 将茎顶端叶芽 (自茎尖向下约 5 cm) 取下, 用 FAA 固定液 (用 70%乙醇配制) 固定, 乙醇脱水后, 置于体视显微镜 (45 倍) 下观察测量叶片数及叶片长、宽, 检测顶端叶芽分化情况^[18]; 2023 年, 各处理在移栽时以及移栽后每隔 10 d, 于每个小区选取 3 株烟苗测量, 方法同 2022 年。

1.3 模型构建

1.3.1 模型自变量计算 烟草叶片发生模型采用 4 个自变量进行, 分别为生长天数 (growing days, GD)、生长度日 (growing degree days, GDD)、温光效应 (thermal-photo effectiveness, TPE) 和生理发育时间 (physiological development time, PDT)。

某一生育阶段生长度日^[19]计算公式:

$$GDD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_0) \quad (T_i > T_0) \quad (1)$$

式中, T_i 为第 i 日平均温度, T_0 (生物学零度) 定为 10 °C, n 为生育期天数。当 $T_i \leq T_0$ 时, 该日 GDD=0。

温光效应指温度和光照辐射的互作效应, 又称

为辐热积^[14]; 温度效应用相对热效应 (relative thermal effectiveness, RTE) 表示, 定义为作物在实际温度下生长 1 d 相当于最适宜温度下生长 1 d 的比例, 取值范围 0~1; 光照辐射效应用相对光照辐射效应 (relative photo radiation effectiveness, RPRE) 表示, 定义为作物在实际辐射下生长 1 d 相当于在最适辐射下生长 1 d 的比例, 取值范围 0~1^[14]。

每日相对热效应采用三段线性函数计算^[14]:

$$RTE = \begin{cases} (T - T_b) / (T_{ob} - T_b) & (T_b \leq T < T_{ob}) \\ 1 & (T_{ob} \leq T \leq T_{ou}) \\ (T_m - T) / (T_m - T_{ou}) & (T_{ou} \leq T \leq T_m) \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_b 为发育下限温度, T_m 为发育上限温度, T_{ob} 为发育最适温度下限, T_{ou} 为发育最适温度上限, 当 $T < T_b$ 或 $T > T_m$ 时, RTE=0。烟草各生育时期三基点温度参考相关文献^[5]。

每日相对光照辐射效应计算公式^[20]:

$$PAR = 0.5 \times Q \quad (3)$$

$$R = \sum_{i=1}^{24} PAR_i \quad (4)$$

$$RPRE = 1 - e^{-R} \quad (R > 0) \quad (5)$$

式中, PAR 为 1 h 内的总光合有效辐射, Q 为该小时内的太阳总辐射, 0.5 表示光合有效辐射在太阳总辐射中所占的比例^[20]; PAR_i 为第 i 小时内的太阳光合有效辐射 (MJ/m²), R 表示每日 24 h 内的总光合有效辐射值。

温光效应计算公式^[20]如下:

$$TPE_i = RTE \times RPRE \quad (6)$$

$$TPE = \sum_{i=1}^n TPE_i \quad (7)$$

式中, TPE_i 为某一生育期内第 i 天温光效应, TPE 为某一生育期内温光效应。

生理发育时间指作物在最适温光条件下完成发育所需的最短时间, 作物在最适温光条件下生长 1 d 定义为 1 个生理发育日^[20], 由相对热效应和相对光周期效应 (relative photoperiod effectiveness, RPE) 共同决定, 相对光周期效应定义为作物在实际光周期条件下生长发育与在最适光周期条件下生长发育的比例, 取值范围 0~1^[20]。相对热效应计算方法同温光效应中热效应的计算。

每日相对光周期效应采用以下公式^[20]计算:

$$RPE = \begin{cases} 0 & (DL \geq DL_c) \\ (DL_c - DL) / (DL_c - DL_o) & (DL_c > DL > DL_o) \\ 1 & (DL \leq DL_o) \end{cases} \quad (8)$$

式中, DL_c 为临界日长, 取值 14 h, DL_o 为最适日长, 取值 10 h, DL 为实际日长^[21]。

生理发育时间计算公式^[21]如下：

$$PDT_i = RTE \times RPE \quad (9)$$

$$PDT = \sum_{i=1}^n PDT_i \quad (10)$$

式中， PDT_i 为某一生育期内第 i 天生理发育效应， PDT 为某一生育期内生理发育时间。

1.3.2 模型构建 采用第 1 年试验不同移栽期处理的数据分别构建叶片发生模拟模型，并将所有处理数据汇总建立综合模拟模型。叶片数目模拟模型运用 Richards 方程 $Y=A/(1+e^{-Kx})^{1/N}$ 建立，式中， x 表示自变量生长天数、生长度日、温光效应和生理发育时间等， Y 表示因变量叶片数， A 为最终叶片数目参数， B 为叶片数目初值参数， K 为叶片数目生长速率参数， N 为叶片数目形状参数^[22]。对方程求导，可获得生长速率 (V)、平均生长速率 (V_a)、最大生长速率 (V_{max})、达到最大生长速率时的时间 (T_{Vmax})、达到最大生长速率时的生长量 (W_{Vmax})、缓慢增长期与快速增长期的拐点值 (T_1)、快速增长期与稳定增长期的拐点值 (T_2)、生长量达最大量 99% 的拐点值 (T_3) 等特征参数^[22]。

1.3.3 模型检验 利用 2 年试验的数据分别对综合模拟模型进行检验。计算各模型模拟值与实测值的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和相对误差 (relative error, RE)，对模拟符合度进行分析，RMSE 和 RE 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。同时绘制观测值与模拟值的 1:1 关系图，检验模型的可靠性^[16]。

1.4 数据处理

利用 Excel 2019 软件进行数据分析与作图；利用 SPSS 22 软件构建烟草叶片数目模型。

2 结果与分析

2.1 不同移栽期条件下气温与光照分析

2022 和 2023 年不同移栽期条件下平均气温、太阳总辐射和日照时数如图 1 所示。不同移栽期下同一生长时期的气温、太阳辐射和日照时数存在较明显的差异。从整个时期来看，随移栽期推迟，平均气温呈现升高趋势，太阳辐射和日照时数呈现略降趋势。

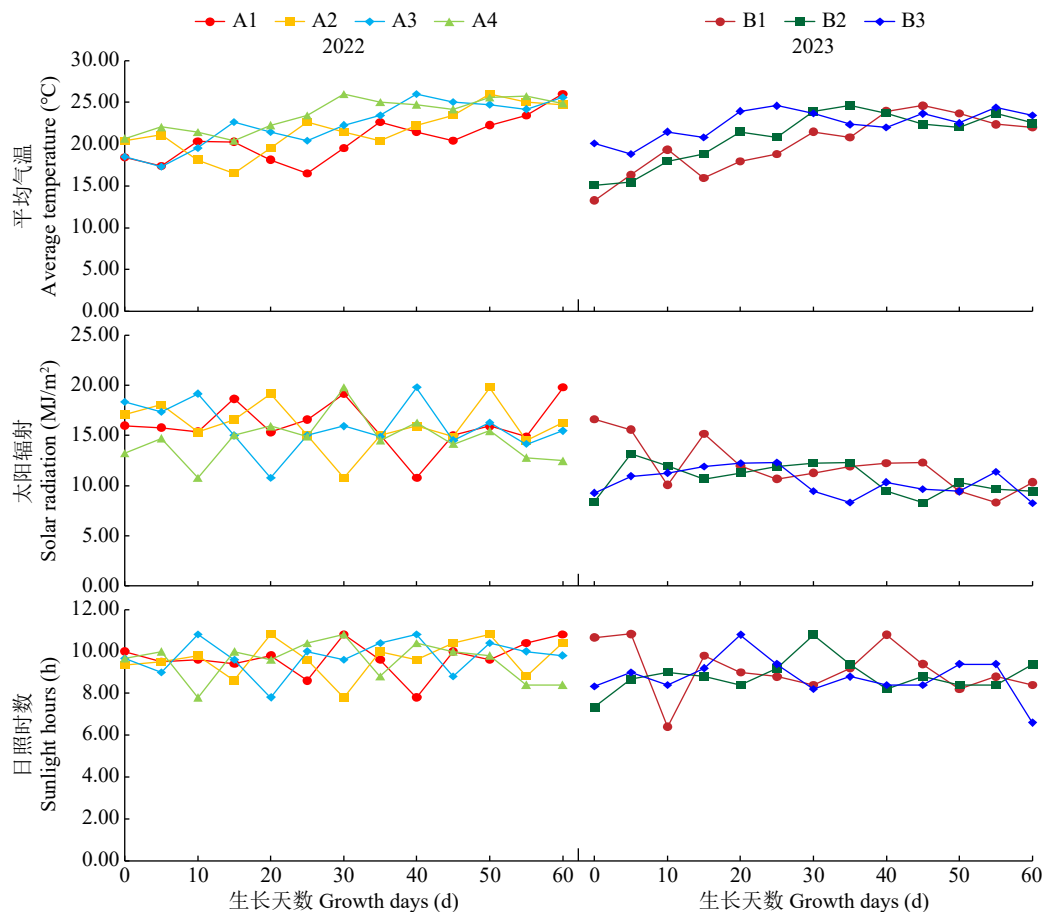


图 1 不同移栽期下气象数据
Fig.1 Meteorological data at different transplanting periods

2.2 烟草叶片发生模拟模型的建立

烟草叶片数目动态变化模型的参数如表 1 所示，模型示意图如图 2 所示。各处理模型 R^2 值均大于 0.990，表明方程对数据的拟合度较好，且达到极显著水平；综合模型 R^2 值大小顺序为 PDT=

TPE>GDD>GD，表明 PDT 和 TPE 模型模拟准确性更高。不同移栽期最终叶片数目(A)基本一致。以生长天数为自变量，不同移栽期叶片发生曲线差异较大，达到最大叶数的时间随移栽期推迟而减少；不同处理生长度日模型曲线差异较小，温

表 1 烟草叶片发生模型参数
Table 1 Parameters of tobacco leaf initiation dynamic model

自变量 Independent variable	处理 Treatment	模型参数 Model parameter				R^2
		A	B	K	N	
生长天数 GD	A1	40.833	689.746	14.693	479.172	0.997**
	A2	40.667	583.130	13.438	422.498	0.996**
	A3	40.814	709.781	17.309	497.594	0.997**
	A4	40.748	445.869	11.766	310.362	0.998**
	均值	40.645	708.780	16.903	504.512	0.990**
生长度日 GDD	A1	41.026	23.013	0.053	16.493	0.996**
	A2	40.681	52.997	0.122	40.449	0.995**
	A3	40.855	39.364	0.086	30.243	0.996**
	A4	40.918	43.451	0.092	31.475	0.995**
	均值	40.872	44.227	0.098	32.783	0.993**
温光效应 TPE	A1	41.170	13.540	0.461	9.520	0.996**
	A2	40.693	45.184	1.527	34.277	0.995**
	A3	40.834	62.262	2.027	47.644	0.998**
	A4	40.833	80.168	2.547	58.131	0.995**
	均值	40.852	51.784	1.696	38.553	0.995**
生理发育时间 PDT	A1	41.068	16.826	0.593	12.239	0.996**
	A2	41.048	27.059	0.937	20.518	0.995**
	A3	40.913	61.947	2.144	47.064	0.996**
	A4	40.833	64.961	2.199	46.130	0.995**
	均值	40.847	43.558	1.521	32.177	0.995**

“**”: $P < 0.01$.

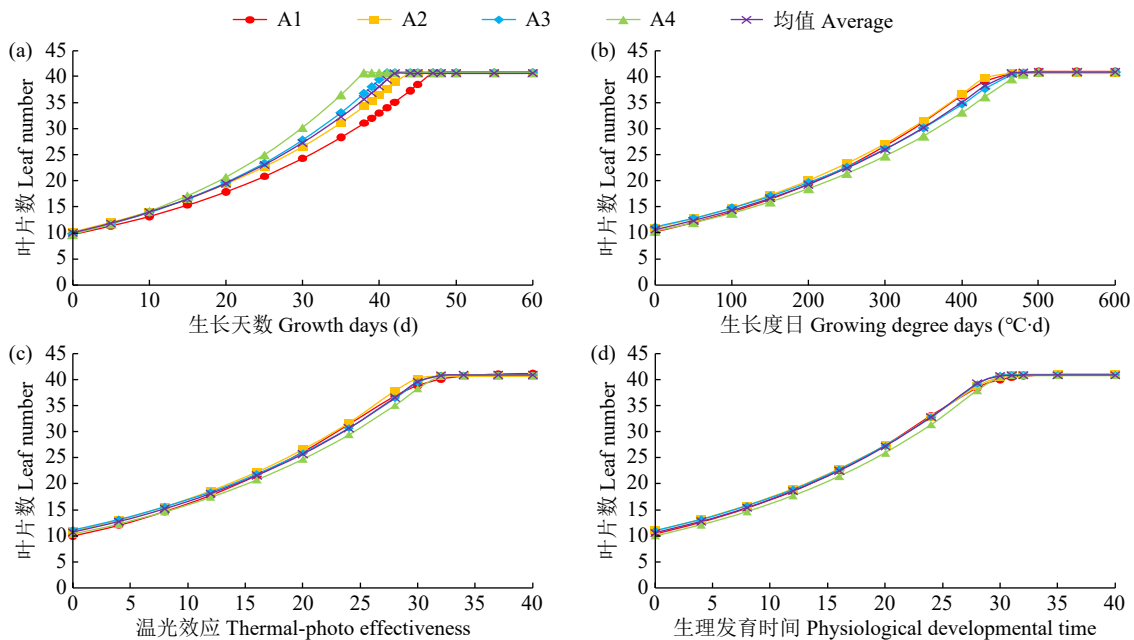


图 2 烟草叶片发生模拟模型
Fig.2 Simulation model of tobacco leaf development

光效应、生理发育时间模型曲线差异最小。

2 所示，实测值与模拟值比较关系如图 3 所示。2

2.3 烟草叶片发生模型的检验

年检验的综合模型 RMSE 和 RE 值的大小顺序均为

2 年试验数据对综合模拟模型的检验结果如表

PDT < TPE < GDD < GD，生长天数模型模拟数值

表 2 烟草叶片发生模型检验

Table 2 Model verification of tobacco leaf development

年份 Year	处理 Treatment	均方根误差 RMSE				相对误差 RE (%)			
		生长天数 GD	生长度日 GDD	温光效应 TPE	生理发育时间 PDT	生长天数 GD	生长度日 GDD	温光效应 TPE	生理发育时间 PDT
2022	A1	2.29	1.00	0.84	0.89	8.89	3.89	3.26	3.46
	A2	0.92	1.16	1.02	0.97	3.58	4.52	3.96	3.79
	A3	0.98	0.71	0.68	0.76	3.54	2.57	2.45	2.75
	A4	2.40	1.18	1.14	1.07	8.66	4.25	4.10	3.84
	均值	1.78	1.01	0.98	0.91	6.67	3.80	3.43	3.42
2023	B1	2.93	0.91	0.90	0.75	12.82	3.99	3.96	3.30
	B2	0.79	1.07	0.96	0.86	3.17	4.34	3.88	3.46
	B3	1.81	0.98	1.03	0.94	6.89	3.71	3.92	3.59
	均值	2.04	0.99	0.97	0.85	8.28	4.01	3.92	3.47

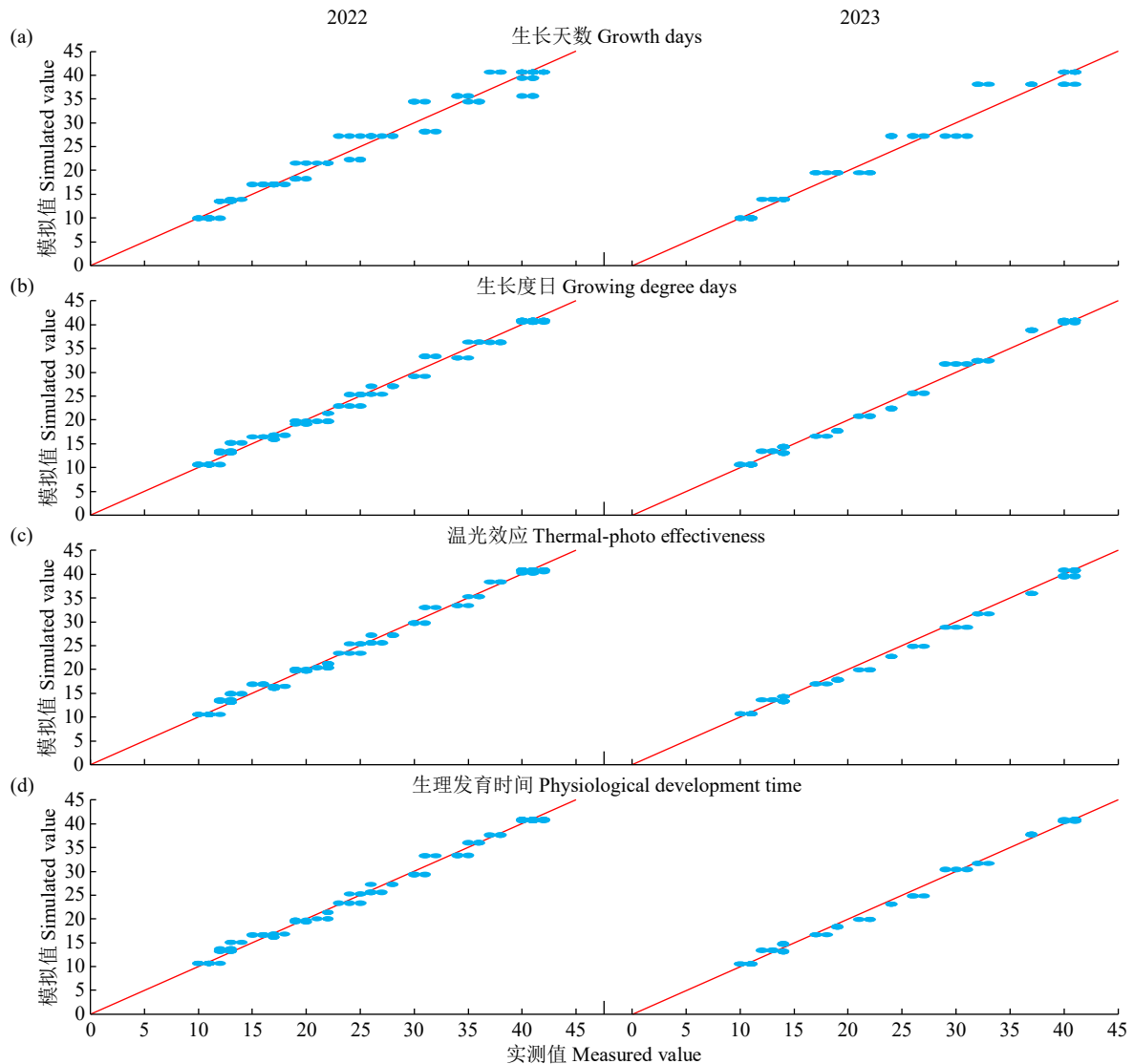


图 3 烟草叶片数目模拟值与实测值比较

Fig.3 Comparison between simulated and measured values of tobacco leaf number

的离散度最高，生长度日模型和温光效应模型较小，生理发育时间模型最小，均表明生理发育时间模型精度最高，温光效应模型和生长度日模型次之，而生长天数模型最差。

生长天数模型对特定时间段（5月上旬）移栽的烟草叶片发生进程模拟效果较好，而对移栽过早或过晚的模拟效果较差，其 RMSE 和 RE 值均大幅提高；生长度日模型和温光效应模型在大部分移栽时间下具有较好模拟效果，其中温光效应模型精度在大部分条件下高于生长度日模型；生理发育时间模型在不同移栽期条件下均具有较好模拟效果，且其模型精度在大部分条件下高于生长度日模型和温光效应模型。相比 2022 和 2023 年生长天数模型、生长度日模型和温光效应模型的 RE 值均有一定程度提高，而生理发育时间模型

的 RE 值增加幅度最小，表明生理发育时间模型在年度间准确度更高。

2.4 不同移栽期条件下烟草叶片发生速率分析

不同移栽期下烟草叶片发生速率如图 4 所示，各模拟模型叶片发生速率均表现先增大，后迅速降为 0，表现出非典型“S”型生长曲线特征。以生长天数为自变量时，各处理叶片发生速率存在较大差异，随移栽期推迟，叶片发生速率呈现加快规律，达到最大速率的时间缩短；以生长度日和温光效应为自变量时，A3 和 A4 处理叶片发生速率较 A1 和 A2 处理降低，达到最大速率的生长度日和温光效应随移栽期推迟增加；以生理发育时间为自变量时，各处理叶片发生速率相近似，达到最大速率的生理发育时间移栽期推迟略微增加。

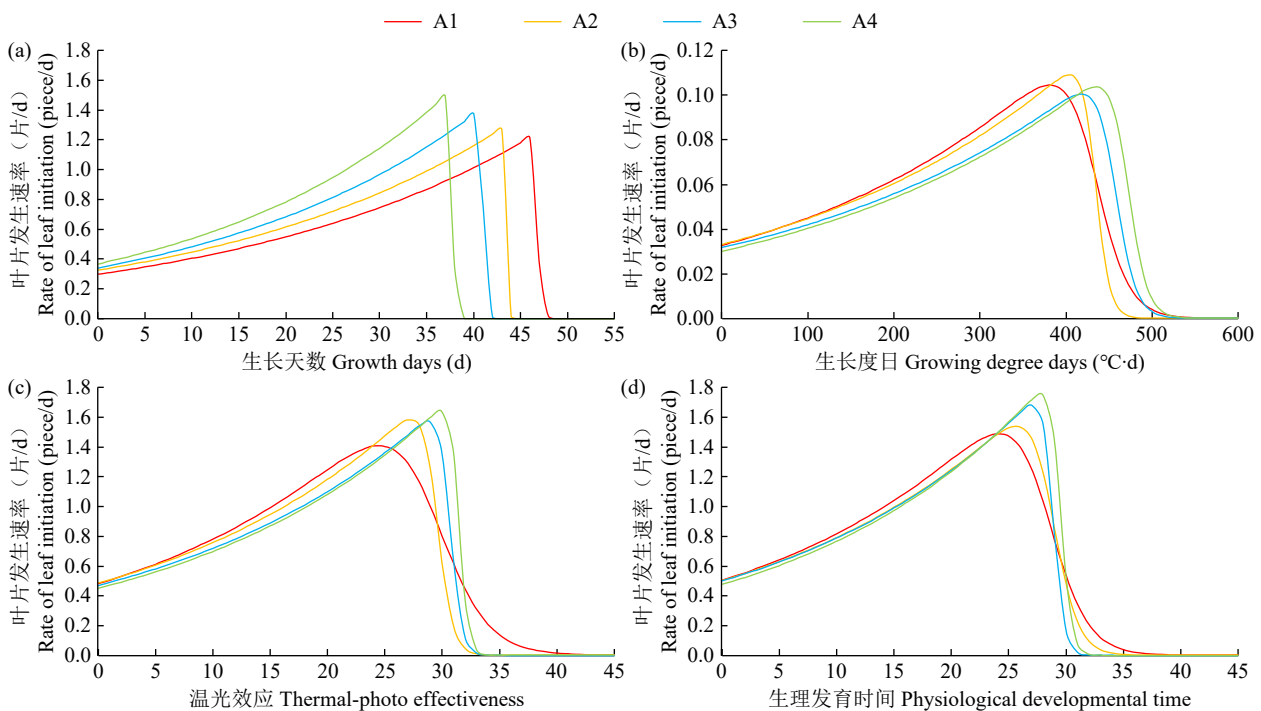


图 4 烟草叶片发生速率
Fig.4 Rate of tobacco leaf initiation

2.5 烟草叶片发生特性分析

对不同移栽期条件下基于各个尺度的烟草叶

片发生模型进行推导，获得各模型的特征参数如表 3 所示。各模型的 T_2 与 T_3 值均基本一致，表明

表 3 烟草叶片发生模型特征参数

Table 3 Characteristic parameters of tobacco leaf initiation dynamic model

自变量 Independent variable	V_a	V_{max}	T_{Vmax}	W_{Vmax}	T_1	T_2	T_3
生长天数 GD	0.62~0.77	1.23~1.51	37.41~46.52	40.00~40.31	36.92~46.10	37.90~46.94	37.63~46.62
生长度日 GDD	0.05~0.06	0.10~0.11	381.32~434.80	34.49~37.10	325.33~396.33	434.98~473.27	440.06~483.04
温光效应 TPE	0.82~0.86	1.41~1.64	24.48~29.88	32.15~38.07	19.01~28.27	29.64~31.50	30.17~34.36
生理发育时间 PDT	0.85~0.93	1.49~1.75	24.15~27.80	33.25~37.67	19.56~26.03	28.74~29.57	29.13~31.80

叶片发生过程几乎无稳定增长阶段。从 3 个时期的拐点数值 T_1 、 T_2 和 T_3 来看, 以不同尺度模拟不同移栽期条件下烟草叶片发生进程的变化幅度顺序是 $PDT < TPE < GDD < GD$, 表明生理发育时间在模拟不同条件下叶片发生进程的精度高于其他模型。在 4 月下旬到 5 月下旬的移栽时间范围内, 烟草叶片分化完成, 即数目达到最大值的时间为 37.63~46.62, 生长度日为 440.06~483.04, 温光效应值为 30.17~34.36, 生理发育时间值为 29.13~31.80。

3 讨论

烟草叶原基生长 7~10 d, 长度达到 0.1 cm 左右时, 叶轴两侧开始向外伸展形成侧翼状, 即为叶片形成, 通过体视显微镜可精准观测烟草叶片初始形态, 确定生物学叶片数目^[5]。本研究表明, 大田期烟草叶片发生速率是一个逐渐加快又突然下降为 0 的过程, 本文中构建的多个方程均显示叶片数目变化曲线几乎无稳定增长期阶段, 呈现非典型“S”型特征, 与其他器官的生长过程存在差异, 但与生产实际情况相符, 这是因为烟草叶片快速发生至最大数目后, 茎顶端进入生殖生长阶段, 叶片数不再增加, 没有典型“S”型曲线中稳定增长的第 3 段过程, 因此出现叶片发生速率达到最大后骤然下降的现象。烟草叶原基分化完成后即进入花芽分化, 因此烟草叶片发生速率快慢也与开花时间密切相关, 而开花是影响植物生育进程的核心环节^[23]。叶和花均是植物茎顶端分化形成的侧生器官, 其分化发育过程都受到内部复杂调控网络与外部环境因素的共同影响^[1,23]。

对作物来说, 温度效应主要包含低温春化效应和高温热效应, 小麦^[24]等作物需要经过冬天一段时间低温才能在春季开花, 称为春化作用, 高温 (27 °C) 处理能够促进拟南芥开花, 而低温 (16 °C) 下生长的拟南芥则表现为晚花^[25], 称为热效应; 光照效应主要包含光周期和光合有效辐射效应, 植物茎尖分生组织的分化活性会随光照的变化而变化^[26]。外界环境温度和光照的变化会通过信号传递到相应调控途径, 进而影响茎顶端发育进程。对于烟草来说, 常规情况下温度影响主要体现在热促进效应, 但有研究^[27]表明, 烟苗

生长前期遭遇一段时间低温会导致早花现象, 烟草叶片数减少, 表现出一定的低温春化作用; 光照影响体现在光周期和光合有效辐射效应 2 个方面, 光周期调控发育进程^[20], 光合辐射主要影响生长进程^[14]。作物种植期的不同, 会导致其生长所处的温光条件发生变化, 进而影响其生长发育进程。本研究中, 烟草叶片发生速率随移栽期推迟而加快, 达到最大叶片数的时间缩短, 由方程特征参数推算, 叶原基分化结束、花芽分化的时间为 30~39 d, 正是各移栽期的团棵期, 与前期研究^[28]中烟草团棵时间随移栽期推迟显著缩短的结果相一致, 气温随移栽期推迟升高是发育进程加快的主要原因, 光照变化也起一定作用。

当前基于温光因素尺度的生长发育模拟已在主要作物中开展较多研究^[29]。王乐等^[11]采用有效积温对棉花叶龄动态进行分段模拟, 具有较好的实用性和可靠性; 王萌萌等^[30]优化建立基于光温组合要素的水稻群体茎蘖增长动态模型, 相比原模型具有更高精度与可靠性; 孟亚利等^[31]采用生理发育时间作为定量发育进程的尺度, 构建了预测水稻顶端发育阶段与物候期的模拟模型, 具有较强的解释性、系统性以及较好的预测性和实用性。有关烟草叶片生长和物质积累等生长过程的模拟分析也已开展较多工作^[14-16], 但关于烟草叶片数动态变化模型的研究较少。本研究综合考虑温度和光照的影响, 构建基于不同尺度的烟草叶片发生模型, 多项检验结果表明生长度日模型精度明显高于生长天数模型, 温光效应模型精度高于生长度日模型, 但在年度间仍存在波动, 生理发育时间模型精度最高。温光因素模拟模型建立的基本原理是作物发育的某一生育阶段的积温效应或温光效应基本恒定^[32]。生长度日法误差扩大的原因, 是由于其假定发育速度与温度之间呈线性关系, 同时未考虑光照效应的作用^[19]。研究^[33]表明, 水稻主茎各叶片出伸所需有效积温与叶位之间并非完全成直线或指数增长关系, 温度超出适宜范围时, 其与生长发育速率的关系是非线性的。温光效应模型和生理发育时间模型综合考虑温度非线性效应以及光照因素, 因其模型机理解释性较强, 广泛应用于作物模型研究中, 温光效应模型在多种作物的生长模拟中有较好效果^[30],

生理发育时间模型主要在作物发育过程模拟预测中应用^[25]。本研究中,叶片发生包含细胞分化、分裂和伸长等过程,涵盖发育与生长过程,对光周期效应与光辐射效应均产生影响。2年试验检测结果显示,温光效应模型精度在第2年有较明显下降,而生理发育时间模型精度仍保持最高,基本不变,说明烟草叶片发生的快慢可能主要决定于叶原基分化的速率,受光周期调控的影响更大。本研究建立的烟草叶片发生数目生理发育时间模型,在烟草生长前期气温、日照时数存在变化的烟区均可适用,但各地区的模型参数需结合当地温光条件进行确定。烟草叶片数目的变化表征了植株发育过程,与其他作物中利用叶龄动态变化推算生育进程和叶面积指数等的研究相通,可为烟草生产精准管理提供理论支撑。

4 结论

不同移栽期烟草最终叶片数目基本一致,但叶片数变化规律差异较大,随移栽期推迟叶片发生速率加快,达到最大叶片数的时间缩短;分别以生长天数、生长度日、温光效应和生理发育时间等为尺度构建烟草叶片数目动态模型,模型为非典型“S”型生长曲线,几乎无稳定增长期;2年试验检验结果表明,生长度日模型精度高于生长天数模型,在一定条件下具有使用价值,温光效应模型精度高于生长度日模型,但预测精度在年度间存在波动,生理发育时间模型精度高于其他模型,具有更高的可靠性与普适性。

参考文献

- [1] 乐丽娜,黄敏仁,陈英.植物叶形态建成的分子机理研究进展.分子植物育种,2016,14(11):3205-3213.
- [2] 石生辉,王吉,朱敏,等.不同叶龄期剪叶对春玉米籽粒灌浆及产量的影响.东北农业科学,2024,49(1):19-26.
- [3] 张智优,曹宏鑫,陈兵林,等.设施番茄发育期与叶龄动态模拟模型研究.中国农业气象,2011,32(4):550-557.
- [4] 吕伟生,曾勇军,石庆华,等.双季机插稻叶龄模式参数及高产品种特征.作物学报,2018,44(12):1844-1857.
- [5] 中国农业科学院烟草研究所.中国烟草栽培学.上海:上海科学技术出版社,2005.
- [6] 解梦凡,贾海江,曲远凯,等.种植密度和氮肥用量对百色烟区烤烟叶片发育及烟叶产量的影响.作物杂志,2024(2):189-197.
- [7] 刘福昊,郭申伯,王笛,等.设施番茄外观形态及物质累积分配模型构建与验证.农业工程学报,2022,38(21):188-196.
- [8] 蒙继华,王亚楠,林圳鑫,等.作物生长模型研究现状与展望.农业机械学报,2024,55(2):1-15,27.
- [9] 孙扬越,申双和.作物生长模型的应用研究进展.中国农业气象,2019,40(7):444-459.
- [10] 李忠辉,袁福香,郭春明,等.基于当量积温的春玉米叶龄模式研究.农学学报,2020,10(12):94-97.
- [11] 王乐,牛媛,曹志强,等.棉花叶龄动态的模拟研究.江苏农业科学,2018,46(4):68-73.
- [12] 吕大树,陈小龙,藏照阳,等.贵州省烤烟上部烟叶成熟期主要气象因素分析.烟草科技,2021,54(8):18-25.
- [13] 张继旭,张忠锋,刘文涛,等.不同光照强度对烤烟中上部叶片结构及物理性状的影响.西南农业学报,2019,32(2):322-326.
- [14] 张明达,李蒙,胡雪琼,等.基于辐热积法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量.生态学报,2013,33(22):7108-7115.
- [15] 招启柏,廖文程,孔光辉,等.移栽期对烤烟叶片生长动态的影响及其模型的建立.中国烟草学报,2013,19(4):41-54.
- [16] 孙延国,王永,张杨,等.烟草温光特性研究与利用:III.基于温光效应的烟草叶片生长模拟模型建立.中国烟草科学,2022,43(4):6-14.
- [17] 陈钊,魏子全,张骞,等.移栽期对烤烟品种龙江851生长规律的影响.现代化农业,2011(8):25-28.
- [18] 孙延国,董建新,吴元华,等.西南烟区主栽烟草品种叶片发生及生长模拟模型建立.中国农业科技导报,2018,20(8):29-38.
- [19] 钱益亮,崔会会,邵伏文,等.有效积温对烤烟叶龄及成熟度的影响.中国烟草科学,2013,34(6):15-19.
- [20] 宋洋,王学林,殷剑敏,等.三种光温模型在模拟水稻生育期中的应用与比较.生态学杂志,2014,33(12):3262-3267.
- [21] 张明达,朱勇,胡雪琼,等.基于生理发育时间和生长度日的烤烟生育期预测模型.应用生态学报,2013,24(3):713-718.
- [22] 李国强,汤亮,张文字,等.不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析.作物学报,2009,35(12):2258-2265.
- [23] 张艺能,周玉萍,陈琼华,等.拟南芥开花时间调控的分子基础.植物学报,2014,49(4):469-482.
- [24] 张鹏钰,卫丽,朱灿灿,等.普通小麦春化基因VRN3的表达分析及过表达载体构建.作物杂志,2016(2):63-67.
- [25] Balasubramanian S, Sureshkumar S, Lempe J, et al. Potent induction of *Arabidopsis thaliana* flowering by elevated growth temperature. PLoS Genetics, 2006, 2(7): e106.
- [26] 陆维超,赵建国,张莉,等.植物茎尖分生组织分化调控机制研究进展.西北植物学报,2016,36(5):1055-1065.
- [27] 金磊,晋艳,周冀衡,等.苗期低温对烤烟花芽分化及发育进程的影响.中国烟草科学,2007,28(6):1-5.
- [28] 孙延国,马兴华,黄择祥,等.烟草温光特性研究与利用:I.气象因素对山东烟区主栽品种生育期的影响.中国烟草科学,2020,41(1):30-37.
- [29] 董智强,王萌萌,李鸿怡,等.WOFOST模型对山东省夏玉米发育期与产量模拟的适用性评价.作物杂志,2019(5):159-165.
- [30] 王萌萌,杨沈斌,江晓东,等.光温要素对水稻群体茎蘖增长动态影响的分析及模拟.作物学报,2016,42(1):82-92.
- [31] 孟亚利,曹卫星,周治国,等.基于生长过程的水稻阶段发育与物候期模拟模型.中国农业科学,2003,36(11):1362-1367.
- [32] 严美春,曹卫星,罗卫红,等.小麦发育过程及生育期机理模型的研究:I.建模的基本设想与模型描述.应用生态学报,2000,11(3):355-359.
- [33] 冯阳春,魏广彬,李刚华,等.水稻主茎出叶动态模拟研究.中国农业科学,2009,42(4):1172-1180.

Establishment and Verification of a Simulation Model for Tobacco Leaf Initiation Based on Different Temperature and Light Scales

Wang Dequan¹, Liu Zhongqing¹, Zhao Qinghai¹, Zhao Hongjun¹, Sun Gang¹,
Wang Yi¹, Sun Yanguo², Shi Yi², Jiang Bin³, Wu Kaicheng³

(¹Shandong Weifang Tobacco Co., Ltd, Weifang 261061, Shandong, China;

²Institute of Tobacco Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao 266101, Shandong, China;

³China National Tobacco Corporation Shandong Province Company, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract In order to accurately simulate the initiation process of tobacco leaves and provided reference for precise management and control of tobacco production, field comparison experiments of different transplanting date treatments were carried out for two consecutive years from 2022 to 2023 to establish dynamic models of tobacco leaf changes based on different scales, and the simulation accuracy of different models was analyzed. The results showed that the rate of leaf initiation accelerated with the delay of the transplanting date, and the time to reach the maximum number of leaves was shortened. The final number of leaves (*A* value) in different transplanting dates was basically the same. The leaf initiation models of tobacco was an atypical “S” type growth curve with no stable growth period. The accuracy of the growing degree days model was higher than that of the growing day model, which had better practicality when the temperature changed in the appropriate range. The accuracy of the thermal-photo effectiveness model was higher than the growing degree days model, however, the prediction accuracy fluctuated across different years. The accuracy of the physiological development time model was higher than other models. The time for the tobacco leaves number to reach the maximum value was 37.63-46.62, the growing degree days was 440.06-483.04, the thermal-photo effectiveness value was 30.17-34.36, and the physiological development time was 29.13-31.80, in the transplanting date from late April to late May in Shandong tobacco area. The simulation model of tobacco leaf initiation based on physiological development time had higher reliability and universality, which could accurately characterize the process of plant development and provide support for the precise management of tobacco production.

Key words Tobacco; Leaf initiation; Temperature; Light; Simulation model