

苹果叶片生长模拟模型的建立

田雪亮¹, 胡小平², 杨家荣²

(1 河南科技学院 植物保护系, 河南 新乡 453003; 2 西北农林科技大学 植物保护学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 以有效积温为自变量, 以叶片面积、叶片日龄和叶片数量为依变量建立苹果叶片生长模型。该模型包含有效积温子模型、单叶面积子模型、单枝叶面积子模型、单枝叶片日龄子模型、单枝叶片数量子模型和单树叶片生长子模型。通过Delphi程序将各子模型联接, 逐日计算单树叶片总面积、单树叶片日龄和单树叶片总数量。对田间实测数据与模型模拟数据进行相关性分析, 以检验模型的准确度。结果表明, 相关系数分别为0.997, 0.972和0.974, 说明该模型结构合理并具有较高的准确度。

[关键词] 苹果; 叶片; 叶片面积; 生长模型

[中图分类号] S661.101

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2006)04-0105-05

“病害三角”提出了病原生物、寄主植物和环境条件三者之间的关系。寄主植物作为病原菌的寄生场所和营养来源, 在病害流行过程中起着重要作用。寄主植物有其自身的生命周期, 而这种周期显著影响寄主的抗病性及病害的流行。在植物病害流行模拟模型研究中, 寄主植物生长模型是必不可少的组成部分。目前, 众多植物病害流行模拟模型中的寄主生长模型都是极为简单的作物模型, 其功能仅能满足病害模拟模型辅助变量的需要, 如能结合栽培学中的作物生长模型, 便可提高病害模拟模型的精确度和准确度, 但有些作物模型不能满足病害模拟的需要, 还需加以改造。大多作物生长模型均以有效积温作为模型的驱动变量^[1], 因为一般作物完成整个生育期所需积温值相对稳定, 若作物生长阶段环境和温度均最适宜, 则积温值可表征作物生育期长度。

苹果叶片是各种苹果叶部病害的载体, 其面积的动态变化与病害发生流行密切相关。因此, 本研究建立以有效积温为驱动变量的苹果叶片生长模拟模型(Simulative Model for apple Leaf Growth), 以期苹果叶部病害流行的模拟模型提供必备组件。

1 材料与方法

1.1 调查果园状况

果园位于陕西省旬邑县太村镇, 园地海拔1 200 m, 年降雨量500~600 mm。苹果树于1995年春定植, 树龄8年, 品种为富士。定植密度4 m×4 m, 采用

传统整形修剪法修剪。

1.2 气象资料来源

由自动气象站(澳大利亚产)逐时记载温度, 每隔2个月下载温度资料。统计1997~2003年4~7月的日最高、最低气温资料, 采用正弦法^[2]计算有效积温, 用SA S 8.1数据分析软件^[3]进行统计分析。

1.3 叶片面积计算

选择主叶脉长度为2~10 cm的富士苹果叶片共20张, 测量主脉及叶片最大宽度, 计算长宽乘积, 并称量叶片湿重。将叶片扫描入计算机, 用Photoshop软件计算叶面积。

1.4 叶片相关参量和新生枝条总数的田间调查

每树选择东、南、西、北、中5个方位, 共计50个枝条。自第一片叶展开后直至07-26, 每隔5 d调查1次枝条上每片叶的主脉长度、最大宽度、生长天数及每个枝条上的叶片数量。分别于5月、6月、7月上旬随机调查1次10株苹果树的新生枝条总数, 计算单株果树新生枝条总数。

1.5 模型组装

在Delphi语言环境下, 采用面向对象的程序设计方法将各个子模型耦合联接。

1.6 模型检验

自调查之日起, 每隔10 d随机选择1株苹果树, 采摘树上所有叶片, 统计数量, 并称其质量。利用叶片面积与叶片湿重关系式计算叶片面积; 对单树叶面积、单树叶片数量的田间实测数据和未参与建模

· [收稿日期] 2005-08-16

[基金项目] 欧盟科技合作项目(ICA 4-CT-2001-10001)

[作者简介] 田雪亮(1978-), 男, 河北保定人, 助教, 硕士, 主要从事植物病理学研究。

的叶片日龄数据与苹果叶片生长模拟模型的模拟数据进行相关性检验^[4],以检测模型的准确度。

2 结果与分析

2.1 有效积温子模型的构建

陕北地区富士苹果萌芽的时间为04-10左右,因此以04-10为有效积温的起点,以后天数为自变量,有效积温为依变量,构建函数:

$$A TM = 1790236 + 1876935 \cos(0.015D + 3.472),$$

$$D \in [1, 98], R^2 = 0.999 \quad (1)$$

式中, $A TM$ 为有效积温, D 为04-10后天数。判断所构建函数准确度的标准是决定系数 R^2 或相关系数 r 的大小, R^2 或 r 越接近1,表明所构建函数的准确度越高。在式(1)中, R^2 值为0.999,表明构建的函数具有较高的准确度。

2.2 单叶面积子模型的构建

选取形状规则、主脉长度为2~10 cm的富士苹果叶片,以分辨率为28346像素/cm的扫描仪扫描苹果叶片,在Adobe Photoshop 7.0下计算叶片所在区域的像素数,并测量叶片主脉长度和叶片最大宽度。分别以叶片主脉长度、叶片最大宽度、叶片主脉长与其最大宽度乘积为自变量^[5],以叶片面积为依变量,构建出可描述苹果叶片面积的3个函数,并选择拟合度较高的函数作为单叶面积子模型。

$$SL = 0.693EI + 0.644,$$

$$EI \in [3.24, 60.76], R^2 = 0.986 \quad (2)$$

$$SL = 4.604LE - 9.653,$$

$$LE \in [2.00, 10.64], R^2 = 0.936 \quad (3)$$

$$SL = 8.922WI - 15.091,$$

$$WI \in [2.00, 10.64], R^2 = 0.911 \quad (4)$$

式中, SL 为叶片面积(cm^2), EI 为叶片主脉长与最大宽度乘积(cm^2), LE 为叶片主脉长度(cm), WI 为叶片最大宽度(cm)。

比较3个函数后发现,以叶片主脉长与叶片最大宽乘积所建立的函数决定系数最大,因此以式(2)作为单叶面积子模型。

2.3 单枝叶面积子模型的构建

自04-17~07-14共计调查27组数据,利用式(2)计算得到单枝叶面积。以04-10为起点的有效积温为自变量,以平均单枝叶面积为依变量建立散点图(图1),并拟合构建如下函数:

$$S_z = \frac{253.702}{(1 + e^{-1.422 - 0.006A TM})^{19.259}}, R^2 = 0.996 \quad (5)$$

式中, S_z 为苹果树单枝叶面积, $A TM$ 为以04-10为

起点的累积温度。

该式为Logistic非线性拟合结果,式中253.702是环境最大容量,在本函数中的意义为平均每枝条的最大叶面积,对于不同品种该值不同。

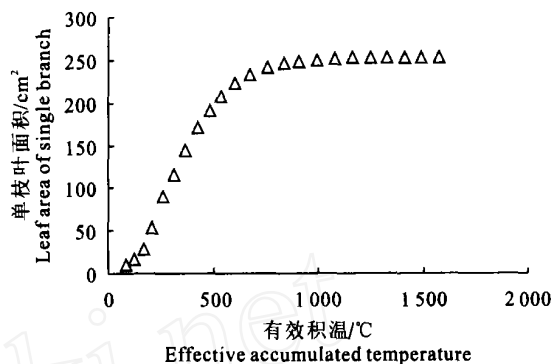


图1 苹果树单枝叶面积与有效积温关系曲线

Fig 1 Relation curve of leaf area of single branch and effective accumulated temperature

2.4 单枝叶片日龄子模型的构建

叶龄为叶片展开后的生长天数,其变化与温度呈现一定的相关性^[6],因此可以用有效积温预测叶片的平均日龄。单枝叶片日龄是枝条上所有叶片日龄的平均值。采用单枝叶片日龄与有效积温构建以下函数:

$$AL = 0.716 + 0.034A TM - \frac{4.789226}{A TM^2}$$

$$A TM \in [85.220, 1079.800], R^2 = 0.999 \quad (6)$$

式中, AL 为单枝叶片日龄; $A TM$ 为有效积温。该式的 $R^2 = 0.999$,表明其拟合效果很好。

在苹果生长季节中,苹果叶片日龄与温度、光照及果树生长习性有关。本研究侧重于温度对叶片日龄的影响,另外还需考虑光照和营养条件等因素的影响。

2.5 单枝叶片数量子模型的构建

以有效积温为自变量,以单枝叶片数量为依变量,建立苹果叶片数量与有效积温的关系函数:

$$NL = 15494 - 14671e^{-0.0001A TM^{1.466}}$$

$$A TM \in [85.220, 1079.800], R^2 = 0.995 \quad (7)$$

式中, NL 为苹果枝条上的叶片数量; $A TM$ 为有效积温。

2.6 单树叶片生长子模型的构建

该子模型中包含单树叶片面积、单树叶片数量和单树叶片日龄3个参量。单树叶片面积、单树叶片数量分别由单枝叶片面积、单枝叶片数量乘以单树总枝条数 N 得到。单树叶片日龄是单株树所有叶片

日龄的平均值, 其值等同于单枝叶片日龄。

通过3次调查的10株苹果树的新生总枝条数, 计算得到单株苹果树枝条平均数 $N = 108.01$, 单枝叶面积为 S_z 。因此, 单树叶片总面积(S_t)为:

$$S_t = N \times S_z \tag{8}$$

单枝叶片数量为 N_L , 因此, 单树叶片数量(Q_t)为:

$$Q_t = N \times N_L \tag{9}$$

单枝叶片日龄为 A_L , 因此, 单树叶片日龄(A_t)为:

$$A_t = A_L \tag{10}$$

3 模型组装

在Delphi语言环境下, 采用面向对象的程序设计方法, 将各个子模型耦合联接, 组建苹果叶片生长模拟模型。描述叶片的类是程序的基本类单元, 该类主要由有效积温、单叶面积、单枝叶面积、单枝叶片

日龄、单枝叶片数量和单树叶片生长6个变量构成。模型以1d为一个步长, 模拟苹果叶片生长的生物学过程, 计算并输出单树叶片面积、单树叶片日龄和单树叶片数量。其中有效积温作为其他各子模型的驱动变量, 贯穿于整个程序之中。

模型运算过程: 输入某日日期, 程序判断输入日期是否在04-10~07-26期间, 如不是, 则提示重新输入日期; 如是则程序调用有效积温子模型计算当日有效积温值。随后, 单枝叶片日龄子模型调用有效积温值计算单枝叶片日龄; 同时, 单枝叶面积子模型调用有效积温值和单叶面积子模型计算单枝叶总面积; 单枝叶片数量子模型调用有效积温值计算单枝叶片数量。最后, 单树叶片生长子模型调用单枝叶总面积、单枝叶片日龄、单枝叶片数量和单树枝条总数, 计算并输出单树叶片生长的3个参量。模型运算流程见图2。

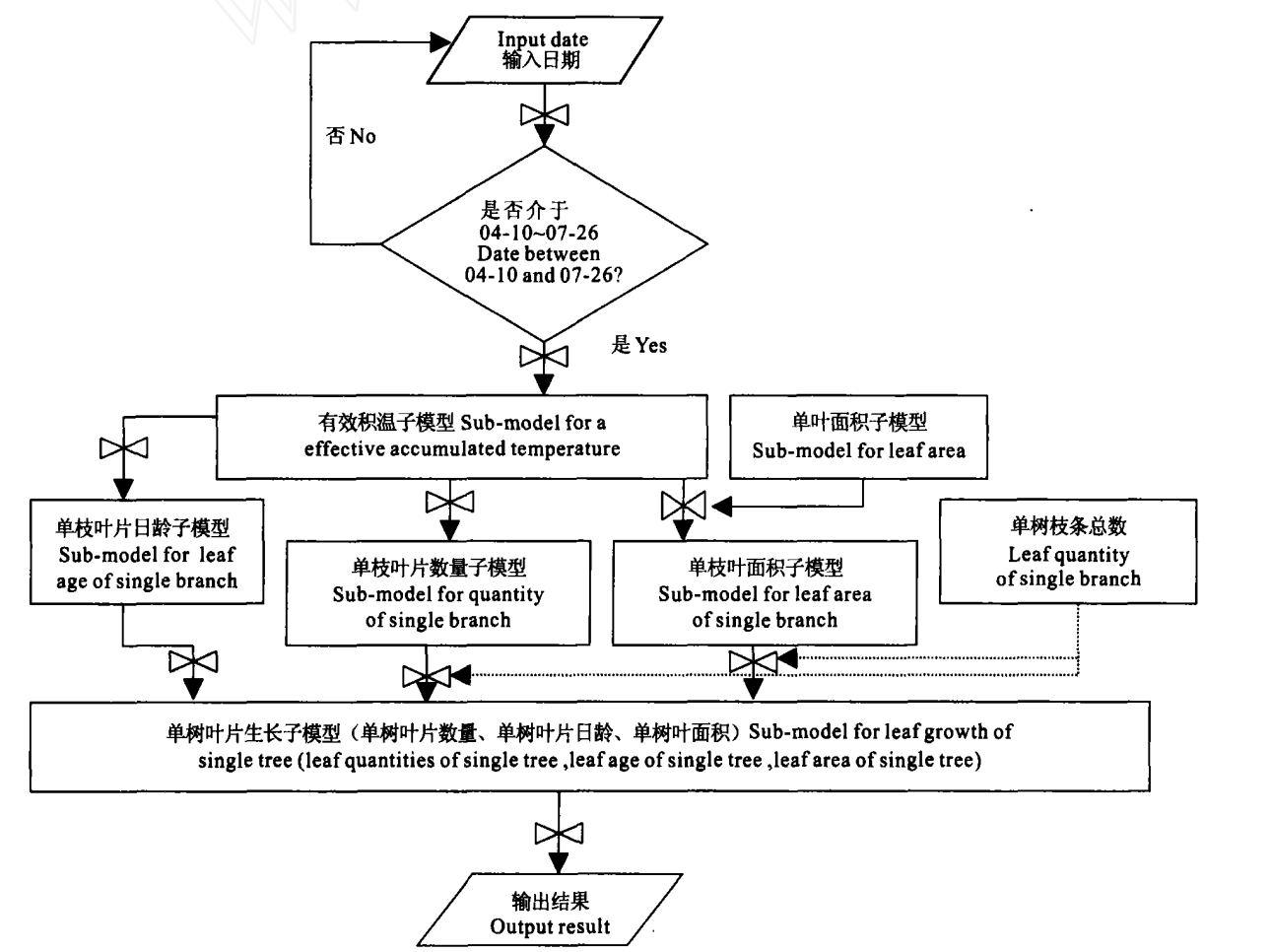


图2 苹果叶片生长模拟模型流程

Fig 2 Program of simulative model for the growth of apple leaf

4 模型检验

4.1 单树叶片面积测量

利用叶片面积与叶片湿重数据,建立可描述叶片面积的关系式:

$$SL = 12\,697 \times \ln WL + 21\,807, R^2 = 0.939 \quad (11)$$

式中, WL 为叶片质量(g), R^2 为0.939,表明函数拟合效果较好。

4.2 单树叶片面积验证

在模拟模型的检验中,无需对系统中的所有子模型进行检验,只需对模拟模型的整体输出结果与田间实测数据或未参与建模的数据进行符合度检验即可。常用方法有标准误差法^[7]、相关性分析法和卡方检验法^[8]。

本研究对田间实测数据与苹果叶片生长模拟模型模拟的单树叶面积数据进行相关性测验,结果表明相关系数为0.997,对应的概率值小于0.001,说明该模型的模拟结果与田间调查结果一致,具有较高的准确度。

表1 单树叶面积模拟值与实测值

Table 1 Simulative and observed value of gross leaf area of single tree

日期 Date	模拟值 Simulated value	实测值 Observed value	误差 Error
04-10	1 344.60	1 524.96	+ 180.36
04-20	2 703.24	3 048.84	+ 345.60
05-01	14 016.24	15 782.04	+ 1 765.80
05-10	33 623.64	34 737.12	+ 1 113.48
05-20	47 433.60	48 023.28	+ 589.68
06-30	52 746.12	53 043.12	+ 297.00
07-10	54 193.32	54 360.72	+ 167.40
07-20	54 517.32	54 699.84	+ 182.52

由表1可知,单树叶面积的模拟值比实测值小,其中在04-20~05-20,模拟值与实测值误差较大。因此时为苹果叶簇期,叶片生长较快,故田间取样工作量大,容易出现误差,从而导致建模数据偏差,使模型准确度受到一定程度影响,今后需进一步完善。

将单树叶面积的模型模拟数据、田间调查数据与苹果生长天数作图(图3)。由图3可以看出,模拟数据和调查数据符合程度较高。苹果叶片面积与叶片生长天数之间近似于Logistic关系^[9],表明模型模拟输出的苹果叶片生长状况与其实际生长状况相符,说明该模型结构基本合理。

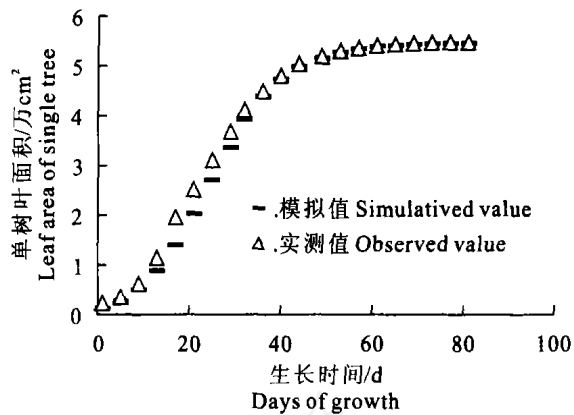


图3 单树叶面积模拟值、实测值与生长天数曲线

Fig. 3 Curve of simulated value and observed value of leaf area of single tree and days of growth

4.3 单树叶片日龄验证

田间测量单树叶片日龄的工作量巨大,由于人力限制,并未对此数据进行测量,因此用未参加建模的单树叶片日龄数据与模型模拟的单树叶片日龄数据进行相关性分析,相关系数为0.972,对应的概率值小于0.001,表明模型的准确度较高。由表2可以看出,在04-20~05-20,模拟值与实测值误差较大,误差值最大为76.96,最小为14.36。

表2 单树叶片平均日龄模拟值与实测值

Table 2 Simulative and observed value of average leaf age of single tree d

日期 Date	模拟值 Simulated value	实测值 Observed value	误差 Error
04-10	108.00	124.40	16.40
04-20	612.06	583.20	- 28.86
05-01	879.44	956.40	76.96
05-10	1 242.35	1 296.00	53.65
05-20	1 757.48	1 803.60	46.12
06-30	2 168.32	2 143.80	- 24.52
07-10	2 577.64	2 592.00	14.36
07-20	3 333.44	3 348.00	14.56

表3 单树叶片数量模拟值与实测值

Table 3 Simulated and observed value of leaf quantities of single tree

日期 Date	模拟值 Simulated value	实测值 Observed value	误差 Error
04-10	192.51	185	- 7.51
04-20	352.20	398	45.80
05-01	560.10	589	28.90
05-10	776.94	764	- 12.94
05-20	1 001.84	1 023	21.16
06-30	1 187.53	1 197	9.47
07-10	1 371.69	1 364	- 7.69
07-20	1 494.28	1 489	- 5.28

4.4 单树叶片数量验证

对模型模拟计算的单树叶片数量与田间实测值进行相关性分析, 相关系数为 0.974, 对应的概率值小于 0.001, 表明模型的准确度较高。由表 3 可以看出, 在 04-20~05-20, 模拟值与实测值误差较大, 误差值最大为 45.80 片, 最小为 -5.28 片。

5 讨 论

1) 计算叶片面积的方法很多, 但均有局限性, 其中网格法费时费力, 叶面积仪法需要采摘叶片测量, 这两种方法都难以在田间测量大量的叶片; 卫星遥感反射法可克服上述不足, 但在近期尚不能实现。本研究利用叶片主脉长度和最大宽度乘积推求单叶面积, 其方法简单, 结果准确。

2) 在苹果的生长季节中, 春季生长量占全年生长量的 73.4%~74.1%^[10], 因此本研究选择春季研究苹果叶片的生长规律。当日平均温度达到 10℃ 时, 富士苹果开始萌芽生长。在渭北地区, 04-10 前后日平均气温刚刚达到 10℃, 且年际间变化不大;

在 7 月中下旬, 苹果叶片春季生长阶段基本结束。因此, 本模型的起点为 04-10, 终点为 07-26。

3) 通过对模型的检验发现, 模型模拟值与田间实测值误差较大的时段出现在 04-20~05-20, 此时苹果叶片生长迅速, 容易给田间调查带来误差, 最终导致模型出现偏差, 因此需要进一步加强田间调查的精确性, 以增强模型的准确度。

4) 该模型基本反映出苹果叶片面积随有效积温的动态变化, 反应了苹果叶片生长的生物学过程。该模型可增加到苹果叶部病害模拟模型中, 为其提供寄主生长参数, 提高病害模拟模型的准确度。鉴于试验条件限制, 本模型中暂时只考虑富士苹果在常规栽培管理条件下, 有效积温对其叶片生长的影响, 其他诸如品种、地域、树龄、肥力等因子可能会使模型中有关参数的数值不同, 这尚待进一步研究。影响苹果叶片生长动态的变量还有叶片鲜重、干重、果实数等, 随着研究的深入, 可将这些变量增加到苹果叶片生长模拟模型中, 以进一步提高模型的准确度。

[参考文献]

- [1] 张立桢, 曹卫星, 张思平, 等. 棉花形态发生和叶面积指数的模拟模型[J]. 棉花学报, 2004, 16(2): 77-83
- [2] 肖悦言. 介绍一种计算有效积温的方法[J]. 植物保护, 1983(2): 43-45
- [3] 胡小平, 王长发. SAS 基础及统计实例教程[M]. 西安: 西安地图出版社, 2001.
- [4] 刘 洪, 金之庆. 油菜发育动态模拟模型[J]. 应用气象学报, 2004, 10: 634-640
- [5] 吴远藩. 量叶片长和宽计算番茄叶面积[J]. 农业科技通讯, 1980(12): 20-21
- [6] 林忠辉, 项月琴, 莫兴国, 等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003(11): 69-72
- [7] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀. 温室番茄发育模拟模型研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1219-1225
- [8] 胡小平. 陕西苹果黑星病流行规律及其病原菌遗传多样性的 SSR 分析[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004
- [9] 束怀瑞. 苹果学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996
- [10] 河北农业大学. 果树栽培学各论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002

Development of simulative model for growth of apple leaf

TIAN Xue-liang¹, HU Xiao-ping², YANG Jia-rong²

(1 Department of Plant Protection, Henan Science Academy, Xinxiang, Henan 453003, China;

2 College of Plant Protection, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 453003, China)

Abstract: The simulative models for the growth of apple leaf, including sub-model for an effective accumulated temperature, for leaf area, for leaf area of single branch, for leaf age of single branch, for leaf quantity of single branch and for leaf growth of single tree, were developed with effective accumulated temperature, leaf single area branch, leaf age and quantity of leaf. The model was composed of sub-models which coupled with programming language Delphi, and worked out leaf area, leaf age and quantity of leaf. The validation of the model with the data obtained from field and data from simulated model was analysed by correlation. The result was that index of correlation were 0.9997, 0.972 and 0.974, indicating that the model was of rational structure and higher accuracy.

Key words: apple; leaf; leaf area; simulative model