

马铃薯生育期进程的计算机模拟模型研究

王爱华, 黄冲平

(浙江大学农业与生物技术学院, 杭州 310029)

摘要: 以 1993~1994 年的田间试验数据和同步的气候资料为基础, 采用高斯方程, 建立了以日平均气温为驱动变量, 肥水满足条件下的马铃薯生育期的模拟模型。结果表明本模型不但具有较强的机理性和解释性, 而且具有模拟精度高、预测性好等特点。本研究根据提出的模型用 Visual Basic 语言编程, 使每日生态因子变化对马铃薯发育生理日的影响能够动态地表现出来, 模拟结果具有很强的直观性, 从根本上克服了同类研究中的缺陷。

关键词: 马铃薯; 生育期; 计算机; 模拟模型

中图分类号: S532

文献标识码: A

文章编号: 1672-3635 (2003) 02-074-05

1 前言

大量研究发现, 马铃薯生育期与马铃薯的生长季、叶龄、器官形成、光合生产和干物质的积累等都有密切的关系。它不仅能体现出作物生长的各个阶段, 而且要求人们在不同的发育阶段中采用不同的栽培管理措施。因此, 对马铃薯生长发育模拟的研究, 是实现马铃薯早熟高产的基础, 也是建立马铃薯栽培管理模型的基础。

本研究利用两年的田间试验所获得的实测数据, 在参考大量国内外该领域最新研究成果的基础上, 建立了马铃薯生育期的动态模拟模型。该模型可有效地用于马铃薯在不同生理生态和生产条件下生育期的预测, 同时它对于最佳种植和收获时期的选择、以及制定农艺措施等方面也有较强的指导意义。

2 材料与方 法

2.1 试验设计

试验于 1993 年 2 月至 5 月和 1994 年 2 月至 5 月在浙江大学华家池校区实验农场进行。其中 1993 年为参数试验, 1994 年为验证试验。试验处

理及代号分别为: ①地膜+天膜 (A1); ②天膜 (A2); ③地膜 (A3); ④露地 (A4)。所谓天膜, 即在播种畦上搭一约 40 cm 的小拱棚, 盖上与地膜质地相同的 0.008 线膜。小区面积 20 m², 随机排列, 三次重复。

2.2 供试品种

供试品种为“东农 303”, 由浙江省义乌市种子分公司从黑龙江省克山马铃薯研究所引种调入。

2.3 供试土壤

土壤质地为粉质壤土。有机质含量 25.6 g/kg、全氮 1.5 g/kg、速效磷 44.8 mg/kg、速效钾 46.8 mg/kg。

2.4 生育进程测定与温度记载

土壤温度用 10 cm 和 5 cm 的曲管地温度计测定。从播种后次日起至收获, 按照张理等介绍的方法, 逐日于 8 点、14 点、20 点对地膜和露地条件下土壤温度进行观测记载, 并按其介绍的方法计算平均温度^[1]。同时观测马铃薯出苗、齐苗、封行、现蕾等生育进程发生动态, 标准以调查样方内 70% 以上达到该生育期之日为相应生育进程时日。

地面温度由浙江省气象局气候研究中心提供, 该中心离试验区 500 m 左右。

3 建模的基本原理与假设

目前, 国内尚未有关于马铃薯生长发育动态模拟的研究报道, 本文通过对大量文献资料特别是国

收稿日期: 2003-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号 39970122)。

外最新研究成果的分析与归纳, 参考其他作物的生长发育动态模拟的研究, 结合南方马铃薯生产的实际, 提出以下几个基本设想作为建模的理论依据。

①马铃薯的一生, 从播种到成熟大体可划分为 3 个阶段, 即播种到出苗、出苗到现蕾、现蕾到成熟。南方马铃薯的主栽季节为春季, 现蕾后由于气温较高不能正常开花结果而花蕾脱落, 且收获的是地下块茎而非籽粒, 从形态发育上来讲现蕾意味着马铃薯主茎叶片生长全部完毕, 在正常栽培条件下, 现蕾后马铃薯块茎生长迅速加快, 因此这样划分三个阶段是有科学依据的^[2]。②马铃薯同一品种完成某一生育阶段的有效生理日是个常数。所谓有效生理日是指马铃薯在最适温度下完成某一生育阶段需要的生长天数, 且不受土壤水分、土壤肥力和病虫害的影响。这种假设最早由国内学者高亮之在研究水稻生长发育动态模拟的“钟模型”中提出, 并得到验证^[3]。③根据作物生长温度三基点的基本原理, 本研究假定马铃薯各生育阶段从最低温度到最适温度, 及最高温度到最适温度对其生长发育的速率影响系数是对称的。这种假设在荷兰学者 Penning de Vries FWT 著名的 MACROS 模型中等到广泛应用^[4]。④本模型以 C·T·de Wit 提出的作物第一生产水平为条件^[4~6], 即假设在整个生育期间, 没有病虫害、杂草的影响, 肥水充足, 马铃薯的生长只取决于气象条件和品种的遗传特性。⑤马铃薯的生长发育受光周期影响不明显, 尤其南方的马铃薯生产更是如此, 因此本模型不考虑光周期因素。

4 模型的组建

4.1 马铃薯生育期基本模型

国外近期虽有关于马铃薯生长发育模型的模拟研究, 但均只给出了结果而极少给出生育期模型的数学描述^[7~9]。国内高亮之等 (1989) 在提出水稻“钟模型”时, 表达了有关生育期的数学模型, 但该模型中有两个温度参数, 这在一定程度上增加了参数调试的难度, 而且有时甚至不能确保“预先确定的最适温度发育速度最快”这一条件^[3], 殷新佑 (1994) 提出了改进的相关模型, 但笔者认为该模型参数 α 的获取过程未能计算日平均温度高于最适温度的生育日期中高温区的抑制效应, 而在逐日模拟中则计算了相应的抑制效应, 因此参数获取

的过程与应用过程是相矛盾的。本研究根据品种遗传特性及环境因子对马铃薯生长发育的影响, 提出用高斯方程建立马铃薯生育期的基本模型:

$$r_i = \begin{cases} e^{-\left(\frac{T_i - T_o}{\beta}\right)^2} & T_L \leq T \leq i \leq T_U \\ 0 & T_i \leq T_L, T_i \geq T_U \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中 r_i 为某生育阶段第 i 天的生长速率, T_i 为第 i 天的实际平均气温, T_o 为某生育阶段马铃薯生长发育的最适温度, T_L 、 T_U 分别为某生育阶段马铃薯生长发育的最低温度和最高温度, β 为待估参数。

根据“极值理论”, 求 (1) 式中 r_i 对 T_i 的一阶导数 (r'_i)

$$r'_i = -2 \times \frac{T_i - T_o}{\beta^2} \times e^{-\left(\frac{T_i - T_o}{\beta}\right)^2}$$

令 $r'_i = 0$, 求得驻点 $T_i = T_o$, r_i 在 T_o 处具有二阶导数且, 求 r_i 对 T_i 的二阶导数 (r''_i)

$$r''_i = -\frac{2}{\beta^2} \times e^{-\left(\frac{T_i - T_o}{\beta}\right)^2} \times \left[1 - 2 \times \left(\frac{T_i - T_o}{\beta}\right)^2 \right]$$

因 $r''_i (T_o) < -\frac{2}{\beta^2} < 0$, 所以在 $T_i = T_o$ 处取得极大值, 极大值为 $r_i (T_o) = 1$, 其生理意义为在最适温度下 ($T_i = T_o$) 马铃薯生长一天的发育速率为一个有效生理日。

相应的生育期模型为:

$$\int_1^N r_i dt = \sum_{i=1}^N r_i = \sum_{i=1}^N e^{-\left(\frac{T_i - T_o}{\beta}\right)^2} = DS_0 \quad (2)$$

式 (2) 中, N 为完成该生育期所需的实际天数, 而 DS_0 为完成该生育期所需要的有效生理日。在运行模型时, 当逐日 r_i 的累计值达到 DS_0 时, 就表示某个生育期已完成, 这时即可得出 N 的值。

4.2 受地膜覆盖影响的生育期模型

地膜和天膜覆盖后, 马铃薯的生育进程明显加快, 天膜覆盖后主要是增加了小拱棚内小气候的温度, 因此可以通过公式 (1)、(2) 直接计算。地膜覆盖则主要是增加了地温, 用上述方程就无法表达相应的生理生态过程, 必需以普通露地条件下获得的生理日数作各处理的标准和对照, 通过两者生长发育生理进程的差异来计算地膜覆盖的贡献, 因此将公式 (1) 修改为:

$$r_i = \begin{cases} e^{-\left(\frac{T_i - T_o}{\beta}\right)^2} + r_g & T_L \leq T \leq i \leq T_U \\ 0 & T_i \leq T_L, T_i \geq T_U \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中 R_i 为地膜覆盖条件下的生长速率, r_g 为地温的贡献, 其生理意义和计算方法如下:

$$r_g = e^{-\left(\frac{T_g - T_0}{\beta}\right)^2} - e^{-\left(\frac{T_{ck} - T_0}{\beta}\right)^2} \quad (4)$$

式 (4) 中 T_g 为地膜覆盖条件下的地温, T_{ck} 为普通栽培的地温, 模拟计算时普通栽培处理的 T_g 等于 T_{ck} , 因此 r_g 为零。于是地膜覆盖栽培条件下的生育期模型为:

$$\int_1^N r_i dt = \sum_{i=1}^N R_i = DS_0 \quad (5)$$

式 (5) 的理论意义与实用价值与式 (2) 是一致的。

4.3 模型参数的确定

马铃薯各生育阶段的最高温度 (T_U)、最适温度 (T_0) 和最低温度 (T_L) 如表 1 所示。

表 1 马铃薯各生育阶段的温度参数值

| 生育阶段 | T_L ($^{\circ}C$) | T_0 ($^{\circ}C$) | T_U ($^{\circ}C$) |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 播种~出苗 | 2 | 13~18, 取 15 | 28 |
| 出苗~现蕾 | 2 | 18 | 34 |
| 现蕾~成熟 | 2 | 18 | 34 |

参数 β 和 DS_0 的计算是借助 SAS 软件的 NLIN 统计程序, 即基于加权最小误差平方法的非线性回归方法进行参数的拟合。参数的搜索范围是以经验数值为中心, 前后缩小或扩大一定的数值作为搜索范围, 一开始的搜索范围较大, 随后逐次缩小搜索范围和扩大搜索精度, 直到得到满意精度的数值为止, 搜索采用玛克底特搜索法, 参数终值见表 2。

表 2 马铃薯各生育阶段的模型参数值

| 生育阶段 | β | DS_0 | R |
|-------|---------|--------|------|
| 播种~出苗 | 3.6800 | 11.9 | 0.99 |
| 出苗~现蕾 | 5.7863 | 21.1 | 0.91 |
| 现蕾~成熟 | 6.5233 | 9.6 | 0.85 |

注: R 为相关系数。

5 模型的检验

依据本研究建立的模拟模型及确定的参数, 用 Visual Basic 语言编程, 图 1 所示是天膜覆盖条件

下生态因子对马铃薯发育生理日影响的面向用户界面。界面的上部用于数据的输入, 中部用于显示模型的输出结果。这种界面直观地表达了逐日平均温度对累计发育生理日的影响。左上角菜单中的新建、打开、保存、退出命令, 分别用于重新开始新的模拟、打开保存过的模拟结果、保存模拟结果和退出模拟。

进行模拟时, 用户可以在“播种季节”的下拉菜单中选择相应的季节, 并在相应的文本框中输入株距、行距、播种及收获日期等因素, 计算机就能实时地根据这些因素及日平均温度显示出相应的模拟结果。左边为发育生理日累计的变化曲线图, 其步长为一天; 右边为数据结果。若马铃薯某品种累计发育生理日数达到相应生育阶段的有效生理日数 (图 1 中以实心圆点表示), 则模拟进入下一个生长发育阶段, 直至成熟。同时界面的底部可得到各生育阶段模拟的生长日数, 进而与实际生长日数进行比较。

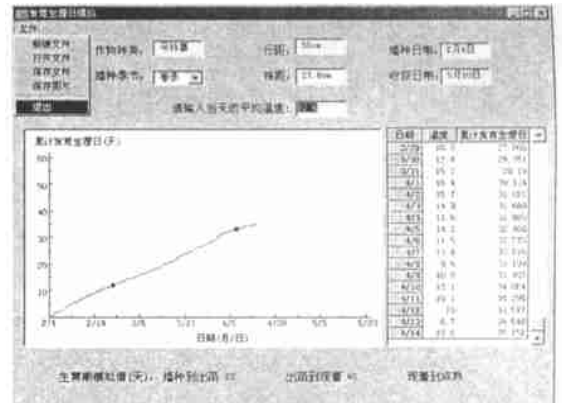


图 1 生态因子对马铃薯发育生理日影响的计算机模拟界面

模拟值与实测值之间的符合度采用国际上检验模型时常用的统计方法 RMSE (Root mean square error) 进行统计分析^[7], 其表达式为:

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

上式中 OBS_i 为实测值, SIM_i 为模拟值, n 为样本容量。RMSE 的值越小, 表明模拟值与实际观测值的一致性越好, 模型的模拟结果越准确、可靠。

表 3 给出了 1994 年 4 个处理的马铃薯不同生育阶段生长天数观察值与模拟值的比较。由于受地温的影响, A1 和 A3 处理的模拟和实际生育期均要短于同时播种而不覆盖地膜的 A2 和 A4 处理。

由表 3 可知, 对各个处理的不同生育阶段模拟, 绝对误差均为 1~2 d, 对全生育期模拟, 绝对误差均小于 5 d, RMSE 均小于 4 d, 表明模拟值与实测值

之间存在着良好的一致性。各生育阶段模拟的天数均少于实测天数, 说明试验田除气候条件以外的生产条件还未达到最佳。

表 3 1994 年马铃薯生育期模拟值与实测值的比较

| 处理 | A ¹ | | A ² | | A ³ | | A ⁴ | | RMSE |
|-------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------|
| | 模拟值 | 实测值 | 模拟值 | 实测值 | 模拟值 | 实测值 | 模拟值 | 实测值 | |
| 播种~出苗 | 19 | 19 | 22 | 23 | 17 | 19 | 29 | 30 | 1.22 |
| 出苗~现蕾 | 39 | 41 | 40 | 41 | 40 | 41 | 41 | 43 | 1.58 |
| 现蕾~成熟 | 13 | 15 | 15 | 16 | 14 | 15 | 19 | 20 | 1.32 |
| 全生育期 | 71 | 75 | 77 | 80 | 71 | 75 | 89 | 93 | 3.77 |

由全生育期的模拟天数 (Y) 和实测天数 (X) 拟合的回归方程为 $Y=4.25+0.97X$ ($r^2=0.968$), 基本上与对角线 ($Y=X$) 重合 (图 2), 从中也可以看出该模型的预测性能较好。

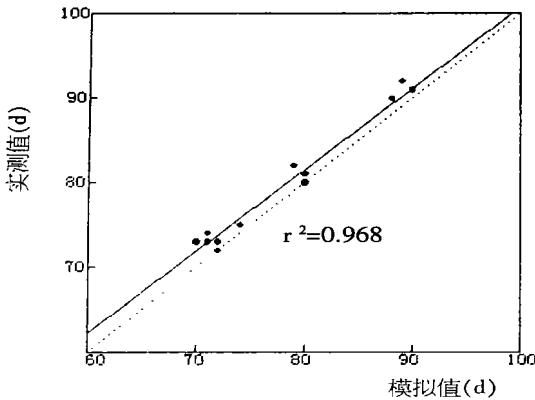


图 2 马铃薯全生育期模拟值与实测值的相关图

6 讨论

本模型提出了用高斯方程计算马铃薯的生长发育速率的方法, 并明晰了地膜覆盖对生育期影响的数学机理, 比过去的定性研究有明显的改进。验证结果表明本模型具有生物学意义明确、机理性强、模拟精度高等优点。但由于本研究仅在一个品种 (东农 303) 和同一试验地点 (浙江大学华家池校区实验农场) 的条件下对模型进行验证, 故该模型尚有待多品种、不同地点的重复试验加以进一步验证和完善。

上述模型是在水肥无胁迫的基础上建立起来的, 也未考虑病虫害及其他灾害对作物的不利影响, 因此, 有待于进一步深入研究, 建立起一个完整的马铃薯生态系统模拟模型, 推动作物模型更好

地服务于生产实践。

本研究借助 Visual Basic 6.0 软件, 建立了一个直接面向用户的人机交互界面表达模拟结果, 直观地、动态地解释了环境因素对马铃薯生长的影响机理。课题组今后将进一步系统的开发完整的作物生长模拟软件, 并在适当时机在网上发布以推动作物生长计算机模拟的研究。

参 考 文 献

- [1] 北京农业大学主编. 农业气象 [M]. 北京: 农业出版社, 1992, 246~247.
- [2] 张国平, 周伟军主编. 作物栽培学 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001, 231~247.
- [3] 高亮之, 金之庆, 黄耀等编著. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992, 93~123.
- [4] F W T 彭宁德弗里斯等著. 朱德峰, 程式华等译. 几种一年生作物生长的生态生理过程模拟 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991, 29~127.
- [5] C T 德威等著. 裴鑫德等译. 作物同化、呼吸和蒸腾的模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [6] F T W 彭宁德弗里, H. H 拉文等著. 王馥棠等译. 生长与作物生产的模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [7] van Delden A., M J Kropff, and A J Haverkort. Modeling temperature and radiation-driven leaf area expansion in the contrasting crops potato and wheat [J]. Field Crops Research, 2001, 72 (2): 119~142.
- [8] Daniel O Caldiz, F J Gaspari, A Moreno Kiernan, et al. Agro-ecological zoning at the regional level: spatio-temporal variation in potential yield of the potato crop in the Argentinian Patagonia [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2002, 88 (1): 3~10.
- [9] Tom Hodges, Scott Lee Johnson, and Brad S Johnson. A modular structure for crop simulation models: Implemented in the SIM-POTATO Model [J]. Agronomy Journal, 1992, 84 (5): 911~915.

THE SIMULATION MODEL OF POTATO PHENOLOGIC DEVELOPMENT

WANG Ai-hua, HUANG Chong-ping

(College of Agriculture and Bio-technology, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

ABSTRACT: Based on the field experimental data and simultaneously observed climatic data in 1993 and 1994, a phenology simulation model for potato development was established, at the perfect fertilizer and water conditions. The drove variable is daily average air temperature, and the basic model was Gauss equation. The simulation result showed that this model was of clear mechanism, explanatory, accuracy and prediction. This research was programmed with Visual Basic based on established model. Through the running user-friendly graphical interface potato developmental physiology date effected by ecological factors could dynamically be expressed. The simulation result was of very strong intuitiveness. This method completely overcame the shortage of simulation result express in crop production modeling.

KEY WORDS: potato; phenology; computer; simulation model

台州市路桥绿丰筛网厂

——厂价直销尼龙防虫网、遮阳网

台州市路桥绿丰筛网厂是专业生产尼龙防虫网、遮阳网的骨干企业。本厂依靠科学的管理、可靠的质量及优惠的价格得以迅速发展, 目前已形成具有月产尼龙筛网4.6万 m^2 的生产线, 拥有先进的网室加工设备, 加工的网室不开缝、无疵点。欢迎广大用户订购。

部分产品价格

①尼龙筛网: 40目 1.60元/ m^2 、50目 1.75元/ m^2 、60目 1.85元/ m^2 ;

②遮阳网: 遮光率(50%) 0.70元/ m^2 、(60%) 0.75元/ m^2 、
(70%) 0.80元/ m^2 ;

③尼龙种子袋、吊签、插地牌等产品价格有资料备索。

厂址: 浙江省台州市路桥区新桥镇

邮编: 318055

业务联系人: 陈永福(厂长)

电话: 0576-2615659

传真: 0576-2615860

手机: (0) 13605763305