

马铃薯生长模型研究进展及其应用

李亚杰¹, 石 强¹, 何建强², 张俊莲¹, 白江平¹, 王 蒂¹

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室 - 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 马铃薯是世界第四大粮食作物, 然而马铃薯的生产却易受到环境因素和遗传因素的影响。通过利用生长模型将马铃薯生理生态过程和相互关系进行量化表达, 分析其内部结构与外界环境的关系, 从而提出合理的管理方式, 达到增产高效的目的。目前, 国际上开发了一些较成熟的马铃薯生长模型, 如 SUBSTOR - potato, NPOTATO, LINTUL - POTATO 模型等, 应用在国内马铃薯生产实践中取得了一定成果, 但总体来说中国马铃薯生长模型的应用还处于探索发展阶段。本文通过对国内外马铃薯生长模型研究的分析总结, 得出国内外马铃薯生长模型的主要特点是偏重 C、N 素研究, 缺少 P、K 素研究; 模型所需要的参数较其他作物模型更为复杂。同时, 综合分析现有各个生长模型的原理与技术路线的异同点与优缺点, 指出马铃薯生长模型需在遗传参数和气候参数方面加以深化研究, 并展望了利用作物生长模型指导国内马铃薯生产相关的发展趋势。

关键词: 马铃薯; 决策管理; 生长模型

中图分类号: S532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)02-0126-11

Development and applications of potato growth models

LI Ya-jie¹, SHI Qiang¹, HE Jian-qiang², ZHANG Jun-lian¹, BAI Jiang-ping¹, WANG Di¹

(1. Gansu Provincial Key of Aridland Crop Science-Gansu Key Lab of Crop Improvement & Germplasm Enhancement, College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil & Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The growth and yield of potato are largely affected by the genetic variation as well as the environmental conditions. Potato growth model can be used to quantify the interaction of the physiological and the ecological processes. Thus, the analysis of interaction between inner structure (both genetic and physiological) and the environmental factors can facility the making of a accurate planting management decisions, achieving the objective of improvement of both the yield and the quality. Nowadays, many potato growth models have been developed and some of them had been tested and evaluated in the potato production, such as SUBSTOR-potato, NPOTATO, and LINTUL - POTATO. However, the application of potato growth models in China is still in its infancy. This paper summarized the latest development of available potato growth models and compared their main characteristics. Meanwhile, the development purposes of some prevailing potato growth models were reviewed. The majority of potato growth models are focused on the distribution of C and N elements, but they lack the analysis of P and K elements. The results also indicated that the construction of the potato growth models is rather complicated than those of other crops, which needs more detailed knowledge of genetic and the climate factors governing potato growth. In addition, the prospect of applying potato growth models in China was also discussed.

Keywords: potato; decision management; growth models

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 作为世界第四大粮食作物越来越多的被人们所关注^[1]。随着人们对

马铃薯需求量的不断增加, 市场需要更多高产且易被加工的鲜薯, 但由于马铃薯普遍种植于冷凉阴湿

收稿日期: 2013-07-05

基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAD06B03); 甘肃省重大专项项目 (1102NKDA025)

作者简介: 李亚杰 (1986—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向为作物遗传育种。E-mail: liyajie-2008@163.com。

通信作者: 白江平, 男, 甘肃天水人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事作物遗传改良。E-mail: baijp@gsau.edu.cn。

王 蒂, 男, 陕西延安人, 教授, 博士生导师, 主要从事作物育种。E-mail: wangd@gansu.edu.cn。

地区,所以目前在国内的可种植地区面积有限。因此,要想显著的提高马铃薯产量与品质,只有通过种质资源的改进和利用,创新完善马铃薯的增产栽培技术,同时结合更多的有效管理体系,从而达到提高马铃薯产量与品质的目的。马铃薯属于喜凉爽型作物,其生长过程可分为几个不同的阶段,各个阶段所要求的生长条件不同。马铃薯对生长环境条件变化敏感,产量受各种因素影响较大,包括自身遗传因素、田间管理措施、天气、病虫害等,其中光照、温度与水分是影响马铃薯产量的主要环境因子。如何合理地综合利用遗传因素与田间管理模式,使得马铃薯达到高产优质目的,是我国乃至全世界马铃薯生产目前所面对的主要问题。然而,基因型与自然环境之间互作的复杂性,严重限制了此类研究的进展与普及。作物模型的开发为解决此类问题提供了一条快速有效的途径,其应用发展将是今后农业科学研究者深入探索的主要研究方向。

作物生长模拟通常是指将气象、作物及其土壤等环境作为一个整体,应用系统分析的原理和计算机模拟方法,综合大量的作物生理学、生态学、农学、农业气象学、土壤肥科学等学科的理论 and 研究成果,通过对作物的生长发育、光合生产、器官建成、干物质的积累和分配、产量形成等生理过程及其与环境 and 栽培技术的关系加以理论概括和数量分析,建立相应的模型,然后在计算机上进行动态的定量分析和作物生长过程的模拟研究。作物生长模型的建立不仅有利于已有科学研究成果的综合集成,同时也是作物种植管理决策现代化的基础^[2-3]。但是,要将作物生长模型应用于实际生产中比较困难。因为模型中涉及了生物、土壤、大气等因素,这些因素之间的相互作用关系研究尚存在一些问题,需要进行深入的试验验证,以寻求更合理的定量描述方法^[4]。作物生长模型按其研究对象与实际功能大体可分为两类:描述型模型和解释型模型。描述型模型又称为静态模型、工程应用模型、回归模型、黑箱模型等。它依据积温学说理论,利用气象资料与运用统计学方法建立的作物生产经验统计模型^[5]。这类模型形式上相对简单,缺乏对系统机理的阐述,是一种黑箱式的模型,在应用上存在较大的局限性。解释型模型又称为动态模型、科学理论模型、机理模型等。解释模型以系统动力学为原理描述环境因子、管理模式与作物生长、形态发育和产量形成过程之间的关系。因为作物的生长是光合作用、呼吸作用、同化产物分配、叶面积增长及分蘖产生等基本过程的综合结果。所以要建立解释型模型,需要分析

整个系统,并对这个系统的过程和机理进行量化。

为了研究影响马铃薯生长的各因子及其相互关系,提出合理的管理方式,增加产量,提高品质,人们提出运用相应模型对马铃薯的生长进行模拟。马铃薯生长模型,简称马铃薯模型,即对马铃薯生育期和器官建成及产量的模拟,通过对马铃薯各个生长阶段的动态模拟研究,将其生长发育和生理生态过程,基本规律及其相互关系进行量化表达,找出最利于马铃薯器官建成和生长的条件,逐渐向大田生产推广应用,以增加产量和农民收入。最早的完整马铃薯生长模型诞生在荷兰,随着计算机和农业信息技术的发展,逐渐出现了更多相关的马铃薯模型。并对整个马铃薯的生长过程进行了定量描述,提高了马铃薯生长模型的实用性。本文结合几个典型的马铃薯生长模型,对马铃薯生长模型的发展历程,应用领域及出现的问题进行研究探讨。

1 马铃薯生长模型发展回顾

作物生长模型在马铃薯上的研究与应用虽然不如小麦、水稻、玉米等作物那么深入,但自 20 世纪 80 年代以来也有较大的发展,且越来越受到重视。从最初简单的单个性状预测模型发展到现在复杂的作物内部生理变化过程、生长发育的计算机模拟程序均有报道^[6-19]。国际上, Sibma^[6]最先利用总二氧化碳同化率和日呼吸量来计算马铃薯的总干物产量。马铃薯的潜在产量可由植株截获的总辐射量、转化效率、收获指数及块茎的干物质含量求得。根据其计算公式,若块茎的干物质占总干物重的 80%,块茎的干物质含量占 20% 的话,那么每公顷 22 t 干物质产量的马铃薯,其鲜薯的潜在产量可达每公顷 110 t。Ng 和 Loomis^[7]于 1984 年开发了 POTATO 模拟模型,该模型为一个机理模型,具有详细的形态学与生理学内容。1982 年, Remy 和 Viaux^[8]提出了马铃薯对氮肥的需求量计算公式。Feddes^[9]等开发的 SWACRO 模型是一个马铃薯综合生长模型,由土壤水分平衡模型(SWATER)和作物生长模型两个亚系统组成,主要用于描述作物水分管理的变化对马铃薯呼吸作用和产量的影响。Sands^[10]推荐了马铃薯顶芽生长速度对温度和贮藏期反应的几个经验关系式,综合这些关系式得出一个预测马铃薯出苗时间的简单经验模型,利用受控条件下的试验数据估算模型中诸参数,并通过大田试验来检验该模型。结果表明,通过利用室内实验所得的模型参数,该模型能够应用于田间试验,但是出苗的预测时间与实际出苗时间存在一定的差异,

这可能与贮藏温度,贮藏前处理,检验次数,变量因素有关。澳大利亚的 Sands 和 Regel^[11] 研究认为马铃薯块茎的重量函数为不同重量等级的块茎产量的频率分布,并且假定在一个成熟的马铃薯作物群体中,块茎的重量呈正态分布,建立了一个预测马铃薯块茎重量函数的经验模型。苏格兰作物研究所 Marshall 等^[10] 报道,马铃薯的最大干物产量可由播种及收获的时间、土壤和空气的温度以及光辐射等基本数据估算。根据以前的试验,他们假定植株获得的光辐射转换成干物质的比率为 $1.8 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。E-jeji 等^[12] 修正并扩展了一个已经存在的作物生长需水模型,用以模拟马铃薯生长的块茎产量和用水量,其根据施水量来预测块茎产量,这一经验模型通过英国五个不同地点的马铃薯 37 年的生长数据得到了验证。

在我国国内,张永成^[13]、杜守宇^[14]、高聚林^[15] 等利用系统工程学的原理和方法,结合马铃薯的生产实践,以马铃薯产量形成较大影响的主要栽培措施为决策变量,以产量为目标函数,建立了马铃薯密度、施磷量(P_2O_5)、施钾量(K_2O)、施氮肥(N)及追施氮量与产量关系的数学模型。通过模拟寻优,对模型进行解析,求得各因素的主次关系,因素间的交互作用,明确了影响鲜薯产量的主要因素,最终提出了马铃薯高产优化栽培综合农艺措施的优化组合及量化的栽培技术指标。程俊珊等^[16] 采用回归正交旋转组合设计,依据系统工程学原理,通过 1989 至 1991 年的田间试验,建立了数学模型,筛选出了优化方案,并且验证了优化方案建立了高寒阴湿区马铃薯高产优质高效的函数模型,比较综合地反映了氮、磷、农肥、密度与马铃薯产量构成之间的函数关系,为马铃薯定量化栽培提供了科学依据。龚学臣^[17] 等采用正交旋转回归设计的方法,选取氮、磷、有机肥三个因素为决策变量,以马铃薯鲜薯产量为目标函数,通过田间试验获得的数据,建立了冀西北旱地马铃薯产量与参试因子间的数学模型。对模型进行解析的结果表明:施用有机肥对旱地马铃薯增产很重要,但施化肥(氮磷)也能增产;并且有机肥施用可以促进氮肥的增产效果,降低磷肥的增产效果。最后通过计算机模拟寻优获得最佳施肥方案。Yuan 等^[18] 提出用指数方程动态地模拟马铃薯的整个生长过程,同时预测干物质的积累情况。此外,在假定气温每升高 10°C 马铃薯的生物进程增加一倍的条件下,该模型还建立了太阳辐射与日最大绝对生长量之间,以及日最大相对生长率与温度之间的函数关系。曹兴明^[19] 等,采用统计分析的方法,在乌兰

察布地区选取氮、磷、钾和有机肥为决策变量,以马铃薯鲜薯产量为目标函数,通过在较为贫脊无前茬作物的试验地进行田间试验获得的数据,建立了马铃薯产量与参试因子间的数学模型,比较综合地反映了氮、磷、钾和有机肥对马铃薯产量的影响。

2 作物生长模型与马铃薯模型的开发应用研究

从作物模型概念提出到作物模型的建立,已经涉及到多种作物,但是主要以禾本科作物为主,例如小麦^[20],玉米^[21],水稻^[22],棉花^[23-24],甘薯^[25],甜菜^[26]等。目前常用的几种基于禾本科作物的生长模型的优缺点如表 1 所示。在禾本科作物生长模型中,美国的 CERES 模型是基于 DSSAT 软件系统的模型,根据不同禾本科作物生长特点开发设计了相应的模型,主要包括 CERES - wheat, CERES - Maize, CERES - Rice 等,模拟作物包括水稻,小麦,玉米等。该模型以应用系统工程学为原理,动力学方法和计算机技术构造的作物 - 土壤 - 大气系统的动态模拟模型,CERES 模型所需的数据与参数包括:天气资料,土壤资料,大田试验资料,田间管理措施等,它不受地域、气候和土壤类型等条件的限制,可以动态模拟作物在自然环境下的生长、发育和产量形成,CERES - Rice 是 CERES 模型中的水稻模型,根据水稻的温光特性和群体光能利用等生理过程研制的,主要由 4 个子程序组成:土壤水分平衡程序,氮素平衡子程序,物候发育子程序,生长子程序。在 CERES 模型中,可模拟天气、土壤水分、N 素动态、遗传特性等对作物生长发育与产量形成的影响;以大气、植株、土壤为一体化进行对植株生长发育动态变化模拟,进而预测作物产量。澳大利亚的 APSIM 模型(Agricultural Production System Simulator)是一种具有模块化结构的作物生产模拟系统,以气候变化与农作物生长及田间水分变化为基本原理,模拟气候变化影响农作物的生长发育、产量及农田水分平衡等,APSIM 模型主要应用在田间土壤水分平衡方面。APSIM 模型的一个重要特点是把不同的研究领域与学科整合到模型中,以便把某一学科或领域的成果应用到别的学科或领域中,使研究者在同一平台上比较不同的子模型。与其他作物模型不同的是,APSIM 模拟系统的核心突出的是田间土壤水分平衡,天气和管理措施引起土壤特征变量的连续变化作为模拟重点,而作物、牧草或树木在土壤中的生长只不过是使土壤属性改变。GOSSYM(Gossypium Simulation Model)模型是棉花模型,是美国农业部农

业研究署于 1983 年研制成的第三代棉花模拟模型, 1985 年又研制成解释 GOSSYM 的专家系统 COMAX, 进而诞生了著名的 GOSSYM/COMAX 棉花专家计算机管理模拟系统。GOSSYM 模型是一个动态模型, 能在生理水平上模拟棉花的生长发育和产量形成。该模型实质表达植物根际土壤中水分和氮素与植株体内碳和氮的物质平衡, 包含水分平衡、氮素平衡、碳平衡、光合产物的形成与分配、植株的形态建成等子模型。GOSSYM 模型可模拟棉花对外界条件的反应(如逐日的太阳辐射、最高和最低气温、风速、降雨等气象条件, 以及种植密度、行距、耕作措施、施氮肥和灌溉等农艺措施)。该模型主要功能是模拟棉花

各器官的生长发育状况、预报生理胁迫情况, 为管理系统提供事实数据。COTGROW 是我国第一代棉花模型, 是集成气象、土壤等环境条件和栽培管理措施为一体的棉花生长发育动态解释性模型, 以天气为驱动变量, 土壤条件为基础, 栽培措施为影响因子, 碳素平衡为核心, 综合考虑土壤和植株水分、矿质营养平衡对棉株生长发育、形态发生、棉铃脱落、产量品质的影响。该模型借鉴了著名的 GOSSYM 棉花模型的经验, 与其他模型相比, 其特点是包含磷与钾的吸收模块, 不受地域、气候和土壤类型等条件的限制, 见表 1。

表 1 几种主要作物生长模型比较

Table 1 Comparison of main crop growth models

生长模型 Growth models	研究者 Authors	原理 Principle	特点 Advantage	缺点 Disadvantage	参考文献 References
CERES	Ritchie, Jones, Ritchie, et al	以作物生长和发育机理为建模基础, 采用一些经验方法对某些复杂的过程、参数或变量进行简化处理, 从而使模型便于应用	1. 不受地域、气候和土壤类型等条件的限制 2. 不仅能模拟作物在自然环境下生长发育的主要过程, 还能模拟土壤养分平衡与水分平衡	1. 只含有 N 元素平衡模块 2. 对许多生理、生态过程的描述还是具有经验性	[20-22]
APSIM	APSRU (Agricultural Production Systems Research Unit) 小组 (CSIRO 和昆士兰州政府联合组建)	以气候变化与农作物生长及田间水分变化	1. 能够模拟作物产量对不同基因型、气候和管理条件的反应, 评价轮作序列中土壤肥力指标和作物产量 2. 注重土壤过程, 如土壤 N、土壤水、有机质以及同土壤 N 和土壤水分运动密切相关的地表留茬问题	1. 缺少病害预测模拟模块, 草地部分开发不够, 动物生产系统未开发成熟 2. 未考虑病虫害对作物的影响	[27]
COTGROW	潘学标, 等	将作物模拟技术与作物优化原理相结合	1. 综合借鉴了国外大量棉花模型的经验, 模型中考虑了打顶的措施 2. 根据土壤和气候数据模拟棉花单株的形态发生和发育 3. 分层计算棉田土壤水分平衡, 增加氮素平衡模块和棉株对磷钾的吸收。	1. 对许多生理、生态过程的描述具有经验性 2. 模型中的一些参数需进一步进行校准	[23, 28]
GOSSYM	Baker, Lambert, et al	棉花生长发育过程中的生理变化, 形态建成, 土壤水肥动态变化, 干物质积累	棉花根际的土壤水分和氮素平衡以及棉花体内的碳、氮平衡	缺少根系对水分的吸收变化及氮素的动态平衡	[24]

马铃薯不同于其他禾本科粮食作物, 马铃薯属于茄科粮食作物。禾本科作物中, 小麦、水稻等的根系为须根系。茎上有节与节间, 节间中空, 称为秆, 多为圆筒形。节部居间分生组织生长分化, 使的节间伸长。叶部结构为单叶互生成 2 列, 叶片由叶鞘、叶片和叶舌构成(有时具叶耳); 叶片狭长呈线形, 具平行叶脉, 中脉显著, 不具叶柄, 通常不从叶鞘上脱落。花序顶生, 多为圆锥花序、穗状花序。小穗是禾本科作物的典型特征, 小穗由颖片、小花、小穗轴组

成, 通常两性, 由外稃和内稃包被着, 柱头多呈羽毛状。果多为颖果。而马铃薯中, 由种子直接长成的植株一般形成细长的主根和分枝的侧根; 马铃薯块茎繁殖的植株无主根, 只形成须根系。马铃薯的茎分为地上茎与地下茎, 地下茎有匍匐茎和块茎两种, 块茎由匍匐茎顶端膨大形成, 它们具有地上茎的很多特性, 匍匐茎、块茎和地上茎没有本质上的区别。马铃薯初生叶为单叶, 全缘, 随着植株的生长, 逐渐形成奇数羽状复叶。马铃薯花序为顶生聚伞花序。

果为浆果,浆果内含实生子。小麦、水稻的产量与分蘖、单位面积株数、穗长、小穗数、穗粒数等有关系。马铃薯的产量直接构成是块茎,块茎的大小与数目影响着马铃薯产量,而匍匐茎的生长发育关系着块茎的形成。综上知,马铃薯与小麦、水稻在光合作用、呼吸作用、蒸腾作用以及其它生理生化特性方面,具有各自的特点(马铃薯与小麦、水稻的植株形态差异决定了种植马铃薯时,单位面积株数比小麦、水稻低;马铃薯收获的是变态茎,小麦、水稻收获的是种子),所以,马铃薯相关模型的建立与禾本科作物具有差别。马铃薯在其生长过程中所要求的平均温度低(较小麦、水稻),对环境条件变化极为敏感,受各种因素影响较大(其中天气与田间管理措施为主要影响因素,尤其光照,温度与水分是影响马铃薯产量的主要因子)。马铃薯产量(块茎)在土壤中形成,因此,土壤条件极大的影响马铃薯产量。马铃薯块茎的生长发育可划分为四个不同时期:块茎形成期,决定单株结薯数的关键时期,所以要保证水肥充足;块茎增长期,从地上部与地下部干物重平衡开始;块茎膨大期,需水最敏感的时期,也是需水数量最多的时期,这一时期,植株体内的营养分配由供应茎叶迅速生长转变为主要满足块茎迅速膨大为主,这段时期内马铃薯茎叶的生长速度明显减缓;最后是块茎淀粉积累期,需要适量的水分供应。为了保证马铃薯茎叶的寿命(增长光合寿命,以达到光合产物最大值),干物质向块茎的转移,在不同生长阶段的环境需求对马铃薯模型的建立提出了考验。

在马铃薯模型的发展过程中,基于其他作物生长模型的原理与技术路线,也出现了不同类型的生长模型,将天气、土壤水分、养分、温度和微生物等要素考虑在内,从马铃薯出苗到成熟,叶片到根系等,从不同角度对马铃薯的生长模拟进行了阐述。

2.1 SUBSTOR - potato 模型

国际上常用的 SUBSTOR - potato 模型,与 CERES 模型一同包含在 DSSAT(Decision Support System for Agrotechnology Transfer)系统中^[29]。SUBSTOR 模型由多个模块组成,包括气候模块,土壤模块,田间管理措施等,该模型综合了禾本科作物模型的部分特点,将作物不同生长过程考虑在内,建立了大气-作物-土壤系统模型,包括如下几个重要马铃薯生长生理过程:叶片光合作用的计算;马铃薯茎、叶、根的生物量形成;植株对水分的利用率;植株体内 N 元素平衡及分布等。为了评价 SUBSTOR 模型的实际使用效果,Travasso^[29]在阿根廷进行田间试验,并利用不同地点和时间的试验结果来校准这一模型。

试验中发现,在该马铃薯生长模型中,输入参数中不考虑成熟期时,由于成熟期叶面积值估算过高,从而导致块茎产量模拟值过高,为解决这一问题,在模型中需考虑遗传系数,对块茎形成模拟能有效地进行校正,使得模拟值与实际值的吻合度增加。

在马铃薯生产中,N 元素作为必需元素对产量有直接影响。如果 N 元素缺少,植株将表现为缺素症,即叶绿素合成减少,出现叶片变黄、植株矮小、产量降低(光合能力下降)。由于 N 元素是一个重要的输入量,而且是处于动态变化的营养元素,所以对作物产量每年都有不同的影响。因此,N 元素量的控制合理与否是决定产量多少的关键。Bowen^[30]等人利用来自厄瓜多尔和秘鲁两个马铃薯品种得田间试验数据,对 SUBSTOR 的适用性进行了测试,最终结果显示该模型能够准确模拟马铃薯品种对 N 肥需求反应,评价了 N 元素对马铃薯产量的影响,帮助营养学研究和农民更好的掌握植株对 N 元素的需求量,结合土壤中的含 N 量,确定出最优 N 肥施用量,从而加强了肥料的利用效率,达到合理有效施肥的目的。在秘鲁,该模型能够准确模拟在灌溉和无灌溉条件下马铃薯生长,而且对田间管理措施有较强的敏感性。

2008 年,孙芳^[31]等人将 SUBSTOR 马铃薯模块与中心区域气候模型(PRECIS)区域气候模式相嵌套,在 25 km × 25 km 网格尺度上,模拟未来气候情景(空气中 CO₂ 浓度比现在高 30% 至 49%)下宁夏马铃薯的生产。结果表明:在一定的浓度范围温室气体 CO₂ 排放的模式下,假定作物品种和播期不变,考虑未来大气中高 CO₂ 的肥效作用,以及未来气候有一定程度的变暖,在 2020s 和 2050s 时段,宁夏马铃薯的产量相比现在可能增加 11.3% 和 13.3%;但生育期分别缩短 5% 和 3%。如果品种不变、播期提前,将延长马铃薯的生育期,增加产量,但播期提前超过 10 d 后,增产幅度将减小;如果改种温度敏感系数低的品种,若延长马铃薯的生育期,可提高马铃薯产量。此结果建议在宁夏区域应采取播期提前或培育温度敏感系数低马铃薯新品种以适应当地未来的气候变化。因此,作物模型的研究应用还需考虑未来气候条件(高 CO₂ 浓度、温室效应、全球平均气温升高)的变化。

2.2 NPOTATO 模型

NPOTATO 模型由欧洲 CLIVARA 项目计划开发,经过长期试验模拟形成一种全面的马铃薯生长模型,主要模拟气候变化条件下的马铃薯生长,NPOTATO 模型以一天为步长。模块包括植株生长,

同化物分配,叶面积增长,物候期发展,衰老,土壤水分平衡,土壤 N 元素变化,胁迫环境下的同化物分配等。在 NPOTATO 模型中,干物质产量通过冠层光截获以及转化效率计算。Wolf^[32]在荷兰对 NPOTATO 模型和 POTATOS 模型在校正和灵敏度水平上进行比较,依据 15 年的测量数据,利用灌溉和非灌溉条件,主要根据模型结构特点,从模型灵敏度,在不同环境气候和管理措施等多方面进行预测结果比较,结果证明 NPOTATO 模型对作物产量能进行精确地模拟,而 POTATOS 模型对产量估计过高。造成两者的差异性主要原因是较高的蒸散量、水分差异、太阳辐射、CO₂ 浓度等因素。

在荷兰,根据 5 年的田间数据,Kooman^[33]等人利用 NPOTATO 模型解释早熟品种马铃薯生长期短与产量低的关系。在试验中,考虑块茎是主要的存储库,它影响马铃薯早熟特性有两种方式:同化物提早分配影响叶子的生长;减少个别叶子的寿命。最终干物质分配模拟结果较好;在敏感性评价中,发现马铃薯块茎最大生长速率能够影响马铃薯的早熟性,但是当块茎生长条件适宜时,叶子寿命是影响马铃薯早熟性的重要因素。

2.3 LINTUL - POTATO 模型

LINTUL - POTATO 模型属于光温模型,建立在光能截获利用与温度关系基础上,能够模拟光能截获利用率、温度及昼长等对马铃薯块茎产量的影响。在 LINTUL - POTATO 中,干物质产量计算通过冠层所截获的光能,块茎产量由干物质增长量以及运送到块茎的干物质决定。利用 LINTUL - POTATO 模型可以帮助一些育种家利用光辐射、昼长时间、温度等,选育对特定环境适应良好的马铃薯品种。Kooman^[34]利用 8 个马铃薯品种分别种植在荷兰、突尼斯、卢旺达三种不同环境下,研究不同温度、昼长对马铃薯生长的影响以及温度与昼长的交互作用。将马铃薯生长周期分为四个阶段(第一阶段:播种与发芽;第二阶段:发芽到块茎初始形成期;第三阶段:块茎初始形成到同化率到达 90%;第四阶段:成熟期),层层分析解释昼长与温度的关系,发现没有昼长时间影响的情况下,马铃薯最佳生长温度在 18℃~24℃;低温昼长时间较长的情况下,推迟块茎初始形成期,延长马铃薯生长周期,增加光能截获最大值,最终增加产量。

Robert^[35]利用 LINTUL - POTATO 模型在全球气候变化下对马铃薯产量影响进行模拟,并且根据各地区气候变化的程度,对马铃薯的种植管理作出相应的调整。他将气候数据分为三个时期(1961—

1990,2010—2039,2040—2069),并利用 7 个气候变化情景进行预测模拟。在 1961—1990 年与 2040—2069 年之间,全球平均温度将会分别上升 2.1℃和 3.2℃,温度上升幅度较小,如果改变马铃薯种植日期,改变品种,温度影响会减小。在高海拔区,若改变马铃薯播种时间,种植晚熟品种,温度升高对马铃薯产量不会产生影响,但是在低海拔地区,改变播种时间和地点,将会减少马铃薯产量,在热带地区种植耐热型品种可以减少温度的影响。马铃薯育种工作中,抗旱马铃薯品种的选育是比较复杂的,影响因素较多,比如田间管理、作物特性、周围环境等。LINTUL - POTATO 模型在育种工作中起到了重要的作用,Spitters^[36]等利用 LINTUL - POTATO 模型的特殊结构,针对抗旱马铃薯品种选育研究出将环境、田间管理、作物特性结合起来的方案,并对不同的育种方案进行评价,最终确定了有效的育种计划。

2.4 INFORCROP - POTATO 模型

INFORCROP - POTATO 模型^[37]发展于印度,应用于马铃薯生长、土壤水分、C、N 元素的动态变化、病虫害防治等方面。INFORCROP - POTATO 模型以一天为步长,其中包含着较完整影响马铃薯生长的因素。在物候期,它将马铃薯的生长过程分为三个阶段:种植到出苗;出苗到块茎形成;最后成熟。模型依据感光性原理,通过计算叶片的光辐射利用率、干物质同化率、根冠比、根系生长等进行预测模拟。在土壤水分与营养元素模块方面,模型考虑到影响水分变化的主要因素是蒸发量;土壤中营养元素的变化可划分为不同的过程。在病虫害影响方面,主要依据病虫害危害机制进行预测模拟,从而精确反映了病虫害对产量的影响。

2.5 CropSystVB - CSPotato 模型

CropSystVB - CSPotato 是由 CropSystVB 模型和 CSPotato 模型组合而成的马铃薯生长模型,兼备了两种模型的特点。CropSystVB 模型是 CropSyst 模型的更新版本,而且 CropSyst 已经被广泛用于评价作物产量和管理措施,尤其是在美国的太平洋西北地区^[38],CSPotato 是 Simpotato^[39]更新版本,在一定的农业灌溉条件下,CropSystVB - CSPotato 模型能有效模拟在马铃薯在循环生态系统中的生长、产量及土壤水分、养分变化情况。CropSystVB 还提供了一种数据结构框架,能够处理天气、土壤,以及作物每天输入与土壤输出等,CropSystVB 包含一种土壤 - 水分 - 植株 - 大气系统整体循环框架,能够模拟作物生长,发育,水分与 N 素平衡在作物轮作环节中的变化情况。CropSystVB - CSPotato 模型中以马铃薯

生长对碳水化合物(土壤中的有机质)的利用为基础,把马铃薯的潜在生长(根,茎,叶,块茎潜在生长的集合)加以研究。表明温度是决定潜在生长的主要因子,潜在碳同化量主要由最小光能利用率与水分胁迫生长来计算。

Ashok^[40]等人利用不同的马铃薯品种和不同的 N 肥处理试验,对 CropSystVB - CSPotato 模型进行了验证,结果显示对于产量结果与 N 肥吸收情况,模拟值与实测值拟合度高,证明 CropSystVB - CSPotato 模型是一种能够有效模拟马铃薯生长的工具。

2.6 HPOTATC 模型

在我国,黄冲平^[41]开发了模拟马铃薯生长发育的动态模型 HPOTATC,首次在国内完成了马铃薯生长发育模拟模型的构建。HPOTATC 包括马铃薯的生育期模型、株高、叶龄等植株个体性状模型、群体叶面积动态与光合生产模型、干物质积累与产量形成等模型。其中,生育期模型是基于高斯方程的温度效应非线性模型,该模型解析了不同生态条件下,马铃薯生育期变化的机理。在马铃薯植株性状与群体建成的模拟模型中,包含了对株高和叶龄的模拟。株高模拟模型以温度效应为基础,用高斯方程表达。在叶龄性状模型中,通过对马铃薯主茎各叶龄的叶片单叶面积和相同时期的分枝叶面积作系统的测定,模拟叶龄的发展趋势,并对相应叶龄序列的主茎

叶片和分枝叶面积进行积分,便得到叶面积的增长状况。在叶面积模型中,运用 Logistic 方程对整个生育期的叶面积变化进行动态模拟。在干物质积累模型中,以光合作用为基础,通过对冠层光合作用的分析,解析出干物质积累与日照强度、温度的关系。在产量模型中,以干物质的积累数值为基础,研究从起始结薯到最终块茎成熟生理年龄。黄冲平通过利用生态数学的方法(高斯方程)模拟马铃薯生长的同时,还对 HPOTATC 模型提出了几点改进意见:包括多种环境因素、病虫害的影响;根系的生长模拟到建模方法、参数确定、生产应用等。与此同时,他提出了应用同位素示踪技术进一步发展作物群体发育的动态模拟,推进数字化农业技术的途径,将马铃薯的模拟模型和专家系统相结合,组建成由预测、诊断和农艺措施联成一体的计算机优化管理决策、咨询支持系统,以扩大马铃薯模拟模型在未来生产中的应用。

在马铃薯生长模型的发展过程中,还出现了其它不同类型的模拟模型,例如荷兰瓦赫宁根研制的 SWACROP 模型^[9,42]、CropSystVB - CSPotato 模型^[38,40]、SIMPOTATO 模型^[39]、CROPSYST 与 SIMPOTATO 组合的 CROPSYST - SIMPOTATO 模型^[39-43]、POTATOS 模型^[44]、LPOTCO 模型^[45-46]。其各自的主要特点和应用情况等见表 2、表 3。

表 2 主要马铃薯生长模型的优缺点比较

Table 2 The comparison of potato growth models

主要马铃薯模型 Models	特点 Advantage	缺点 Disadvantage
SUBSTOR - potato 模型	能够完整模拟马铃薯的整个生长发育过程与生理生态过程,及土壤养分平衡与水分平衡;在模型中加入了马铃薯生长的遗传参数	与 CERES 模型相同,只含有对 N 素的动态变化模拟,缺少对其他元素的动态模拟
NPOTATO 模型	全面的马铃薯生长模型,主要模拟气候变化条件下的马铃薯生长,能够确定适宜的播种日期	气候变化条件下的马铃薯生长模拟,易受环境变化的影响,对气候依赖性大
LINTUL - POTATO 模型	通过冠层光能截获途径模拟气候变化对马铃薯生长发育影响,属于光温模型。作物生长速率由冠层辐射截获量和光能利用率(LUE)决定,依据感光性原理,计算叶片光辐射利用率、干物质同化率、根冠比、根系生长,进行预测模拟	侧重于作物生育的某些方面,难以定量描述和预测作物生长发育的综合关系
INFORCROP - POTATO 模型	应用于马铃薯生长,土壤水分、N 元素与 C 元素的动态变化,并包含了病害模块	属于单点模型,不能适用于大尺度的作物模拟
CropSystVB - CSPotato 模型	以马铃薯生长过程中 C、N 元素的动态变化过程为基础,预测马铃薯产量	缺少马铃薯遗传参数,机理性较弱
HPOTATC 模型	基本完成了马铃薯生育期,植株性状,群体建成,干物质积累与产量形成的模拟	基本参数存在一定偏差,生理生态过程变化的模拟存在经验性

3 马铃薯生长模型应用中存在的问题

现有的作物模拟模型中,存在着部分模型经验性强的情况,如同化物分配、形态发育、呼吸、光合

等过程的量化,均有待进一步的完善,同时许多模拟模型属于单点作物模型。目前,还没有完全普遍适用于大尺度模拟的模型,所以,在进行区域试验时,对最终模拟结果具有一定影响,而且模型中考虑的

环境因子尚欠全面,加之目前人们尚未发现的其它影响因素。因此,现有马铃薯生长模型存在着一些亟待解决的问题。如在地下水位较高的地区、引水灌区,土壤水与地下水的相互作用,对于马铃薯根系吸水、耗水及生长过程具有显著影响^[47]。但是,目

前绝大多数马铃薯生长模型未考虑地下水作用,即使考虑了地下水影响,也仅尽是将地下水位作为输入因子,这样就产生了一个影响因子,忽视了地下水分的动态影响,这足以引起模拟结果的较大误差。

表 3 马铃薯生长模型的应用及特点

Table 3 Application and character of primary potato growth models

模型 Models	类型 Style	应用地点 Locations	研发地 Source	应用 Application	参考文献 References
SUBSTOR - potato	生长模型	美国,阿根廷,捷克	美国	马铃薯生长及产量预测	[29 - 31]
HPOTATC	生长模型	浙江	中国	马铃薯的生育期,叶龄变化等植株个体性状,群体叶面积动态变化与光合生产、干物质的积累与产量形成进行了模拟	[41]
SIMPOTATO	生长模型	美国	美国	对马铃薯的生长过程,土壤过程进行模拟	[39]
CROPSYST - SIMPOTATO	生长模型	美国	美国	预测不同 N 肥和水分变化条件下 N 肥转化利用情况,所提供的信息用于确定合理施肥时期和浇灌时期	[39, 43]
CropSystVB - CSPotato	生长模型	美国	美国	有效模拟在马铃薯生长循环生态系统中,作物的生长状况,土壤变化情况及产量结果	[38, 40]
SWAPCROP	水分预测模型	古巴	荷兰	马铃薯生长过程之中的水分利用和产量结果预测	[9, 42]
LINTUL - POTATO	光温模型	荷兰,突尼斯,卢旺达	荷兰	模拟预测光能截获利用率及温度,昼长等对马铃薯块茎产量的影响	[34 - 36]
INFORCROP - POTATO	生长模型	印度	印度	应用于马铃薯生长,土壤水分, N 元素与 C 元素的动态变化,病虫害防治等方面	[37]
POTATOS	生长模型	欧洲	荷兰	在水分、营养元素、气候变化条件下马铃薯的生长	[44]
LPOTCO	生长模型	欧洲	欧洲	模拟预测气候变化对马铃薯的生长影响	[45, 46]
NPOTATO	生长模型	欧洲	荷兰	不同气候变化下,预测植株生长,同化分配,光合作用,植株器官衰老,水分平衡,胁迫环境下的同化产物分配和衰老	[32, 33]

马铃薯生长模型对产量的敏感性已经在苏格兰^[48]和美国^[49]的部分地区进行测试。在苏格兰的寒冷地区,由于生长季节中温度的逐渐升高可以产生较高的产量^[50],但是在气候比较温暖的地区,尤其是美国的南部,气温升高对马铃薯产量增加会产生负作用,这是由于地域温度不同影响了模型的预测稳定性,出现了应用局限性。此外,作物品种自身的不断升级,以及模型在不同气候环境下的有效利用性和敏感度的差异。这就要求以主要模拟气候变化条件下的马铃薯生长模型,在其模型参数中需依据大量多年气候数据,用来对气候变化参数作进一步的修正、测试、检验。

马铃薯的产量主要决定于冠层结构的光合作用,在 LINTUL - potato 光能截获模型中,通过计算冠

层光能截获值,就可模拟马铃薯的产量结果。但是,由于冠层结构(冠型、叶型、面积、倾角和曲度等)的复杂性、品种间差异及发育过程的动态变化等原因,使得精细的冠层内部光传播与截获模型结合分析极其复杂^[51],所以其难以在马铃薯生长模型中得到实际应用。因此,需要把冠层结构参数加以分析、研究,融入到 LINTUL - potato 光能截获模型中,从而提高模型的预测准确度。

此外,马铃薯生长模型应用中所需的参数较多,差别也大。模型机理性越强,参数越多,从而由参数不确定性所引起的模拟结果不确定性也就越高。由于模型运行需要的气候、土壤和作物遗传特性、管理措施等资料往往具有较大的不确定性,尤其品种的遗传参数,在不同的环境条件下其数据参数出现较

大的变异性,使得模拟效果和可靠程度还不能令人满意。虽然在 SUBSTOR - potato 模型中,已经加入了部分马铃薯遗传参数,但是由于多变环境及多种外界因素的影响,其预测结果与实际还有较大的偏离,所以,遗传参数还需进一步的校准。只有精确地测定或者合理地估计这些参数,并将其用于模拟模型,作物模拟模型的研究才会有一定价值。因此,未来还需要对马铃薯模型的参数估计和模型校正做进一步的研究。

在大多数马铃薯生长模型中,例如 SUBSTOR - potato, INFORCROP - POTATO 模型等,主要集中于对 C、N 和水分的动态变化进行了模拟,缺少对 P、K 元素的动态模拟。研究发现:马铃薯的产量在地下形成,水肥要求较高,而且对土壤的变化具有敏感性,包括土壤温度、水分等,并且马铃薯的整个生长发育阶段对 N、P、K 的利用率不同,K 元素是马铃薯一生中需求最多的营养元素,决定着块茎的形成,所以,在未来的模型中,K 元素的动态模拟也是一个重点。这就要求在以后的马铃薯生长模型发展改进过程中,依据马铃薯不同发育阶段对水肥的需求以及土壤温度的变化,精确到对每一个生长发育阶段的模拟,以减少模拟结果与实测结果的偏差。

4 马铃薯生长模型的展望

在中国西北干旱与半干旱地区,马铃薯是重要的粮食兼经济作物,其产量的高低直接影响农户家庭的收入,但是部分地区的水分、养分及病害对马铃薯的产量具有较大的影响。对水分和养分胁迫的定量模拟,是马铃薯模型合理应用的关键。水分与养分胁迫往往产生交互作用,且难以区分^[52]。对农作物生产中水分和养分管理的目的是实现生产效益的最大化或产量最大化、水肥资源的高效利用^[53]、以及环境保护等。但是,其主要问题是水分和养分胁迫与马铃薯响应之间的相互关系。模拟模型能否在马铃薯生产实际应用中发挥作用,取决于合理模拟水分和养分胁迫对作物生长的影响。在解决此问题的基础上,才能找出合理调控水肥供应的途径,提出相应的管理方法和水肥资源合理配置的方案,为长期进行资源的优化配置、产量预测及粮食安全风险评估提供有效依据。在常见马铃薯病虫害中,晚疫病、蚜虫对马铃薯生长影响较大,蚜虫不仅充当着晚疫病致病菌传播的媒介,而且还直接采食马铃薯。所以,蚜虫及晚疫病是马铃薯主要的减产因子。目前,国外对病虫害模型建立模拟发展较快,国内缺少对晚疫病模拟研究报道。因此,在以后的研究模

型模拟工作中,应建立全国范围内马铃薯晚疫病数据库,收集、整理马铃薯晚疫病传播的相关数据,包括气象数据、田间试验数据、疾病发生规律、蚜虫种群动态变化规律等。将病害发生模型与生长模型结合起来,建立一个比较全面综合的马铃薯病虫害预测系统,准确预测晚疫病发生的时间,做到及时防治病虫害。

在今后的总体研究中,马铃薯生长模型主要应用在宏观和微观两个层面上。在宏观层面上,马铃薯生长模型与决策支持系统、网络技术等高新技术或其它模型进一步有机结合,可以大范围的对马铃薯长势进行实时动态监测。在未来的作物模型研究中,应发展更有效的马铃薯生产力模型与气候模式相结合的方法,选择更好的、合理的气候模式预测未来气候的变化情况,评价全球气候变化对马铃薯产量的影响,做到能够实时预测不同气候条件下马铃薯的发育过程和产量,为进一步指导大田生产马铃薯;为收获营养器官的其他作物(如红薯、蕃茄等)的模拟模型建立提供理论参考;为国家和地区制定气候变化的适应政策提供科学依据。在微观层面上,马铃薯生长模型的研究进一步趋向精细化、具体化、机理化。马铃薯生长模拟与 3S 技术相结合使得马铃薯的精细生产达到了实现:如 Han 和同行^[54]已经将 SIMPOTATO 与 GIS 结合起来研究马铃薯产量与土壤中 N 元素分布情况,提高了大田生产马铃薯的效益。科学是第一生产力,计算机的发明与应用使科学研究更高效化和准确化,利用计算机技术建立虚拟马铃薯植株、模拟马铃薯植株结构与环境因子的关系、研究基因与马铃薯植株发生发育的关系、激素与其他新陈代谢产物和马铃薯形态发生学的关系;根据马铃薯生长模型在各地区的要求和各地的自然条件的差异,建立起马铃薯生长模型所需的标准化参数数据库,提高马铃薯生长模型的通用性和兼容性,在马铃薯生长的不同时期,对其个体、器官、组织、细胞以及生理生化过程进行模拟,以及对地上部茎叶发育与地下部块茎形成进行动态模拟,使得最终的模型模拟结果更加准确,更加可信。

5 结 语

作物生长模型经历了几十年的发展。马铃薯作为主要的粮食作物之一,其生长模型的研究已取得长足的进步与显著的效果。与美国、荷兰等农业发达国家相比较,我国的作物模型模拟技术相对较为落后,尤其是在马铃薯生长模型方面,国内的有关研究处于初级阶段,尚未全面展开,一些技术体系还不

成熟,所以,今后我国的马铃薯生长模型开发与研究需大量借鉴国外的模拟技术和经验。同时,完善优化现有的以主要营养元素、水分胁迫、病虫害在内的综合动态模拟模型,建立起模型所需的对应标准化参数数据库,利用马铃薯生长模型与遥感技术,使地理信息系统和计算机专家系统相结合,开展区域农业发展研究。最终,设计开发出更完善科学的马铃薯生产计算机决策管理系统。

参考文献:

- [1] Št'astrná M, Toman F, Dufková J. Usage of SUBSTOR model in potato yield prediction[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, (97): 286-290.
- [2] 马波,田军仓.作物生长模拟模型研究综述[J].*节水灌溉*, 2010, (2):1-5.
- [3] Sinclair T R, Seligman N G. Crop modeling: from infancy to maturity[J]. *Agronomy*, 1996,88:698-764.
- [4] 罗毅,郭伟.作物模型研究与应用中存在的问题[J].*农业工程学报*, 2008,24(5):307-312.
- [5] 刘其永.作物生长模拟模型现状及发展趋势[J].*福建电脑*, 2008,7:54-65.
- [6] Stigter C J. Experimental evaluation of a crop climate simulation model for indian corn (*Zea mays* L.)[J]. *Agricultural Meteorology*, 1977, 18(3):163-186.
- [7] Ng E, Loomis R S. Simulation of growth and yield of the potato crop [C]//*Simulation Monographs* Pudoc, Wageningen, 1984.
- [8] 谢从华.数学模型在马铃薯研究中的应用[J].*马铃薯杂志*, 1989,3(3):176-179.
- [9] Feddes R A. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone-State of the art[J]. *Hydrology*, 1988,100(1-3):69-111.
- [10] Sands P J. 预测马铃薯出苗期的数学模型[J].*农业新技术新方法*, 1990,2:25-32.
- [11] Sands P J, Regel P A. A simple model for predicting graded yields[J]. *Field Crops Research*, 1983,6:25-40.
- [12] Ejjeji C J, Gowing J W. A dynamic model for responsive scheduling of potato irrigation based on simulated water-use and yield[J]. *Agricultural Science*, 2000,135:161-171.
- [13] 张永成,谢连美.马铃薯丰产栽培综合农艺措施数学模型的研究[J].*马铃薯杂志*, 1989,3(2):79-87.
- [14] 杜守宇,田恩平,黄广龙.马铃薯栽培综合农艺措施数学模型及优化方案研究[J].*马铃薯杂志*, 1991,5(1):25-31.
- [15] 高聚林,刘克礼.马铃薯高产优化栽培措施与产量关系模型的研究[J].*马铃薯杂志*, 2003,17(3):131-137.
- [16] 陈俊珊,徐福祥,桑德福.高寒阴湿地区渭薯1号综合农艺措施数学模型及优化方案的研究与应用[J].*马铃薯杂志*, 1998, 8(1):36-40.
- [17] 龚学臣,杨立廷,牛瑞明,等.冀西北旱地马铃薯肥料效应数学模型的研究[J].*马铃薯杂志*, 1998,12(1):3-6.
- [18] Yuan A M, Bland W L. Light and temperature modulated exponential growth model for potato (*Solanum tuberosum* L.)[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004,121:141-151.
- [19] 曹兴明,穆俊祥,张宏智,等.乌兰察布地区马铃薯优化施肥方案及函数模型建立[J].*集宁师专学报*, 2008,30(4):45-52.
- [20] 姜志伟,陈仲新,周清波,等.CERES - Wheat 作物模型参数全局敏感性分析[J].*农业工程学报*, 2011,27(1):236-242.
- [21] 戴明宏,陶洪斌,廖树华,等.基于 CERES - Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J].*农业工程学报*, 2008,24(4):30-36.
- [22] 罗霄,李忠武,叶芳毅,等.水稻生长模型 CERES - Rice 的研究进展及展望[J].*中国农业科技导报*, 2009,11(5):54-59.
- [23] 潘学标,韩湘玲,石元春. COTGROW: 棉花生长发育模拟模型[J].*棉花学报*, 1996,8(4):180-188.
- [24] Baker D N, Lambert J R, Mckicion J M. Gossym, A simulator of cotton growth and yield[R]. *South Cordina*, 1983.
- [25] Mithra V S S, K. Somasundaram. A model to simulate sweet potato growth[J]. *World applied sciences journal*, 2008,4(4):568-577.
- [26] Vandendriessche H J. A model of growth and sugar accumulation of sugar beet for potential production conditions: SUBEMOpo I. Model performance[J]. *Agricultural Systems*, 2000,64(1):1-19.
- [27] 沈禹颖,南志标, Bill Bellotti, 等. APSIM 模型的发展与应用[J]. *应用生态学报*, 2002,13(8):1027-1032.
- [28] 潘学标,韩湘玲,王延琴,等.棉花生长发育模拟模型 COTGROW 的建立 II 发育与形态发生[J].*棉花学报*, 1999,11(4):174-181.
- [29] Travasso M I, Caldiz D O, Saluzzo J A. Yield prediction using the SUBSTOR - potato model under Argentinian conditions[J]. *Potato Research*, 1996, (39):305-312.
- [30] Bowen W, Cabrera H, Barrera V, et al. Simulating the response of potato to applied nitrogen[R]. *Impact on a Changing World. International Potato Center Program Report 1997 - 1998*, págs. Lima, 1999:381-386.
- [31] 孙芳,林而达,李剑萍,等.基于 DSSAT 模型的宁夏马铃薯生产的适应对策[J].*中国农业气象*, 2008,29(2):127-129.
- [32] Wolf J. Comparison of two potato simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analyses[J]. *Climate Research*, 2002,21:173-186.
- [33] Kooman P L, RABBINGE R. An analysis of the relation between dry matter allocation to the tuber and earliness of a potato crop[J]. *Annals of Botany*, 1996,77:235-242.
- [34] Kooman P L. Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and daylength[D]. *Landbouwniversiteit te Wageningen: Wageningen Agricultural University*, 1995.
- [35] Hijmans R J. The effect of climate change on global potato production[J]. *Potato Research*, 2003,80:271-280.
- [36] Spitters C J T, Schapendonk A H C M. Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation[J]. *Plant and Soil*, 1990,123:193-203.
- [37] Aggarwal P K, Kalara N, Chander S & Pathak H. Infocrop - A generic simulation model for annual crops in tropical environments [C]//*Indian Agricultural Research Institute, New Delhi*, 2004.
- [38] Stockle C O, Donatelli M, Nelson R. CropSyst, a cropping systems [J]. *Europ Agronomy*, 2003,18:289-307.
- [39] Hodges T, Johnson S L, Johnson B S. A modular structure for crop simulation models: Implemented in the simpotato model[J]. *Agron-*

- my, 1992, 84:911-915.
- [40] Ashok K. Alva, Claudio Stockle J M, Vangilmalla R. Reddy & Dennis Timlin. A crop simulation model for predicting yield and fate of nitrogen in irrigated potato rotation cropping system[J]. Crop Improvement, 2010, 24:142-152.
- [41] 黄冲平. 马铃薯生长发育的动态模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [42] Ruiz M E. Using model SWACROP for potato(v. Desiree) water use and crop yields[D]. Cuba: Agrarian University of Havana 1998, 120.
- [43] Stockle C O, Martin S A, Campbell G S. CropSyst, a cropping simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield[J]. Agricultural Systems, 1994, 46:335-359.
- [44] Spitters C J T. Crop growth models: their usefulness and limitations [J]. Acta Horticult, 1990, 267:349-368.
- [45] Wolf J, Oijen M V. Modelling the dependence of european potato yields on changes in climate and CO₂[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112:217-231.
- [46] Wolf J, Oijen M V. Model simulation of effects of changes in climate and atmospheric CO₂ and O₃ on tuber yield potential of potato (cv. Bintje) in the European Union[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 94:141-157.
- [47] Luo Yi, He Chansheng, Marios Sophocleous, et al. Assessment of crop growth and soil water modules in SWAT2000 using extensive field experiment data in an irrigation district of the Yellow River Basin [J]. Hydrology, 2008, 352(1-2):139-156.
- [48] Peiris D R, Crawford J W, Grashoff C, et al. A simulation study of crop growth and development under climate change[J]. Agricultural Forest Meteorology, 1996, 79:271-287
- [49] Rosenzweig C, Phillips J, Goldberg R, et al. Potential impacts of climate change on citrus and potato production in the US[J]. Agricultural Systems, 1996, 52(4):455-479.
- [50] Kabat P, Marshall B, van den Broek B J. Comparison of simulation results and evaluation of parameterization schemes, in modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system[C]//Kabat P, Marshall B, van den Broek B J, et al. A Comparison of Potato Growth Models. Wageningen Pers, Wageningen, 1995:439-501.
- [51] Rosati A, Badeck F W, Dejong T M. Estimating canopy light interception and absorption using leaf mass per unit leaf area in solanum melongena[J]. Annals of Botany, 2001, 88(1):101-109.
- [52] Sadras V O. Yield and water-use efficiency of water-and nitrogen-stressed wheat crops increase with degree of co-limitation[J]. Agronomy, 2004, 21(4):455-464.
- [53] Panda R K, Behera S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for maize under stressed conditions[J]. Agricultural Water Management, 2004, 66(3):181-203.
- [54] Han S, Evans R G, Hodges T, et al. Linking a geographic information system with a potato simulation model for site-specific crop management[J]. Environment Quality, 1995, 24:772-777.

(上接第 106 页)

棉花花铃期应适当增加磷肥的施入量,而桃期后期应适当减少磷肥的施入量。红枣和棉花在磷肥的竞争上相对水分而言较小,根据棉花和红枣的不同生育特点可以将这种竞争降到最低。棉花和红枣在钾肥的竞争利用上相对剧烈,在枣树新稍增长期和幼果期和果实膨大后期应控制钾肥的施入量,而花期和果实膨大前期应增大钾肥施入。棉花从花铃期到桃期后期应适当增加钾肥的施入量,其它阶段应对钾肥的施入进行控制。

参 考 文 献:

- [1] 李林, 张文新, 苏柳芸. 新疆地区红枣产业发展现状与战略思考[J]. 北方果树, 2008, (1):35-37.
- [2] 张卫东, 范荣尚, 贾家贤. 阿克苏地区枣粮间作高产配套栽培技术[J]. 新疆农业科技, 2010, (2):54-55.
- [3] 刘开昌, 胡昌浩, 董树亭, 等. 高油玉米需磷特性及磷对籽粒营养品质的影响[J]. 作物学报, 2001, 27(2):267-272.
- [4] 孙克刚, 姚健, 焦有, 等. 棉花的需肥规律与施钾研究[J]. 土壤肥料, 1999, (3):12-14.
- [5] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, 12:22-192.
- [6] 杨玉玲, 盛建东, 田长彦, 等. 盐化灌淤土壤速效氮、磷、钾空间变异性与棉花生长关系初步研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5):542-547.
- [7] 郑德明, 姜益娟, 柳维扬. 新疆棉田土壤速效养分的时空变异特征研究[J]. 棉花学报, 2006, 18(1):23-26.
- [8] 宋锋惠, 吴正保, 史彦江. 枣棉间作生态系统内根系和棉花产量分布及土壤养分时空变化[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(1):48-53.
- [9] 朱敏, 梁智, 徐万里, 等. 新疆绿洲棉田土壤养分时空分布特点[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(5):1076-1081.
- [10] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1):79-88.
- [11] 赵军, 刘焕军, 隋跃宇, 等. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1):41-45.
- [12] 王宏庭, 金继运, 王斌, 等. 土壤速效养分空间变异研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4):349-354.
- [13] Buresh R J, Tian G. Soil improvement by trees in sub-Saharan Africa[J]. Agro forestry Systems, 1997, 38(1/3):51-76.
- [14] Makumba W, Janssen B, Oenema O, et al. The long-term effects of a gliricidia-maize intercropping system in Southern Malawi, on gliricidia and maize yields, and soil properties[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2006, 116:85-92.