

作物生长模拟模型在我国农业气象 业务中的应用研究进展及思考

王石立 马玉平

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要: 近年来我国农业气象科研和业务部门紧密结合,开展了作物生长模拟模型应用于农业气象业务的研究和应用试验工作。基于国外作物生长模拟模型的应用进展以及我国农业气象业务的现状,简要分析了农业气象业务中应用作物生长模拟模型的必要性和紧迫性。针对单点理论模型能否在业务中应用的疑惑,详细讨论了国外引进作物生长模型的本地化和单点理论模型在区域尺度上模拟应用等两个关键问题的重要性和技术方法。重点介绍了近年来我国气象系统农业气象科研和业务部门在推进作物生长模拟模型在农业气象业务应用方面所做的工作,即基于东北玉米、华北小麦和江南双季稻生长模型的气象条件影响评价和产量动态预测方法等。最后从改进完善作物生长模拟模型、探讨区域模拟应用技术及稳健推进业务应用和实施等方面分析了目前存在和出现的问题,以及可能的解决途径。

关键词: 作物生长模拟模型 农业气象业务 应用

The Progress in Application of Crop Growth Simulation Models to Agro-meteorological Services in China

Wang Shili Ma Yuping

(Chinese Academy of meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The research and application of crop growth simulation models in agro-meteorological services were carried out in recent years in China. The necessity of applying crop growth simulation models to agro-meteorological services was analyzed on the basis of reviewing application of crop growth simulation models around the world and the state of agro-meteorological services in China. The methodology of localization research of foreign models and the approach of application

中国气象局 2007 年多轨道业务建设项目“中国农业气象灾害监测预警系统建设”和国家科技支撑计划课题“农业重大气象灾害监测预警与调控技术研究”之“北方农业干旱监测预警技术研究”课题(2006BAD04B01)资助

收稿日期:2008年1月17日; 修定稿日期:2008年3月18日

of model from single site to regional scale were discussed. It is focused on the progress in application of crop growth simulation models to agro-meteorological services in China, and effect assessment of meteorological condition on crops growth and dynamic forecasting of crop yield by using maize growth modal in North-East China, wheat growth model in North China and double cropping rice model in the middle Yangtze River valley. Finally, the existing problems and possible resolution in applying crop growth simulation models were proposed from mechanism improvement, regional scale application, as well as operational implement.

Key Words: crop growth simulation models agro-meteorological services application

引 言

作物生长动力模拟模型从系统科学的观点出发,遵循农业生态系统物质平衡和能量守恒原理及物质能量转换原理,以光、温、水、土壤等条件为环境驱动变量,运用数学物理方法和计算机技术,对作物生育期内光合、呼吸、蒸腾等重要生理生态过程及其与气象、土壤等环境条件的关系进行逐日动态数值模拟,再现农作物生长发育及产量形成过程。它综合考虑大气、土壤、作物遗传特性和田间管理等因素对作物生产的影响,克服了传统的作物-天气统计模型的缺点,是一种面向生育过程,机理性很强的数值模拟模型。1990年代以后,随着需求的加大和技术的发展,作物生长模拟模型在世界各地得到了广泛应用。模型研究人员在机理性和应用性并重、作物模型与其他学科模型结合、模拟技术与其他信息技术相结合等方面做了很多工作^[1-2]。作为一种工具,作物生长模拟模型在区域和全球尺度上的环境、资源、可持续发展以及气候变化影响、作物生长监测、产量预测、农业生产决策管理等方面发挥着重要作用^[3]。欧盟各国已将 WOFOST 模型成功应用于作物生长监测和农业产量预测等日常业务^[4]。自 1990 年代初作物模拟技术引入我国以来,相关领域和相关部门的众多学者对作物生长模拟模型进行了大量深入细致的研究,并在气候变化影响评估、作物栽培模拟优

化决策、农业管理决策支持系统、精准农业和农业气象服务系统等方面积极开展了推广应用,取得了许多有意义的成果^[5-12]。

近年来我国农业气象服务业务的科技含量有所提高,一些科研成果陆续应用于农作物生长气象条件评价和产量预测业务。利用农业气象指标进行作物气候年景评价^[13];考虑农业气象灾害的作物敏感性、气候脆弱性和灾害影响权重因素的农作物产量灾害损失业务评估^[14];选取作物生长期内逐旬气温、降水和日照时数资料,运用综合聚类方法动态预测产量^[15-16]等均已投入实际业务。

但是,我国是农业大国,国家粮食安全始终是我国经济发展与社会和谐面临的重大问题,气候变化引发的极端气候事件频繁发生直接影响着农业可持续发展。政府和公众对及时准确的农业气象条件评价、灾害损失评估及产量动态预测的需求十分迫切。但是,目前我国农业气象服务业务中对农作物生长气象条件评价的科学定量程度和动态跟踪能力还很不够,已有的一些气象影响评价模型多以统计手段为主,亟待进一步改进;产量预测仍然沿用传统的统计预测模型,机理性不足,而且存在统计模型固有的拟合较好,外推效果较差的局限性。业务服务人员已经深感产量预报模型有待于机理化和动态化^[17]。因此,积极引进国外先进的作物生长数值模拟技术,在传统统计方法的基础上,逐步发展可在业务中应用的机理性较强的新一代农业气象数值模拟模型,增强农业气象服务能力,

已成为我国农业气象业务发展的必然趋势。

1 区域尺度应用作物模拟模型需要解决的关键科学技术问题

由于作物生长模拟模型复杂,一些参数需要从田间试验数据中获取,加之模拟结果与作物生长实况尚有一定出入,因此常常被认为只是供研究使用的单点理论模型。近年来的研究实践表明,只要设法解决国外引进生长模型的本地化和单点试验研制的作物模型在区域尺度上的应用等关键问题,作物模型是有可能逐步应用于农业气象服务业务的。

1.1 国外引进作物生长模型的本地化

目前国际上的作物生长模拟模型很多,大体上可分为荷兰 Wageningen 大学系列模型、美国 CERES 系列模型、澳大利亚 AP-SIM 模型以及俄罗斯作物生长模型等几个类型。但不管引进使用哪一类模型,在使用这些模型前,首先要用本地实测资料对模型中的一些重要参数(如遗传参数、土壤参数等)进行调试或校准,然后再用另一批数据进行检验,以保证得到较好的模拟结果。这些工作对于界面友好、具备参数优化功能的作物模型都是比较容易的。目前一些做法就是以少数试验数据得到的参数大致取值范围,利用模型或自己开发的优化程序,在此范围内反复调试参数,直至模拟的发育期和生物量数值与观测值的误差在给定的允许误差范围内,最终得到比较合理的参数。然而,对于真正的模式研究和应用来说,只做到这一步显然是不够的。因为各种模型描述的作物生长过程、遗传特性以及各地的生态气候类型不尽相同,直接用于我国农业气候条件下的农作物品种时,往往会出现偏差。况且有些参数调试过程只是纯数学意义上的多变量优化算法。如果只利用有限地点、有限年份的观测资料单纯调试参数,就有可能出现部分

变量模拟效果较好,但其生物学意义或科学意义有纰漏的现象。因此应当熟悉掌握作物模型的结构内容,利用详尽的作物田间试验观测数据对一些参数进行校准,对一些过程或模块进行适应性修改。例如荷兰 WO-FOST 小麦模型主要针对欧洲小麦的品种生态类型,对于冬季生长过程的处理仅以夜间最低温度 7 日滑动平均值低于 0°C 表示不再有同化物生成。但是我国季风气候明显,华北冬季严寒,冬小麦生育期间存在较长的越冬休眠期。直接使用该阈值模拟的小麦停止生长和返青日期与实际观测相差很大。因此,对 WOFOST 模型本地化的研究从华北冬小麦停止生长和返青期气象指标(日平均气温)入手,确定华北不同地区日平均气温与最低温度的对应关系,以计算得到的各地停止生长和返青期最低温度作为 WOFOST 模型判断越冬开始和终止的指标,就有可能较好地解决直接应用 WOFOST 模型模拟发育进程误差太大的问题^[18]。

1.2 作物生长模型的区域尺度应用技术

鉴于环境变量(如天气、土壤)和管理变量的非均匀性,在将假设环境均匀的单点、田块或小区水平的作物生长动力模型应用于更大空间尺度和更高级系统水平时,面临的最大问题是升尺度连接(scaling-up)。

(1) 基于单点参数和模型模拟结果的作物模型区域应用

除了实验室测定,不随时间地点品种而变的生理性参数外,作物生长模拟模型中有些参数随作物发育期而变,因品种、地区而异,使用模式时需要根据实际情况加以确定。

值得提出的是,有些研究选择研究区域内有一定代表性的较多数量的站点,在获得单点参数的基础上运行作物模型,给出站点模拟结果,或者再利用地理信息系统对离散点的模拟结果进行插值得到空间格点分布^[19]。也有研究考虑到模型应用对象的需要,分别用不同地点的实际产量序列对由田

间试验资料确定的发育参数和光合作用参数进行微调,得到“地区性参数”,以求参数值在地区范围内具有较好的代表性。针对实际产量序列的增长趋势,用时间趋势处理得到的气象产量加上近 5 年的平均产量对实际产量进行订正,以扣除产量长序列中的科技进步影响作用。从模拟结果看,订正后的“地区性参数”能反映地区尺度上的品种特性,并较好地模拟区域产量的变化趋势^[20]。这一作法比直接调试特定地点的参数前进了一步。

(2) 基于气象要素空间插值和作物参数分区的作物模型区域应用

在作物生长模型应用于分析较大空间尺度的作物生长状况等问题时,往往希望得到详细的空间分布差异,而单点参数的普适性相对有限。因此东北玉米冷害预测研究中采用了气象要素格点插值和作物参数分区的方法,即考虑到作物模型中驱动变量气象因子的空间属性,借助 GIS 适当的插值方法,将台站逐日气象要素值插值为具有较高分辨率的格点输入值^[21]。同时,对于以具有地理属性的气象要素表示、空间变异明显的发育参数,根据品种、气候、地形因素划分若干区域,每个区域内格点上的参数值相同^[22]。这样,在格点上运行作物模型即可得到空间模拟结果。这一做法比较适合在较大范围内使用。

2 我国农业气象业务应用作物生长模拟模型的研究和推广进展

为了加快科研成果的转化,增强我国气象为农业服务的能力,中国气象科学研究院在作物模拟多年研究基础上,积极推进作物生长模拟模型在农业气象研究和服务业务中的应用^[23],其中作物模型与区域气候模式结合的气候变化农业影响评估和新一代农业气象灾害预警技术研究已取得初步成果^[24]。2005 年与国家气象中心生态与农业气象室合作,在中国气象局新技术推广项目“新一代农作物生长气象影响评估及产量预测模型业

务应用开发与推广”支持下,尝试了基于东北玉米、华北小麦和江南双季稻生长模型的气象条件影响动态评价及产量动态预测方法应用研究,探讨了在农业气象业务应用中可能出现的问题和解决途径。2007 年进一步通过中国气象局多轨道业务建设项目“中国农业气象灾害监测预警系统建设”的支持,在一些相关省级农业气象研究所和业务部门继续进行研究和推广,取得了一定的经验和成果。

2.1 基于作物生长模型的农业气象条件影响评价

在农业科技水平、农业投入、土壤性状及作物品种特性等基本不变的情况下,气象条件是直接影响作物生长、发育及产量形成的主要因素。因此,利用作物生长模型进行农业气象条件影响实时评价是作物模型的一个最直接、最有前景的应用领域。欧盟各国已用作物模型开展作物生长状况监测服务,提供本年度和上年度的生物量累积曲线,或利用 GIS 给出本年度生物量的空间分布(<http://mars.jrc.it/bulletins.htm>)。我国气象部门在这方面也进行了积极的尝试。探讨了作为评价标准的平均气候状态下平均模拟生物量的确定方法,提出实时动态评价方案,采用先模拟后平均的方法;以模型中的发育阶段(DVS)作为比较评价中的时间“指针”,以保证时间上的可比性^[25]。在此基础上,利用作物生长模型和实时逐日气象资料,通过对模拟的累积生物量及其与历史同发育进程模拟数值的比较来动态评估当前天气气候条件对作物生长影响的利弊。其中选择发育进程和生物量(叶面积指数、地上部分生物量)两大要素的年际相对变化值进行农业气象条件优劣的评价。发育进程与近几年平均或上 1 年相比较,通过发育期的推迟或加快描述农业气象条件状况;生物量按主要发育阶段与前几年平均或上 1 年模拟结果相比较,通过增减百分率评价农业气象条件的优劣。评价产品有区域动态评价图和单点动态评价曲

线两种。区域动态评价在主要发育阶段进行,单点动态评价可逐日连续分析。

考虑到北方农业干旱发生频繁,华北冬小麦模型可以根据需要逐旬给出华北地区农业干旱指数评估干旱程度,东北玉米生长模型则在东北地区出现水分胁迫时逐旬给出水分胁迫对生物量影响的定量结果。

由于作物生长模拟模型面向生长过程,从机理上较好地考虑了光、温、水等气象要素对作物生长发育和产量形成的综合影响,同时在比较评价中使用了生物量相对变化数值,因而作物生育期内各评价日期得到的模拟生物量距平(距前 X 年平均或距上一年)的实时动态变化趋势与农业气象条件实时监测结果相当一致,显示出较强的农业气象条件影响评价能力。

利用 2007 年为省级农业气象业务开发的基于作物生长模拟模型的农业气象条件影响评价和产量动态预报系统,分别对吉林、辽宁、河南、湖南、江西等省进行了 2006 和 2007 年逐旬玉米、小麦和双季稻的农业气象条件影响评价应用试验,均得到了较好的结果。

2.2 基于作物生长模型的作物产量动态预测

传统的天气-作物产量预测是建立最终产量与前期气象条件的统计相关关系,不考虑作物本身的生长状况及其动态变化。而农作物最终产量的形成是作物生育期内生物量不断积累的过程,前后期积累的生物量之间存在一定关联性;气象条件对农作物生长过程的影响也具有一定的持续性。因此有可能从动态预测的角度出发,根据模拟到的作物生长中后期累积干物质数量来预测最终产量。最简单而直接的方法是以实时气象资料和后期气候平均值组成全生育期完整的气象数据,运行作物模型,在不同时间段动态预测产量。另一种方法是利用生长模型和前期实时气象条件预测作物产量,即确定作物生长

中后期累积的干物质与最终产量的相互关系,建立动力-统计型的作物产量动态预测模型,在作物生长的中后期,利用前期实时模拟的累积干物质重量动态地预测气象产量,进而借助趋势产量预测最终产量。为了与作物生长模型模拟的生物量的含义(假定土壤、品种等处于适宜状态或基本不变,以光温水等气象要素为主要因子驱动模型的结果)相匹配,建模所用产量取实际历史产量剔除趋势产量后的剩余波动部分,即气象产量。

在江南区域双季稻生长模型基础上建立的江南地区 22 个地市历年早、晚稻生长中后期不同发育阶段(孕穗、开花、乳熟、成熟)的产量动态预报模型大部分通过不同显著性水平的检验。一些地市的产量动态预测模型随着发育进程的推进,通过的显著性检验水平从 0.10 逐步上升到 0.05,表明越接近生长后期,模拟的干物重与气象产量的关系越密切。但也有少数结果呈相反趋势,还需要进一步寻找原因。以动力-统计预测模型结合趋势产量预测的江南双季稻产量动态预测取得了较满意的结果^[26]。

然而,该方法最初用于东北各地玉米产量预测时效果欠佳。通过对东北吉林、辽宁两省玉米产量的变化及其与降水、温度关系的分析,发现东北历年玉米产量不甚稳定,变异系数很大;两省玉米生育期内降水量东西部差异很大;西部地区玉米产量与降水关系密切;同时,玉米模型能较好地模拟受水分影响的生物量。因此,模拟的最终总干重与实际产量变化的统计相关密切,有可能在生长中后期利用模拟的前期累积干物质重量来预测其最终产量。但对于水分条件较好,玉米产量受降水影响较小的东部地区,则可能不适宜采用这种方法。

2.3 便于业务部门使用的计算机应用系统

为了使省级农业气象业务人员能够掌握上述技术,科研人员开发研制了专供业务人员使用的基于作物生长模型的农业气象条件

影响评价和产量预测的计算机应用系统。业务人员只要经过培训,掌握操作方法(包括某些参数的简易修正与调整),就能编制出相应的服务产品。

3 进一步推进业务应用的思考

农业系统是一个包含非生物和生物因素之间大量相互关联相互作用的复杂系统,作物生长模拟模型作为一种系统分析方法和描述这些响应的平台,在帮助理解这一复杂系统方面起着很大作用。基于这一理由,应用作物模型本身就是一个研究科学的过程,来不得半点浮躁和简单化。要以科学和严谨态度,积极稳妥地进行,杜绝浮躁冒进。研究和应用模型可以有所侧重。模式研制人员要对模拟理论和模型内容有深入了解,做到引进、消化、掌握、改进,不断提高模拟能力,并逐步发展自己的作物模型。业务应用人员也要对模型有基本了解,侧重于探讨在业务中应用的方法和途径。如有可能,最好参与模型的本地化研究,利用本地资料,结合本地的农业生产和具体的农业气象问题,检验和改进模型。

3.1 努力改进完善作物生长模拟模型

完善改进作物生长模型,不断提高作物模拟的科学性始终是模型应用工作的前提和基础。

(1) 加强国外引进模型的本地化和适应性研究。要重视研究的作物对象,广泛收集农业资料、田间试验资料和长期物候观测资料,进行多点、长序列资料的验证。要注意分析品种变化和产量差异。参数调整和过程改进要慎重进行。切忌数字游戏,避免只根据有限点的验证便直接在大范围使用,避免仅用单一资料(如受科技水平和人为因素影响的统计部门产量数据)调试模型后就推广应用。

(2) 紧密结合本地农作物和品种的生长

特性及农业气象问题,有针对性地改造已有模型,发展新模块、新方法,力求发展具有自主知识产权的模型应用系统。

(3) 作物模拟模型不是万能的,它所模拟的只是特定农业生产水平、作物品种特性等条件下,由随机变化的气象条件所驱动的作物生长过程,一些极端异常、严重致灾气象条件的影响还很难从机理上描述,也很难模拟出来。即便有的引进模型中有一些对于干旱、高温胁迫影响的描述,也具有一定的经验性和局限性。因此,要考虑极端气象事件的影响,注意收集当地有关农业气象灾害等研究成果,补充、修正和改进已有的作物模型,使之能更客观准确地模拟本地作物的生长发育及产量形成过程。

3.2 积极探讨区域化应用技术

把来自属性均匀小区上的作物动力模型应用到更大区域时还有很多技术尚未解决。

(1) 作物、土壤等一些重要参数的确定。如前所述,单点调整作物参数的方法在区域上使用时存在普适性不足的缺陷,实际业务应用时会受到很大限制。基于作物参数分区的做法可以满足调整站点的需要或在格点上应用,但是对区域划分的客观准确有较高要求,分区也不宜过大。针对研究气候变化对大范围区域影响评估的需要,有研究探讨了GIS技术支持下,改造基于站点的作物生长模拟模型得到大范围网格点为单元的模拟^[27]。当前需要积极探讨应用地理信息技术,同时又符合生物学意义的区域模拟和应用方法。

(2) 模拟分析的空间尺度的确定。应用区域作物模型分析区域上作物响应的环境变量原因时,人们关心的是输入变量如气象条件空间各点的时间变异形式。但多数情况下人们更关心区域内作物响应的结果。应当在空间格点还是在离散站点上进行模拟呢?除了气象资料因子的空间尺度外,还要看应用的需要。一般说来,分析较大空间范围内气

象对农业影响以及各地差异时,关注的是超越站点行政边界的整体空间分布情况,此时以格点模拟为宜。而对于地方尺度的服务来说,可能更加关心具体地市、县级区域内作物的响应。但此时会出现由于用一个或几个站点的环境变量代表研究地区环境变量的平均值或用对平均环境变量的响应去估计对非均匀环境的非线性响应的平均值,而产生归并(聚合)空间误差。这种情况下,需要深入分析作物生长环境变量的时间空间变异及作物响应,探讨区域模拟时误差产生的原因及控制或减小误差的方法。有关研究建议,第一要合理化输入取样,例如利用GIS的地理场取样,基于Monte Carlo方法推导分析模拟响应结果的分布概率场取样;第二,进行区域校正,用研究地区响应变量的历史资料,通过校正模型的输入和输出以描述和减小偏差;第三,处理不完善资料,借助地理信息系统、遥感、网络等现代信息技术和数学方法,获取质量可靠并有一定空间覆盖度的土壤、天气和作物管理等输入数据^[2]。欧盟CGMS项目中即采用天气要素插值-模拟产量聚合的作法^[4],国内也有仿照这一做法的研究^[28]。

3.3 稳健推进在农业气象业务中的应用和实施

(1) 影响评价和产量动态预测方法需要进一步改进和完善

作物生长模型应用于气象影响评价的原理、结果和试应用方面已经显现出较好的前景,但在评价方法、标准、内容上还有值得深入探讨之处。基于作物模型的产量动态预测可以得到由本地气象条件决定的地市或县级的实时动态产量预报,是大范围统计模型预报的补充,具有一定的优越性。但是目前一些模型的预测效果和精度还不够理想。除了与模型本身的模拟能力、对气象条件的灵敏程度有关外,还和地区、作物种类、生产水平等很多因素有关,需要积极寻求改进办法或其他更好的方法。鉴于作物模型的实时评价

能力较强,今后可以考虑将气象灾害损失动态评估与动态的产量预报相结合的作法。

(2) 业务化实施方案需要真正落实

农业气象业务引进作物模式的思路是依托台站监测网络,根据实时气象资料逐日、逐旬给出农业气象条件评价及产量动态预测结果,为农业气象服务提供定量依据。实现业务化首先要解决实时气象资料的获取和格式自动转换问题。受制于目前气象系统的监测和信息传输网络渠道,不少省份实时气象资料的及时获取还存在一些问题,需要尽快解决,或者设法寻求相关替代方案。一些省份已经能够根据当地实时气象资料来源渠道及自动转换为作物模式所需格式,这为实现业务流程打下了基础。

需要指出的是,作为农业气象研究的手段之一,作物模拟技术尚不够完善,一些植物生理生态过程的描述还缺乏科学性(如光合作用模型);国内在自主开发方面差距甚远;区域模拟技术还有待探讨;作物生长模拟模型在气象部门业务中的应用也刚刚迈出第一步。但是,千里之行,始于足下。有理由相信,在农业气象业务服务需求的推动下,依靠先进的作物生长模拟技术的科学支撑,经过农业气象研究和业务人员扎扎实实,一步一步的艰苦努力,作物模拟技术将在农业气象业务中得到更好更广泛的应用,我国农业气象业务水平和服务能力一定能够达到一个新的台阶。

致谢: 文中作物生长模型业务应用的研究工作是在王馥棠研究员的关心指导,刘建栋研究员、帅细强高工、庄立伟高工的直接参与以及吉林、辽宁、河南、河北、湖南、江西气象科学研究所相关人员的合作下完成的,并得到国家气象中心王建林研究员的大力支持。特此一并致谢!

参考文献

- [1] Gerrit Hoogenboom. The State-of-the Art in Crop Modeling[R]. In: (M. V. K. Sivakumar Ed.) Climate Prediction and Agriculture. Proceedings of the START/WMO International Workshop held in Gene-

- va, Switzerland, 27-29 September 1999. Washington, DC, USA, International START Secretariat, 2000. 69-75.
- [2] James W. Hansen and James W. Jones. Scaling-up Crop Models for Climate Prediction Applications[R]. In: (M. V. K. Sivakumar Ed.) Climate Prediction and Agriculture. Proceedings of the START/WMO International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27-29 September 1999. Washington, DC, USA, International START Secretariat, 2000. 77-117.
- [3] 刘布春, 王石立, 马玉平. 国外作物模型区域应用研究的进展[J]. 气象科技, 2002, 30:193-203.
- [4] Supit I, Hooijper A A, van Diepen C A, et al. System description of the WOFOST6.0 crop simulation model implemented in CGMS, volume 1: theory and algorithms. The Winand Starting Centre for Intergrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Wageningen, the Netherlands. 1994:1-144.
- [5] 高亮之. 农业模型学基础[M]. 天马图书有限公司, 香港, 2004. 1-320.
- [6] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 等. 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS)[J]. 江苏农业学报, 2000, 16(2): 65-72.
- [7] 李杰, 郑爱军, 宋振伟, 等. 基于 Web 的 GIS/CC-SODS/ES 系统设计与实现[J]. 数字农业与农业模型通讯, 总(3)2004, (1): 24-26.
- [8] 上海精准信息技术公司. 精准农业管理决策支持系统的设计与实现[J]. 数字农业与农业模型通讯, 总(3)2004, (1): 33-37.
- [9] 冯利平. 气候异常对我国华北冬小麦生产影响评估模型的研制[M]. 气候异常对国民经济影响评估业务系统的研究. 北京: 气象出版社, 2001. 25-32.
- [10] 潘学标, 李玉娥. 气候对新疆棉花生产影响的区域评估系统研究[M]. 气候异常对国民经济影响评估业务系统的研究. 北京: 气象出版社, 2001. 57-68.
- [11] 张宇, 王石立, 王馥棠. 气候变化对我国小麦发育及产量影响的模拟研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 264-270.
- [12] 熊伟, 林而达, 居辉, 等. 气候变化的影响阈值与中国的粮食安全[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 84-87.
- [13] 娄秀荣, 侯英雨. 全国晚稻气候年景评价方法研究[J]. 气象, 2003, 29(2): 21-25.
- [14] 马晓群, 陈晓艺. 农作物产量灾害损失评估业务化方法研究[J]. 气象, 2005, 31(7): 72-75.
- [15] 杨霏云, 王建林. 晚稻单产动态预测方法研究[J]. 气象科技, 2005, 33(5): 433-436.
- [16] 王建林, 杨霏云, 杨霏云. 西北地区玉米产量动态业务预报方法探讨[J]. 应用气象学报, 2004, 15(1): 51-57.
- [17] 钱栓, 王建林. 农业气象作物产量预报的特点与思考[J]. 气象科技, 2003, 31(5): 257-264.
- [18] 马玉平, 王石立, 张黎. 针对华北小麦越冬的 WOFOST 模型改进研究[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 145-149.
- [19] 刘建栋, 王馥棠, 于强, 等. 华北地区农业干旱预测模型及其应用研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 593-604.
- [20] 石春林, 金之庆. 基于 WCSODS 的小麦渍害模型及其在灾害预警上的应用[J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 462-468.
- [21] 庄立伟, 王石立. 东北地区逐日气象要素的空间插值方法研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 605-615.
- [22] 刘布春, 王石立, 庄立伟, 等. 基于东北玉米区域动力模型的低温冷害预报应用研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 616-625.
- [23] 刘布春, 刘文萍, 梅旭荣, 等. 我国农业气象业务引入作物生长模型的前景[J]. 气象, 2006, 32(12): 10-15.
- [24] 王石立. 近年来我国农业气象灾害预报方法研究概述[J]. 应用气象学报, 2005, 14(5): 574-581.
- [25] 马玉平, 王石立, 王馥棠. 作物模拟模型在农业气象业务应用中的研究初探[J]. 应用气象学报, 2005, 16(3): 293-303.
- [26] 帅细强, 王石立, 马玉平, 等. 基于水稻生长模型的江南双季稻生长气象影响评价和产量动态预测[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 78-81.
- [27] 熊伟. 用 GIS 和作物模型对作物生产进行区域模拟方法[J]. 中国农业气象, 2004, 25(2): 28-32.
- [28] 高永刚, 王育光, 殷世平, 等. 世界粮食研究模型在黑龙江省作物产量预报中的应用[J]. 中国农业气象, 2006, 27(1): 27-30.