利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估

孙 宁[1], 冯利平[2※]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘 要: 以北京地区冬小麦生产为例, 介绍了两种作物生长模型——小麦生长模拟模型WheatSM 和农业生产模拟系统(小麦模型)APSIM-Wheat 在作物生产气候风险评估中的应用研究。在对WheatSM 和APSIM-Wheat 进行参数调试和验证的基础上, 用北京地区1955～2000年的历史时期气候资料, 以日为时间步长, 进行多年冬小麦生产的模拟, 分析不同气候年型下冬小麦产量的风险。其中, 利用WheatSM 的模拟结果评估了北京地区热害对冬小麦产量造成的风险, 结果表明, 5月平均气温≥21℃时为灌浆期高温年型, 热害造成的减产至少在13.1%以上; 利用APSIM-Wheat 的模拟结果评估了北京地区干旱造成的冬小麦产量风险, 结果表明, 当全生育期降水量<100 mm, 缺水量>169.40 mm 时, 北京冬小麦全生育期严重干旱, 冬小麦产量在4 t·hm^{-2}以下。以上研究结果符合生产实际, 可为北京地区不同气候年型下冬小麦生产的动态决策和减轻灾害损失提供科学依据和技术支持。

关键词: 冬小麦; 作物生长模型; 气候风险评估; 北京地区

中图分类号: S1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1002-6819(2005)02-0106-05

孙 宁, 冯利平. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 106-110.

Sun Ning, Feng Liping. Assessing the climatic risk to crop yield of winter wheat using crop growth models [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 106-110. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

作物生长模型是用数学方程描述作物、土壤、气候之间的作用过程, 动态地模拟作物生长发育和产量形成过程的动态模拟模型。计算机技术的进步和作物生理生态机理研究的深入, 极大地促进了作物生长模型的发展和应用, 较有影响的模型主要有美国的CERES 系列模型[1]和GOSSYM[2]系列模型、荷兰SUCROS[3]和MACROS[4]系列模型、澳大利亚的APSM 系统[5]等, 我国学者也在水稻、小麦、玉米、棉花等主要作物的模拟模型及个别生理过程模拟研究方面取得了一定成绩, 如CCSODS 系列模型、小麦生长发育模拟模型WheatSM[6]、棉花生长发育模拟模型COTGROW[7]。由于作物模拟模型用数值模拟的方式较准确地表达了作物生长与气候因子变化之间的关系, 并可以利用长时间序列的历史气象数据, 通过可控因子(施肥、灌溉)来模拟作物的生长发育进程, 因此在评估气候波动对产量的影响, 产量风险的预警分析方面显示了强大的功能, 成为辅助农业生产决策的良好工具。

作物生产的气候风险(Climatic Risk to Crop Production)是指可被测量的因气候因素变化而对作物生产造成不利影响的可能性, 是作物生产过程中, 气候要素变化的不确定性和其后果的函数。20世纪90年代起, 国际上以澳大利亚学者为代表[8-14], 利用作物生长模型评价农业气候资源、气候风险以及品种适宜性的研究日趋广泛。我国学者在气候应变研究等方面取得了大量成果[15,16], 但应用作物生长模型评估气候风险的研究并不多见。

作物生长模型在气候风险评估研究中的优势在于: 机理性强, 较好地反映了作物生育进程、产量与各生育阶段温度、降水量以及土壤水分动态的关系; 动态性和综合性强, 可以进行不同品种、不同播期及各种气候背景组合条件下的产量模拟, 可以实现不同年型下的动态决策和气候应变管理, 还可以对新品种的应变管理提供基础。本文以北京地区冬小麦生产为例, 介绍了两种作物生长模型——小麦生长模拟模型WheatSM[6,17]和农业生产模拟系统(小麦模型)APSIM-Wheat[19,20]在作物生产气候风险评估中的应用研究结果。

1 小麦生长发育模拟模型(WheatSM)

1.1 WheatSM 的基本原理

WheatSM (Wheat Growth and Development Simulation Model)即小麦生长发育模拟模型, 是在大量的田间实验和大范围的有关研究资料收集的基础上建立的适于我国大面积范围应用的自主版权的一个作物模型。

WheatSM 由小麦发育期模型(WDSM)、光合生产模型(WPSM)、产量形成模型(WYSM)和土壤水分动态模型(WATMOD)等子模型按照一定的生理生态学规律进行有机的衔接组成。模型对小麦不同类型(冬性、半冬性和春性)品种发育期动态、叶官形成动态、光合生产和产量形成进行模拟, 考虑光合作用、呼吸消耗和同

收稿日期: 2004-02-25 修订日期: 2004-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目"华北平原小麦玉米两熟生产气候风险评估与决策支持研究"(39970418)

作者简介: 孙 宁(1973-), 女, 博士生, 主要从事全球变化的环境效应, 以及作物模拟和信息技术的研究。北京 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101。Email: sunn@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 冯利平, 北京 中国农业大学资源与环境学院, 100094。Email: fengl@cau.edu.cn

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

化物在各器官中的分配等生理过程, 同时考虑了冬小麦的春化作用、光周期作用, 以及冬小麦发育的三基点温度、发育速度与温度的非线性关系等, 考虑温度、CO_2 的影响, 可以模拟小麦的生长发育与产量形成动态。

WheatSM 的模拟以逐日的气温、太阳辐射、日长等气象要素为驱动变量, 以小麦发育期为时标控制系统的运行及子程序与有关参数的调用。该模型将小麦整个生长发育过程划分为 4 个生育阶段[17], 即第一阶段: 播种～出苗期; 第二阶段: 出苗～拔节期; 第三阶段: 拔节～抽穗期; 第四阶段: 抽穗～成熟期。在出苗期～拔节阶段, 包括春化阶段和光照阶段。

WheatSM 的运行需在 Microsoft Access 数据库下建立天气数据库、作物资料数据库和土壤资料数据库。其中, 天气数据库是模型运行的主要输入部分, 包括逐年逐日、常年逐日、逐年逐月、常年逐月各表, 每个表中所需气象数据项目为: 最高气温、最低气温、平均气温、降水量(mm)、日照时数(h)等; 土壤资料数据库包括土壤类型、质地、典型土壤的分层田间持水量、凋萎系数、容重、土壤水分动态、土壤养分状况(有机质含量、全氮、速效氮、速效磷、速效钾等); 作物资料数据库包括品种名称、品种类型、播种期、生育进程、产量、栽培措施数据、试点经纬度、海拔高度等。

模型输出各生育期起止日期、生物产量、经济产量、公顷穗数、穗粒数、千粒重等, 以及总生物量、根系重、茎鞘重、叶片重、穗部重等作物要素信息。WheatSM 具有较好的机理性, 以日为步长, 具有较高的时间分辨率, 在华北冬小麦地区具有较高的适用性[18]。

1.2　参数的调试与验证

采用"试错法"对 WheatSM 的参数加以调试和确定。用于验证模型的资料为 1997 年 9 月至 2000 年 6 月在北京市昌平县史各庄乡北郊农场进行的冬小麦渗灌技术试验资料[21], 该区为华北北部山前冲积平原, 属暖温带半湿润半干旱大陆性及风气候, 供试土壤以中性为主, 0～200 cm 土层平均凋萎湿度为 0.125 cm^3/cm^3, 土壤肥力中上等。供试小麦品种 1997～1998 年为"京核 3 号", 1999～2000 年为"9428"。试验地面积 1.8 hm^2。选用不同播期(分别为 1997 年 9 月 29 日、1998 年 9 月 26 日、1999 年 10 月 3 日)不同灌溉处理(分别为旱地、渗灌、喷灌)的 9 个试验组合进行调试和验证。用平均所得的参数模拟北京冬小麦不同播期的生育长度和产量, 拟合结果表明(图 1), WheatSM 对冬小麦生育期及产量的模拟值与实测值拟合情况良好。

2　农业生产模拟系统——小麦模型(APSM-Wheat)

2.1　APSM-Wheat 的基本原理

APSM (Agricultural Production System Simulator)是由澳大利亚农业生产系统研究所(APSRU)开发的用于模拟农业生产系统的软件系统, 其模型框架是由 APSRU (Agricultural Production Systems Research Unit)小组(由 CSIRO 和昆士兰州政府联合组建)在过去的 10 多年内开发的, 它将作物、牧草、土壤水分、土壤肥力及侵蚀状况等子模型(或模块)灵活地集成在一起, 可以模拟气候、土壤状况、管理措施等变化对作物生长的影响[19]。APSM 模拟系统可以让用户通过选择一系列的作物、土壤以及其他子模块来配置一个自己的作物模型, APSM-Wheat 即是选择小麦生产系统以及有关模块来配置的模拟模型, 它可以动态地模拟小麦的地上部分和地下部分的生长、谷物产量、水分和氮素的吸收、土壤水分和土壤氮素情况, 该模型包括小麦生长(NWHEAT)、土壤水分(SOILWAT)、土壤肥力(SOILN)和作物残余物(RESIDUE) 4 个模块。小麦生长、土壤水分、土壤肥力模块的原理取自 CERES 模型, 作物残余物模块是由 Probert[20]开发的新模块。APSM-Wheat 有效地模拟了小麦生产系统, 并可以根据用户的需要, 模拟主要因子对小麦生产的影响, 使模拟结果更加有针对性。APSM-Wheat 运行所需数据包括: 气象数据(包括多年逐日值、多年平均值等)、品种数据(包括品种类型、适种期、播深等)、土壤数据(包括土壤类型、质地、典型土壤的分层土壤体积含水量、凋萎系数、容重、土壤水分动态、土壤养分状况等)、栽培措施数据以及试点的经纬度、海拔高度等。

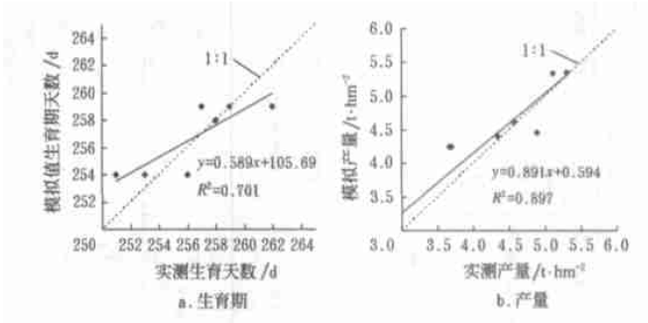

图 1　WheatSM 冬小麦模拟生育期及产量的拟合情况

Fig. 1　Relationship between simulated and observed duration of the whole growth phase, and relationship between simulated and observed yields by WheatSM

根据本文的研究需要, 模型除输出小麦生长发育及产量结果外, 还包括与降水因子有关的各项气候、土壤水分指标。主要有: 各生育期起止日期(包括播种——出苗, 出苗——拔节, 拔节——抽穗, 抽穗——开花, 开花——成熟); 播前土壤水含量(m^3/m^3) (0～2 m 土层, 计算方法为: 输入起始年份的土壤水含量, 以后年份由土壤水分模型根据降水与小麦生长耗水计算, 其中考虑了麦收后夏玉米生长对土壤水分的影响); 全生育期及各生育期的降水量、缺水量、小麦水分需求量和蒸散量; 各生育期累积生物量($g \cdot m^{-2}$); 全生育期小麦由各土层吸收的水量; 全生育期最大叶面积指数; 地上部分总生物量($g \cdot m^{-2}$); 产量($g \cdot m^{-2}$)。

2.2　参数的调试与验证

APSM-Wheat 的参数调试方法与资料同 WheatSM。全生育期天数模拟值拟合结果及产量模拟值拟合结果(图 2)表明 APSM-Wheat 对北京地区冬小麦生育期及产量的模拟结果接近实际。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

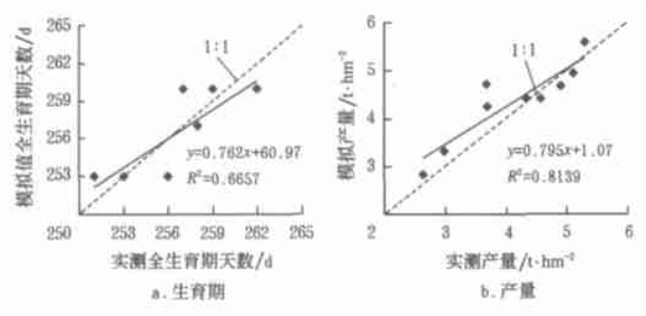

图 2 APSIM-Wheat 冬小麦模拟生育期及产量的拟合情况

Fig. 2 Relationship between simulated and observed duration of the whole growth phase, and relationship between simulated and observed yields by APSIM-Wheat

3 北京地区冬小麦生产的气候风险分析

北京地区属大陆季风气候区, 光照资源较丰富, 温度和降水的季节间和年际间变化幅度较大, 使得温度和降水成为本地区农业生产的主要限制因子。因此本文以热害和干旱为例, 选取与温度和降水相关的多年气候指标中, 与多年模拟产量相关显著的因子作为划分气候年型的关键因子, 评估各种年型下的产量风险。

3.1 热害风险评估

根据北京地区冬小麦不同生育阶段生长发育对气候因子响应的差异, 考虑干热风降低抽穗后的结实率、灌浆期高温不利籽粒灌浆对小麦发育和产量的影响等, 分别选择了与热害有关的温度指标, 对 WheatSM 的多年模拟产量(1955～2000 年)(45a)和各温度指标序列进行回归分析, 并进行相关系数检验。结果表明, 温度是 WheatSM 模拟产量的限制因子, 其中, 5 月平均气温与产量的相关最为显著, 且经对 1955～2000 年不同播期的模拟产量、生育期与相应的 5 月平均气温进行回归分析和相关系数检验, 结果表明显著性在 0.01 水平以上。因此将 5 月平均气温距平值作为划分灌浆期温度年型的指标。通过分析 5 月平均气温的距平值的年际变化趋势及其与模拟产量距平值的关系, 进行年型划分(表 1)。

表 1 北京地区灌浆期温度年型

Table 1 Year types of temperature in grain filling period in Beijing

年型	5 月平均气温距平值/℃	5 月平均气温/℃	出现频率/%
热年	≥0.95	≥21	26
正常年	-0.95～0.95	19.1～21	59
凉年	≤-0.95	≤19.1	15

本文将累积分布函数的函数值作为产量风险率, 用来表达高于或低于某一产量水平的风险大小。统计北京地区 1962～2000 年 39 年中不同灌浆期温度年型出现的年份, 作出各种年型下产量变化的累积分布函数(图 3), 可见不同年型下产量风险率的显著差异: 同一产量水平下的热害风险率在热年均高于凉年, 如产量 5.5 t·hm^{-2}水平以上的风险率在凉年为 13.2%, 而在热年则高达 91.4%; 产量 5 t·hm^{-2}水平时在凉年风险率为 0, 而热年则为 32.2%。从产量水平上看, 北京热年风险率 10% 时产量高于 4.37 t·hm^{-2}, 比凉年同样风险率下减产 20% 以上, 减产幅度在各风险率水平下最大; 50% 风险率下热年的产量高于 5.08 t·hm^{-2}, 凉年高于 5.88 t·hm^{-2}, 减少 13.6% 以上; 90% 风险率时热年产量高于 5.44 t·hm^{-2}, 比凉年的 6.27 t·hm^{-2}减少了 13.1% 以上, 减产幅度最小。

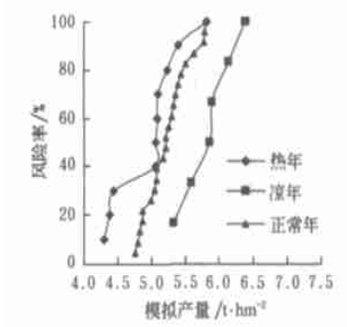

图 3 北京不同灌浆期温度年型的产量风险率

Fig. 3 Yield risk rates of different year types of temperature in grain filling period in Beijing

3.2 干旱风险评估

干旱是北京地区冬小麦生产上发生最频繁的灾害。北京地区常年从冬小麦播种到成熟降水量仅 170 mm 左右, 只能满足小麦需求的三分之一[22], 而且冬小麦生长季处在少雨且降雨年际变异大的冬春季节, 降水年际变异系数 35% 以上。根据 APSIM-Wheat 输出的北京 1955～2000 年(45 年)全生育期降水量和全生育期缺水量(根据降水量与蒸发量的差值计算), 和不同播期的模拟产量序列进行回归分析, 并进行相关系数检验, 证明二者和产量的相关非常显著(显著性水平达 0.01 以上)。因此将这两个因子的距平值作为指标评估干旱的产量风险, 根据二者与模拟产量距平百分率的相关关系, 划分全生育期干旱年型(表 2), 求算各年型的产量风险率(图 4)。可见, 当全生育期降水量< 100 mm, 缺水量> 169.40 mm 时, 北京冬小麦全生育期严重干旱, 在各风险率水平上的冬小麦产量均无法达到 4 t·hm^{-2}, 高于 3 t·hm^{-2}的产量风险率为 84.4%, 比中旱年高出 38%, 而在轻旱年此产量水平无风险; 在全生

表 2 全生育期干旱年型

Table 2 Levels for different year types of drought in the whole growth period

年型	全生育期降水量		全生育期缺水量		出现频率/%
	距平百分率/%	降水量/mm	距平百分率/%	缺水量/mm	
全生育期重旱年	< -20	< 100	> 30	> 169.40	17.8
全生育期中旱年	-20～20	100～154.6	-30～30	94.52～169.40	62.2
全生育期轻旱年	> 20	> 154.6	< -30	< 94.52	20

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

育期降水量> 154.6 mm, 缺水量< 94.52 mm 时, 为全生育期轻旱年, 水分条件对冬小麦生长比较充足, 高于 4 t·hm^{-2}的产量可达到无风险, 而在中旱年, 此产量水平的风险率仍较高, 为 74%。可见, 根据不同全生育期干旱年型的产量风险率, 调整灌溉措施, 对提高产量, 减少风险具有重要意义。

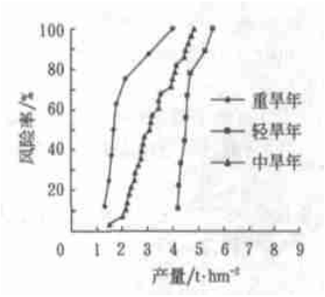

图 4　北京不同全生育期干旱年型的产量风险率

Fig. 4　Yield risk rates for various levels of different year types of drought in the whole growth period

4　结论与讨论

本文应用作物生长模型 WheatSM 和 APSIM-Wheat, 以北京地区冬小麦为例, 评估了作物生产的气候风险。体现了作物生长模型、统计分析方法及农业气象与作物栽培科学相结合的技术路线, 其优越性有:

1) 作物生长模型是基于作物生长发育动态的模拟, 较好地反映了作物发育与环境变量的关系, 如生育进程、产量与各生育阶段温度、降水量以及土壤水分动态的关系。在此基础上进行作物气候生产力的模拟和气候风险分析, 具有较高的机理性, 可为作物生产的决策管理和气候应变管理提供可靠的技术支持。

2) 以历史时期气候为背景, 以日为时间步长, 应用作物生长模型进行多年气候生产力的模拟, 比以往采用旬或月甚至更长时间尺度的气候资料平均值的研究分辨率提高。

3) 作物模拟模型可以进行不同品种、不同播期及各种气候背景组合条件下的产量模拟, 可以实现不同年型下的动态决策和气候应变管理, 还可以对新品种的应变管理提供基础。本文在对 WheatSM 和 APSIM-Wheat 两个作物模拟模型进行参数调试和验证的基础上, 利用 WheatSM 的模拟结果评估了北京地区热害对冬小麦产量造成的风险, 结果表明, 5 月平均气温指标 ≥21℃时为灌浆期高温年型, 热害造成的减产至少在 13.1% 以上; 利用 APSIM-Wheat 的模拟结果评估了北京地区干旱造成的冬小麦产量风险, 结果表明, 当全生育期降水量< 100 mm, 缺水量> 169.40 mm 时, 北京冬小麦全生育期严重干旱, 冬小麦产量在 4 t·hm^{-2}以下, 高于 3 t·hm^{-2}的产量风险率为 84.4%; 在全生育期降水量< 154.6 mm, 缺水量> 94.52 mm 时, 为全生育期轻旱年, 水分条件对冬小麦生长比较充足, 高于 4 t·hm^{-2}的产量可达到无风险, 而在中旱年此产量水平的风险率仍较高, 为 74%。以上评估结果意义明确, 可为北京地区不同气候年型下冬小麦生产的动态决策和减轻灾害损失提供科学依据和技术支持。

[参　考　文　献]

[1] Ritchie J T. Model for predicting evaporation from a row crop with in complete cover [J]. Water Resources Research, 1972, 8: 1204-1213.

[2] Baker D N, Lambert J R, McKinion J M. GOSSYM: A simulator of cotton crop growth and yield[A]. Tech. Bull, 1089. South Carolina Agric Exp Stn, Clemson University, Clemson. 1983.

[3] Van Keulen H, Penning de Vries F W T, Drees E M. A summary model for crop growth[C]. In: Penning de Vries F W T, van Laar H H (eds), Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen, The Netherlands, 1982: 87-98.

[4] Penning de Vries F W T, Jansen D M, ten Berge H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops [C]. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen, The Netherlands, 1989. 271.

[5] McCown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, et al. APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural system research[J]. Agricultural System, 1996, 50: 255-271.

[6] 冯利平. 小麦生长发育模拟模型(WheatSM)的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 1995.

[7] 潘学标, 邓绍华. COTGROW: 棉花生长发育模拟模型[J]. 棉花学报, 1996, 8(4): 180-188.

[8] Hammer G L, Muchow R C. Assessing climatic risks to sorghum production in water-limited subtropical environments I: Development and testing of a simulation model[J]. Field Crops Research, 1994, 36: 221-234.

[9] Muchow R C, Hammer G L, Vanderlip R L. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments II. Effects of planting date, soil water at planting and cultivar phenology[J]. Field Crops Research, 1994, 36: 235-246.

[10] Chapman S C, Hammer G L, Meinke H. A sunflower simulation model: I. Model development[J]. Agronomy Journal, 1993, 85: 725-735.

[11] Meinke H, Hammer G L. A peanut simulation model: II. assessing regional production potential [J]. Agronomy Journal, 1995, 87: 1093-1099.

[12] Parry M L, Carter N T. The assessment of effects of climatic variations on agriculture: aims, methods and summary of results[A]. In: Parry M L, Carter T R, Konijn N T. (eds) The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Volume1. Assessments in Cool Temperate and Cold Regions [C]. Dordrecht Netherlands: Kluwer, 1988: 11-97.

[13] Parry M L, et al. The assessment of effects of climatic variations on agriculture: a summary of results from studies in semi-arid regions[A]. In: Parry M L, Carter T R, Konijn N T. (eds) The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Volume2. Assessments in Semi-Arid Regions [C]. Dordrecht Netherlands: Kluwer, 1988: 9-61.

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

[14] Monteith J L, Virmani S M. Quantifying climatic risk in the semiarid tropics: ICRISAT experience [C]. In: Muchow R C, Bellamy J A. (eds) Climatic risk in crop production: models and management for the semiarid tropics and subtropics. Wallingford UK: C A B. International, 1991: 183-204.

[15] 王恩利, 韩湘玲. 黄淮海地区冬小麦、夏玉米生产力评价及其应用[J]. 中国农业气象, 1990, 2: 41-46.

[16] 韩湘玲, 刘巽浩. 全国种植制度气候区划[A]. 全国农业气候资源和农业气候区划研究协作组. 中国农业气候资源和农业气候区划论文集[C]. 北京: 气象出版社, 1986: 1-26.

[17] 冯利平, 高亮之, 金之庆, 等. 小麦发育期动态模拟模型的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(4): 418-424.

[18] 冯利平, 孙 宁, 刘荣花, 等. 我国华北冬小麦生产影响评估模型的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(4): 73-76.

[19] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L. An overview of APSM, a model designed for farming systems simulation [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18: 267-288.

[20] Probert M. E Modeling water, Nitrogen and crop yield for a long-term fallow management experiment [J]. Australia Journal of Experimental Agriculture, 1995, 35: 941-950.

[21] 冯利平, 巴比江, 甄文超. 北京地区冬小麦渗灌技术节水高产综合效益研究[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(5): 35-41.

[22] 宋秉彝. 现代化吨粮田技术与实践[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 13-30.

Assessing the climatic risk to crop yield of winter wheat using crop growth models

Sun Ning[1], **Feng Liping**[2]

(1. *Institute of Geography Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*;
2. *College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: Based on validation of two crop growth models (WheatSM and APSM-Wheat) for the winter wheat yield simulation of Beijing, winter wheat yields of multi-years were simulated by day step. According to the relationship among temperature, rainfall and simulated yields, different year types were defined and climatic risk to winter wheat production in different types of year was analyzed. Using WheatSM simulated yields, the high temperature risk to winter wheat production was assessed: when average temperature in May is over or equal to 21℃, the year of this phenological season is attributed to high temperature type and the yield will be reduced at least by 13.1% by high temperature disaster. Drought risk to wheat production was assessed using APSM-Wheat simulated yield: when rainfall for a whole growing period is less than 100 mm and water shortage for a whole growing period is over 169.40 mm, the year is attributed to severe drought type and the yield is lower than 3.5 t·hm^{-2}. This study shows that the advantage of applying crop growth models to assessing climatic risk to crop production. The information obtained by climatic risk assessment provides valuable scientific basis and technological support for dynamic decision-making, and relieving the losses of winter wheat yield caused by high temperature and drought disasters, which ensures sustainable production of winter wheat in Beijing.

Key words: winter wheat; crop growth model; climatic risk; Beijing

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.