

WOFOST作物模型机理及使用介绍

杨妍辰¹ 王建林² 宋迎波²

(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: WOFOST (World Food Studies) 模型是荷兰 Wageningen 农业大学和世界粮食研究中心 (CWFS) 共同开发研制, 模拟特定土壤和气候条件下一年生作物生长的动态解释性模型。模型着重强调定量土地评价、区域产量预报、风险分析和年际间产量变化及气候变化影响的量化应用。模型以同化作用、呼吸作用、蒸腾作用和干物质分配等作物生理生态过程为模拟基础, 主要包括潜在生长条件、水分限制条件和养分限制条件下作物生长的模拟。详细介绍了 WOFOST 模型的发展、应用范围、理论基础以及使用操作等, 便于更多的人快速了解、掌握和使用模型, 进一步促进作物模型在我国的发展和业务服务应用水平。

关键词: WOFOST 模型, 模型发展, 模型结构, 理论基础, 模型使用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.005

Introduction of WOFOST Crop Growth Simulation Model Mechanism and Its Use

Yang Yanchen¹, Wang Jianlin², Song Yingbo²

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 National Meteorology Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The WOFOST (World Food Studies) model is developed by Wageningen Agricultural University and the Center for World Food Studies. It is a dynamic explanation model that simulates the annual crop growth with the specific soil and climatic conditions. The model emphasizes the application of land quantitative evaluation, regional yield forecast, risk analysis, the annual yield changes and quantization of the effects of climate change. The simulation of model is based on the crop physiological and ecological process, including assimilation, respiration, transpiration and dry matter distribution. WOFOST model consists of three levels of the crop growth simulation, the potential growth conditions, water-limited and nutrient-limited conditions. This paper introduces the development and application of WOFOST model, its theoretical basis and operation and so on, to facilitate more people to quickly understand, grasp and use the model, and further promote the development of crop models in our country and raise the application level of service.

Keywords: WOFOST model, model development, model structure, theoretical foundation, model using

农业系统是一个非常复杂, 包含生物、非生物因素及其相互作用的系统。由于大量相互作用的存在, 确定整个农业系统的响应机制十分困难。近30年来, 作物生长模型迅速发展, 作为一个系统的分析方法, 对于理解作物与气候、土壤因素之间的相互作用起到了很大帮助。

作物生长模型从系统科学的观点出发, 以土壤—植被—大气系统的物质平衡、能量守恒和物质能量转换原理为基础, 以光、温、水、土壤等条件为环境驱动变量, 对作物与环境条件之间的关系以及作物

的生理生态过程进行定量描述, 动态模拟作物的生长发育过程, 并解释作物与大气、土壤等因素之间的相互关系, 是一种面向作物生长发育过程、机理性很强的数值模拟模型。作物生长模型作为一种分析工具, 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了重要作用, 为农业资源的管理利用、农业最大收益的获取提供了科学依据。

美国、澳大利亚、荷兰等国在20世纪七八十年代即开始了作物模型的研究, 建立起玉米、小麦、棉花等作物生长模型, 并逐步应用于农业生产管理、作物产量预测以及全球气候变化对农业生产影响的评估^[1]。我国在20世纪90年代初引入作物生长模拟技术, 在气候变化影响评估、作物栽培模拟优化决策和农业

收稿日期: 2012年12月8日; 修回日期: 2013年1月6日

第一作者: 杨妍辰 (1988—), Email: yang_yanchen@126.com

资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201106021, GYHY201306076)

气象服务等方面积极推广应用,取得了许多有意义的成果^[2]。

近年来WOFOST模型逐渐受到广大学者的关注。该模型为荷兰Wageningen的de Wit学派开发的系列作物模型之一,引入我国后许多学者对这一模型进行了研究,并应用于当地农业生产,对我国农业气象服务起到了十分重要的作用。但是,该模型在我国的应用,仍然停留在研究和试用阶段,尚未真正应用于农业气象服务。为了推动作物模型尽快应用于业务服务,提升农业气象业务服务水平,本文拟详细介绍WOFOST模型的发展、应用范围、理论基础和使用操作,使更多的人快速了解、掌握和使用模型,进一步促进作物模型在我国的发展和业务服务应用水平。

1 模型结构与发展

WOFOST模型是荷兰Wageningen农业大学和世界粮食研究中心(CWFS)共同开发研制,模拟特定的土壤和气候条件下一年生作物生长的动态解释性模型^[3]。模型的开发旨在探索提高发展中国家农业生产

力,着重强调在定量土地评价、区域产量预报、风险分析和年际间产量变化及气候变化影响等研究方面的应用。

WOFOST模型以一天为步长对作物生长发育进行模拟,其模拟基础为作物的生理生态过程,主要包括同化作用、呼吸作用、蒸腾作用、干物质的分配等。模型可以模拟潜在生长条件、水分限制和养分限制三种水平下的作物生长。潜在生长条件是指保证营养元素和水分最佳供应,作物产量仅由辐射、温度和作物特性决定;水分限制生产条件,即假设营养元素的供给仍然是最佳的,但需考虑土壤有效水分对蒸发和作物产量的影响;养分限制条件即考虑N、P、K三种元素对作物产量的影响。模型的结构如图1所示。

WOFOST模型最初是CWFS(世界粮食研究中心)和Wageningen农业大学在世界粮食安全和生产研究的基础上建立的,后成为Wageningen模型家族中的一员。1988年后,由SC-DLO(the DLO Winand Staring Centre)与AB-DLO(the DLO-Center for Agrobiological Research and Soil Fertility)、WAU-

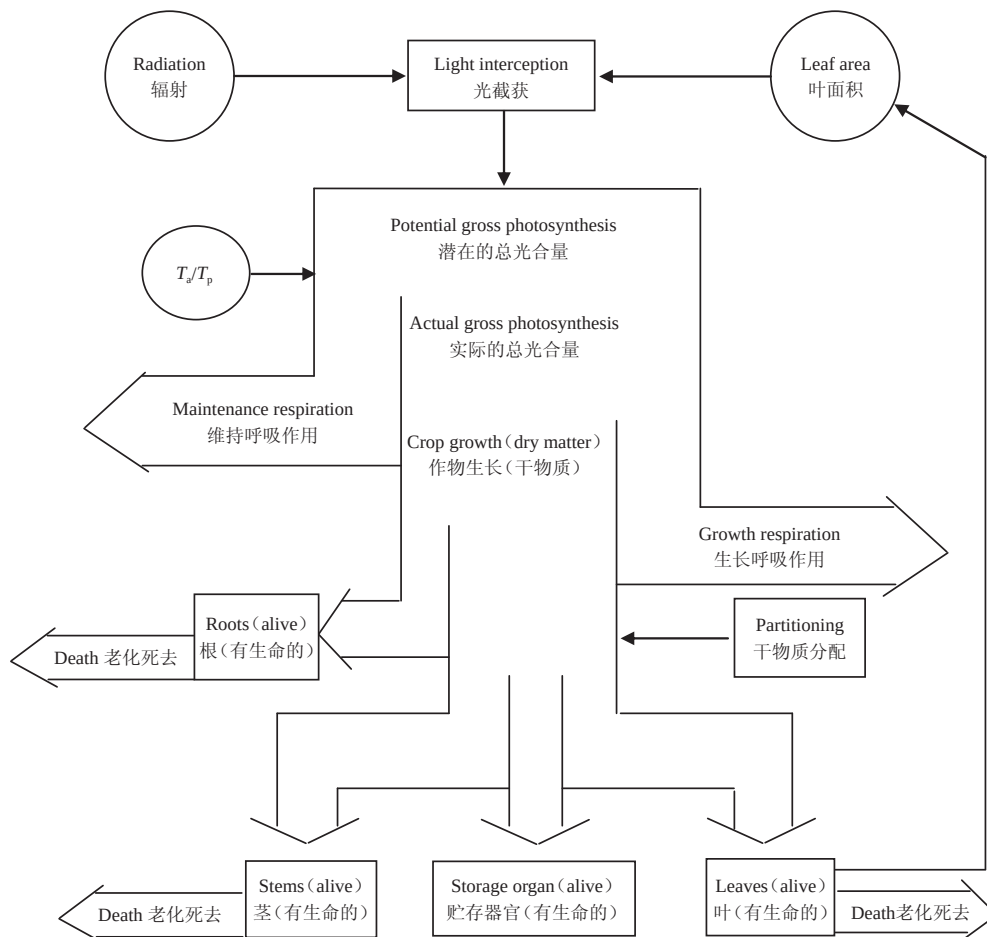


图1 作物生长过程 (T_a 和 T_p 分别为实际、潜在呼吸作用速率)

TPE (Wageningen Agricultural University, Department of Theoretical Production Ecology) 合作继续发展。最初的WOFOST模型由Wolf等在1986年进行整理编写, 接下来的WOFOST3.0版和4.0版分别由Rappoldt和Van Diepen等整理编写, 而6.0版的记录文件是由Supit等在1994年给出的, 技术说明书则由Hijmans等进行编写^[4]。

1994年, WOFOST 6.0已得到了长足的发展, 被用于模拟全欧洲一年生作物的产量, 并被合并到CGMS (Crop Growth Monitoring System) 中。为了更好地满足多种需要, 1997年WOFOST6.0在系统网络的基础上得到了进一步的完善, 产生了WOFOST7.1; 2012年又进一步修改得到了7.15版本, 使模型可以对出苗前水分平衡进行模拟, 相应地更新了WOFOST控制中心, 将模拟的时间项单独建立了界面。

2 模型的应用

从WOFOST模型诞生至今, 许多方面的研究和应用都取得了显著的成果。CWFS将WOFOST3.1应用在布基纳法索、加纳和肯尼亚, 研究施肥量对粮食作物增产的影响。结果表明, 这三个国家在不进行额外灌溉的条件下, 随着施肥量的增加, 粮食产量有显著提高。1989年, WOFOST在布基纳法索的AGRISK工程中被用来进行产量风险研究^[5], 目的在于了解土壤类型、作物品种、播种日期、降雨以及播种地块位置与作物干旱风险之间的关系, 以便更好地指导农民进行生产决策。WOFOST4.1作为产量评估的工具被运用到赞比亚粮食安全的早期警报系统中^[6-8], 并且曾用于秘鲁安第斯山脉地区灌溉和水分保持的评价^[6]。WOFOST5.3被用于评价欧共体主要粮食作物的区域生产潜力^[9, 10]。在MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing) 工程中, 欧洲联合研究中心把WOFOST6.0作为产量预测的模型^[11-13]。模型的使用者们也曾把模型运用于森林和草地评估, 并且通过更多的子模块代替土壤水模型。

在我国, 宋艳玲等^[14]利用WOFOST作物模型研究了干旱对我国冬小麦产量的影响, 发现我国北方地区冬小麦生育期内的降水与产量并没有显著相关关系, 但春季降水则与产量显著相关, 揭示了我国北方春季降水量对冬小麦产量影响的重要性。陈振林等^[15]利用WOFOST模型模拟了低温、干旱对玉米产量的综合影响, 结果表明, 低温、干旱以及低温和干旱并发都会使玉米的产量下降, 而且低温和干旱并发要比单一灾害发生时的影响更大。高永刚等^[16]利用WOFOST模型对黑龙江省四大作物产量进行了趋势产量处理, 效果

理想、可行, 克服了只用一组参数在复杂气候区域进行作物产量模拟的局限性。谢文霞等^[17]应用WOFOST模型对浙江水稻潜在生长进行了模拟和验证, 结果显示, 模型可以较好地分析浙江水稻的生长过程和产量潜力。杜春英等^[18]基于WOFOST模型对黑龙江省水稻产量动态预报的研究, 实现了WOFOST模型在黑龙江省水稻生长模拟中的动态化应用。综上所述, WOFOST模型具有广阔的应用前景, 是提升我国现代农业气象业务服务的主要科技支撑之一。

3 WOFOST模型理论基础

3.1 同化作用和呼吸作用

作物的同化速率由公式 (1) 计算:

$$A_L = A_m \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon I_{aL}}{A_m}} \right) \quad (1)$$

其中, A_L (单位: $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2}(\text{leaf}) \cdot \text{s}^{-1}$) 为总同化速率, A_m (单位: $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2}(\text{leaf}) \cdot \text{s}^{-1}$) 为最大总同化速率, ε (单位: $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{J}^{-1}$) 是单叶原始光能利用率, ε 和 A_m 与温度有关, A_m 由作物的特性决定, I_{aL} 为叶层L吸收的辐射, 由公式 (2) 求得:

$$I_{aL} = \frac{dI_L}{dL} = k \cdot (1 - \rho) \cdot I_0 \cdot e^{-k \cdot L} \quad (2)$$

其中, k 为消光系数, 是辐射特性、太阳高度角、叶片角度分布和单叶漫散系数的函数; ρ 为反射系数, 是太阳高度角、叶片角度分布和叶片反射、传导性能的函数; L 为叶面积指数; I_0 为晴天冠层顶部辐射, 由公式 (3) 求得:

$$I_0 = I \cdot \sin \beta \quad (3)$$

其中, I 为太阳常数, β 为太阳与地球表面之间角度。

3.2 作物生育期

作物各器官的生长由其本身特性所决定, 而各生育期发展的速率则受到温度和光周期的影响。在WOFOST模型中, 作物生育期由无量纲的状态变量——发育阶段 (DVS, 即Development Stage) 表示, 可由公式 (4) 计算。对于大多数一年生作物, 作物出苗时 $DVS=0$, 花期 $DVS=1$, 成熟 $DVS=2$ 。为计算温度对发育阶段的影响, 在模型中引入积温的概念。每日有效温度 (T_e) 是日平均温度 (T) 和基础温度 (T_{base} , 作物在该温度下停止生长) 的差值, 即 $T_e = (T - T_{base})$ 。 T_e 是非负的, 在最大有效温度 ($T_{max,e}$) 之上时, T_e 恒定不变。在 $T_{max,e}$ 和 T_{base} 之间, 积温的每日增量是由线性插值得到。

$$DVS = \frac{\int T_e}{T_{req}} \quad (4)$$

其中 T_c 为积温, T_{req} 为作物发育进入到下一阶段所需要的积温。

在WOFOST模型中, 光周期影响因子(F_{pr})由公式(5)计算得到:

$$F_{pr} = \frac{P - P_c}{P_0 - P_c}, 0 \leq F_{pr} \leq 1 \quad (5)$$

其中, P_0 为最佳光周期, P_c 为临界光周期。

一些作物的发育速率也受到光周期的影响, 其发育阶段DVS由公式(6)计算:

$$DVS = F_{pr} \frac{\int T_c}{T_{req}} \quad (6)$$

随着作物的不断进化, 现代作物比较早时期作物生长时受到光周期的影响大大降低, 在模拟中通常不再考虑光周期的影响。

3.3 蒸腾作用

作物通过关闭气孔对水分胁迫做出反应, 气孔关闭导致作物与大气之间 O_2 和 CO_2 交换减少, 同时 CO_2 的同化速率也降低, 这一影响由公式(7)计算:

$$A = \frac{T_a}{T_p} \cdot A_p \quad (7)$$

其中, A 为同化速率, A_p 为潜在同化速率, T_a 为实际蒸腾速率, T_p 为潜在蒸腾速率。

WOFOST中潜在蒸腾通过Penman公式进行计算。不同作物间可以用一个校正系数进行计算, 大多数作物使用系数为1, 节水作物为0.8, 而蓄水作物为1.2。实际作物蒸腾等于潜在蒸散乘以光截获、水分胁迫以及一般作物的校正因子。由于Penman计算蒸散的方法主要是针对低矮作物(如草)而建立的, 在模拟玉米等高度较高作物时常常低估了实际蒸散, 因此一

般作物的校正因子(变量 $CFET$)取值为1.0, 有时可能会增加到1.15。

3.4 土壤水分平衡

WOFOST中土壤水分模块有3个。第一种, 潜在生产条件下, 土壤持续湿润, 作物水分需求被量化为作物蒸腾和被冠层遮蔽下土壤表面蒸发的水量。第二种, 水分限制生产条件下, 土壤中的水分可以自由流动, 并且这类土壤地下水位很深以至于对根区土壤水分含量不产生影响。第三种也是在水分限制生产条件下, 水分平衡受根区浅层地下水的影响, 这一子模块类似于第二种情况, 不同的是土壤持水力是由地下水位的深度决定的, 且存在毛管上升水, 根区水分含量不随深度变化。

模型中土壤被分为3个部分: 实际根区(RD_{act}), 实际根区以下到地下水位部分, 以及地下水位之下到距地表土层1000cm的部分。最大根深为 RD_m , 地下水位深度为 Z 。当地下水进入根区, 根区又细分为水分饱和区域和非饱和区域。对水通量的计算包括降水(R), 地表储存水(SS), 地表径流(SR), 地表蒸散(E), 作物蒸腾(T), 由根区渗透到更深土层的水分(PC), 以及上升到根区的毛管上升水(CR), 具体如图2所示。

水分的有效性首先由土壤物理特性所决定, 其次是水分平衡。生长阶段根区的水分平衡等于来自降水和灌溉的水分供应, 以及由于作物蒸腾、土壤蒸发和渗透到深层土层造成的水分减少之间的差异。

3.5 养分

模型中只考虑N、P、K元素。养分限制产量是采用QUENFTS(Quantitative Evaluation of the Fertility of

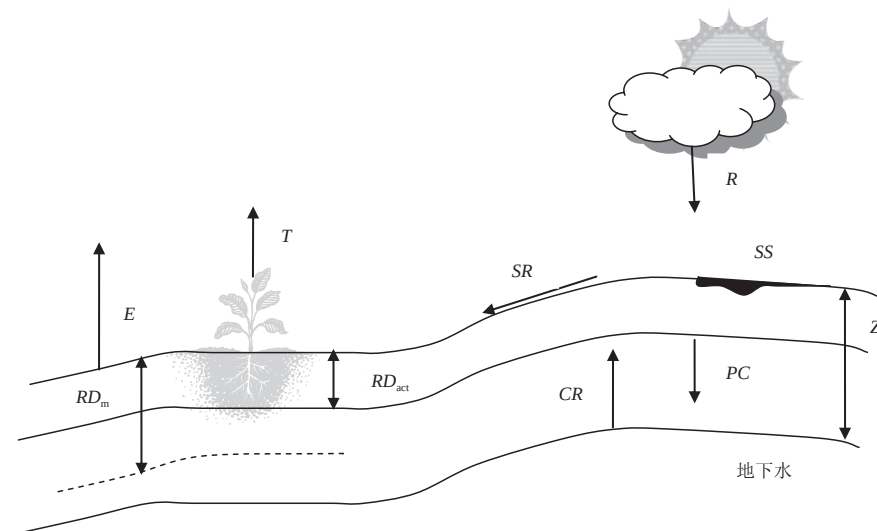


图2 土壤水分平衡的组分示意图

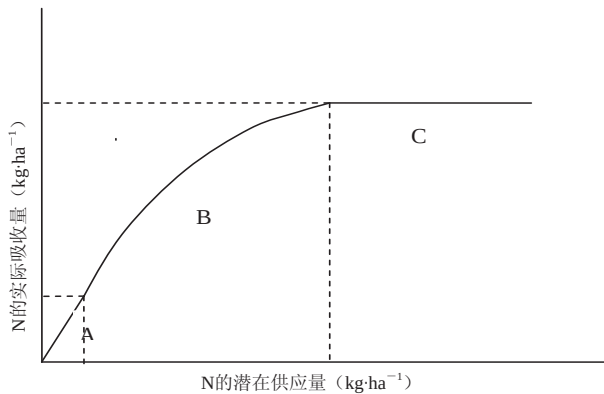


图3 第二种养分影响下N的实际吸收与潜在供应量之间的关系

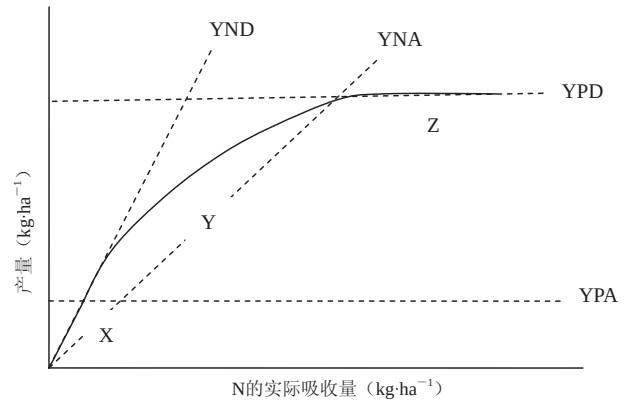


图4 P供应影响下作物产量与N实际吸收量之间的关系

Tropical Soils) 模型进行计算^[3]。同时, WOFOST模型中包含了生物固氮, 作物参数 $NFIX$ 决定了总的氮供应中来自生物固氮的部分, 通常 $NFIX$ 被确定为一个常数。

三种元素其中任一种元素的实际吸收量由该元素和其他两种元素的供给量共同决定。在P定量的情况下, N的吸收情况如图3所示。可以看出, 在A段N的潜在含量相对于P来说非常低。因此, N的实际吸收量等于N的潜在含量。在C段N的潜在含量相对于P来说已经非常高, 随着N潜在含量的增加, N的实际吸收量保持不变。而在B段, 随着N含量的增加, 作物吸收的N也在不断增加, N的吸收量与N的供应量之比由1降低至0。

在营养元素的实际吸收量确定以后, 对产量的影响如图4(以P和N为例)所示。可以看出, 在X段, P元素达到最大的供给水平, 生长不受P元素的限制; N元素达到最大的吸收水平, 限制产量。在Y段, N和P均限制作物的产量。在Z段, N达到最大的供给水平, 只有P限制作物的生长。

4 模型使用

对于模型的数据输入、结果输出和文件格式要求皆以WOFOST7.1版本为例进行解释。更新的版本WOFOST7.15只是在输入数据的界面有所不同, 其余均与7.1版本相同。

4.1 数据输入

WOFOST模型的输入数据由常规选项、作物、气象、土壤、养分和再运行几个部分组成。其中气象文件中的内容只能在WOFOST控制中心(WCC)外进行编辑。

4.1.1 常规数据 (General data)

常规数据主要是模拟水平的选择, 包括潜在作物

生长模拟 (Simulation of potential crop growth)、潜在作物生长模拟和水分限制作物生长模拟 (Simulation of water-limited crop growth) 以及潜在、水分限制和养分限制作物生长模拟 (Calculation of nutrient-limited crop growth) 3个选项。

在常规数据选项中还有一项十分重要, 即结果输出的间隔日期 (Output interval), 这主要是针对模拟的详细输出结果 (Detailed output) 所显示的内容而设定的。如果用户提供的输出间隔日期超过作物整个生育期, 则模拟将只显示出苗、开花和成熟3个时期的模拟结果。

4.1.2 作物数据 (Crop data)

作物界面主要包括两部分: 一是可选作物 (Available crops), 用于选择模拟的作物品种; 二是开始日期 (Start Day) 和结束日期 (End Day)。

在WOFOST模型中, 日期是根据一年中某日的序列数来确定的。例如, 1月1日为模拟日期的第1天, 12月31日为第365天 (闰年为第366天)。作物生长所持续的时间不能短于1天, 也不能超过366天。

4.1.3 气象数据 (Weather data)

气象数据界面主要包括气象数据格式 (Weather format)、可利用站点 (Available stations) 和降雨数据选项 (Rainfall data options) 3部分。

4.1.4 土壤数据 (Soil data)

在土壤界面中可以选择土壤的类型以及设定有关的土壤水文特性。

4.1.5 养分数据 (Nutrient data)

养分界面可以设定土壤的养分状况。

4.2 结果输出

模型输出的结果有两类, 一类是详细结果 (Result detailed...), 另一类是汇总结果 (Result summary...)。

详细结果是针对单独一个气象年模拟结果的输出，而汇总结果是对所模拟的多年结果的输出。详细结果窗口包括“Potential”、“Water-limited”、“Water balance”3部分结果；汇总结果所包括的模拟结果分别是“Potential”、“Water-limited”、“Summary”。另外，汇总结果还有多个年份模拟的平均结果输出。

模型所模拟的结果可以利用“Graph”图表显示，但模型所生成的图表不能直接导出。

4.3 输入文件

模型输入文件主要包括作物文件、土壤文件、气象文件、运行文件等。对文件中某一参数的修改，可以通过写字板或记事本等程序打开该文件进行编写，然后保存。重新启动WOFOST模型即可得到更改过的文件，在新的模拟过程中该参数的值将会按修改过的值参与到模拟中。

4.3.1 作物文件 (Crop files)

用户模拟的任意一种作物都需要向WOFOST提供包含特定参数的作物文件，这些文件存储在...\WCC\CROPD\。文件的编写需符合特定的要求，建议用户在需要编写新的作物文件时，以模型原有某品种作物文件进行修改，而不要完全重新编写文件，因为文件中含有大量参数，很容易在编写中出错。

作物文件的开头部分主要记录了该品种作物的名称、地理位置、模拟开始的时间、作物数据的来源、气象数据类型和该作物文件的名称等。接下来文件的内容即为作物文件所包含的变量及其所对应的值。

4.3.2 土壤文件 (Soil files)

土壤文件的主要信息是土壤物理特性，其中包括土壤水分保持、渗透系数、土壤可用参数。而土壤化学特性的默认值在站点文件 (site file) 中给出。土壤文件储存于...\WCC\SOILD，其语法要求与作物文件相同。

4.3.3 气象文件 (Weather files)

气象文件主要包括辐射（或日照时数）、气温、降水、蒸压和风速。模型中包含WOFOST-format和CABO-format两类气象文件。

WOFOST-format包括两种类型，一是长期的月平均值 (WOFOST-climate) 气象数据，另一种是时间序列的月平均值 (WOFOST-weather) 气象数据。文件开始的三行所包含的参数与注释用于WCC辨认气象站点以及介绍该站点的特征。气象文件储存于...\WCC\METEO\CLIMD。

CABO-format是每日气象数据，每个文件都包含一个气象站点一年的气象数据。该文件储存于...\WCC\

METEO\CABOWE。文件名称包括国家的名称或缩写以及站点的序号。文件扩展名的3个数字代表年份，例如NL3.987表示Netherlands, station 3 (De Kooy), year1987。WOFOST每日气象数据来源于荷兰3个站点：Wageningen、Swifterbant和De Kooy。模型对文件的格式要求十分严格，建议用户在需要编写新的气象文件时，严格按照模型原有某气象文件格式进行编写。

每日气象数据往往是不完整的，缺失的数据可以通过线性插值的方法自动估算。但降雨数据缺失时直接设定为0。

4.3.4 降水文件 (Rainfall files)

降水文件包含每日降水数据，降水数据必须与一个完整气象站点的数据结合使用。文件储存于...\WCC\METEO\CLIMD。通常在模拟中如果选择CABO-format气象文件则不单独选用降水文件，而是使用气象文件中所含的降水数据。

4.3.5 运行文件 (Run files)

运行文件包括与气象、作物时间有关数据文件 (the timer file (WCCTI.TIM))、土壤化学特性默认数据值文件 (the site file (WCCSI.SIT))、再运行文件 (the rerun file (WCCRR.RER)) 和包含基本信息的运行选项文件 (the run option file (WCC.WCC))。这些文件储存于...\WCC\RUNIO。文件的编写要求与作物文件、土壤文件相似。

4.4 输出文件 (Output files)

模拟的结果储存在输出文件中，主要有以下4种文件类型：

——*.OUT detailed output of simulation 模拟的详细结果

——*.PPS summary output for potential growth 潜在生长的汇总结果

——*.WPS summary output for water limited growth 水分限制生长的汇总结果

——*.SUM summary output 汇总结果

详细结果文件 (*.OUT) 包含潜在生长、水分限制生长、水分平衡和养分需求4部分结果。

汇总结果文件 (*.PPS和*.WPS) 中，每一行结果代表每一个生长期。文件*.SUM提供了*.PPS和*.WPS文件的摘要，文件中给出了某一地区参数的长期平均值。*.SUM文件只在WOFOST模拟超过两个气象年时生成。

5 结语

我国是人口大国，农业现代化水平还不够高，

气候变化引起的极端天气气候灾害频繁发生,对农业生产及其可持续发展造成了严重影响。因此及时、准确地掌握作物生长动态,科学动态地预测作物产量变化,对指导农业科学管理、因势利导趋利避害、确保国家粮食安全具有重大意义。

WOFOST模型是国际上较为先进的农业气象应用模型,它在作物产量风险分析、产量变化预测、农业生产决策管理等领域都具有十分突出的技术优势。只要深入地了解模型的结构、机理和使用操作,结合我国农业生产实际,通过持续不断的本地化研究,模型一定能够成为我国农业气象业务服务的重要支撑技术。

参考文献

- [1] 杨霏云,高学浩,钟琦,等.作物模型、遥感和地理信息系统在国外农业气象服务中的应用进展及启示.气象科技进展,2012,2(3): 34-38.
- [2] 王石立,马玉平.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.气象,2008,34(6): 3-10.
- [3] Boogaard H L, van Diepen C A, Roetter R P, et al. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. DLO Wageningen: Winand Staring Centre, 1998.
- [4] 谢文霞,王光火,张奇春. WOFOST模型的发展及应用.土壤通报,2006,37(1): 154-158.
- [5] Mellaart E A R. Toepassing van gewasgroei-simulatiemodellen voor risico-studies in sahellanden (The application of crop-growth simulation models for risk-studies in Sahelian countries). In: Huijbers C, Lingsma S P, Oudkerk J C (Eds.) Informatica toepassingen in de agrarische sector, voordrachten VIAS-Symposium 1989.
- [6] Berkhout J A A, Huygen J, Azzali S, et al. MARS definition study. Results of the preparatory phase. Main report. Report 17. SC-DLO, Wageningen, The Netherlands, 1988.
- [7] Huygen J. Simulation studies on the limitations to maize production. Report 7. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, 1990.
- [8] Wolf J, Berkhout J A A, Diepen C A, et al. A study on the limitations to maize production in Zambia using simulation models and a geographic information system In: Bouma J, Brecht A K (Eds.). Land qualities in space and time, proceedings of a symposium organized by the International society of soil science (ISSS), Wageningen, the Netherlands, 22-26 August 1988. Pudoc, Wageningen.
- [9] Koning G H J de, Janssen H, van Keulen H. Input and output coefficients of various cropping and livestock systems in the European Communities, Working Documents W 62. The Hague: Netherlands Scientific Council for Government Policy, 1992.
- [10] Lanen H A J van, Diepen C A van, Reinds G J, et al. Physical land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects with in the EUROPE communities. Agricultural Systems, 1992, 39: 307-328.
- [11] Vossen P. Early crop yield assessment of the E.U countries: the system implemented by the Joint Research Center. EUR Publication of the Office for Official Publications of the E. C. Luxembourg, 1995.
- [12] Vossen P, Rijks D. Early crop yield assessment of the E.U countries: the system implemented by the Joint Research Center. EUR16318 EN of the Office for the office for Official Publications of the E. C. Luxembourg, 1995.
- [13] Diepen C A. van, Wal T van der. Crop growth monitoring and yield forecasting at regional and national scale. In: Dallemand J F, Vossen P (Eds.). Agrometeorological models: Theory and applications. Publication EUR 16008 FR of the Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, 1995.
- [14] 宋艳玲,董文杰. 1961—2000年干旱对我国冬小麦产量的影响.自然灾害学报,2006,15(6): 235-240.
- [15] 陈振林,张建平,王春乙.应用WOFOST模型模拟低温与干旱对玉米产量的综合影响.中国农业气象,2007,28(4): 440-442.
- [16] 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.中国农业气象,2006,27(1): 27-30.
- [17] 谢文霞,严力蛟,王光火.运用WOFOST模型对浙江水稻潜在生长过程的模拟与验证.中国水稻科学,2006,20(3): 319-323.
- [18] 杜春英,李秀芬,王晨轶,等.基于WOFOST模型的黑龙省水稻产量动态预报研究.安徽农业科学,2011,39(24): 15093-15095,15122.