

王萌萌,董智强,李楠,等.WOFOST模型在评估气候变化对粮食生产影响方面的研究进展[J].海洋气象学报,2023,43(3):9-19.

WANG Mengmeng, DONG Zhiqiang, LI Nan, et al. Research progress of assessing the impacts of climate change on grain production by the WOFOST model[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(3):9-19. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.03.002. (in Chinese)

WOFOST模型在评估气候变化对粮食生产影响方面的研究进展

王萌萌^{1,2,4},董智强^{1,3,4},李楠^{1,3,4},李曼华^{1,3,4},陈辰^{1,3,4}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.德州市气象局,山东 德州 253078;3.山东省气候中心,山东 济南 250031;4.中国气象局-中国农业大学农业应对气候变化联合实验室,北京 100193)

摘要:近年来国内外学者采用不同的方法评估气候变化对粮食生产的影响,其中机理模型评价方法是运用较多的方法之一。WOFOST(WORLD FOOD STUDIES)模型由于其机理性强、源代码开放、参数调整较为简便等优势,已经在相关研究中得到广泛应用。该模型以不同作物生长发育的机理过程为依据,经过适用性验证后,可用于粮食作物气候生产潜力评估和气象灾害影响评价;结合历史气候资料与未来气候情景数据,可定量评价过去及未来气候变化对粮食生产的影响。通过介绍WOFOST模型的基本原理、运行机制、参数设定与参数本地化等相关方法,系统总结该模型在评估气候变化对粮食生产影响方面的研究进展,并指出现有研究存在的不足,以期为未来开展相关研究工作提供参考。

关键词:气候变化;WOFOST模型;粮食生产;影响解析;适应决策

中图分类号: P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)03-0009-11

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.03.002

Research progress of assessing the impacts of climate change on grain production by the WOFOST model

WANG Mengmeng^{1,2,4}, DONG Zhiqiang^{1,3,4}, LI Nan^{1,3,4}, LI Manhua^{1,3,4}, CHEN Chen^{1,3,4}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Dezhou Meteorological Bureau, Dezhou 253078, China; 3. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 4. CMA-CAU Jointly Laboratory of Agriculture Addressing Climate Change, Beijing 100193, China)

Abstract: In recent years, domestic and foreign scholars assess the impacts of climate change on grain production with different methods, and crop mechanism model is one of the widely used methods. With the characteristics of strong mechanism, open source code, and relatively simple way to adjust parameters, the WOFOST (WORLD FOOD STUDIES) model has played an important role in related researches. Based on the growth mechanism of different crops, this model could be used to assess the

收稿日期:2022-08-09;修回日期:2022-09-15

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2018BD024);山东省气象局气象科学技术研究项目(2022sdqxz03,2017sdqxz02);“十三五”山东重大气象工程项目(鲁发改农经[2017]97号)

第一作者简介:王萌萌,女,硕士,助理工程师,主要从事农业应对气候变化影响相关科研与业务,tiandiwoyi@126.com。

通信作者简介:董智强,男,博士,高级工程师,主要从事气候变化对农业生产的影响评估等研究,zhiqiangdong@cau.edu.cn。李楠,女,硕士,正高级工程师,主要从事农业适应气候变化影响等研究,dogears0229@qq.com。

climatic potential productivity and the impacts of meteorological disasters after applicability verification. Combined with the historical climate data and the future climate scenario data, this model could also be used to quantitatively assess the impacts of the past and future climate change on grain production. On this basis, the general information of the WOFOST model is introduced, including its basic principle, operating mechanism, parameter setting, parameter optimization methods and so on. The research progress of assessing the impacts of climate change on grain production by the WOFOST model is systematically summarized, and the shortcomings of the existing researches are pointed out, hoping to provide reference for future researches.

Keywords: climate change; WOFOST model; grain production; impact analysis; adaptation decision-making

引言

人类活动致使气候以前所未有的速度变暖^[1],伴随气温升高、降水格局改变、极端天气气候事件的频发与增强,人类生产生活正受到显著影响^[2-3]。粮食生产作为对气候变化响应最为敏感的产业,正承受着日益增长的负面影响;伴随农业气候资源、作物生长发育与产量形成等的变化,农业可持续发展与粮食生产安全正面临前所未有的威胁^[4-7]。

农业气候资源主要包括光、热和水等,是作物生长的物质基础和能量源泉。气候变化使光、热、水的分配发生变化,进而影响种植制度、品种布局、作物发育进程及其产量、品质形成等^[2,8-9]。气候变暖直接改变了区域的热量资源,但同时积温的增加会使得作物生长发育加快,生育期缩短,减少短生育期作物的干物质累积时间,最终造成产量下降^[10-12]。非洲、亚洲、欧洲、拉丁美洲等地的大多数国家,都出现粮食产量显著下降的情况,粮食生产正面临前所未有的威胁,并随着气候变化的严峻形势而日益加剧^[1,12]。在气候变化背景下,干旱、洪涝、高温热害、低温冷害与病虫害等发生的频率与强度呈明显增大的趋势,影响粮食生产安全^[13-14]。为此,如何科学定量地评估气候变化对粮食生产的影响,并探讨有效的适应对策,不仅是一个重要的科学问题,也是政府部门亟需解决的现实问题,对于提升防灾减灾能力、保障粮食安全、确保农业资源高效利用等均具有重要意义。

目前,最直接揭示气候变化对粮食生产影响的研究方法,便是构建气候因子与作物生育期、产量及品质等的关系方程,并以之为依据进行影响评估^[15-17]。但是由于很多地区缺乏长时间尺度的粮

食生产数据资料,或是因为在不同的气候背景下,不同气候因子与粮食生产之间的相互关系不明确,导致气候变化影响评估的不确定性增大。针对这两个问题,常用的方法包括观测试验和模型模拟等^[15-20]。观测试验是一种重要的研究方法,可获得大量重要数据用以检验假设或评价因果关系。但试验过程耗时、耗力,需要多种处理的长期观测,实施起来具有一定的难度,在使用中存在较大的局限性。作物机理模型以不同作物生长发育的机理过程为依据,通过结合不同的气候模式,能够较为准确地对作物生长发育和产量形成进行模拟,进而生成长时间尺度的粮食生产数据,从而较为有效地解决上述两个问题。加之作物模型模拟定量水平高且更为高效,特别是能够大大扩展影响评估的时间与空间尺度,目前已经在很多国家和地区得到广泛应用,成为定量评估气候变化对作物生长发育、产量形成影响的主要研究方法^[15,17,21]。而这其中,WOFOST (WORLD FOOD STUDIES) 作物模型由于机理性强、源代码开放、参数调整相对简便等优势,已经在气候变化对粮食生产的影响评估方面得到了广泛应用^[22-25]。

为此,本文将在介绍 WOFOST 模型基本原理、参数本地化方法及其发展应用的基础上,系统总结该模型在评估气候变化对粮食生产影响中的研究进展,分析目前研究中存在的相关问题与未来展望,以期为更加客观、定量的气候变化影响评估工作提供参考。

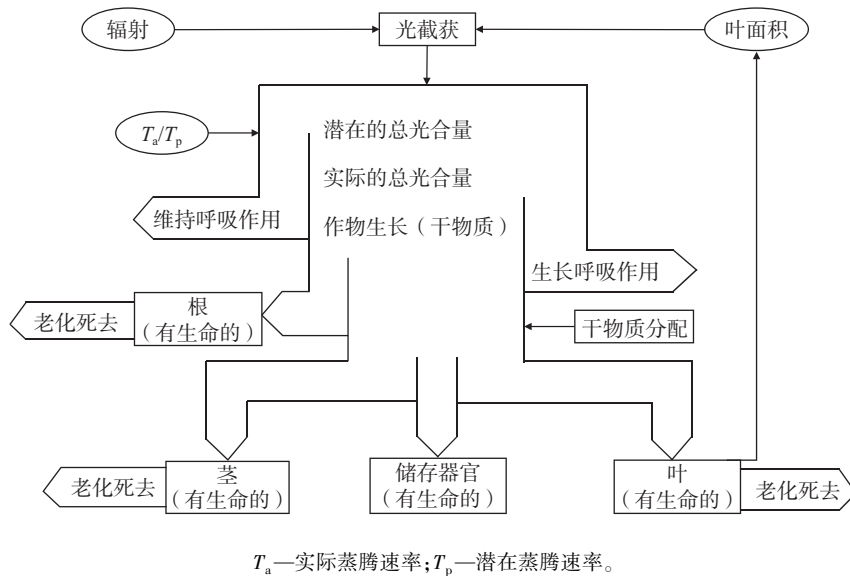
1 WOFOST 模型简介

WOFOST 模型是荷兰瓦赫宁根大学和世界粮食研究中心共同开发研制,模拟一定土壤和气候条件下作物生长发育的动态解释性模型^[26-31]。以日为时间步长,该模型能够动态、定量模拟潜在条件、水

分限制和养分限制 3 种水平下的作物生长^[21,32]。其中,潜在生长条件下作物生长仅由辐射、温度和作物特性决定,养分、水分等条件都处于最适状态;水分限制条件下假设养分供给仍处于最佳状态,模拟水分条件对作物生长的影响;养分限制条件需综合考虑氮(N)、磷(P)、钾(K) 3 种元素对作物生长的影响^[25-30,33]。

WOFOST 模型根据土壤和气象条件对作物根、茎、叶、穗生物量以及土壤水分动态进行模拟,模拟的基础为同化作用、呼吸作用、蒸腾作用以及干物质分配等生理生态过程^[26,31]。根据作物品种特性和环境

条件,解释作物从出苗到开花、开花到成熟的生长发育过程,模拟在辐射、温度、降水、作物自身特性等综合情况下日尺度的干物质积累^[27](图 1)。干物质生产的基础是冠层总 CO₂ 的同化,通过吸收的太阳辐射和单叶光合特性计算作物的日同化量,再通过高斯积分法计算冠层总同化量^[28](图 1)。部分同化物被用于维持呼吸而消耗,余下的同化物被转化成干物质,在转化过程中又有部分干物质被用于生长呼吸而消耗,产生的干物质在根、茎、叶和储存器官中进行分配,分配系数随发育阶段的不同而变化,发育阶段的计算由积温或日长进行控制^[26-28](图 1)。



T_a —实际蒸腾速率; T_p —潜在蒸腾速率。

图 1 WOFOST 模型作物生长流程^[27]

Fig.1 Flow chart of crop growth process in the WOFOST model^[27]

WOFOST 模型自问世以来得到了极大的发展,随着版本的不断更新,其应用范围不断扩大,相关研究在世界各地不同领域广泛开展^[34]。目前 WOFOST 模型主要被用于产量预测、风险分析、生产潜力评价、灾害影响评估、气候变化影响评估及预估、关键发育期预报、长势模拟、生长关键因子确定、灌溉和施肥的产量效益估算等方面^[35-41]。

WOFOST 模型的首次应用是在加纳、布基纳法索和肯尼亚等 3 个非洲国家,研究施肥量对粮食作物产量的影响,结果表明,在这 3 个国家,粮食产量随施肥量的增加而增加,额外的田间灌溉对产量影响较小^[28,32,42]。在布基纳法索的 AGRISK 工程中,WOFOST 模型被用于产量风险研究,通过了解土壤类型、作物品种、播种日期、降水

及播种地位置与干旱风险之间的关系,更好地指导农业生产实践^[32,43]。此外,WOFOST 模型在欧洲被用于对主要大田作物的潜在产量评估,在安第斯山脉被用于灌溉和水分保持评价,为指导当地的农业生产提供有效依据^[31,44-45]。在农业遥感检测(Monitoring Agriculture with Remote Sensing, MARS)工程中,欧洲联合研究中心利用 WOFOST 模型,将当年和往年的作物生长动态进行比较,同时对整个地区和国家进行产量预测^[32,46-47]。之后 WOFOST 模型被耦合入作物生长监测系统(Crop Growth Monitoring System, CGMS)中,并可以在计算机的 SUN-UNIX 操作系统中运行。另有学者将模型进行扩展修改,使之运用于森林和草地的模拟^[28,42]。

2 应用评估研究进展

WOFOST 模型具有一定的普适性,可根据作物品种、土壤特性、气候条件等对参数进行调整,进而使模型适用于不同地区的不同作物^[21,35-36]。在对 WOFOST 模型进行适用性研究时,需要对作物参数和土壤参数进行标定,结合研究区域的气候特征、土壤特性和研究作物的品种遗传特性,调试出模拟效果最好的一套参数,即参数本地化^[21]。其中土壤参数可通过农业气象常规观测资料和土壤含水量动态观测数据进行调整,而作物参数数量相对较多并且复杂,因此目前关于参数本地化的研究多集中于作物参数的确定与验证^[41,48]。

2.1 参数本地化应用

2.1.1 参数敏感性分析

WOFOST 模型的参数量很多,对全部参数一一进行校正和优化的工作量巨大,而且有些参数的校准和优化并未明显提高模型的模拟精度,因此需要通过敏感性分析有效地界定参数的敏感性和重要性,从而确定需要优化的参数^[48-49]。敏感性分析可有效提高模型应用中的工作效率,也可以减少优化算法的计算量和计算时间,因此在实际研究中得到了广泛应用。通过敏感性分析,筛选出对模型模拟结果影响较大的参数,再对敏感参数进行优化,对于不敏感的参数可采用模型默认值或查阅相关文献获取参数值^[49-50]。比如相关学者通过敏感性分析,选定华北冬小麦出苗期和返青期生物量为待优化参数,并通过同化观测数据有效减小了 WOFOST 模型对于开花期、成熟期、储存器官干重以及地上部分总干重的模拟误差^[36]。在研究 WOFOST 模型对东北春小麦生长发育和产量的模拟效果时,有学者对主要参数进行敏感性分析,选取并调整对模拟结果影响较大的积温、储存器官同化物转化效率等参数,最终验证了 WOFOST 模型在东北春麦区的适用性^[51]。

敏感性分析分为局部敏感性分析和全局敏感性分析。局部敏感性分析只能反映单个参数对模拟结果的影响,分析结果具有一定的片面性;而全局敏感性分析可以同时检测多个参数变化对模拟结果的影响,并且可以反映参数之间相互作用的综合影响。因此,作物模型参数的敏感性分析越来越倾向于采用全局敏感性分析方法^[21,36,48-49,52]。目前全局敏感

性分析方法主要包括 Morris 参数筛选法、基于方差的 Sobol 法、傅里叶幅度检验法 (Fourier Amplitude Sensitivity Test, FAST)、扩展傅里叶幅度检验法 (Extend Fourier Amplitude Sensitivity Test, EFAST) 等^[48,53]。其中,EFAST 法计算高效,要求的样本数较低,目前应用较为广泛,该方法充分采取 Sobol 法和 FAST 法的优势,进而探索出一种新的全局敏感性分析方法。该方法基本原理是分解参数对模型结果的方差,把参数敏感性分为单个参数及参数之间耦合作用对模型结果的影响两种类型^[48]。相关研究采用 EFAST 方法,对 WOFOST 模型 26 个作物参数进行了全局敏感性分析,确定了 TSUM1、SLATB1、SLATB2、SPAN、EFFTB3 和 TMPF4 等 6 个对产量敏感的参数,证明了该方法在模型参数本地化研究中应用前景较大(表 1)^[54]。

2.1.2 参数本地化

在完成参数敏感性分析的基础上,就要对敏感参数进行本地化验证。现阶段,较为常用的参数本地化方法主要有 3 种,即控制试验法、试错法和对比优化法。

在模型建立之初,作物生长参数主要通过控制试验或大田试验获取,根据大量的试验观测数据对作物参数进行本地化标定^[21,55]。该方法工作量大,不利于 WOFOST 模型的广泛使用和推广。

试错法是在默认参数范围或现有研究的基础上,逐个调整模型参数并运行,通过比较模拟值与实测值的拟合程度来确定参数值。试错法可操作性强且实用效果良好,因此在相关研究中应用相对广泛^[21]。如运用 WOFOST 模型评估玉米干旱损失的研究中,采用试错法进行参数调整,验证了模型在北京地区春玉米和夏玉米产量模拟与灾害评估方面的适用性^[39]。在内蒙古河套灌区对玉米生长全过程的模拟适用性研究中,采用试错法对 WOFOST 模型部分参数进行校准,研究结果表明,模型对叶面积指数、各器官生物量以及产量的模拟结果与实际较为符合,能够适用于河套地区玉米生理、生态过程的诊断、评估等^[49]。

基于过程模型的非线性参数优化方法,主要包括遗传算法、普适似然不确定估计 (general likelihood uncertainty estimation, GLUE) 法、马尔科夫蒙特卡洛 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 方法、FSEOPT 优化程序等。其中,MCMC 法是基于贝叶

斯统计理论的一种参数估计方法,在基于过程的生物模型参数调整方面应用广泛,其参数优化效率较 GLUE 法更高^[48,56]。已有学者结合参数全局敏感性分析方法以及 MCMC 法,以冬小麦实际观测数据为参照,对 WOFOST 模型的 55 个品种参数进行了敏感性分析、筛选和优化,为冬小麦参数本地化研究夯实了基础^[48]。除此之外,目前应用较多的 FSEOPT

优化程序^[35-36,57],是根据 Price 算法和 Downhill-Simplex 方法,利用 FORTRAN (Formula Translation) 语言开发的一种模型参数优化程序^[35,58]。该程序以模型模拟结果与实测数据的拟合优度为标准,进行参数优化,并最终获得参数值的最佳组合,相关学者采用 FSEOPT 优化程序对敏感参数进行调整,有效减小了 WOFOST 模型的模拟误差^[35]。

表 1 WOFOST 模型中冬小麦部分作物参数及其取值范围^[54]
Table 1 Ranges of input parameters for the WOFOST model of winter wheat^[54]

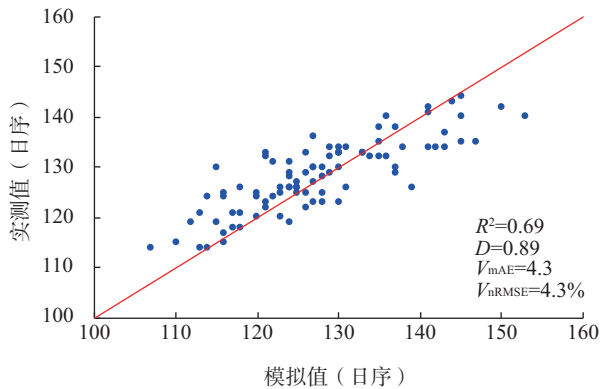
参数	含义	取值范围
TSUM1	出苗到开花的有效积温/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	1 300~1 500
TSUM2	开花到成熟的有效积温/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	500~800
TDWI	初始总干物重/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	100~300
LAIEM	出苗时的叶面积指数/($\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-2}$)	0.000 7~0.300 0
SLATB1	生育期为 0 时的比叶面积/($\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-1}$)	0.001~0.004
SLATB2	生育期为 0.5 时的比叶面积/($\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-1}$)	0.001~0.004
SLATB3	生育期为 1 时的比叶面积/($\text{hm}^2\cdot\text{hm}^{-1}$)	0.001~0.004
SPAN	35 $^{\circ}\text{C}$ 环境下叶生存周期/d	20~30
EFFTB1	0 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶光能有效利用率/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}$)	0~1.0
EFFTB2	10 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶光能有效利用率/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}$)	0~1.0
EFFTB3	20 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶光能有效利用率/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}$)	0~1.0
EFFTB4	30 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶光能有效利用率/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}$)	0~1.0
EFFTB1	40 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶光能有效利用率/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}$)	0~1.0
AMAX1	生育期为 0 时的最大 CO_2 同化率/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	25~50
AMAX2	生育期为 1.0 时的最大 CO_2 同化率/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	30~60
AMAX3	生育期为 1.3 时的最大 CO_2 同化率/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	40~80
AMAX4	生育期为 2.0 时的最大 CO_2 同化率/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	30~60
TMPF1	最大 CO_2 同化率在 0 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0~1.0
TMPF2	最大 CO_2 同化率在 10 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0~1.0
TMPF3	最大 CO_2 同化率在 20 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0~1.0
TMPF4	最大 CO_2 同化率在 30 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0~1.0
TMPF5	最大 CO_2 同化率在 40 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0~1.0
CVL	干物质转化成叶的速率/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.5~1.0
CVO	干物质转化成储存器官的速率/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.5~1.0
CVR	干物质转化成根的速率/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.5~1.0
CVS	干物质转化成茎的速率/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.5~1.0

2.1.3 参数适用性评价

WOFOST 模型引入我国后,其模拟性能和适用性在很多地区的不同作物中得到了验证。如基于 2000—2001 年禹城综合试验站的水分处理实验,采用 2001 年实验数据对参数进行校正,利用 2000 年实验数据进行验证,结果表明模型对潜在生长的模拟较好,适用于华北平原作物生长与水分利用的研究;但模型对一些细节问题考虑不足,较为适合大面积、区域范围内的模拟,该项研究成果为 WOFOST 模型在我国的本地化研究奠定了良好的基础^[27]。

如以华北地区冬小麦为研究目标,采用不同气候生态区代表站点资料对模型参数进行调整,并利用同化法将 WOFOST 模型与 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 遥感信息相结合,取得较好模拟效果,为遥感信息在冬小麦区域生长模拟研究中的应用奠定了基础^[36]。如根据山东 16 个农业气象观测站历史观测数据和水分控制试验资料,确定了 WOFOST 模型中光温和土壤性能相关参数,采用对比优化法确定其他生理参数,结果表明调整优化后的参数对于冬小麦生长发育和产量

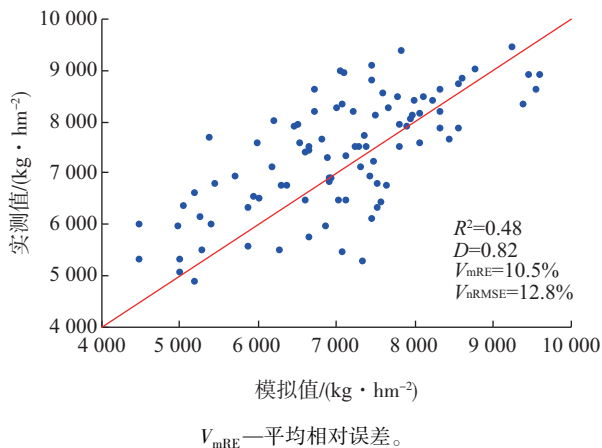
形成的模拟具有较好的适用性(图2、3),并且可以准确模拟干旱胁迫下冬小麦产量的减少趋势,为WOFOST模型的推广应用、干旱评估等提供了参考^[59]。



R^2 —决定系数; D —Willmott 一致性指标(D 指标);
 V_{mAE} —平均绝对误差; V_{nRMSE} —归一化
均方根误差;下同。

图2 山东冬小麦开花期实测值和模拟值的对比结果^[59]

Fig.2 Comparison result for the observed value and simulated value of the flowering period of winter wheat in Shandong^[59]



V_{mRE} —平均相对误差。

图3 山东冬小麦产量实测值与模拟值的对比结果^[59]

Fig.3 Comparison result for the observed value and simulated value of winter wheat yield in Shandong^[59]

2.2 气候变化影响评估

2.2.1 气候生产潜力影响评估

WOFOST模型在定量评估气候变化对粮食生产的影响研究中已经发挥了巨大作用,对于各地主要粮食作物的研究均取得了较好成果。国外研究人员采用WOFOST模型,评估欧盟25个国家之间秋播小麦的模拟单位面积产量差距,结果表明25个国家

主要地区的模拟单产差距为 $2\sim 4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,在欧洲西北部比较小,在葡萄牙最大^[60]。利用WOFOST模型研究气候变化对奥地利东北部冬小麦产量的影响,结果表明气候变化的综合影响使冬小麦产量增加 $30\%\sim 55\%$ ^[61]。国内专家学者将WOFOST模型与气候趋势分析方法相结合,研究近43 a黑龙江气候变化对农作物产量的影响,结果表明玉米产量呈增加趋势,平均增幅为 $4.81\%\cdot(10\text{ a})^{-1}$,大豆产量整体呈下降趋势,平均降幅为 $1.52\%\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ^[62]。采用WOFOST模型对黑龙江甜菜气候生产潜力的空间分布特征进行模拟分析,结果表明:甜菜早、中熟品种气候生产潜力在中部和东部由北向南递增,在西部由北向南递减;晚熟品种则在中东部和东部由北向南递增,在西部由北向南递减,在中西部处于中产水平^[63]。利用WOFOST模型模拟青藏高原冬小麦生产潜力及其对气候变化的响应,结果表明冬小麦光温生产潜力呈下降趋势,平均降幅为每10 a下降 $0.27\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,主要是因为升温使冬小麦生长期显著缩短,接收的总辐射量减少,不利于干物质积累,光温生产潜力下降^[64]。通过对WOFOST模型进行面域化,模拟华北平原夏玉米潜在产量时空演变及其对气候变化的响应,并分析潜在产量与平均温度及日均太阳总辐射的相关性,结果表明潜在产量上升的区域与温度的上升有关,潜在产量下降的区域与太阳总辐射的下降有关^[40]。利用验证后的WOFOST模型模拟华北地区冬小麦的光温生产潜力和气候生产潜力,结果表明前者呈东北高西南低的变化趋势,后者呈南高北低的趋势^[65]。根据水稻田间试验,模拟并验证浙江水稻潜在生长过程,结果表明WOFOST模型能够较好地模拟浙江主要水稻品种的潜在生长过程,并能有效评估水稻的生产潜力,为当地制定水稻种植计划和田间管理措施提供科学依据^[29]。

2.2.2 气象灾害影响评估

气候变化加剧了农业气象灾害的发生,评估其对粮食生产的影响具有重要意义。在印度,采用WOFOST模型评估升温胁迫对水稻生产的影响,最高气温和最低气温分别升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 将导致产量分别下降 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[66]。在奥地利,采用WOFOST模型模拟玉米和冬小麦产量对升温胁迫的响应,结果表明升温 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 导致站点A和

站点B冬小麦在2003、2004年减产均超过10%,导致玉米在2013年减产超过10%,但在2014年减产小于10%^[67]。利用WOFOST模型对中国辽宁春玉米进行干旱灾损风险评估,结果表明不同生育期发生干旱对最终产量的影响不同,并且在相同干旱情形下,不同区域受影响的程度也不同,在全生育期和各生育阶段发生轻、中、重旱3种不同情景下,干旱导致的减产率总体上呈由东部向西部地区逐渐加重的趋势^[37]。采用WOFOST模型评价内蒙古河套灌区玉米生长发育对低温冷害的响应,结果表明:以抽雄期延迟日数和灌浆指数为冷害指标,对历史冷害发生状况的评估结果与实际基本相符,研究时段1961—2010年12个站点共发生不同程度低温冷害260站次,其中重度冷害占37.3%,轻中度冷害占62.7%,在发生严重冷害的年份中,84.7%的年份表现为减产的趋势;与传统方法相比,用该方法评价研究地区玉米低温冷害的生物学意义更加明确^[38]。在黄淮海流域,利用WOFOST模型评价夏玉米对初始土壤含水量、不同发育时段降水量和根层土壤含水量等水分条件的敏感性,结果表明:夏玉米对干旱的敏感发育阶段依次为抽雄—乳熟期、出苗—七叶期以及拔节—抽雄期;对涝渍的敏感发育时段主要为出苗—七叶期、拔节—抽雄期以及七叶—拔节期;相对于降水量,初始土壤含水量对最终生物量的影响更大,后者降低50%可能导致夏玉米减产14.5%^[68]。在WOFOST模型中增加晚霜冻影响处理,建立风险评估模型对黄淮区域晚霜冻风险进行评估,结果表明冬小麦晚霜冻风险呈西高东低趋势,黄淮西部的高风险主要是由于晚霜冻的高灾损,河南西南部的高风险是由于晚霜冻的高频率,西北部和东部的高风险则是晚霜冻的高频率和高灾损共同作用^[41]。在江苏,利用WOFOST模型研究不同时期高温胁迫对水稻生育期和产量的影响,结果显示过高的温度会抑制作物有机物合成,并且导致水稻生育期缩短,进而影响水稻干物质积累,高温发生时段与程度不同造成水稻减产的程度不同,高温强度越大、持续时间越长所造成的影响越大^[69]。利用WOFOST模型,在江苏冬小麦灌浆期进行升温 and 干旱胁迫模拟,结果表明:灌浆期升温 and 干旱复合胁迫会严重影响籽粒干物质积累和产量形成;不同级别升温胁迫、干旱胁迫以及复合胁迫均导致减产率不

同程度增大,籽粒干物质分配比例不同程度降低,复合胁迫的影响程度大于单一胁迫;升温导致江苏南部冬小麦减产程度最大,籽粒干物质积累受阻最为严重;干旱对江苏中部冬小麦产量影响最为严重,籽粒干物质积累程度由南至北递减;复合胁迫下,减产率大致由南至北递增,而干物质积累程度递减^[70]。

2.2.3 未来情景影响预估

近年来,随着气候模式的发展,利用气候模式与作物模型相结合的方法,可定量预估未来气候变化对粮食生产的影响^[18,20,71]。气候模式是评价气候变化及其影响的重要方法,可以实现长期气候模拟,通过生成逐日天气数据,输入到作物模型,实现对未来气候条件下作物生长发育和产量形成的模拟,用于预估气候变化对粮食生产的影响^[19-20,24]。国内外已有相关研究将不同气候模式与WOFOST模型结合,预估未来气候变化对不同地区及不同作物的影响^[17,67,72]。

在国外,有关专家学者利用WOFOST模型预估在CO₂质量浓度为425 ppm和500 ppm及升温2.7~4.7℃条件下,伊朗地区旱作小麦到2025年和2050年的减产率,结果表明:两种CO₂质量浓度下2025年平均减产18%,2050年平均减产24%,且减产主要是受降水减少和冬小麦生育期缩短的影响^[73]。采用WOFOST模型模拟A1F1情景下,2055年温度和大气CO₂条件下马铃薯的潜在产量,结果表明:温度和CO₂的单独作用对不同熟型马铃薯产量影响较大,两者的综合作用导致2055年马铃薯晚熟、中熟和早熟品种产量分别下降2.6%、4.6%和5.3%^[74]。

在国内,研究人员将气候模式BCC-T63与WOFOST模型相结合,预估2000—2100年气候变化对我国主要粮食作物生长发育和产量的影响,结果表明:东北地区中熟玉米生育期平均缩短3.8 d,平均减产3.3%,晚熟玉米生育期平均缩短1.4 d,平均减产2.7%;华北地区冬小麦生育期平均缩短8.4 d,平均减产10.1%;南方早稻生育期平均缩短4.9 d,平均减产3.6%,晚稻生育期平均缩短4.4 d,平均减产2.8%^[22,24]。基于同样的方法,预估重庆地区2001—2050年冬小麦产量的变化,结果表明:品种与生产条件不变,在未来气候变化下,冬小麦的产量变化波动较小,平均减产3.0%^[25]。模拟基准气候站(benchmark station, BS; 1961—1990年)和B2情

景下 2011—2050 年东北地区玉米产量,结果表明: 2030 年代和 2040 年代东北地区大部受气候因素影响呈减产趋势;整体而言,未来 40 a 受气候变化影响,东北地区玉米单产总体表现为减产,减产幅度为 9.5%^[72]。基于 WOFOST 模型预估 A2 和 B2 情景下东北 2050 年大豆不同熟型的分布及生育期、产量的变化,结果显示:在 B2 情景下,不同熟型的大豆品种种植北界表现为不同程度的北扩东移;在 A2 和 B2 情景下,未来 30 a 大豆出苗—开花阶段缩短,生育进程加快,可能会导致全生育期缩短,大豆的减产面积和幅度将逐渐增大^[75]。针对西北半干旱地区马铃薯,借助 RCP4.5 情景和 WOFOST 模型,分析气候变化对气候资源、种植区划以及温度、水分、光照适宜度和生育期、产量的影响,结果表明:未来 50 a,马铃薯生育期内的热量资源增加,水分资源下降,种植适宜区总体表现为南界北移和面积缩小;生育期内的温度、水分、光照适宜度均下降;未来气候情景下,研究区大部分地区马铃薯产量呈下降趋势,适播期与各发育期将提前,全生育期将缩短^[76]。

3 小结与展望

WOFOST 模型在评估气候变化对粮食生产的影响及其发展趋势方面发挥了重要作用,相关研究成果为制定合理的种植计划与田间管理措施,以及适应和减缓气候变化的不利影响等提供了重要的科学依据。然而,WOFOST 模型在气候变化对粮食生产的影响研究和业务应用中还存在一定的不确定性,需要在今后的研究和应用中不断改进。

第一,WOFOST 模型参数本地化、区域化运用等方面存在一定的不确定性。通过调整 WOFOST 模型参数对不同地区的不同作物进行模拟,在参数本地化过程中,用于参数调整的观测数据由于试验年份与品种的差异,会在一定程度上导致参数值的不同,进而导致模型的模拟精度存在不确定性。基于单站进行参数本地化的模型在应用到区域范围时,空间差异性导致模拟精度降低。因此需要机理性更强、普适性更高的参数本地化方法,充分考虑模型对于不同作物生长机理的模拟和气候变化实际,在业务应用中根据气候年型、作物品种特性等确定最适宜的参数值,进而提高模拟精度。

第二,气候变化本身存在不确定性。气候变化

在不同地区有不同的表现,对不同作物的影响情况不同,因此全方位的研究气候变化对粮食生产的影响存在一定难度。在气候变化背景下,全球极端天气气候事件出现的频率将大大增加,会对作物生长发育造成严重影响,导致粮食生产的不稳定性加剧。而 WOFOST 模型对于极端气候事件的响应存在不足,不能全面、系统、准确地反映出气候变化对粮食生产的影响。此外,气候变暖导致作物病虫害的发生、发展加剧,但未来气候情景下,病虫害对于粮食生产的影响程度难以估计,这也是今后需要重点研究的课题之一。

第三,气候模式对于气候变化的模拟存在不确定性。当前,用于开展未来气候变化模拟的全球气候模式和区域气候模式众多,例如参加第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6,CMIP6)的气候模式就有 112 个,不同模式的输出结果必然存在一定差别。最新研究成果表明,目前通过不同算法估算的太阳总辐射均高于实测辐射,输入作物模型后高估了中国玉米(13.8%~23.6%)和冬小麦(37.3%~65.4%)的模拟产量,导致气候变化对作物产量影响的不确定性被放大^[77]。此外,由于 WOFOST 模型需要气象数据库中的逐日太阳辐射量驱动光合作用模拟,而大部分气象观测站缺乏太阳辐射观测数据,一般采用经验公式通过日照时数计算得到,该计算过程中不可避免出现误差,从而影响模拟结果;如何有效降低转化计算过程中产生的误差,将是进一步提高模拟准确性的有效方法之一。

第四,WOFOST 模型对于气象灾害影响评价的不确定性。已有研究评价某灾种影响时,模型均默认其他要素处于最适状态下;但大田作物在实际生长过程中,会受光、温、湿及田间管理措施等的综合影响。因此需要进一步研究如何系统分析多因素之间的耦合作用,并深入探索多灾种的综合影响评价方法。

第五,目前对于 WOFOST 模型输出结果的挖掘利用不够,现有研究对于模型输出结果的利用多集中在产量、生育期、干物重等,模型输出的 CO₂ 同化、叶面积指数、呼吸消耗、干物质积累等生长发育过程数据非常详细,如何充分利用这些数据来评价气候变化对作物生长发育的影响,需要进一步研究与尝试。

本文通过介绍 WOFOST 模型的运行机理和适

用性研究成果,总结了该模型在评估、预估气候变化对粮食生产影响中的应用现状,并就存在的问题进行了思考和展望。相关专家和学者在该模型的敏感性分析、本地化与定量评估等方面都取得了突破性的进展,研究成果显著,希望未来能在WOFOST模型参数本地化、机理开发利用、输入数据优化、输出结果运用以及灾害影响评估等方面开展更深入的研究与探索。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, United Kingdom/New York, USA: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
- [3] 徐玮平, 孟祥新, 伯忠凯, 等. 2000—2015年华北地区8月极端干旱的异常环流型及其波活动特征[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(1): 92-99.
- [4] 房世波, 韩国军, 张新时, 等. 气候变化对农业生产的影响及其适应[J]. 气象科技进展, 2011, 1(2): 15-19.
- [5] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 80-94.
- [6] 赵秀兰. 近50年登陆我国热带气旋时空特征及对农业影响研究综述[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 1-11.
- [7] 吴洪颜, 张佩. 气候变化背景下江苏省水稻气候适宜性区划研究[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(3): 69-76.
- [8] 赵俊芳, 郭建平, 马玉平, 等. 气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2922-2930.
- [9] 俞书傲. 气候变化对农作物生产的影响: 以浙江为例的实证研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [10] 潘志华, 郑大玮. 气候变化科学导论[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [11] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1877-1885.
- [12] 董智强. 气候变化背景下半干旱区春小麦生产的脆弱性与风险评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [13] IPCC. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report [R]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007.
- [14] BATTISTI D S, NAYLOR R L. Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat [J]. Science, 2009, 323(5911): 240-244.
- [15] 李克让, 陈育峰. 中国全球气候变化影响研究方法的进展[J]. 地理研究, 1999, 18(2): 214-219.
- [16] 郭佳, 张宝林, 高聚林, 等. 气候变化对中国农业气候资源及农业生产影响的研究进展[J]. 北方农业学报, 2019, 47(1): 105-113.
- [17] 赵俊芳, 郭建平, 张艳红, 等. 气候变化对农业影响研究综述[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 200-205.
- [18] 包刚, 覃志豪, 周义, 等. 气候变化对中国农业生产影响的模拟评价进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2): 303-307.
- [19] 马锐, 江敏, 石春林. 气候变化对农业影响评价研究进展[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 16-19.
- [20] 秦鹏程, 姚凤梅, 曹秀霞, 等. 利用作物模型研究气候变化对农业影响的发展过程[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 240-245.
- [21] 董智强, 王萌萌, 李鸿怡, 等. WOFOST模型对山东省夏玉米发育期与产量模拟的适用性评价[J]. 作物杂志, 2019, 35(5): 159-165.
- [22] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1179-1184.
- [23] 王文佳, 冯浩. 国外主要作物模型研究进展与存在问题[J]. 节水灌溉, 2012(8): 63-68.
- [24] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 未来气候变化情景下我国主要粮食作物产量变化模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 208-213.
- [25] 张建平, 李永华, 高阳华, 等. 未来气候变化对重庆地区冬小麦产量的影响[J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 268-270.
- [26] BOOGAARD H L, VAN DIEPEN C A, RUTTER R P, et al. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 [R]. DLO Wageningen: Winand Staring Centre, 1998: 1-40.
- [27] 邬定荣, 欧阳竹, 赵小敏, 等. 作物生长模型WOFOST在华北平原的适用性研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 594-602.
- [28] 谢文霞, 王光火, 张奇春. WOFOST模型的发展及应用[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 154-158.
- [29] 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[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 319-323.

- [30] 杨妍辰,王建林,宋迎波. WOFOST 作物模型机理及使用介绍[J]. 气象科技进展, 2013, 3(5): 29-35.
- [31] 王萌萌,杨学斌,王吉顺,等. WOFOST 模型在德州市的适用性研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(5): 160-164.
- [32] 杨妍辰. 干旱对河北固城地区夏玉米产量影响的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [33] DE VRIES F W T P, JANSEN D M, TEN BERGE H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops[M]. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1989.
- [34] SUPIT I, HOOIJER A A, VAN DIEPEN C A, et al. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS: volume 1: theory and algorithms[M]. Wageningen, The Netherlands: The Winand Staring Centre for Intergrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), 1994: 1-44.
- [35] 马玉平,王石立,张黎. 针对华北小麦越冬的 WOFOST 模型改进[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 145-149.
- [36] 马玉平,王石立,张黎,等. 基于遥感信息的华北冬小麦区域生长模型及模拟研究[J]. 气象学报, 2005, 63(2): 204-215.
- [37] 杨霏云,郑秋红,李文科,等. 基于 WOFOST 模型的辽宁省春玉米干旱灾损风险评估[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 218-225.
- [38] 李秀芬,马树庆,赵慧颖,等. 基于 WOFOST 模型的内蒙古河套灌区玉米低温冷害评价[J]. 中国农业气象, 2016, 37(3): 352-360.
- [39] 栾庆祖,叶彩华,莫志鸿,等. 基于 WOFOST 模型的玉米干旱损失评估: 以北京为例[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 311-316.
- [40] 江铭诺,刘朝顺,高炜. 华北平原夏玉米潜在产量时空演变及其对气候变化的响应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 865-876.
- [41] 张雪芬,余卫东,王春乙. 基于作物模型灾损识别的黄淮区域冬小麦晚霜冻风险评估[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 277-284.
- [42] 张铁楠. WOFOST 模型在东北春麦区生产中的应用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [43] WOLF J, OUATTARA K, SUPIT I. Sowing rules for estimating rainfed yield potential of sorghum and maize in Burkina Faso[J]. Agric For Meteorol, 2015, 214/215: 208-218.
- [44] BERKHOUT J A A, HUIJGEN J, AZZALI S, et al. MARS definition study: results of the preparatory phase: main report[R]. Wageningen, The Netherlands: Centre for World Food Studies (SOW), 1988.
- [45] VAN LANEN H A J, VAN DIEPEN C A, REINDS G J, et al. Physical land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects within the European communities[J]. Agric Syst, 1992, 39(3): 307-328.
- [46] VOSSEN P, RJIKS D, HOUGH M N. Early crop yield assessment of the EU countries: the system implemented by the Joint Research Centre[M]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1995.
- [47] CEGLAR A, VAN DER WIJNGAART R, DE WIT A, et al. Improving WOFOST model to simulate winter wheat phenology in Europe: evaluation and effects on yield[J]. Agric Syst, 2019, 168: 168-180.
- [48] 何亮,侯英雨,赵刚,等. 基于全局敏感性分析和贝叶斯方法的 WOFOST 作物模型参数优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 169-179.
- [49] 孙琳丽,侯琼,马玉平,等. WOFOST 模型在内蒙古河套灌区模拟玉米生长全程的适应性[J]. 生态学杂志, 2016(3): 800-807.
- [50] BUSSAY A, VAN DER VELDE M, FUMAGALLI D, et al. Improving operational maize yield forecasting in Hungary[J]. Agric Syst, 2015, 141: 94-106.
- [51] 张铁楠,许为政,魏湜,等. WOFOST 模型对东北春麦区春小麦生长和产量的模拟效果[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(1): 120-128.
- [52] MA G N, HUANG J X, WU W B, et al. Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield[J]. Math Comput Model, 2013, 58(3/4): 634-643.
- [53] SALTELLI A, TARANTOLA S, CAMPOLONGO F, et al. Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2004: 20-78.
- [54] 陈艳玲,顾晓鹤,宫阿都. 基于 EFAST 方法的 WOFOST 作物模型参数敏感性分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 72-78.
- [55] SONG Y L, CHEN D L, LIU Y J, et al. The influence of climate change on winter wheat during 2012-2100 under A2 and A1B scenarios in China[J]. Adv Clim Change Res, 2012, 3(3): 138-146.
- [56] MAKOWSKI D, WALLACH D, TREMBLAY M. Using a Bayesian approach to parameter estimation: comparison of the GLUE and MCMC methods[J]. Agronomie, 2002, 22

- (2):191-203.
- [57] 马玉平,王石立,张黎,等.基于遥感信息的作物模型重新初始化/参数化方法研究初探[J].植物生态学报,2005,29(6):918-926.
- [58] STOL W, ROUSE D L, VAN KRAALINGEN D W G, et al. FSEOPT a FORTRAN program for calibration and uncertainty analysis of simulation models[M]. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agricultural University,1992:1-24.
- [59] DONG Z Q, JIANG M Y, XUE X P, et al. The applicability evaluation and drought validation of the WOFOST model for the simulation of winter wheat growth in Shandong Province, China[J]. Heliyon,2022,8(12):e12004.
- [60] BOOGAARD H, WOLF J, SUPIT I, et al. A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union[J]. Field Crop Res,2013,143:130-142.
- [61] EITZINGER J, ZALUD Z, ALEXANDROV V, et al. A local simulation study on the impact of climate change on winter wheat production in north-eastern Austria[J]. Die Bodenkultur,2001,52(4):279-292.
- [62] 高永刚,顾红,姬菊枝,等.近43年来黑龙江气候变化对农作物产量影响的模拟研究[J].应用气象学报,2007,18(4):532-538.
- [63] 高永刚,南瑞,顾红,等.黑龙江省甜菜气候生产力模拟和种植气候区划[J].生态学杂志,2009,28(1):27-31.
- [64] 穆青云,李俊,何亮,等.青藏高原冬小麦生产潜力及其对气候变化的响应[J].干旱区资源与环境,2021,35(7):92-99.
- [65] 邬定荣,刘建栋,刘玲,等.华北地区冬小麦生产潜力数值模拟及其自然正交分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(5):7-14.
- [66] BANNERJEE S. Possible impact of climate change on rice production in the Gangetic west Bengal, India[C]// Proceedings of the 14th Australian Agronomy Conference. Adelaide, South Australia: Australian Society of Agronomy,2008.
- [67] EITZINGER J, THALER S, SCHMID E, et al. Sensitivities of crop models to extreme weather conditions during flowering period demonstrated for maize and winter wheat in Austria[J]. J Agric Sci,2013,151(6):813-835.
- [68] 马玉平,孙琳丽,俄有浩.黄淮海夏玉米不同发育阶段对旱涝灾害的敏感性[J].自然灾害学报,2015,24(6):90-96.
- [69] 王连喜,许小路,李琪,等.不同时期高温胁迫对江苏省水稻生育期和产量的影响[J].作物杂志,2015,31(2):95-100.
- [70] 沙慧敏,李琪,孙锡鹏,等.灌浆期升温 and 干旱胁迫对江苏冬小麦产量和干物质分配的影响[J].气象与减灾研究,2021,44(3):201-208.
- [71] WOLF J, VAN DIEPEN C A. Effects of climate change on yield potential of wheat and maize crops in the European Union [J]. Stud Environ Sci, 1995, 65: 745-750.
- [72] 米娜,张玉书,蔡福,等.未来气候变化对东北地区玉米单产影响的模拟研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(8):117-123.
- [73] NASSIRI M, KOOCHEKI A, KAMALI G A, et al. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran [J]. Arch Agron Soil Sci, 2006, 52(1):113-124.
- [74] DUA V K, SINGH B P, GOVINDAKRISHNAN P M, et al. Impact of climate change on potato productivity in Punjab: a simulation study [J]. Curr Sci India, 2013, 105(6):787-794.
- [75] 曲辉辉,朱海霞,王秋京,等.气候变化对东北三省大豆生育期和产量的影响模拟[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(7):61-69.
- [76] 王春玲.气候变化对西北半干旱地区马铃薯生产影响的研究[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [77] ZHANG Z T, SUN S, ZHANG F L, et al. Using estimated radiation in crop models amplified the negative impacts of climate variability on maize and winter wheat yields in China [J]. Agric For Meteorol, 2022, 318: 108914.3.