

基于 WOFOST 模型的辽宁省 春玉米干旱灾损风险评估

杨霏云¹, 郑秋红¹, 李文科², 王琦³, 罗蒋梅¹, 樊栋樑¹

(1. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2. 山东省气象局, 山东 济南 250031;
3. 国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要:利用锦州农业气象试验站的作物生长发育和土壤实测数据对 WOFOST 模型水分胁迫模块进行了调参, 适用性验证表明, WOFOST 模型适用于辽宁省春玉米生长发育和产量的模拟, 辽宁省春玉米受干旱的影响可以利用 WOFOST 模型较敏感地反映出来。利用调参后的 WOFOST 模型模拟了全生育期及出苗~拔节、拔节~抽雄、抽雄~乳熟和乳熟~成熟各阶段发生轻、中、重旱情景对辽宁省春玉米产量的影响, 并根据模拟结果确定了不同干旱风险等级下辽宁省东、中、西部玉米生产的灾损范围。结果表明:不同生育期发生干旱对产量的影响不同, 总体上, 抽雄~乳熟期发生干旱的影响最大, 其次是拔节~抽雄期, 而出苗~拔节期和乳熟~成熟期发生干旱对产量的影响较小, 全省春玉米在抽雄~乳熟期发生重旱的减产风险达 30%~70%; 在相同干旱水平下, 不同区域受影响程度也不同, 在全生育期及各生育阶段发生轻、中、重旱情景下, 干旱导致的减产率总体上表现为由东部向西部地区逐渐加重的趋势, 在全生育期重旱情景下, 辽宁省东部的春玉米减产率为 40%~75%, 中部为 60%~90%, 西部达 65%~95%。

关键词:春玉米; 干旱灾损; 风险评估; WOFOST 模型; 辽宁省

中图分类号:S423 **文献标志码:**A

Risk assessment of drought damage of spring maize in Liaoning Province based on WOFOST model

YANG Feiyun¹, ZHENG QiuHong¹, LI Wenke², WANG Qi³, LUO Jiangmei¹, FAN Dongliang¹

(1. China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China;
2. Shandong Meteorological Bureau, Jinan, Shandong 250031, China;
3. National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Parameters of the water stress module of WOFOST model were adjusted based on the observed data of crop growth and soil moisture and properties from Jinzhou agrometeorological experimental station. The applicability test proved that WOFOST model was suitable for simulating the spring corn growth and yield in Liaoning Province, and the influences of drought on spring maize can be sensitively simulated by WOFOST model. Influences of mild drought, moderate drought and severe drought scenarios of the whole growth period and different growth stages on yield of spring maize in Liaoning Province were simulated. According to the simulation results, the yield loss under different drought risk levels across Liaoning Province was estimated. The results showed that the same drought level in different growth stages has different effects on yield. Generally, drought in tasseling-milk stage had the greatest impact, followed by jointing-tasseling stage, while drought during seedling-jointing stage and milk-maturing stage had less impact on yield. Yield loss across the whole province under severe drought scenario in tasseling-milk stage was 30%~70%. Under the same drought level, different regions were affected differently. Under all the three drought scenarios, either in the whole growth period or the different growth stages, the yield reduction rate caused

收稿日期:2020-02-18

修回日期:2020-04-26

基金项目:中国气象局 2020 年产量预报专项(14105200000190001)

作者简介:杨霏云(1972-),女,内蒙古集宁人,正研级高级工程师,主要从事农业气象监测预报方法与农业气象统计研究。E-mail: yangfy@cma.gov.cn

通信作者:郑秋红(1975-),女,河北滦县人,博士,副研究员,主要从事农业气象灾害及气候变化研究。E-mail: zhengqh@cma.gov.cn

by drought generally showed a trend of aggravating from the east to the west. Under the situation of severe drought in the whole growth period, the yield reduction rate in the east of Liaoning Province was 40%~75%, in the middle area was 60%~90%, and in the west area is 65%~95%.

Keywords: spring corn; yield loss caused by drought; risk assessment; WOFOST model; Liaoning Province

干旱是威胁粮食安全的重大自然灾害之一。在全球气候变化及人类活动的影响下,20世纪中叶以来,全球大部分地区干旱化的趋势明显^[1-3]。中国东北地区亦是如此,干旱频率随年代际变化逐渐升高,干旱程度逐渐加重^[4]。辽宁省位于东北地区南部,属于温带大陆性季风气候,是中国重要的粮食产地之一,也是农业灾害多发的地区之一,尤其是农业干旱。据估算,1949—1990年,辽宁省临时性抗旱的投入为33亿元,再加上干旱导致农作物减产损失的75亿元,总共108亿元^[5]。

作物生长模型借助计算机程序,利用统计学和动力学的方法描述作物生长过程,可以较好地揭示作物生长、发育、产量等与环境、管理措施或遗传变异的关系^[6]。WOFOST(World Food Studies)模型是荷兰瓦赫宁根大学和世界粮食研究中心(CWFS)合作开发研制的作物模型。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^[7-8]。作为一个开源模型,WOFOST已在全球多地得到了广泛的应用和验证^[9-15]。

2000—2001年,中国科学院地理科学与资源研究所的邬定荣等^[16]在禹城综合试验站进行了小麦的水分处理实验,来评价WOFOST模型在华北平原的适用性,结果证明模型对潜在生长的模拟较好。马玉平等^[17]利用WOFOST模型分析了黄淮海流域夏玉米生长对初始土壤含水量、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,表明WOFOST模型对水分条件的不同较敏感,可以模拟干旱的影响。张建平、栾庆祖、宋艳玲等^[18-22]基于WOFOST模型对西南地区、华北、北京等地的干旱对冬小麦、玉米的产量的影响进行了评估,取得了较满意的效果。刘维等^[23]利用WOFOST模型预估了干旱对河南省夏玉米气象产量的影响。上述研究证明,WOFOST模型在中国各地研究干旱对作物产量的影响是适宜的。武荣盛等^[24]基于WOFOST模型分析了内蒙古地区春玉米在拔节~抽雄期和抽雄~乳熟期分别发生不同程度干旱对生物量和产量的影响,表明WOFOST模型可以模拟作物不同生育期干旱对生长发育的影响差异。朱津辉、李琪

等^[25-26]利用WOFOST模型模拟了河北、吉林等省小麦、玉米干旱发生后不同的给水方案下生长发育和产量形成,给出了最佳灌溉方案,研究为将WOFOST模型应用于农田的水肥条件模拟提供了科学的依据。但基于WOFOST模型研究辽宁省春玉米干旱灾损目前尚未见报道。

本文利用WOFOST模型研究干旱对辽宁省春玉米生长发育和产量的影响,对不同干旱风险下的灾损进行评估,为促进区域农业干旱灾害适应和风险应对提供依据。

1 材料与方法

1.1 资料来源

采用辽宁省6个农业气象试验站的数据进行模型的调参和验证,分别用建平和绥中代表辽宁丘陵地区,用新民和锦州代表辽河平原区,用瓦房店和庄河代表辽东半岛(表1)。收集了WOFOST模型中所用到6个代表站的玉米作物、气象、土壤及田间试验资料。

作物资料主要包括辽宁锦州的玉米品种、熟性、生育期、生长状况、产量、叶面积指数、干物质等资料,以及部分水分胁迫试验资料;建平、庄河等5个农业气象观测站的玉米生育期、产量资料。气象资料包括各站的平均气温、最高气温、最低气温、风速、降水、日照时数、水汽压和辐射等。土壤资料包括土壤湿度、土壤容重、田间持水量、凋萎湿度、土壤

表1 辽宁省各区域代表站

Table 1 Representative stations in Liaoning Province

区域 Area	代表站 Representative station	经度 Longitude /(°)	纬度 Latitude /(°)	海拔高度 Altitude /m
辽西丘陵 Hilly area of western Liaoning	建平 Jianping	119.633	41.8667	661.6
	绥中 Suizhong	120.35	40.35	16.3
辽河平原 Liaohe plain	新民 Xinmin	122.833	41.9833	31.9
	锦州 Jinzhou	121.117	41.1333	70.2
辽东半岛 Liaodong peninsula	瓦房店 Wafangdian	122.017	39.6333	119.8
	庄河 Zhuanghe	122.95	39.7167	35.9

质地和酸碱度等数据(主要基于 10 km 分辨率的中国土壤数据集,锦州站收集了实测资料)。

1.2 数据资料处理方法

为保证数据的连续性和完整性,针对观测资料中存在的部分缺测数据,对温度、风速和水汽压数据采用五日滑动平均法进行订正,对于缺失的降水数据及标记为 32700 的痕量降水,定义为 0;改进了作物模型中由日照时数计算太阳辐射的 a 、 b 系数;另外,由于常规观察资料中风速为 10 m 高度处的值,根据风梯度公式进行换算处理成模型中要求输入的冠层附近 2 m 处的风速值。

1.3 模型参数调试方法

根据玉米品种的生理特性,基于模型模拟及实际试验和常规观测资料进行验证、对比的结果,对 WOFOST 模型的生育期积温、比叶面积、干物质分配系数、叶片最大 CO_2 同化速率、干物质转化效率等参数进行本地化研究,建立辽宁省玉米模型参数库。相关参数计算调试方法如下:

(1) 生育期积温。不同发育阶段的积温 (Ta) 由下式计算:

$$Ta = \sum (T - 10) \quad (1)$$

式中, T 为日平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

(2) 比叶面积。不同发育进程 (DVS) 的比叶面积 ($SLATB$) 由下式计算:

$$SLATB = S_{DVS_i} / W_{DVS_i}, DVS_i = 0.33, 0.78, 2.00 \quad (2)$$

式中, S_{DVS_i} 和 W_{DVS_i} 分别为第 i 个发育进程时的绿叶面积和绿叶干重。

(3) 干物质分配系数。不同发育进程 (DVS) 干物质分配到叶 ($FLT B$)、茎 ($FST B$) 和储藏器官 ($FOT B$) 的分配系数分别由以下公式计算:

$$\begin{cases} FLT B_i = \frac{W_{L_i}}{TAGP_i} & i = 0.00 \\ FLT B_i = \frac{W_{L_i} - W_{L_{i-1}}}{TAGP_i - TAGP_{i-1}} & i = 0.33, 0.86, 0.95, 1.10, 1.20, 2.00 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} FST B_i = \frac{W_{S_i}}{TAGP_i} & i = 0.00 \\ FST B_i = \frac{W_{S_i} - W_{S_{i-1}}}{TAGP_i - TAGP_{i-1}} & i = 0.33, 0.86, 0.95, 1.10, 1.20, 2.00 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} FOT B_i = \frac{W_{O_i}}{TAGP_i} & i = 0.95 \\ FOT B_i = \frac{W_{O_i} - W_{O_{i-1}}}{TAGP_i - TAGP_{i-1}} & i = 1.10, 1.20, 2.00 \end{cases} \quad (5)$$

式中, W_L 、 W_S 、 W_O 分别为叶干重、茎干重和储藏器官干重; i 表示第 i 个发育进程, $i-1$ 为 i 的前一个发育进程。

(4) 土壤水层厚度。在 WOFOST 模型中,初始土壤含水量等参数是利用土壤水层厚度表示,所以在模型初始土壤含水量输入时需要将观测得到的土壤相对湿度换算为土壤水层厚度,换算公式为:

$$\text{土壤水层厚度 (mm)} = \text{土壤质量含水量 (g} \cdot \text{kg}^{-1}) \times \text{容重 (g} \cdot \text{cm}^{-3}) \times \text{土层厚度 (mm)} \div 1000$$

$$\text{土壤质量含水量 (g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{土壤相对含水量 (\%)} \times \text{田间持水量 (\%)} \div 10$$

生育期积温、比叶面积、干物质分配系数由田间试验数据计算得到;叶片最大 CO_2 同化速率和干物质转化效率利用“试错法”由计算机模拟得到。

1.4 模型的适用性验证方法

通过调试 WOFOST 模型的参数,对比辽宁省各代表站的玉米试验资料与模型模拟结果,评估 WOFOST 模型在辽宁省玉米模拟方面的适用性。

1.5 干旱敏感性分析方法

首先比较当年从出苗至成熟期的降水量与 30 a 平均降水量,判断是否达到气候干旱(表 2)。如果达到气候干旱,则运行当年气象数据驱动下 WOFOST 模型的潜在模式和水分胁迫模式,将两种模式下输出结果进行对比,来检验模型对研究区干旱是否具有敏感性。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫模块的参数修订

水分胁迫情况下,由于土壤水分不足、作物气孔关闭、光合作用速率显著下降且向各器官的运输也受到阻碍,致使干物质积累及分配速率减缓。同时,水分胁迫使比叶面积减小,生长速率降低,进而影响作物生育期进程。WOFOST 模型利用水分胁迫模块可以模拟干旱的影响,如没有试验资料,可直接利用模型的水分胁迫模块与潜在模块模拟结果相比的方法,来进行干旱模拟。如有试验资料,可结合试验资料在一定范围内修改在干旱条件下 WOFOST 模型的参数来进行干旱的模拟。本研究利用锦州站水分胁迫条件下的田间水分控制试验资料,对 WOFOST 模型的生育期积温、比叶面积、干物质分配系数、叶片最大 CO_2 同化速率等进行干旱模块参数订正。模型所需的其它参数仍保留模型原始值。

(1) 生育期积温的订正。利用锦州水分胁迫的小区试验资料,计算播种~出苗、出苗~开花、开花~成熟的积温,对模型积温进行订正,结果分别为:

70.0°C · d、865.5°C · d、880.0°C · d(表 3)。

(2)比叶面积、干物质分配系数参数的订正。根据公式(2)~(5),分别将正常水分条件下确定比叶面积、干物质分配到叶、茎和储藏器官的分配系数进行计算订正,结果详见表 3。

(3)水分胁迫下叶片最大 CO₂同化速率的模拟调整。利用确定的不同发育阶段的积温、比叶面积、干物质分配系数,根据实际观测资料确定模型所需的初始总干物重、初始根深、田间持水量、凋萎湿度

(表 3),在模型水分胁迫模块下,按照误差最小和通过显著性检验的原则,利用“试错法”通过计算机模拟,对叶片最大 CO₂同化速率进行调整,结果详见表 3。参数订正或调整后,模拟结果为:地上总干物重和产量实测值与模拟值的误差分别为 4.02%和 2.78%;叶面积指数、绿叶干重和茎干重的平均误差分别为 8.68%、11.75%和 12.18%,模拟值与实测值的相关系数分别为 0.989、0.998、0.997,均通过了 0.01 水平的相关性检验。

表 2 东北春玉米各生育期干旱气候指标

Table 2 Climate drought index of spring corn at different growth stages in Northeast China

干旱等级 Drought degree	降水量距平百分率 P_a Percentage of precipitation anomalies/%			
	全生育期 Whole growth period	出苗~拔节期 Seedling~ Jointing	拔节~抽雄期 Jointing~ Tasseling	抽雄~乳熟期 Tasseling~ Milk
轻旱 Mild drought	-40< P_a ≤-20	-55< P_a ≤-35	-50< P_a ≤-30	-45< P_a ≤-25
中旱 Moderate drought	-60< P_a ≤-40	-75< P_a ≤-55	-70< P_a ≤-50	-65< P_a ≤-45
重旱 Severe drought	P_a ≤-60	P_a ≤-75	P_a ≤-70	P_a ≤-65

表 3 水分胁迫下参数订正或调整后的模型参数

Table 3 Revised or adjusted parameters of the water stress module of WOFOST model

参数 Parameter	参数含义 Meaning of parameter	单位 Unit	来源 Source	作物生长发育阶段 DVS	取值 Value
TSUMEM	播种~出苗期的积温 Accumulated temperature from sowing to seedling	°C · d	计算 Calculated		70.0
TSUM1	出苗~开花期的积温 Accumulated temperature from seedling to flowering	°C · d	计算 Calculated		865.5
TSUM2	开花~成熟期的积温 Accumulated temperature from flowering to maturing	°C · d	计算 Calculated		880.0
SLATB	比叶面积, DVS 的函数 Specific leaf area, a function of DVS	hm ² · kg ⁻¹	计算 Calculated	0.00	0.0030
				1.00	0.0013
				2.00	0.0009
FLTb	地上干物质分配到叶的部分, DVS 的函数 Distribution of aboveground dry matter to leaves, a function of DVS	kg · kg ⁻¹	计算 Calculated	0.00	1.00
				0.33	0.62
				0.88	0.15
				0.95	0.15
				1.10	0.00
				1.20	0.00
				2.00	0.00
FSTB	地上干物质分配到茎的部分, DVS 的函数 Distribution of aboveground dry matter to stem, a function of DVS	kg · kg ⁻¹	计算 Calculated	0.88	0.85
				0.95	0.85
				1.10	0.30
				1.20	0.00
				2.00	0.00
FOTB	地上干物质分配到储藏器官的部分, DVS 的函数 Distribution of overground dry matter to storage organs, a function of DVS	kg · kg ⁻¹	计算 Calculated	0.95	0.00
				1.10	0.70
				1.20	1.00
				2.00	1.00
CVL	叶生长同化物转化效率 Conversion efficiency of assimilation to leaves		调整 Adjusted		0.720
CVO	储藏器官生长同化物转化效率 Conversion efficiency of assimilation to storage organs		调整 Adjusted		0.720
CVR	根生长同化物转化效率 Conversion efficiency of assimilation to root		调整 Adjusted		0.720
CVS	茎生长同化物转化效率 Conversion efficiency of assimilation to stem		调整 Adjusted		0.690
AMAXTB	叶片最大 CO ₂ 同化速率, DVS 的函数 Maximum CO ₂ assimilation rate of leaves, a function of DVS	kg · hm ⁻² · h ⁻¹	调整 Adjusted	0.00	70.00
				1.25	70.00
				1.50	60.00
				1.75	40.00
				2.00	21.00
TDWI	初始总干物重 Initial total dry matter	kg · hm ⁻²	实际观测 Observed		10.00
RDI	初始根深 Initial root deep	cm	实际观测 Observed		10

2.2 WOFOST 模型在辽宁省玉米主产区的适用性评估

利用代表站资料进行了 WOFOST 模型模拟试验,对 WOFOST 模型在辽宁省春玉米主产区的适用性进行了评估。各站生育期和产量的模拟结果如图 1 所示,图 1A 为辽宁省春玉米实测与模拟生育期日序的比较。生育期的拟合准确度很高,误差一般为 1~5 d,各站生育期拟合曲线的复相关系数普遍达到了 0.98 以上。6 个代表站共 15 a 的产量拟合中,模拟值与实测值误差为 1%~5% 的占 6 a,5%~10% 的 5a,10%~15% 的 2a,15%~20% 的 1 a,仅有 1 a 误差大于 20%。

目前,已有研究利用 WOFOST 模型对辽宁省玉米产量进行模拟^[27-28],本研究结果进一步表明,WOFOST 模型在辽宁省玉米生育期和产量模拟中是适用的。

2.3 WOFOST 模型对辽宁省玉米干旱模拟的敏感性分析

以农业试验资料完备的锦州站为例,利用 WOFOST 模型模拟了干旱年穗重和地上干物重。结果表明,研究区玉米受干旱的影响可以利用 WOFOST 模型较敏感地反映出来,表现在干旱年与非干旱年穗重、地上干物重有较明显的差异(图 2)。

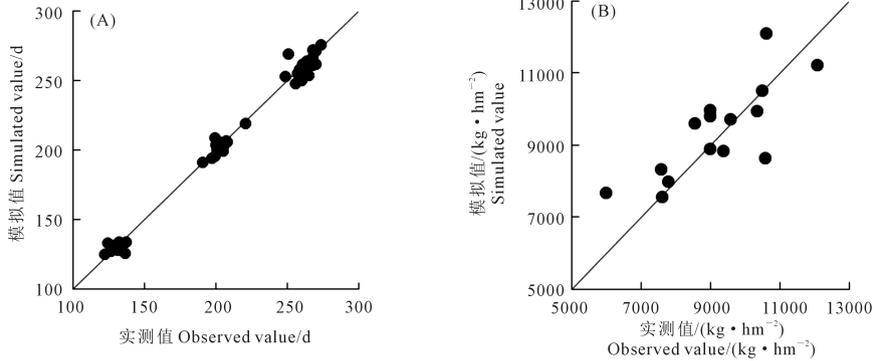


图 1 辽宁省春玉米生育期 (A) 和产量 (B) 的 WOFOST 模型模拟值与实测值比较

Fig.1 Simulated values of WOFOST model compared with observed values of spring maize growth(A) and yield(B) in Liaoning Province

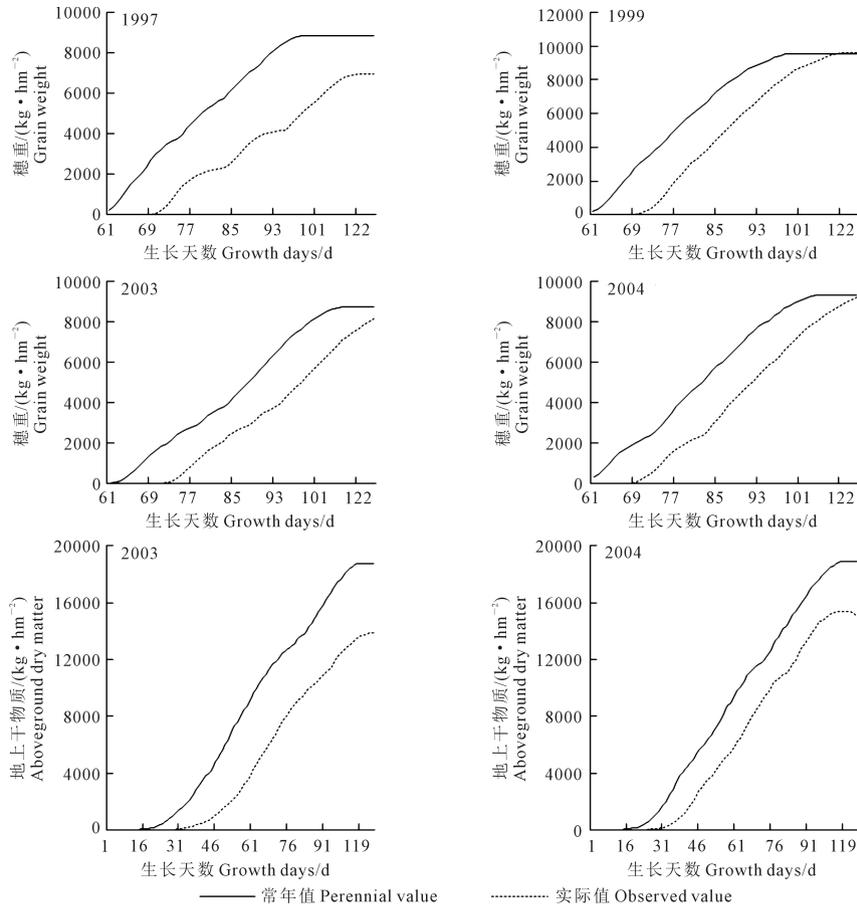


图 2 WOFOST 模型模拟的锦州站干旱年(实际值)与非干旱情景(常年值)下穗重和地上干物重对比

Fig.2 Simulated yield and aboveground dry matter weight of drought years (observed value) and non-drought conditions (perennial value) by WOFOST model of Jinzhou station

2.4 基于 WOFOST 模型的辽宁省春玉米干旱灾损分区模拟

结合干旱的分级指标(表2)模拟了辽宁省各代表站全生育期及各生育期干旱对穗重的影响。结果表明,不同区域受干旱的影响程度不同,其中辽宁西部受干旱的影响明显较重,全生育期干旱达轻、中、重度时,干旱导致的平均减产率分别达到30%、60%和90%左右,中部则平均减产10%、40%和70%左右,东部则为0.5%、10%和60%左右(图3)。

不同发育期干旱对穗重的影响在不同区域表现不同(图4)。模拟结果显示,总体上,抽雄~乳熟期发生干旱对穗重的影响最大,其次是拔节~抽雄期,而出苗~拔节期和乳熟~成熟期发生干旱对穗重的影响较小。区域比较来看,各发育期干旱对瓦房店站的影响最小,其次是绥中站,仅在抽雄~乳熟期重旱时影响较明显,而锦州、建平和新民站在拔节~抽雄期和抽雄~乳熟期发生任何等级的干旱,产量都会受到影响,且影响明显表现为重旱>中旱>轻旱。

根据模拟结果进行了不同区域不同干旱风险下的玉米灾损评估,结果见表4。结果表明,总体上,辽宁省因旱减产风险由东向西逐渐增大。从不同发育期看,在东部和中部地区各发育期发生轻旱和中旱的减产风险均小于30%,只有在拔节期之后发生重旱时减产风险较大,尤其是抽雄~乳熟期发生重旱时;在西部地区,拔节~抽雄期与抽雄~乳熟期发生中旱和重旱的灾损风险均较高。

3 讨论

WOFOST 模型是国内外研究和应用最为广泛的产量预测模型之一,已广泛应用于中国多地的小麦、玉米等作物模拟中。本研究结果表明,辽宁省春玉米受干旱的影响可以利用 WOFOST 模型较敏感地反映出来。

从生物学特性看,在玉米生长期,抽雄吐丝期前后一个月是玉米的需水临界期,降水不足常导致玉米抽雄授粉不畅,结实率受到影响,此时期的干旱往往对产量的影响最大^[27]。模型的模拟结果中抽雄前后两个生育期出现干旱减产最大,结果符合玉米生长发育机理。据姜鹏等人^[28]的试验,拔节~抽雄期与抽雄~乳熟期做土壤水分胁迫处理,同样的水分处理后者比前者减产率高达30.9%。模型模拟结果中,辽西抽雄~乳熟期出现重旱比拔节~抽雄期出现重旱的减产率高25%~35%,与试验结果基本相符,说明模型的模拟结果较为科学合理。张建平等^[29]的模拟结果也表明,拔节期同等程度干旱造成的玉米减产幅度均大于苗期干旱。

模拟结果表明,辽宁省西部地区的春玉米干旱减产风险要高于东部和中部地区。从区域气候特点看,辽宁省属于温带大陆性季风气候区,由于海陆分布、地形地貌等的影响,省内各地气候不尽相同,总体上东湿西干,东南部地区年平均降水量多达800~1050 mm,西北部地区在400~500 mm之间^[30]。刘琳等^[31]以自然灾害指数法为基础,结合加权综合评价法和变异系数法,建立了农业干旱灾害风险评估模型,对辽宁省农业干旱灾害风险进行评价,结果表明,本研究中的建平站所处的朝阳市是辽宁省农业干旱灾害风险最高的区域之一。

由于可获取数据的限制,本研究在模型调试时除锦州外,其他站点仅用到生育期资料和产量资料,并未有叶面积、生物量进行验证。在水分胁迫模块的调参时仅使用了锦州农业气象试验站的水分胁迫的试验数据,对其他代表站的干旱模拟结果可能会存在一定的偏差。在今后的研究中,可结合辽宁各地的农业气象试验资料及水分胁迫试验资料,对辽宁不同区域 WOFOST 模型及水分胁迫模块的参数做进一步调试。

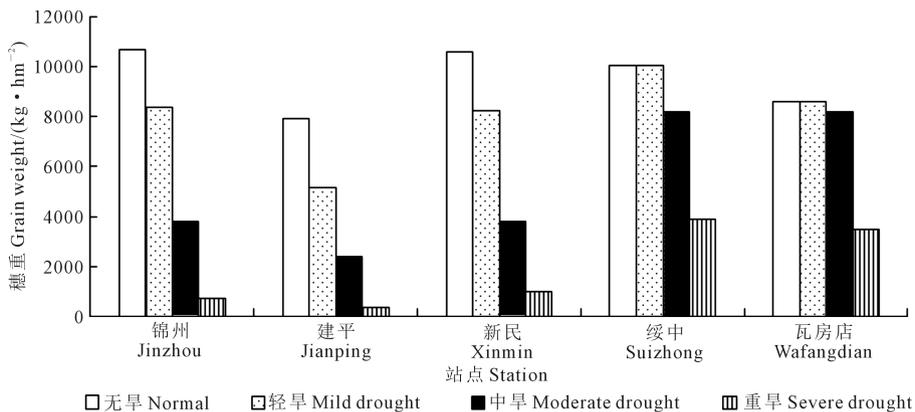


图3 各站点全生育期受不同程度干旱影响的穗重模拟结果

Fig.3 Simulated grain weight of the whole growth period at each station under different drought scenarios by WOFOST model

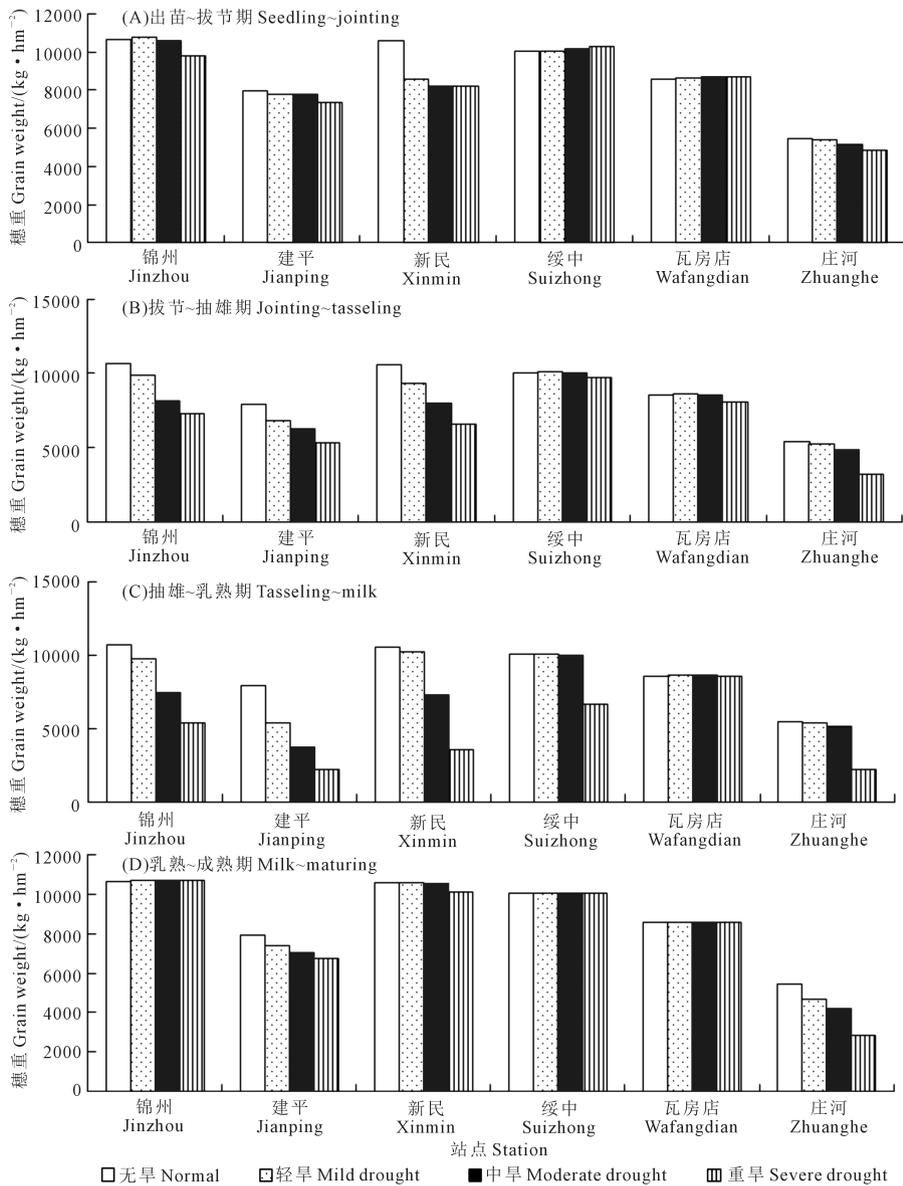


图 4 各站点不同生育期受不同程度干旱影响的穗重模拟结果

Fig.4 Simulated grain weight of different growth stages at each station under different drought scenarios by WOFOST model

表 4 基于 WOFOST 模型的不同干旱风险下辽宁省不同区域灾损程度(减产)

Table 4 Estimated yield loss rate under different drought risk levels across Liaoning Province based on WOFOST model simulation

生育期 Growth stage	灾损程度/%			
	干旱等级 Drought degree	辽宁西部 Western Liaoning	辽宁中部 Middle Liaoning	辽宁东部 Eastern Liaoning
全生育期 Whole growth period	轻旱 Mild drought	5~35	5~20	5~10
	中旱 Moderate drought	35~65	20~60	10~40
	重旱 Severe drought	65~95	60~90	40~75
出苗~拔节期 Seedling~jointing	轻旱 Mild drought	-3~5	-3~5	-3~3
	中旱 Moderate drought	5~25	5~20	3~5
	重旱 Severe drought	25~35	20~30	5~25
拔节~抽雄期 Jointing~tasseling	轻旱 Mild drought	5~15	3~10	0~3
	中旱 Moderate drought	15~35	10~25	3~10
	重旱 Severe drought	25~35	25~40	10~40
抽雄~乳熟期 Tasseling~milk	轻旱 Mild drought	5~30	3~5	3~5
	中旱 Moderate drought	30~50	5~30	5~30
	重旱 Severe drought	50~70	30~60	30~60
乳熟~成熟期 Milk~maturing	轻旱 Mild drought	0~5	0~5	0~15
	中旱 Moderate drought	5~10	5~10	15~25
	重旱 Severe drought	10~15	10~25	25~40

在今后的研究中,可结合辽宁或其他区域的水分处理完全相同的干旱胁迫试验,对干旱模拟结果的范围做进一步验证,研究结论可应用于辽宁或其他气候相近区域的干旱风险评估工作和粮食生产气象保障工作中。

4 结 论

1) 本研究表明, WOFOST 模型适用于辽宁省春玉米生长发育和产量的模拟, 研究区玉米受干旱的影响可以利用 WOFOST 模型较敏感地反映出来。本研究利用农业气象试验站的数据对 WOFOST 模型的水分胁迫模块进行了调参, 得到了一套适用于辽宁省春玉米干旱灾损模拟的参数。调参后对试验小区的春玉米发育期和产量的模型模拟值与实测值的相关性均通过了 0.01 水平的显著性检验。

2) 模型模拟结果表明, 拔节~抽雄期与抽雄~乳熟期发生干旱对产量的影响较大, 以抽雄~乳熟期干旱影响最为严重, 而出苗~拔节期和乳熟~成熟期发生干旱对产量的影响较小。模拟结果符合玉米作物生物学特征, 也与已有研究结果相一致。

3) 模拟结果显示, 辽宁省不同区域春玉米受干旱的影响程度不同, 干旱导致的减产率总体上表现为由东部向西部地区逐渐加重的趋势, 在全生育期重旱情景下, 辽宁西部的减产率可高达 65%~95%。

参 考 文 献:

[1] 马柱国, 符滨斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007, 37(2): 222-233.

[2] 谢安, 孙永罡, 白人海. 中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J]. 地理学报, 2003, 58(S1): 75-82.

[3] Zhou S, Williams A P, Berg A M, et al. Land-atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(38): 18848-18853.

[4] 蔡思扬, 左德鹏, 徐宗学, 等. 基于 SPEI 干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 15-21.

[5] 张亭亭. 辽西北地区干旱分区研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2015.

[6] 李小涵, 武建军, 吕爱锋, 等. 不同 CO₂ 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2936-2943.

[7] Boogaard H L, van Diepen C A, Rotter R P, et al. WOFOST 7.1: User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5[M]. Wageningen: DLO Winand Staring Centre, 1998:1-40.

[8] 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.

[9] de Wit A, Boogaard H, Fumagalli D, et al. 25 years of the WOFOST cropping systems model[J]. Agricultural Systems, 2019, 168: 154-167.

[10] Ceglár 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]. Agricultural Systems, 2019, 168:168-180.

[11] Chervenkov H, Kazandjiev V, Gorgieva V, et al. Application of the crop model WOFOST in grid using meteorological input data from re-analysis and objective analysis[J]. AID6JÁRÁS, 2018, 122(3): 305-320.

[12] Biswas R, Banerjee S, Bhattacharyya B. Impact of temperature increase on performance of kharif rice at Kalyani, West Bengal using WOFOST model[J]. Journal of Agrometeorology, 2018, 20(1): 28-30.

[13] Eweys O A, Elwan A A, Borham T I. Integrating WOFOST and Noah LSM for modeling maize production and soil moisture with sensitivity analysis, in the east of the Netherlands[J]. Field Crops Research, 2017, 210:147-161.

[14] Yu E G, Di L, Kang L, et al. Online parameterization for WOFOST for United States using open geospatial standards[C]//5th International Conference on Agro-geoinformatics (Agro-geoinformatics). Tianjin: IEEE, 2016: 1-6.

[15] Mishra S K, Shekh A M, Yadav S B, et al. Simulation of growth and yield of four wheat cultivars using WOFOST model under middle Gujarat region[J]. Journal of Agrometeorology, 2013, 15(1): 43-50.

[16] 郭定荣, 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.

[17] 马玉平, 孙琳雨, 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.

[18] 张建平, 王靖, 何永坤, 等. 基于 WOFOST 作物模型的玉米区域干旱影响评估技术[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 451-459.

[19] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1762-1769.

[20] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 不同发育期干旱对冬小麦灌浆和产量影响的模拟[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9):1158-1165.

[21] 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.

[22] 宋艳玲, 董文杰. 1961-2000 年干旱对我国冬小麦产量的影响[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 235-240.

[23] 刘维, 侯英雨, 吴门新. 基于 WOFOST 模型的 2014 年河南省干旱对夏玉米产量的预估[J]. 中国农学通报, 2016, 32(36): 146-151.

[24] 武荣盛, 吴瑞芬, 孙小龙, 等. 不同程度干旱对春玉米生物量和产量影响的模拟[J]. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2482-2488.

[25] 朱津辉, 郭建茂, 毛留喜. 基于 WOFOST 模型的河北省保定市冬小麦最佳灌溉方案研究[J]. 气象, 2014, 40(11): 1398-1407.

[26] 李琪, 胡秋丽, 朱大威, 等. 基于 WOFOST 模型的吉林省春玉米干旱复水模拟研究[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(1): 153-160.

[27] 陈怀亮, 张雪芬. 玉米生产农业气象服务指南[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 25.

[28] 姜鹏, 李曼华, 薛晓萍, 等. 不同时期干旱对玉米生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(36): 232-235.

[29] 张建平, 何永坤, 王靖, 等. 不同发育期干旱对玉米籽粒形成与产量的影响模拟[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 43-49.

[30] 中国天气网. 辽宁主要气候特征[EB/OL], [2013-08-28], <http://ln.weather.com.cn/gwym/1958907.shtml>.

[31] 刘琳, 杨志勇, 徐宗学. 辽宁省农业干旱灾害风险评价及分区[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 1-4.