doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.025

气候变化条件下旱作玉米用水效率与单产变化趋势分析

王玉宝1,2 柴成亮1,2 张 鹏2,3 赵 旗1,2 何建强1,2 孙世坤1,2

- (1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
 - 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
 - 3. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:以渭北早塬合阳和长武2个试验站点为研究区域,通过多年的玉米田间试验数据评估 CERES - Maize 模型的适用性,再利用区域气候模式 RegCM4.0 输出的气象数据对 2050 年前玉米单产及生产水足迹进行预测。结果表明:CERES - Maize 模型可以很好地模拟雨养玉米产量和物候期,多数年份二者的绝对相对误差(Absolute relative error, ARE)在 10%以内, CERES - Maize 模型在渭北早塬早作农业区有很好的适用性。应用 CERES - Maize 模型模拟玉米生产水足迹,较传统水足迹计算方法得到的结果更为精确可靠。在 RCP2.6 气候情景下,随着温度升高和生育期有效降水量的增加,玉米产量呈上升趋势;在 RCP8.5 气候情景下,随着温度升高和生育期有效降水的减少,玉米产量呈下降趋势。气温上升幅度过大对玉米单产有明显的负面影响,降水与玉米用水效率呈正相关。为有效应对气候变化对旱作作物产量造成的负面影响,应采取减少温室气体排放量、增强土壤蓄水保墒能力、发展集雨补灌、筛选和培育节水抗旱新品种等措施。

关键词: 玉米; 用水效率; 产量; 气候变化; CERES - Maize 模型; 渭北旱塬

中图分类号: S162.5⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)08-0210-09

Trend Analysis of Water Use Efficiency and Yield of Dryland Maize under Climate Change

WANG Yubao^{1,2} CHAI Chengliang^{1,2} ZHANG Peng^{2,3} ZHAO Qi^{1,2} HE Jianqiang^{1,2} SUN Shikun^{1,2}
(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
 College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Rain-fed agriculture is highly susceptible to climatic conditions. Study on analyzing the trend of yield and water use efficiency of rain-fed maize under climate change conditions is useful for agricultural production planning, which can provide adaptation strategies to climate change for agricultural production. Two test sites of Heyang and Changwu in Weibei highland were set as the study area. Experiment data in maize field was used to evaluate the applicability of CERES – Maize. Finally, the meteorological data produced from regional climate model (RegCM4.0) was used to predict maize yield and its water footprint before 2050. Results showed that the CERES – Maize model could precisely simulate the rain-fed maize yield and phenology; the absolute relative error (ARE) of most samples was less than 10%; the CERES – Maize model had good applicability in the rain-fed agricultural area in Weibei highland. Using the CERES – Maize model to simulate the water footprint of maize production was more accurate and reliable than using traditional water footprint calculation method. Under the RCP2. 6 climate scenario, maize yield showed an increasing trend with increasing temperature and effective precipitation during the growing season; under the RCP8. 5 scenario, maize yield showed a declining trend with increasing temperature and decreasing effective precipitation during the growth period. The excessive temperature rise had an obvious negative effect on maize yield, and the precipitation was

收稿日期: 2018-01-15 修回日期: 2018-02-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400205、2016YFC0400201)、陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016TZC-N-14-1)、高等学校学科创新引智计划项目(B12007)和杨凌示范区科技计划项目(2015NY-16)

positively correlated with the water use efficiency of maize. In order to effectively deal with the negative impact of climate change on the rain-fed crop yields, measures should be adopted, such as reducing greenhouse gas emissions, enhancing soil water storage and preserving moisture capacity, developing rainwater catchment irrigation, and selecting and cultivating water-saving and drought-resistant varieties.

Key words: maize; water use efficiency; yield; climate change; CERES - Maize model; Weibei highland

0 引言

气候变化对未来农业用水效率和产量会造成重 要影响。与灌溉农业相比,旱作农业用水效率和产 量更易受到气候变化的影响[1]。将作物模型与气 候模式相结合,可有效预测气候变化对作物产量和 水分利用效率的影响[2]。农业技术推广决策支持 系统 DSSAT (Decision support system agrotechnology transfer)[3-5]作物系统模型是目前应 用较为广泛的作物模型,可逐日模拟20余种作物的 生长发育过程,定量各影响因子对产量和全生育期 蒸散量的影响[6]。DSSAT 中专门用于玉米生长模 拟的 CERES - Maize 模型[7],被广泛用于不同环境 条件下玉米遗传参数的确定[8]、不同播期及灌溉制 度对玉米产量的影响[9]以及玉米灌溉需水量的确 定[10]等诸多领域。部分学者将 CERES - Maize 模型 用于气候变化对玉米产量及水分利用效率影响的研 究,如利用大气环流模型(General circulation model, GCM)产生的数据和随机天气发生器产生的逐日气 象数据与作物模型相结合,研究华北平原和吉林省 等地玉米产量和水分利用效率对气候变化的响 应[11-12],但是 GCM 输出的数据空间分辨率较低。 也有学者采用作物模型和最新且具有高分辨率的 RCPs(Representative concentration pathways)系列气 候情景相链接,研究气候变化对东北玉米产量和潜 在适应性措施的影响,但未对灌溉玉米和旱作玉米 进行比较研究[13-14]。一系列将 RegCM (Regional climate model)区域气候模式和校正过的 CERES -Maize模型相链接的方法在玉米作物上得到验 证[15-17]。但是,运用 CERES - Maize 模型研究气候 变化条件下旱作玉米产量及其生产水足迹方面的研 究尚未见报道。

旱作农业的产量与用水效率密切相关。因此,合理评价旱作农业用水效率至关重要。旱作农业的作物用水全部依靠降水,降水利用率(有效降水量与总降水量的比值)和降水利用效率(作物单产与蒸发蒸腾量的比值)是评价旱作农业用水效率的两个传统指标。水足迹概念的提出为农业用水效率评价提供了新的工具。作物生产水足迹有效地综合了两个传统指标的意义,并简化了计算过程[18]。针对

利用 CERES - Maize 模型研究雨养玉米生产水足迹方面的不足,本研究以基于田间尺度作物生产水足迹的核算方法为基础,尝试利用 CERES - Maize 模型综合评价气候变化对旱作玉米产量和水分利用效率的影响。选择玉米为研究对象,以北方典型旱作区的陕西渭北旱塬为研究区域,通过多年的玉米田间试验数据评估 CERES - Maize 模型在渭北旱塬地区的适宜性,并利用区域气候模式 RegCM4.0 输出气象数据,分析渭北旱塬在 RCP2.6 和 RCP8.5 两种气候情景下玉米产量和水分利用效率的变化趋势,旨在为我国旱作农业生产布局规划,以及制定适应气候变化的农业生产策略提供支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

渭北旱塬位于陕西省关中平原区以北、陕北丘 陵沟壑区以南,是陕西省重要的粮食生产基地。区 域农业生产依赖天然降水,属于中国北方典型的旱 作农业区,种植方式为春玉米一年一熟制[19]。选取 位于旱塬东部的陕西省合阳县西北农林科技大学旱 作农业试验站(35°19′54.45″ N,110°05′58.35″ E,海 拔850 m),以及位于旱塬西部的长武县中国科学院 黄土高原农业生态试验站(35°14′N,107°41′E,海 拔 1 220 m) 2 个试验点进行研究。合阳和长武 2 个 站点均属暖温带半湿润易干旱型大陆性季风气候 区,多年平均气温分别为 10.5℃和 9.5℃,极端高温 分别为 40.1℃和 37.6℃,极端低温分别为 -21.2℃ 和 - 26.2℃;无霜期分别为190 d 和171 d;多年平均 降雨量分别为 543.35 mm 和 583.41 mm,常年降水 主要集中在7、8、9月,降雨年际间分布不均;多年平 均蒸发量分别为 1832.8 mm 和 1016.6 mm。2 个站 点土壤类型均为黑垆土,黄土母质疏松,属于中壤 土,土层厚,蓄水保肥能力强。

1.2 数据及来源

研究所需数据包括:田间管理数据、土壤数据和气象数据。田间管理数据包括初始土壤水,作物品种,播种方式、日期和密度,施肥品种、日期和施肥量,收获时期等,来自试验、调查数据和文献[18-19]。土壤剖面数据来源于《陕西农业土壤》^[20]和文献[19]。历史年份逐日气象数据,包括太阳辐

射、最高气温、最低气温、降雨量,其中太阳辐射根据逐日日照时数通过埃斯曲郎(Angstron)经验公式计算^[21],来自于中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn)。2017—2050年气候数据,来源于中国国家气候中心基于全球气候模式比较计划CMIP5(Coupled model intercomparison project phase 5)的数据产品,采用动力降尺度模型 RegCM4.0获取的分辨率为0.5°×0.5°的区域数据^[22],再通过薄盘样条曲线函数进行插值和2个站点经纬度获取站点水平的逐日气象数据。本研究选取辐射强迫最低和最高的 RCP2.6与 RCP8.5气候情景,分析未来最极端的2种气候情景。

1.3 作物模型遗传参数的率定

遗传参数是品种特性的反映,不同区域所种植的玉米品种特性和模型中供试品种参数不尽相同,因此在调试参数时,需要调整模型中遗传参数的阈值范围。CERES - Maize 模型中可供调试与生长有关的玉米品种特性参数有6个,即遗传参数:P1为幼苗期生长特性参数,指完成非感光幼苗大于8℃热量时间,一般取100~400℃·d;P2为光周期敏感系数,指光敏感期大于临界日长1h的光周期导致发育延迟的程度,通常取值0~4;P5为灌浆期特性参数,指吐丝至生理成熟期大于8℃的热量时间,取值为600~1000℃·d;G2为单株最大穗粒数,一般取值500~1000粒;G3为潜在灌浆速率参数,指最适灌浆条件下线性灌浆阶段的籽粒灌浆速率,一般取值5~12 mg/(粒·d);PHINT为出叶间隔特性参数,一般取值30~75℃·d^[23]。

本文采用 DSSAT 模型自带的 GLUE (Generalized likelihood uncertainty estimation)调参程 序包对玉米品种遗传特性进行参数标定[24],以出苗 期、开花期、成熟期和籽粒产量为相关输出变量,以 田间观测值和模型模拟值之间的绝对相对误差最小 为目标进行调参。模型参数验证均以模拟值和实测 值之间绝对相对误差(Absolute relative error, ARE)、 相对均方根误差(Normalized root mean suare error, NRMSE)、一致性指数 d(The index agreement) 及决 定系数 R^2 来评价,并通过比较模拟值和实测值之间 的差异,逐步调整模型品种和管理参数,使其尽可能 地表现出产量等作物性状的时空差异。ARE 与 NRMSE 越小, 表明模拟精度越高, ARE 和 NRMSE 为小于 10%、10% ~ 20%、20% ~ 30% 和大于等于 30%分别表示模拟结果非常好、较好、一般和较 1,说明模拟值和观测值之间的一致性越高[26]。

1.4 田间尺度作物生产水足迹

田间尺度作物生产水足迹(Water footprint of crop production)是指农田尺度生产单位质量的作物(一般指经济产量)所消耗的广义水资源量。按照水资源消耗的类型,作物生产水足迹可以分为绿水足迹(Green water footprint)和蓝水足迹(Blue water footprint)。本研究中无灌溉,且地下水位深达 10 m以上,因此也无地下水补给^[27],玉米生产全部依赖天然降水,即玉米生产蓝水足迹为零。玉米生产水足迹计算公式为

$$W_{F_{\text{maize}}} = W_{F_{\text{green}}}$$
 (1)

其中
$$W_{Fgreen} = C_{WUgreen}/Y = aE_{Tgreen}/Y$$
 (2)

$$E_{T_{\text{green}}} = \min(ET_c, P_e) \tag{3}$$

式中 W_{Fgreen} ——玉米生产绿水足迹, m^3/kg

 $C_{WU_{\text{green}}}$ ——玉米所消耗的绿水资源量, m^3/hm^2

Y——玉米单位面积产量, kg/hm^2

a——单位换算系数,将单位由水深(mm)转 化为单位面积水量(m³/hm²),取10

 $E_{T_{\text{green}}}$ ——玉米绿水蒸发蒸腾量,mm

ET。——玉米蒸发蒸腾量,由 CERES - Maize 模型求出,mm

 P_e ——玉米生育期有效降水量,mm

有效降水量根据美国农业部土壤保持局提出的方法计算^[28],根据玉米生育期对 $P_{e(dec)}$ 进行求和即可得到玉米整个生育期的有效降水量,刘帝等^[29]、史利洁等^[30]的研究表明,该方法在关中地区具有较好的适用性,其计算公式为

$$P_{e(dec)} = \begin{cases} \frac{P_{dec}(125 - 0.6P_{dec})}{125} & \left(P_{dec} \leq \frac{250}{3}\right) \\ \frac{125}{3} + 0.1P_{dec} & \left(P_{dec} > \frac{250}{3}\right) \end{cases}$$
(4)

式中 P_{dec} ——玉米生育期旬降水量,mm $P_{e(dec)}$ ——玉米生育期旬有效降水量,mm

2 结果与分析

2.1 CERES - Maize 模型验证

历史年份两个站点各处理的不同指标模拟值和实测值比较结果分别见表 1 和表 2,其中,BF 为平衡施肥,CF 为常规施肥,LF 为低肥,NF 为无肥。合阳站点在研究时段内每年有 3 种不同施肥水平,所有年份出苗期 ARE 值均在 0~12.50% 之间,均值为 5.50%;开花期的 ARE 值在 0~4.65% 之间,均值为 1.73%;成熟期 ARE 值在 0~4.4% 之间,平均值为 1.66%;开花期 ARE 值都在 5%以下;物侯期均值为 2.96%,表明模拟结果非常好。总体而言,CERES - Maize 模型对合阳站点玉米物候期的模

表 1 2008—2015 年合阳站点 CERES - Maize 模型模拟值与实测值对比

Tab. 1 Comparison of simulated values of CERES - Maize model with observed values in Heyang station during 2008—2015

		出苗期			开花期			成熟期			籽粒产量		
年度	处理	模拟	实测	ARE/	模拟	实测	ARE/	模拟	实测	ARE/	模拟值/	实测值/	ARE/
		值/d	值/d	%	值/d	值/d	%	值/d	值/d	%	$(kg \cdot hm^{-2})$	$(kg \cdot hm^{-2})$	%
	BF	9	9	0	93	92	1. 09	146	148	1. 35	12 545	11 702	7. 20
2008	\mathbf{CF}	9	8	12.50	93	93	0	146	145	0.69	9 986	8 978	11. 23
	NF	9	10	10.00	93	95	2. 11	146	150	2. 67	6 562	7 198	8.84
	BF	9	10	10.00	95	97	2. 06	153	152	0. 65	8 679	8 021	8. 20
2009	\mathbf{CF}	9	9	0	95	94	1.06	153	155	1. 29	6 361	5 650	12. 58
	LF	9	10	10.00	95	98	3.06	153	159	3.77	5 003	5 139	2.65
	BF	8	8	0	92	96	4. 16	147	153	3. 92	10 800	10 010	7. 89
2010	\mathbf{CF}	8	8	0	92	93	1.08	147	149	1.34	8 853	9 245	4. 24
	LF	8	9	11. 11	92	94	2. 13	147	150	2.00	7 672	8 615	10. 95
	BF	12	11	9. 09	88	90	2. 22	152	157	3. 18	8 512	8 709	2. 26
2011	\mathbf{CF}	12	12	0	88	87	1. 15	152	153	0.65	7 124	7 667	7. 08
	LF	12	11	9.09	88	89	1. 12	152	159	4.40	6 461	7 201	10. 28
	BF	10	10	0	90	89	1. 12	150	154	2. 60	8 371	7 521	11. 30
2012	\mathbf{CF}	10	10	0	90	87	3. 45	150	152	1.32	6 008	6 559	8.40
	LF	10	11	9.09	90	93	3. 23	150	156	3.85	6 150	6 309	2. 52
	BF	11	10	10.00	91	92	1. 09	145	146	0. 68	8 684	7 979	8. 84
2013	\mathbf{CF}	11	11	0	91	91	0	145	145	0	6 999	6 450	8.51
	LF	11	12	8.33	91	90	1.11	145	144	0.69	6 286	6 031	4. 23
	BF	9	8	12. 50	87	86	1. 16	150	153	1. 96	10 683	11 184	4. 48
2014	\mathbf{CF}	9	9	0	87	87	0	150	151	0.66	10 127	11 240	9. 90
	LF	9	9	0	87	86	1. 16	150	150	0	8 964	8 346	7.40
	BF	10	10	0	90	89	1. 12	145	144	0. 69	9 140	9 590	4. 69
2015	\mathbf{CF}	10	9	11. 11	90	88	2. 27	145	143	1.40	8 380	7 670	9. 26
	LF	10	11	9.09	90	86	4. 65	145	145	0	6 807	7 620	10.67
	均值			5. 50			1. 73			1. 66			7. 65

表 2 1998—2011 年长武站点 CERES - Maize 模型模拟值与实测值对比

Tab.2 Comparison of simulated values of CERES - Maize model with observed values in Changwu station during 1998—2011

年度	_ 处理	出苗期		开花期		成熟期			籽粒产量				
		上理 模拟 实测 值/d 值/d	实测	ARE/	RE/ 模拟	实测	ARE/	模拟	实测	ARE/	模拟值/	实测值/	ARE/
			%	值/d	值/d	%	值/d	值/d	%	(kg·hm -2)	(kg·hm -2)	%	
1998	CF	12	11	9. 09	97	97	0	149	149	0	8 219	8 050	2. 10
1999	\mathbf{CF}	13	12	8. 33	103	100	3.00	151	150	0.67	8 746	7 963	9. 83
2000	\mathbf{CF}	12	12	0	95	93	2. 15	146	145	0.69	7 501	6 791	10.46
2001	\mathbf{CF}	13	13	0	99	97	2.06	147	149	1.34	7 239	6 600	9. 68
2002	\mathbf{CF}	12	11	9. 09	105	103	1. 94	150	152	1.32	11 003	10 000	10.03
2003	\mathbf{CF}	13	12	8. 33	100	98	2. 04	163	161	1. 24	13 200	12 700	3. 94
2004	\mathbf{CF}	9	9	0	98	99	1.01	153	150	2.00	9 500	8 660	9. 70
2005	\mathbf{CF}	8	8	0	93	95	2. 11	147	145	1.38	7 840	7 342	6. 78
2007	\mathbf{CF}	12	13	7. 69	96	98	2. 04	155	152	1. 97	9 476	8 804	7. 63
2008	\mathbf{CF}	10	10	0	97	95	2. 11	147	146	0.68	8 005	7 128	12. 30
2010	\mathbf{CF}	10	11	9. 09	94	91	3. 30	148	146	1. 37	12 391	12 945	4. 28
2011	\mathbf{CF}	12	11	9. 09	98	97	1.03	142	140	1.43	10 431	11 922	12. 51
	均值			5. 06			1. 90			1. 17			8. 27

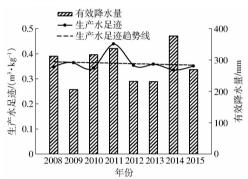
拟结果较好。长武站点各年份玉米出苗期的 ARE 值均在 0~10% 之间,其中 41.67% 的年份模拟值与 实测值完全一致,对开花期和成熟期的模拟 ARE 值

均在 4% 以内,物侯期均值为 2.71%,表明该站点用 CERES - Maize 模型对玉米物候期的模拟结果非常好。

合阳站点所有年份不同处理籽粒产量模拟值与实测值之间的 ARE 均值为 7.65%,其中 75%的处理产量 ARE 值在 10%以下,25%的处理产量 ARE 值介于 10%~20%之间。产量模拟值和观测值之间的 RMSE 及 NRMSE 分别为 670.53 kg/hm²和8.27%,从 ARE 值来看,对产量的模拟相对于物候期稍差,但总体上模拟结果仍非常好。决定系数 R²和一致性指标 d 分别为 0.86 和 0.96,也说明模拟值与观测值的一致性非常好。长武站点各年份玉米产量模拟值与田间实测值之间的 ARE 值均在 13%以内,RMSE 和 NRMSE 分别为 791.33 kg/hm²和8.72%,决定系数 R²和一致性指标 d 分别为 0.91和 0.96,都很接近 1,说明产量模拟值与观测值之间有很好的一致性。

2.2 玉米生产水足迹与产量变化过程分析

如图 1 所示,合阳站点 2008—2015 年玉米生产



水足迹呈波动下降趋势,但下降幅度不大;产量呈波 动增加趋势,但增加幅度较小。如图2所示,长武站 点 1998-2011 年(缺测 2006 年和 2009 年) 玉米生 产水足迹下降趋势较为明显,产量随着时间的推移 增加趋势较为显著。玉米生产水足迹是由玉米生产 过程中的水资源消耗量和玉米单产共同决定,分析 发现,合阳站点玉米生产水足迹与对应年份的有效 降水量变化趋势相反,生育期有效降水量高的年份 对应的玉米生产水足迹较低。特殊年份是2011年, 该年份玉米生产水足迹与有效降水量均较高,其原 因是玉米播种前期土壤蓄水量较少,影响了玉米生 长发育过程,造成玉米产量的下降。长武站点玉米 生产水足迹与对应年份有效降水量的变化规律与合 阳站点相似。特殊年份是1998年,该年份玉米生育 期有效降水量很高,但由于渍涝灾害的原因,单产较 低,导致该年份玉米生产水足迹也很高。

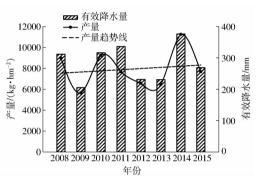


图 1 2008—2015 年合阳站点玉米生产水足迹、生育期有效降水量和产量变化趋势

Fig. 1 Water footprint of maize production, effective precipitation and maize production in Heyang station from 2008 to 2015

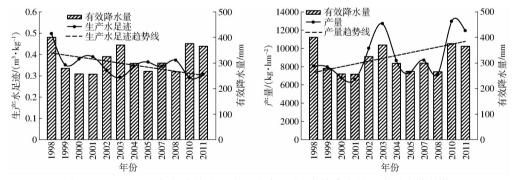


图 2 1998—2011 年长武站点玉米生产水足迹、有效降水量和产量变化趋势

Fig. 2 Water footprint of maize production, effective precipitation and maize production in Changwu station from 1998 to 2011

2.3 2017—2050 年玉米生产水足迹与产量预测

如图 3 所示,在 RCP2.6 和 RCP8.5 两种气候情景下,合阳站点 2017—2050 年玉米生产水足迹均值均为 0.37 m^3/kg ,产量均值分别为 8 896.38 $\mathrm{kg/hm}^2$ 和 9 250.53 $\mathrm{kg/hm}^2$,玉米生产水足迹的 M $-\mathrm{K}$ (Mann $-\mathrm{Kendall}$)趋势检验值分别为 $-\mathrm{0.14}$ 和 $-\mathrm{0.43}$,产量的 M $-\mathrm{K}$ 检验值分别为 0.27 和 $-\mathrm{0.43}$;其中, RCP2.6 气候情景下产量呈上升趋势,由于玉米生育期有效降水的增加幅度小于产量增加幅度,使玉

米生产水足迹也呈下降趋势;而 RCP8.5 情景下虽然玉米的产量有不显著下降趋势,但因玉米用水效率较高,玉米生产水足迹呈下降趋势。如图 4 所示,长武站点 RCP2.6 和 RCP8.5 两种气候情景下,玉米生产水足迹均值分别为 0.39 m³/kg 和 0.38 m³/kg,产量均值分别为 8 528.91 kg/hm² 和 8 771.03 kg/hm²;两种气候情景下该站点玉米生产水足迹的 M - K 趋势检验值分别为 - 2.77 和 - 0.43,产量的 M - K 检验值分别为 0.28 和 - 0.43;因 RCP2.6 情景下玉米

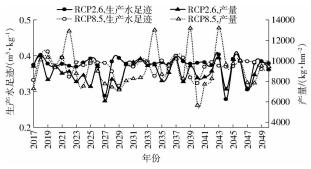


图 3 2017—2050 年合阳站点玉米生产水足迹变化 趋势和产量预测

Fig. 3 Changing trend of water footprint of maize production and maize production in Heyang station from 2017 to 2050

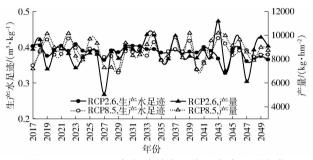


图 4 2017—2050 年长武站点玉米生产水足迹变化 趋势和产量预测

Fig. 4 Changing trend of water footprint of maize production and maize production in Changwu station from 2017 to 2050

水分利用效率较高,玉米生产水足迹呈极显著下降 趋势,产量呈上升趋势;由于有效降水量下降幅度大 于产量下降幅度,从而出现在 RCP8.5 情景下玉米 生产水足迹及其产量同时呈下降的特征。

3 讨论

3.1 CERES - Maize 模型计算玉米生产水足迹的 适宜性

本研究以田间尺度作物生产水足迹的核算方法 为基础,利用 CERES - Maize 模型模拟玉米产量和 实际蒸发蒸腾量,进而获得玉米生产水足迹。玉米 实际蒸发蒸腾量主要基于精度较高的内嵌于模型中 的 Priestley - Taylor 公式计算获得。本文研究结果 表明, CERES - Maize 模型对渭北旱塬旱作玉米产量 具有很好的模拟效果;利用该模型模拟玉米产量在 国内外其他地区也都得到了广泛验证[11,31]。因此, CERES - Maize 适于计算玉米生产水足迹。与计算 旱作和灌溉综合条件下结果相比(表3),本研究计 算的旱作玉米生产水足迹结果明显较小,表明旱作 农业用水效率较高,即尽管灌溉提高了农业单产,用 水效率却下降了。与刘帝等[29]采用的灌区水量平 衡法相比,以及与史利洁等[30]采用的以地市为单元 和张蕾[32]以省级行政区为单元的计算方法相比,本 研究利用作物模型和田间试验相结合的方式,通过 多年玉米田间试验数据对模型进行调参和验证 后,模型模拟计算的玉米生产水足迹数据更精确、 可靠。

表 3 不同学者研究结果比较

Tab. 3 Comparison with other researches

作者	研究范围	研究时段	玉米生产水足迹/(m³·kg-1)	来源	
	叶 玉 A 四	2008—2015 年	0. 36	本文	
	陕西合阳	2017—2050 年	0.37	本文	
本研究	Mb TE IX ab	1998—2011年(缺2006、2009年)	0.35	本文	
	陕西长武	2017—2050 年	0. 39	本文	
史利洁等	陕西省	2000—2012 年	0. 83	文献[30]	
刘帝等	陕西关中地区	1998、2005、2010 年	0.77	文献[29]	
张蕾	陕西省	1996—2006 年	1.18	文献[32]	

3.2 不同气候情景下气温对玉米产量和用水效率 的影响

以气候变暖为主要特征的全球气候变化是各界学者的共识。渭北旱塬是受气候影响敏感地区之一^[22]。本研究发现(表 4),合阳和长武两个站点的最高温度和最低温度在两种气候情景下随时间的推移都呈上升趋势,其中,RCP8.5情景下两站点温度M-K趋势检验值明显大于RCP2.6情景。两站点RCP8.5情景下最低温度上升趋势均达到显著水平(P<0.05)。由于RCP8.5气候情景下温度升高幅度较大,引起玉米生育期的缩短^[33],导致玉米光合

作用时间的缩短,净光合产物和玉米干物质积累的下降,促使两站点玉米产量均呈下降趋势。气温上升幅度过大对玉米单产有明显的负面影响,这与KANG等^[34]的研究一致。应减少温室气体排放、提高作物用水效率等措施来降低气候变化对作物生产造成的负面影响。此外,因玉米生育期缩短引起的玉米蒸发蒸腾量下降幅度小于产量下降幅度,导致气候变暖对玉米水分利用效率有正面影响^[11],渭北旱塬玉米水分利用效率在 2050 年前随温度的升高呈上升趋势。

3.3 未来气候条件下玉米产量和有效降水量的关系

无灌溉条件下,生育期有效降水量决定玉米产

表 4 2017—2050 年合阳站点和长武站点气温、 玉米产量、蒸发蒸腾量和水分利用效率 M-K 趋势检验值

Tab. 4 Values of M – K trend test of temperature, maize production, ET_c and WUE of Heyang and Changwu stations from 2017 to 2050

站点	气候	最高	最低	蒸发	玉米	水分利用
珀只	情景	温度	温度	蒸腾量	产量	效率
A 1711	RCP2. 6	1. 39	0. 83	-0.03	0. 22	0. 37
合阳	RCP8. 5	2.58	3.65	-0.43	- 0. 43	0.76
14 -b	RCP2. 6	1.51	1. 39	- 0. 05	0. 28	3. 92
长武	RCP8. 5	2.49	3. 20	-0.40	- 0. 43	3. 42

量的上限^[35]。本研究模型模拟结果表明,两站点RCP2.6和RCP8.5两种气候情景下,生育期有效降水量越多的年份玉米产量越高(图5、6)。有相关学者运用CERES-Mazie模型模拟了降水对玉米产量的影响,结果表明降水量与玉米产量呈显著的中度正相关,相关系数为0.75^[36]。因此,提高降水利用率和利用效率,可进一步提高旱作玉米产量。

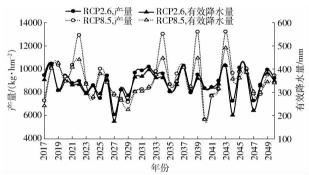


图 5 2017—2050 年合阳站点玉米产量和有效降水量 变化趋势

Fig. 5 Maize production and effective precipitation in Heyang station from 2017 to 2050

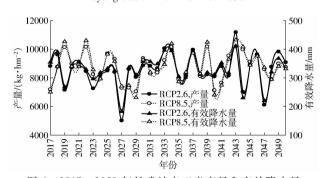


图 6 2017—2050 年长武站点玉米产量和有效降水量 变化趋势

Fig. 6 Maize production and effective precipitation in Changwu station from 2017 to 2050

3.4 不同气候情景下玉米生产水足迹和产量的比较

旱作玉米生产水足迹由玉米生产过程中绿水消耗量和单产共同决定。通过对比两种气候情景下玉米生产水足迹和产量之间的差异可以发现(图 3、4),

两站点 RCP8.5 情景下 2050 年前玉米产量均值高于 RCP2.6 情景。合阳站点 RCP8.5 情景下玉米生育期有效降水量波动幅度较大,导致玉米产量的波动幅度也较大,在产量和生育期有效降水共同作用下,RCP8.5 情景下玉米生产水足迹波动幅度较小。长武站点 RCP2.6 情景下玉米蒸发蒸腾量波动幅度较大,造成玉米产量波动幅度也较大,在产量和蒸发蒸腾量共同作用下,RCP2.6 情景下玉米生产水足迹波动幅度大于 RCP8.5 情景。为减弱较小的有效降水和较大的蒸发蒸腾量对产量造成的负面影响,可以采取保护性耕作措施,改良土壤结构,增强蓄水保水能力;发展雨水集蓄,在旱灾和玉米需水临界期进行补充灌溉;筛选和培育节水抗旱品种。

4 结论

- (1)建立了利用 CERES Maize 模型模拟作物 生产水足迹的方法。以田间尺度作物生产水足迹的 核算方法为基础,利用 CERES - Maize 模型模拟玉 米产量和实际蒸发蒸腾量,进而获得玉米生产水足 迹。利用作物模型和田间试验相结合的方式,通过 多年玉米田间试验数据对模型进行调参和验证,模 型模拟计算的玉米生产水足迹数据更为精确、可靠。
- (2) CERES Maize 模型模拟旱作玉米产量效果好。通过多年田间定位试验数据对 CERES Maize 模型遗传参数的校准和验证,能很好地模拟旱作玉米的生长发育和产量形成过程,其中,物候期总体模拟绝对相对误差(ARE)均值为 2.84%(合阳站点为 2.96%、长武站点为 2.71%),产量模拟值和实测值之间的决定系数(R²)均值为 0.89(合阳站点为 0.86、长武站点为 0.91)。
- (3)不同气候情景下旱作玉米产量存在较大差异,用水效率基本相同。两站点 RCP8.5 情景下2050 年前玉米产量均值较 RCP2.6 情景高298.13 kg/hm²。但 RCP2.6 情景下随着温度的升高和生育期有效降水量的增加,玉米产量呈上升趋势; RCP8.5 情景下随着温度的上升和生育期有效降水量的减少,玉米产量呈下降趋势。两种气候情景下玉米生产水足迹基本相同,2050 年前均呈下降趋势。
- (4)气温上升幅度过大对玉米单产有明显的负面影响,有效降水量与玉米单产呈正相关。RCP8.5 气候情景下温度升高幅度较大,使得玉米生育期缩短,导致玉米光合作用时间的缩短、净光合产物和玉米干物质积累的下降,促使两站点玉米产量均呈下降趋势。提高降水利用率和利用效率,可进一步提高旱作玉米产量。
 - (5)玉米生产水足迹对气温敏感性较低,有效

降水量与玉米生产水足迹呈负相关。由于适当的气温升高对玉米蒸发蒸腾量和产量均具有一定的促进作用,而二者的比值是玉米生产水足迹,因此生产水足迹对气温敏感性较低。继续增加玉米有效降水量,仍可以提高降水利用效率,这表明有效降水量仍未达到玉米用水效率最高时所需的水量,因此,采取有效措施,增加玉米生长过程中的水分供应,可大幅提高玉米单产。

(6)为有效应对气候变化对旱作作物产量造成的负面影响,应进一步提高资源利用效率,发展循环农业,减少温室气体排放量,防止气温的过快升高;采取保护性耕作措施,改善土壤结构,增强土壤蓄水保墒效果;采取农田微集雨措施和适宜的农艺节水模式,发展集雨补灌,筛选和培育节水抗旱新品种,提高降水利用率和利用效率;做好干旱等自然灾害的预警和应对工作,降低灾害对玉米产量的影响。

参考文献

- 1 LIU Y, LI S Q, CHEN F, et al. Soil water dynamics and water use efficiency in spring maize (Zea mays L.) fields subjected to different water management practices on the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5):769-775.
- 2 熊伟. 未来气候变化情景下中国主要粮食作物生产模拟 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.

 XIONG Wei. Simulated study on impacts of climate change on the potential yield of rice [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 3 任新茂, 孙东宝, 王庆锁. 覆膜和种植密度对旱作春玉米产量和蒸散量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 206-211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170127&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 01.027.
 - REN Xinmao, SUN Dongbao, WANG Qingsuo. Effects of plastic film mulching and plant density on yield and evapotranspiration of rainfed spring maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 206 211. (in Chinese)
- 4 宋明丹, 冯浩, 李正鹏,等. 基于 Morris 和 EFAST 的 CERES Wheat 模型敏感性分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10):124-131. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141020&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.020.
 - SONG Mingdan, FENG Hao, LI Zhengpeng, et al. Global sensitivity analyses of DSSAT-CERES-Wheat model using Morris and EFAST methods [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45 (10): 124 131. (in Chinese)
- 5 张忠学, 张世伟, 郭丹丹,等. 玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 206-214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170926&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.026.
 - ZHANG Zhongxue, ZHANG Shiwei, GUO Dandan, et al. Coupling effects of different water and fertilizer conditions and optimization of water and fertilizer schemes on maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 206 214. (in Chinese)
- 6 JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3-4):235-265.
- 7 JONES C A, KINIRY J R, DYKE P. CERES Maize: a simulation model of maize growth and development [M]. Texas: Texas A and M University Press, 1986.
- 8 范铭丰, 武伟, 刘洪斌. 基于 CERES Maize 模型的玉米遗传参数优化及验证 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6):3087 3089. FAN Mingfeng WU Wei, LIU Hongbin. Optimization and validation of genetic parameters of maize based on CERES Maize model [J]. Journal of Anhui Agiculture Science, 2010, 38(6): 3087 3089. (in Chinese)
- 9 戴明宏, 赵久然, CLAUPEIN W, 等. 基于 CERES Maize 模型春玉米水分优化管理决策 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(1):187-192.
 - DAI Minghong, ZHAO Jiuran, CLAUPEIN W, et al. Decision for optimized water management based on CERES Maize crop model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 187-192. (in Chinese)
- 10 YANG Y M, YANG Y H, MOIWO J P, et al. Estimation of irrigation requirement for sustainable water resources reallocation in North China [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(11):1711-1721.
- 11 GUO R P, LIN Z H, MO X G, et al. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8):1185-1194.
- WANG M, LIYP, YEW, et al. Effects of climate change on maize production, and potential adaptation measures: a case study in Jilin Province, China [J]. Climate Research, 2011, 46(46):223-246.
- 13 LIN Y M, WU W X, GE Q S. CERES Maize model-based simulation of climate change impacts on maize yields and potential adaptive measures in Heilongjiang Province, China [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(14):2838 2849.
- 14 孟凡超. 气候变化对东北玉米生长和产量影响的观测与模拟 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2015. MENG Fanchao. Observation and simulation study on maize growth and yield under climate change in northeast China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2015. (in Chinese)

- 15 崔巧娟. 未来气候变化对中国玉米生产的影响评估 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005. CUI Qiaojuan. The Evaluation on the affection of the future climate change on the maize production in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 16 袁静, 许吟隆. 区域气候模式与作物模型嵌套模拟能力的验证 [C] // 中国气象学 2007 年年会论文集.
- 17 STEVENS T, MADANI K. Future climate impacts on maize farming and food security in Malawi [J]. Scientific Reports, 2016, 6:36241.
- [J]. 水利学报, 2017, 48(6):651-660. WU Pute, SUN Shikun, WANG Yubao, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6):651-660. (in Chinese)
- 19 王淑兰, 王浩, 李娟,等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(5):1530-1540.

 WANG Shulan, WANG Hao, LI Juan, et al. Effects of long-term straw mulching on soil organic carbon, nitrogen and moisture and spring maize yield on rain-fed croplands under different patterns of soil tillage practice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1530-1540. (in Chinese)
- 20 陕西省农业勘察设计院. 陕西农业土壤 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982.
- 21 ANGSTROM A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1924, 50(210):121-126.
- 22 GAO X R, ZHAO Q, ZHAO X N, et al. Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050 [J]. Science of the Total Environment, 2017, 595;191 200.
- 23 宋利兵. 基于 CERES Maize 模型的夏玉米动态水分生产函数研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. SONG Libing. Development of crop water production function for summer maize based on CERES Maize model [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- HE J Q, JONES J W, GRAHAM W D, et al. Influence of likelihood function choice for estimating crop model parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method [J]. Agricultural Systems, 2010, 103(5):256-264.
- JAMIESON P D, PORTER J R, WILSON D R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand [J]. Field Crops Research, 1991, 27(4):337-350.
- YANG J, GREENWOOD D J, ROWELL D L, et al. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N_ABLE [J]. Agricultural Systems, 2000, 64(1):37 53.
- 27 刘廷. 不同地表覆盖条件下的土壤水热状况对渭北旱塬冬小麦生产和土壤肥力的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. LIU Ting. Effect of soil hydro-thermal conditions under different soil surface mulching on winter wheat production and soil fertility in Weibei Highland [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- 28 DOLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements [J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): 1037 1048.
- 29 刘帝,操信春,王玉宝. 基于田间实际耗水的作物生产水足迹 [J]. 排灌机械工程学报,2014,32(8):719-724. LIU Di, CAO Xinchun, WANG Yubao. Water footprint of grain production based on crop water consumption [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(8):719-724. (in Chinese)
- 30 史利洁, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 650-658.
 - SHI Lijie, WU Pute, WANG Yubao, et al. Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5):650-658. (in Chinese)
- ARAYA A, HOOGENBOOM G, LUEDELING E, et al. Assessment of maize growth and yield using crop models under present and future climate in southwestern Ethiopia [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2015, 214 215:252 265.
- 32 张蕾. 中国虚拟水和水足迹区域差异研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2009. ZHANG Lei. Study on the regional differences of the efficiency of the virtual water and water footprint in China [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2009. (in Chinese)
- 33 UNSWORTH M H, HOGSETT W E. Combined effects of changing CO₂, temperature, UV B radiation and O₃ on crop growth [J]. Analytica Chimica Acta, 1992, 264(2):275 282.
- KANG Y H , MA X Y , KHAN S. Predicting climate change impacts on maize crop productivity and water use efficiency in the loess plateau [J]. Irrigation & Drainage, 2014, 63(3):394-404.
- 35 赵锦,杨晓光,刘志娟,等.全球气候变暖对中国种植制度的可能影响 X.气候变化对东北三省春玉米气候适宜性的影响 [J].中国农业科学, 2014(16):3143-3156.
 - ZHAO Jin, YANG Xiaoguang, LIU Zhijuan, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China X. The possible impacts of climate change on climatic suitability of spring maize in the three provinces of northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(16): 3143-3156. (in Chinese)
- 36 侯艳林,姜文来. 气候变化背景下主要气象要素对作物单产影响的模拟研究——以吉林公主岭玉米为例 [J]. 中国农业资源与区划,2014,35(6):58-64.
 HOU Yanlin, JIANG Wenlai. Simulating effects of climatic variables on maize yield under climate change—a case study of

Gongzhuling in Jilin province, China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2014, 35(6): 58 -

64. (in Chinese)