

基于 AquaCrop 模型的气候变化对陕西省 冬小麦产量影响模拟分析

周英霞¹, 王全九^{1,2}, 张继红¹, 谭帅¹, 何斌¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过分析陕西省 3 个地区(延安、长武及安康)1957—2013 年气温和降水等气象因子的变化,运用 AquaCrop 模型模拟分析了在现状降雨条件下,气温及 CO₂ 浓度等气象因子变化对陕西省冬小麦产量的影响。结果表明:气温升高 0.1℃,长武及安康分别减产 0.3%和 0.7%,延安增产 0.5%;延安和安康 CO₂ 浓度增加 20 μmol/mol,两地分别增产 3.6%和 4.2%,长武 CO₂ 浓度增加 10 μmol/mol,增产 2.2%;气温和 CO₂ 浓度同时变化(即气温升高 0.1℃同时延安和安康 CO₂ 浓度增加 20 μmol/mol,长武增加 10 μmol/mol),延安、长武和安康分别增产 4.0%、2.0%、3.6%。在仅考虑气温及 CO₂ 浓度变化的情况下,与 2012 年相比未来 18 年 3 种典型年(枯水年、平水年和丰水年)下,3 个地区因区域而表现不同,延安冬小麦增产 3.3%~10.3%,长武增产 2.3%~10.0%及安康增产 1.8%~9.8%。可见,气温与 CO₂ 浓度增加,陕西省“暖干+高碳型”或“暖湿+高碳型”气候有利于冬小麦产量的提高,延安>长武>安康,即可在陕北地区适度增加冬小麦种植面积,提高农业产量。

关键词: 气温; CO₂ 浓度; AquaCrop 模型; 冬小麦产量

中图分类号: S512.1; P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0357-08

Simulation Analysis of the Impact of Climate Change on the Yield of Winter Wheat in Shaanxi Province Based on the AquaCrop Model

ZHOU Yingxia¹, WANG Quanjiu^{1,2}, ZHANG Jihong¹, TAN Shuai¹, HE Bin¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of

Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Analysis of change in meteorological factors like temperature and precipitation during 1957—2013, the effects of temperature and CO₂ concentration on winter wheat yield were simulated by AquaCrop model under current rainfall condition in three regions (Yan'an, Changwu and Ankang) of Shaanxi Province. The results showed that the annual temperature increased by 0.1℃, the winter wheat yield in Changwu and Ankang were reduced by 0.3% and 0.7%, respectively, while it increased by 0.5% in Yan'an, when annual CO₂ concentration increased by 20 μmol/mol in Yan'an and Ankang, the winter wheat yield increased by 3.6% and 4.2%, respectively, the annual CO₂ concentration in Changwu increased by 10 μmol/mol, the yield increased by 2.2%; when the annual temperature and CO₂ concentration rose simultaneously, i. e., temperature rose by 0.1℃, CO₂ concentration of increased by 20 μmol/mol in Yan'an and Ankang, increased by 10 μmol/mol in Changwu, the winter wheat yield increased by 4.0%, 2.0% and 3.6% in Yan'an, Changwu and Ankang, respectively. Only considering the variation of temperature and CO₂ concentration, the winter white yield had different preferences because of the variation of regions. Under three typical years (i. e., dry, normal and wet year), the winter wheat yield may be increased by 3.3%~10.3% in Yan'an, 2.3%~10.0% in Changwu and 1.8%~9.8% in Ankang in the next 18 years compared to that in 2012. Therefore,

收稿日期: 2017-12-27

修回日期: 2018-01-09

资助项目: 陕西水利科技计划项目“陕西省农业干旱风险评估与区划”(2014-1010)

第一作者: 周英霞(1995—), 女, 青海海东人, 在读硕士研究生, 研究方向为农业水土资源与生态环境。E-mail: 193208448@qq.com

通信作者: 王全九(1964—), 男, 教授, 内蒙古丰镇人, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: wquanjiu@163.com

the increases of temperature and CO₂ concentration, the warm-dry and high-carbon as well as the warm-wet and high-carbon climate patterns were conducive to increasing of the winter wheat yield. The increasing rate decreased in the order: Yan'an > Changwu > Ankang, which indicated that it would be possible to increase the winter wheat planting area moderately in order to increase agricultural output in the northern Shaanxi.

Keywords: temperature; CO₂ concentration; AquaCrop model; winter wheat yield

全球气候不断变暖,农业作为受气候变化和气象因素最为敏感的领域之一^[1-2],在粮食生产和安全方面将会面临比以前更为严峻的问题^[3-5]。气候变化对农业生产的影响主要体现在作物产量波动、农业种植结构和布局改变及作物生长发育变化等方面^[6-7]。近年来,学者们就典型气候变化对小麦生产的影响开展了众多研究,包括模拟模型与气候模式相结合、气候模式 PRECIS 输出的未来气候与基准气候条件结合及农田开放式试验平台^[8-10]等。房世波等^[11]研究表明,CO₂ 浓度升高作物产量提高,品质将下降,但研究也存在不确定性,C₃ 与 C₄ 作物光合途径不一致存在短期和长期效应。Shu 等^[12]研究了在雨养和灌溉条件下 CO₂ 浓度对小麦生物量的影响,发现 CO₂ 浓度升高雨养小麦的生物量较高。但是,也有研究表明温度升高会降低甚至抵消了 CO₂ 浓度增加对小麦生物量的正效应^[13]。杨轩等^[14]将大田试验与农业生产系统模拟模型结合研究结果显示,玉米的产量随气温升高先增加后降低,而冬小麦产量随气温升高而降低。杨建莹等^[15]利用“多元逐步回归分析+残差插值”方法分析发现年平均气温增加抽穗期推迟,积温增加成熟期推迟。景毅刚等^[16]研究结果表明陕西冬小麦播种期温度升高,陕北南部及关中越冬起始日期退后,返青期提前。鲁清林等^[17]通过对冬小麦北移后灌浆期籽粒的特性研究结果显示,整个籽粒灌浆持续时间缩短,最大粒重和实际千粒重提高。小麦的生长不仅受其品质的影响,同时也受到气候因子的影响,其中气温和 CO₂ 浓度为影响冬小麦各个生育期阶段、产量品质及种植区域的驱动因子。因此,加强气候因子气温和 CO₂ 浓度对冬小麦产量的影响研究对冬小麦种植区域和环境的适应性具有重要意义。

冬小麦作为陕西主要粮食作物之一,对于气温和 CO₂ 浓度对冬小麦最终产量的影响仍需研究,本文通过分析陕西省(延安、长武和安康)1957—2013 年气温、降水、生育期有效积温和 ET₀ 等因子变化,采用 AquaCrop 模型模拟分析气温、CO₂ 浓度及两者共同作用下对冬小麦产量的影响,同时,通过 3 种不同典型年模拟预测未来气候变化条件下冬小麦产量的变化,为该地区农业生产供一定的理论指导和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省位于东经 105°29′—105°51′,北纬 31°42′—39°35′。总面积 20.56 万 km²,占全国总土地面积的 2.145%。整个区域由北向南,自西向东 10 个辖市及 1 个示范区,以秦岭、北山为边界形成三大地区。平均温度分布基本上是由南向北逐渐降低,其中陕北为 7~11℃;关中为 11~13℃;陕南为全省最暖地区,在 14~15℃。年降水量南多北少,由南向北递减,陕北年降水量为 400~600 mm,关中为 500~700 mm,陕南为 700~900 mm。冬小麦作为陕西省主要细粮作物,2014 年全省小麦种植面积为 1.09×10⁶ hm²,小麦产量 3.90×10⁶ kg,单产为 3 560 kg/hm²,小麦播种面积与 1978 年相比减少 0.51×10⁶ hm²,但单产约增加 2 000 kg/hm²^[18]。除长城沿线可种植春小麦,其他地区均种植冬小麦,主要集中在关中渭北,占全省小麦的 83.6%,陕南占 15%,而陕北仅占 1%。

1.2 AquaCrop 模型基本原理

AquaCrop 模型由气象、作物、田间管理和土壤 4 个模块组成,将土壤—作物—大气作为一个连续系统,以日土壤水分平衡为机理模拟在水分供应发生变化对作物产量和生物量的影响,利用水分生产效率将作物蒸腾量转化为生物量,进而通过生物量与收获指数反映作物最终产量^[19]。其计算原理如图 1 所示。

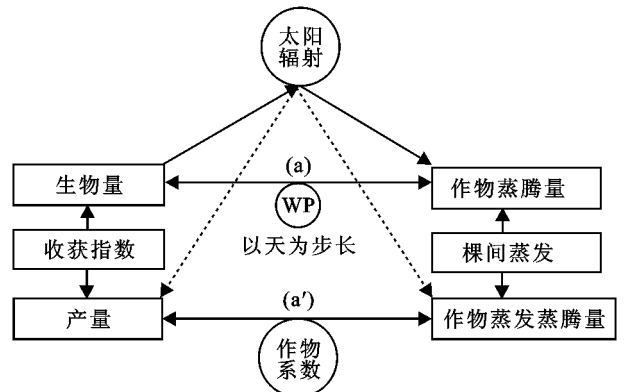


图 1 AquaCrop 模型的计算流程

生物量和产量计算公式为:

$$Y = B \cdot HI \quad (1)$$

$$B = WP \cdot \sum T_r \quad (2)$$

式中: Y 为最终作物产量(t/hm^2); B 为生物量(t/hm^2); HI 为收获指数(%); WP 为生物量水分生产效率 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})]$; T_r 为作物蒸腾量(mm)。

1.3 资料来源和计算方法

利用陕西省农业气象试验站提供的各地区冬小麦作物生育期内逐日最高(最低)气温、降水量、相对湿度、2 m 处风速和日照时数等气象资料。参照《陕西土壤》^[20] 中土壤相关参数确定陕西省 3 个地区土壤类型、质地及土壤其他物理特征值。冬小麦实测产量数据通过查阅《陕西统计年鉴》^[18] 得到。作物灌溉日期、灌水量等参考《陕西省作物需水量及分区灌溉模式》^[21]。AquaCrop 模型模拟所需参考作物蒸发蒸腾量由模型附带 ET_0 计算软件求得。 CO_2 浓度采用 AquaCrop 模型中默认数据 A1B 。 CO_2 。由于研究区地下水位较深,因此不考虑地下水对作物的影响。运用 AquaCrop 模型模拟分析气候变化对陕西省冬小麦产量的影响。

采用线性回归方程拟合分析陕西省 1957—2013 年气温和降水变化特征,依据此变化模拟分析 2003—2012 年气温和 CO_2 浓度变化前后冬小麦产量,

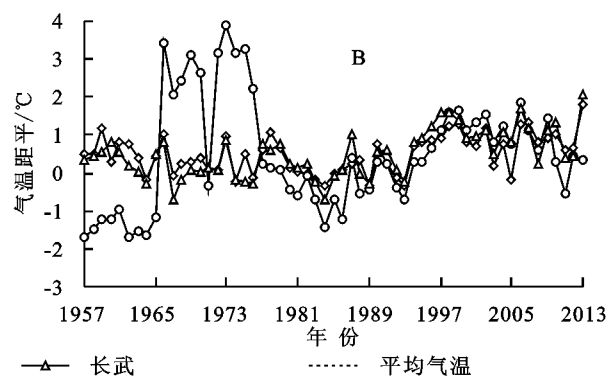
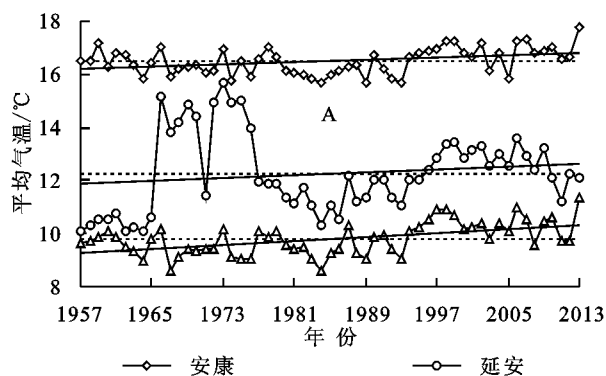


图2 陕西省年际平均气温和气温距平

根据世界气象组织对天气、气候异常,提出的两个定量判断标准,将正距平大于或等于两个标准差为异常暖,大于或等于一个标准差划分为暖年;负距平小于或等于两个标准差为异常冷,小于或等于一个标准差划分为冷年^[22-24]。研究区域延安相应异常暖年为 1973 年,暖年为 1966—1975 年(除 1971 年);无异常冷年;冷年为 1962 年、1984 年。长武相应异常暖年为 2013 年,暖年为 1996—1999 年、2006 年、2010 年;异常冷年为 1967 年、1984 年,冷年为 1964 年、1968 年、1974—1976 年、1989 年、1993 年。安康异常暖年为 2013 年,暖年为 1959 年、1998 年、1999 年、2002 年、2006 年、2007 年;无异常冷年,冷年为 1964 年、1974 年、1989 年、1993 年。

2.1.2 年际平均降水量变化 通过统计延安、长武及安康 57 a 降水资料,运用线性回归分析 3 个地

得出两个典型气象因子对冬小麦产量的影响,通过 57 a 气象资料用 P-III 型频率曲线确定 3 种典型年,分析 3 种典型年下未来 18 a 陕西省冬小麦产量变化趋势。

2 结果与分析

2.1 陕西省气候要素变化分析

2.1.1 年际平均气温变化 通过统计分析陕西省 3 个地区延安、长武及安康 1957—2013 年最低、最高气温,得到 3 个地区平均气温呈上升趋势,年际平均气温为 12.26,9.80,16.50 $^{\circ}\text{C}$,增幅分别为 0.10,0.19,0.10 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图 2A)。3 个地区气温分别在 1965—1977 年(除 1971 年)、1993—1999 年和 1994—1999 年增温较明显,57 a 内 3 个地区相对而言,延安气温波幅较大。延安 20 世纪 60 年代、70 年代、80 年代及 90 年代平均气温距平分别为 -0.22,1.34,-1.08,0.35 $^{\circ}\text{C}$,长武相应平均气温距平分别为 -0.32,-0.25,-0.45,0.35 $^{\circ}\text{C}$,安康相应平均气温距平分别为 -0.10,-0.09,-0.49,0 $^{\circ}\text{C}$,3 个地区进入 90 年代以后气温距平为正值(图 2B)。

区降水量变化趋势(图 3A),1957—2013 年 3 个地区安康与长武降水量呈上升趋势,上升速率分别为 15.32,9.10 mm/10 a,而延安呈下降趋势,下降速率为 2.01 mm/10 a,延安、长武及安康年际平均降雨量为 524.91,549.23,803.00 mm。采用降水距平百分率(D_p)旱等级划分标准,无旱: $D_p > -15$;轻旱: $-30 < D_p \leq -15$;中旱: $-40 < D_p \leq -30$;重旱: $-45 < D_p \leq -40$;特旱: $D_p \leq -45$ ^[25]。由图 3B 分析得,57 a 中延安地区干旱发生 16 a,发生频率为 28.1%,其中,10 次轻旱,频率为 17.5%;6 次中旱,频率为 10.5%。长武与安康地区均有 15 a 发生干旱,发生频率为 26.3%,其中,11 次轻旱,频率为 19.3%;4 次中旱,频率为 7.0%。

2.1.3 生育期内有效积温与 ET_0 变化特征 通过统计延安、长武及安康气象资料,运用线性回归分析

3 个地区 57 a 冬小麦生育期内有效积温和 ET_0 变化特征(图 4)。冬小麦生长下限温度为 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ [16], 计算生育期内有效积温, 运用 ET_0 软件计算得到 ET_0 值。分析得知, 3 个地区生育期内有效积温和 ET_0 均增加, 有效积温上升速率为延安>长武>安康, 分别为 $50.3, 30.9, 29.6^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 生育期内 ET_0 增加速率

为长武>安康>延安, 其值分别为 $8.9, 6.1, 0.6\text{ mm}/10\text{ a}$ 。由降水量和气温变化分析得知, 长武与安康属于“暖湿型”气候, 延安相对而言为“暖干型”气候, 在这两种气候类型下, 延安、长武和安康生育期内有效积温平均值分别为 $1\,301.1, 874.3, 1\,677.5^{\circ}\text{C}$, 相应 ET_0 平均值为 $658.4, 512.7, 477.4\text{ mm}$ 。

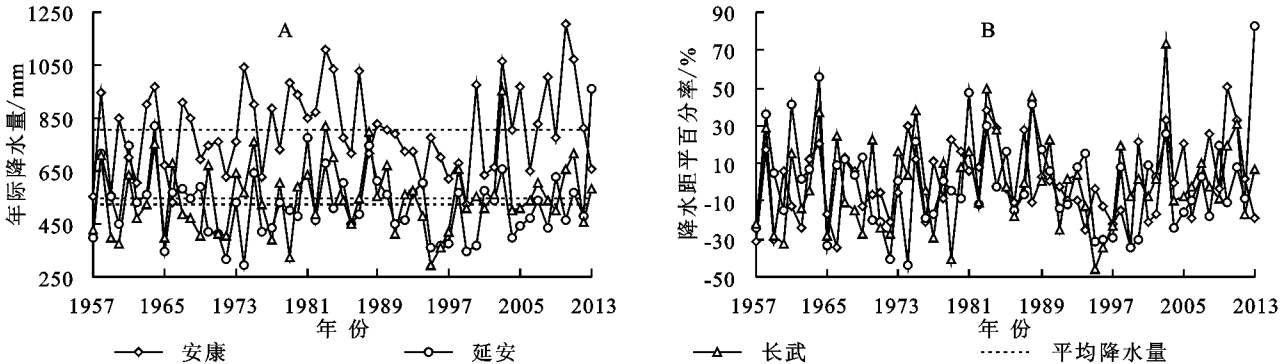


图 3 陕西省降水量变化趋势和降水距平百分率

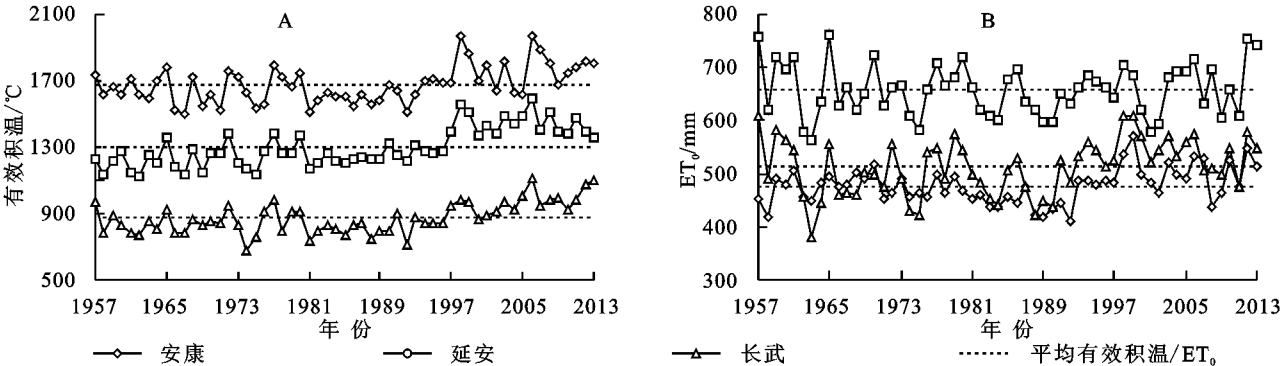


图 4 陕西省冬小麦生育期内有效积温和 ET_0

2.2 AquaCrop 模型参数调试与验证

AquaCrop 模型提供了冬小麦典型作物特性及相关生长参数[19]。由于陕西省各个地区经纬度、作物种植结构及土壤质地等因素的差异, 使冬小麦各生育期生长周期发生变化。

为了使模型在 3 个地区得到良好的应用, 以《陕

西省统计年鉴》给出的冬小麦实测产量数据为目标函数对模型进行校准, 参考 AquaCrop 模型给出的参数值范围和王翔翔等[26] 研究结果通过试差法对模型中参数调试修正, 将实测产量与模拟产量之间的相对误差控制在 10% 以内, 得到适用于 3 个地区作物参数值(表 1)。

表 1 模型典型参数调试

地区	播种到开花 天数/d	地表覆盖度 (CC_0)/%	冠层增长系数 (CGC)/%	冠层衰减系数 (CDC)/%	水分生产力 (WP^*)/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	参考收获指数 (HI_0)/%
延安	215	0.22	4.3	8	15	45
长武	203	1.7	3.6	8.1	16	48
安康	187	1.50	4.1	8.2	15	47

运用校准后模型参数对 3 个地区冬小麦产量进行模拟, 实测值与模拟值之间的误差分析如表 2 所示, 其相对误差均在允许范围内。对于模型在 3 个地区的适应性验证选择平均相对误差(AE)、均方根误差(RMSE)、残差聚集系数(CRM)和一致性系数(D)进行评价(表 3)。由表 3 可知, 整体而言, 表 1 中的参数模拟区冬小麦产量具有较好的拟合度。

2.3 现状降水条件下冬小麦产量对典型气候要素变化的响应

通过对陕西省 3 个地区的气候要素、生育期有效积温和 ET_0 的分析, 结合夏威夷冒纳罗亚天文台测定大气中年平均 CO_2 浓度变化得知, 陕西省长武和安康属于“暖湿+高碳型”气候, 而延安属于“暖干+高碳型”气候。为了进一步了解在两种气候类型下,

气温和 CO₂ 浓度变化对冬小麦产量的影响,在现状降水条件下,分析 CO₂ 浓度、气温等气候因子变化对陕西省冬小麦产量的影响。根据上述已确定的模型

参数,以 2003—2013 年气象资料为基础,分别模拟分析 CO₂ 浓度、气温及两者共同变化条件下冬小麦产量变化特征。

表 2 冬小麦模拟值与实测值误差分析

延安产量/(t·hm ⁻²)			长武产量/(t·hm ⁻²)			安康产量/(t·hm ⁻²)		
实测值	模拟值	误差/%	实测值	模拟值	误差/%	实测值	模拟值	误差/%
2.157	2.24	3.8	3.926	4.067	3.6	2.562	2.42	-5.5
2.705	2.921	8.0	4.426	4.19	-5.3	2.711	2.838	4.7
2.188	2.26	3.3	4.27	4.474	4.8	2.206	2.224	0.8
2.225	2.278	2.4	3.478	3.219	-7.4	2.412	2.26	-6.3
2.536	2.328	-8.2	4.507	4.371	-3.0	2.203	2.369	7.5

表 3 实测值与模拟值精度分析

地区	AE	RMSE	CRM	R ²	D
延安	0.043	0.145	0.018	0.616	0.904
长武	-0.057	0.201	-0.014	0.731	0.937
安康	0.003	0.132	0.001	0.561	0.890

2.3.1 气温变化对冬小麦产量的影响 延安、长武及安康气温分别以 0.10,0.19,0.10℃/10 a 速率上升,延安和安康 10 a 增量为 0.1℃,长武 5 a 增量为 0.1℃,AquaCrop 模型中以 0.1℃为气温年增幅对 3 个地区冬小麦产量进行模拟。由图 5 可知,当冬小麦生育期内气温增加 0.1℃时,延安、长武及安康冬小

麦产量变化趋势有所不同。延安冬小麦平均增产 0.5%,而安康与长武冬小麦平均产量减少 0.7%和 0.3%。温度是影响冬小麦生长发育的主要因素,适宜的温度为冬小麦正常生长发育及光合作用提供能量。研究发现温度对作物产量的影响是非线性的,作物在各生育阶段具有适宜的温度范围,在最适温度之前,增温对作物的光合速率有促进作用,净光合速率增加,有利于干物质的积累,温度高于最适温度后,蒸发率过高,受到高温和水分胁迫,温度过高使土壤中氮素含量下降,产量呈现下降趋势^[11,27-28]。

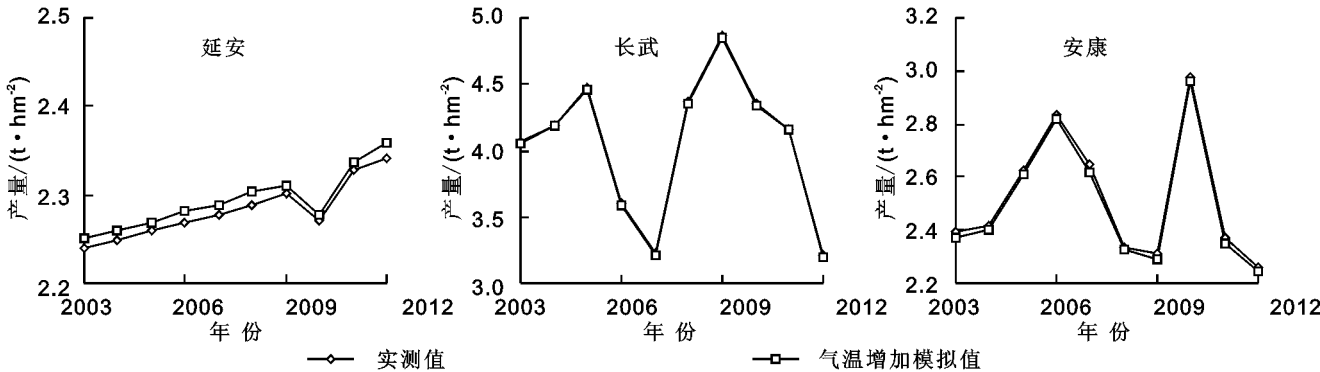


图 5 气温变化前后冬小麦产量对比

2.3.2 CO₂ 浓度变化对冬小麦产量的影响 由图 6 可知,延安和安康 CO₂ 浓度增加 20 μmol/mol,冬小麦增产 3.6%和 4.2%,长武 CO₂ 浓度增加 10 μmol/mol,冬小麦增产 2.2%,但在 2012 年由于长武冬小麦生育期内降水量较其他年份少、参考作物蒸散量(ET₀)较高产量增加幅度较小。CO₂ 是光合作用的底物,CO₂ 浓度升高提高 1,5-二磷酸核酮糖(RuBP)羧化酶的活性,增强对 CO₂ 的固定,抑制 RuBP 加氧酶的活性,降低光呼吸强度,提高光合效率^[29-30]。冬小麦叶片净光合速率和水分利用率增加,作物生长发育加快,冬小麦气孔导度和蒸腾速率降低,在一定程度上缓解了水分不足的胁迫作用,提高作物的初级净生产力,导致产量增加^[11,30-31]。

2.3.3 气温和 CO₂ 浓度同时变化对冬小麦产量的影响 延安、长武及安康冬小麦生育期内平均气温在 5.4~11.9℃。由图 7 可知,延安和安康气温升高 0.1℃,同时 CO₂ 浓度增加 20 μmol/mol,冬小麦平均增产 4.0%和 3.6%,长武气温升高 0.1℃,同时 CO₂ 浓度增加 10 μmol/mol,冬小麦平均增产 2.0%,气温与 CO₂ 浓度共同作用下延安冬小麦增产效果略低于两个因子单独作用之和,而安康与长武略高于两个因子单独作用之和。这是由于温度和 CO₂ 浓度变化对作物影响具有正协同作用,当大气 CO₂ 浓度升高,作物生长适宜温度增加,温度与 CO₂ 浓度同时作用,刺激早期分蘖的形成与存活增加穗粒数,作物生育期提前,生物量的积累增加,同时 CO₂ 浓度增加减缓气温升高对产量的影响^[28,32-35]。

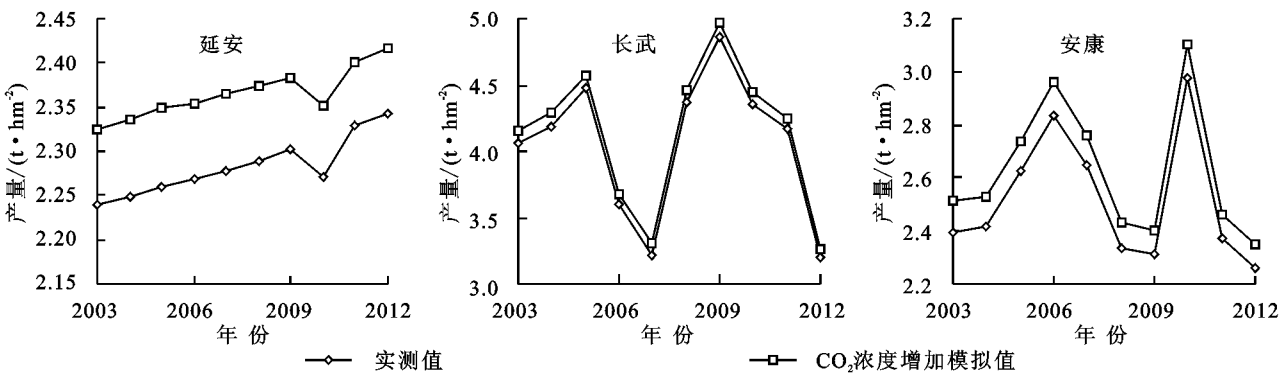


图 6 CO₂ 浓度变化前后冬小麦产量对比

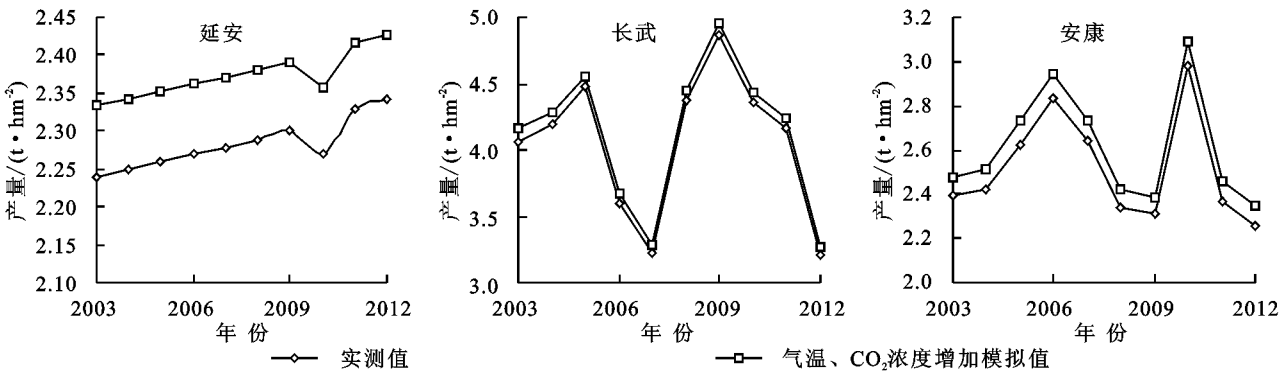


图 7 气温、CO₂ 浓度同时变化前后冬小麦产量对比

2.4 未来气候情景下冬小麦产量对气候因子变化的响应

根据延安、长武及安康 3 个地区气温变化特征，在 2012—2013 年冬小麦生育期内实测最低、最高气温的基础上，将冬小麦生育期内气温以相应速率(0.1,0.19,0.1℃/10 a)增加，得到 2013—2030 年未来 18 a 冬小麦生育期内气温值。3 个地区 2013—2030 年 CO₂ 浓度值采用模型 A1B、CO₂ 模块推荐值。采用 P-Ⅲ型频率曲线分析 57 a 降水资料，得到 3 个地区不同降水保证率下的典型年，结合 AquaCrop 模型模拟分析气候因子气温和 CO₂ 浓度值升高，未来 18 a 在 3 种不同降水保证率下冬小麦产量对气候因子变化的响应，结果如表 4 所示。由表 4 可知，3 个地区未来 18 a 在 3 种不同降水保证率下，气温和 CO₂ 浓度升

高，2020 年、2025 年及 2030 年 3 种典型年下冬小麦模拟产量与 2012 年实测值相比均有不同程度的增产。枯水年延安地区增产 3.3%，6.1%，8.4%，长武地区增产 2.3%，5.1%，7.9%，安康地区增产 1.8%，5.6%，7.6%；平水年延安地区增产 4.4%，7.3%，9.9%，长武地区增产 3.3%，5.9%，8.7%，安康地区增产 2.8%，5.9%，8.9%；丰水年延安地区增产 4.8%，8.5%，10.3%，长武地区增产 4.1%，7.1%，10.0%，安康地区增产 3.6%，6.6%，9.8%。相同降水条件下，气温与 CO₂ 浓度升高有利于陕西省冬小麦增产。同一地区在不同降水保证率下，气温和 CO₂ 浓度增幅相同，其增产有所不同。相同年份、同一降水保证率下不同地区增产也有所不同，延安>长武>安康，这可能与地区经纬度、作物种植结构及土壤质地有关。

表 4 2013—2030 年冬小麦产量模拟 t/hm²

年份	延安			长武			安康		
	枯水年	平水年	丰水年	枯水年	平水年	丰水年	枯水年	平水年	丰水年
2020	2.417	2.444	2.45	3.088	3.121	3.145	2.301	2.324	2.341
2025	2.483	2.51	2.538	3.173	3.198	3.233	2.386	2.393	2.409
2030	2.537	2.571	2.582	3.261	3.284	3.323	2.432	2.461	2.482

3 讨论与结论

(1) 陕西省延安、长武及安康 3 个地区 1957—2013 年年际平均气温呈上升趋势，上升速率为 0.10~0.19℃/10 a，平均气温为 9.80~16.50℃；安康与长武降

水量呈上升趋势，上升速率为 15.32,9.10 mm/10 a，而延安呈下降趋势，下降速率为 2.01 mm/10 a，平均降雨量为 524.91~803.00 mm；有效积温上升速率为 29.6~50.3℃/10 a，平均值为 874.3~1 677.5℃；生育期内 ET₀ 增加速率为长武>安康>延安。

(2) 冬小麦生育期内 CO_2 浓度不变,气温增加,延安冬小麦平均产量增加,而安康与长武冬小麦平均产量减少;气温不变, CO_2 浓度增加 3 个地区均有不同程度的增产;气温与 CO_2 浓度同时增加,在两个气象因子的正协同作用下产量增加,抵消由于气温升高造成的对冬小麦产量的减少。

(3) 3 种不同降水保证率下(枯水年、平水年和丰水年),延安地区 2020 年、2025 年及 2030 年与 2012 年相比丰水年比枯水年增产 1.4%~2.4%,长武地区 2020 年、2025 年及 2030 年与 2012 年相比丰水年比枯水年增产 1.9%~2.1%,安康地区 2020 年、2025 年及 2030 年与 2012 年相比丰水年比枯水年增产 1.8%~3.2%。未来 18 a 这 3 种典型年下与 2012 年相比,枯水年延安增产 3.3%~8.4%,长武增产 2.3%~7.9%,安康增产 1.8%~7.6%;平水年延安增产 4.4%~9.9%,长武增产 3.3%~8.7%,安康增产 2.8%~8.9%;丰水年延安增产 4.8%~10.3%,长武增产 4.1%~10.0%,安康增产 3.6%~9.8%。因此,根据本文的研究结果,气候变暖使陕西省各地区单位面积产量增加,延安>长武>安康,可适当增加在陕北地区冬小麦的种植面积,提高农业产量。

文中在研究气候对冬小麦产量的影响过程中,选择 3 个地区中 3 个地市来分析具有一定的局限性。未来气候变化包括气温、降水、 CO_2 浓度及日照时数等因素共同作用对冬小麦产量的影响。温度升高会使土壤物理参数(相对湿度和土壤含水量等)值发生变化,而本文采用 AquaCrop 作物生长模型模拟预测冬小麦产量,仅考虑了温度与 CO_2 浓度两个变量,将其他参数作为固定值。因此,不能完全反映气候变化对冬小麦产量的影响,其结果的准确性还需今后进一步的研究与完善。

参考文献

- [1] 吕硕,杨晓光,赵锦. 气候变化和品种更替对东北地区春玉米产量潜力的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(18): 179-190.
- [2] 孙丽,王飞,李保国,等. 基于多源数据的武陵山区干旱监测研究[J]. 农业机械学报,2014,45(1):246-252.
- [3] Luo R L, Zhang B L, Gao J L, et al. Climate change impacts on corn production as evidenced by a model and historical yields in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2012,10(2):976-983.
- [4] Thébault A, Mariotte P, Lortie C J, et al. Land management trumps the effects of climate change and elevated CO_2 on grassland functioning[J]. Journal of Ecology, 2014,102(4):896-904.
- [5] Silva C S D, Weatherhead E K, Knox J W, et al. Predicting the impacts of climate change: A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka[J]. Agricultural Water Management, 2007,93(1):19-29.
- [6] Thomas A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China[J]. Global & Planetary Change, 2008,60(3/4):306-326.
- [7] 蒲金涌,姚小英,王位泰. 气候变化对甘肃省冬小麦气候适宜性的影响[J]. 地理研究,2011,30(1):153-160.
- [8] 文新亚,陈阜. 基于 DSSAT 模型模拟气候变化对不同品种冬小麦产量潜力的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(S2):74-79.
- [9] 庞艳梅,陈超,潘学标,等. 未来气候情景下四川盆地冬小麦生育期气候资源及生产潜力的变化[J]. 中国农业气象,2014,35(1):1-9.
- [10] 韩雪,郝兴宇,王贺然,等. FACE 条件下冬小麦生长特征及产量构成的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(36):154-159.
- [11] 房世波,沈斌,谭凯炎,等. 大气 CO_2 和温度升高对农作物生理及生产的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(5):1116-1124.
- [12] Shu K L, Chen D, Norton R, et al. Nitrogen demand and the recovery of 15 N-labelled fertilizer in wheat grown under elevated carbon dioxide in southern Australia[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 92(2):133-144.
- [13] Kim H Y, Lim S S, Kwak J H, et al. Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to experimental warming with elevated CO_2 [J]. Plant & Soil, 2011,342(1/2):59-71.
- [14] 杨轩,王自奎,曹铨,等. 陇东地区几种旱作作物产量对降水与气温变化的响应[J]. 农业工程学报,2016,32(9):106-114.
- [15] 杨建莹,梅旭荣,刘勤,等. 气候变化背景下华北地区冬小麦生育期的变化特征[J]. 植物生态学报,2011,35(6):623-631.
- [16] 景毅刚,范建忠,高茂盛. 气候变暖对陕西冬小麦生育期的影响[J]. 麦类作物学报,2013,33(2):389-396.
- [17] 鲁清林,叶石,何春雨,等. 冬麦北移后小麦籽粒灌浆特性的初步研究[J]. 麦类作物学报,2008,28(2):281-286.
- [18] 陕西省统计局,国家统计局陕西调查队. 陕西统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2004-2014.
- [19] 杜文勇,何雄奎,Shamaila Z,等. 冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测[J]. 农业机械学报,2011,42(4):174-183.
- [20] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [21] 康绍忠. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式[M]. 北京:水利电力出版社,1992.
- [22] 姚玉璧,张秀云,王润元. 西北温凉半湿润区气候变化对马铃薯生长发育的影响:以甘肃岷县为例[J]. 生态

- 学报, 2010, 30(1): 100-108.
- [23] 孙向伟, 高飞翔, 王文鑫, 等. 临河地区气候变化及对春小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 115-119.
- [24] 佚名. 天气气候异常的标准[J]. 青海气象, 2014(1): 49.
- [25] 国家气候中心. 气象干旱等级 GB/T2048—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [26] 王翔翔. 渭北旱塬作物生长特征及其管理模式[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [27] 成林, 刘荣花, 马志红. 增温对河南省冬小麦产量的影响分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 854-859.
- [28] Dueri S, Calanca P L, Fuhrer J. Climate change affects farm nitrogen loss: A Swiss case study with a dynamic farm model[J]. *Agricultural Systems*, 2007, 93(1/3): 191-214.
- [29] 徐芸皎. CO₂ 浓度和温度升高对冬小麦生长发育及需水量的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [30] Peet M M, Huber S C, Patterson D T. Acclimation to high CO₂ in monoecious cucumbers: II. carbon exchange rates, enzyme activities, and starch and nutrient concentrations[J]. *Plant Physiology*, 1986, 80(1): 63-67.
- [31] Girardin M P, Bernier P Y, Raulier F, et al. Testing for a CO₂ fertilization effect on growth of Canadian boreal forests[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 116(G1): G01012.
- [32] 姜帅, 居辉, 吕小溪, 等. CO₂ 浓度升高与水分互作对冬小麦生长发育的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(4): 403-409.
- [33] 李广, 李玥, 黄高宝. 基于 APSIM 模型旱地春小麦产量对温度和 CO₂ 浓度升高的响应[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1088-1095.
- [34] Batts G R, Morison J I L, Ellis R H, et al. Effects of CO₂ and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over four seasons[J]. *Developments in Crop Science*, 1997, 25(1/3): 67-76.
- [35] 杨连新, 李世峰, 王余龙, 等. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 75-80.



(上接第 356 页)

- [21] 贾士靖, 刘银仓, 王慧军. 基于指标体系的河北省农业循环经济发展评价[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1230-1233.
- [22] Richard G A, Luis S P, Dirk R, et al. Guide for calculation of water demand for crops[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.
- [23] 曹永强, 朱明明, 李维佳. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 560-570.
- [24] Karl T R. Some spatial characteristics of drought duration in the United States[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, 22(8): 1356-1366.
- [25] 张丹, 张广涛, 王丽学, 等. 彭曼—蒙特斯公式在参考作物需水量中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(18): 4513-4514.
- [26] 刘钰, L. S. Pereira. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30.
- [27] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] 周体鹏. 基于克里金插值法的昆明市 PM_{2.5} 预测[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [29] 魏凤英. 现代气候统计与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [30] 尹海霞, 张勃, 王亚敏, 等. 黑河流域中游地区近 43 年来农作物需水量的变化趋势分析[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 409-417.
- [31] 肖俊夫, 刘祖贵, 孙景生, 等. 不同生育期干旱对棉花生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水, 1999(1): 24-28.
- [32] 李瑜玲, 宋晓. 小麦节水栽培技术模式研究: 以河北省石家庄市为例[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(9): 35-36, 38.
- [33] 李夕军, 李瑜玲, 宋晓, 等. 冬小麦节水灌溉下的产量规律研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(32): 18, 52.
- [34] 周芬芬. 基于 MODIS 的邢台市旱情动态变化及其驱动力研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2010.
- [35] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65.