

气温和 CO₂ 浓度变化对陕北地区冬小麦产量影响的模拟分析

周英霞¹, 王全九^{1,2}, 何斌¹, 张继红¹, 谭帅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: 分析气候变化对农业生产的影响, 有利于制定相应的对策, 保障粮食安全。在分析陕北地区 1957—2013 年气温、降水等气象因子变化趋势的基础上, 利用 AquaCrop 作物生长模型模拟分析气温及 CO₂ 浓度等气象因子变化对陕北地区冬小麦产量的影响。结果表明: 陕北地区 1957—2013 年平均气温呈上升趋势, 上升速率为 0.22 °C/10 a, 平均降水量呈下降趋势, 下降速率为 0.15 mm/10 a。气温每升高 0.1 °C, 榆林和延安两地冬小麦分别增产 1.5% 和 0.5%; CO₂ 浓度每增加 10 μmol/mol, 两地冬小麦分别增产 3.8% 和 2.0%; 气温和 CO₂ 浓度同时变化 (即气温升高 0.1 °C 同时 CO₂ 浓度增加 10 μmol/mol), 两地冬小麦分别增产 5.1% 和 2.3%。仅考虑气温及 CO₂ 浓度变化, 陕北地区“暖干+高碳型”气候有利于提高冬小麦生产力, 未来 18 年陕北地区冬小麦产量将实现不同程度的增产, 在 3 种不同典型年下与 2012 年相比, 榆林地区 2020, 2025, 2030 年枯水年、平水年和丰水年冬小麦分别增产 21.2%~31.8%, 25.4%~36.0%, 29.7%~40.7%; 延安相应 3 种典型年下增产 3.3%~8.3%, 4.4%~9.7%, 4.8%~10.5%。因此, 可在陕北地区适度增加冬小麦种植面积, 增加农业产量。

关键词: 气温; CO₂ 浓度; AquaCrop 模型; 冬小麦产量

中图分类号: S162.5⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0292-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.045

Effects of Temperature and CO₂ Concentration on the Yield of Winter Wheat in Northern Shaanxi

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

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

Xi'an 710048; 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)

Abstract: Analyzing the impact of climate change on agricultural production is beneficial to develop appropriate strategies and protect food security. In the study, the trends of meteorological factors in 1957—2013, and the effects of temperature and CO₂ concentration on winter wheat yield were simulated by AquaCrop model in Northern Shaanxi Province. The results showed that the annual temperature in Northern Shaanxi increased at a rate of 0.22 °C/10 a, while the annual precipitation decreased at a rate of 0.15 mm/10 a in 1957—2013. With an increase of 0.1 °C in the annual temperature, the winter wheat yield in Yulin and Yan'an increased by 1.5% and 0.5%, respectively. When annual CO₂ concentration increased by 10 μmol/mol, the winter wheat yield increased by 3.8% and 2% in Yulin and Yan'an, respectively. When the annual temperature and CO₂ concentration rose simultaneously (i.e., temperature rose by 0.1 °C and CO₂ concentration increased by 10 μmol/mol), the winter wheat yield increased by 5.1% and 2.3% in Yulin and Yan'an, respectively. Only considering the variation of temperature and CO₂ concentration, the warm-dry and high-carbon climate were beneficial to improve wheat production in Northern Shaanxi. The winter wheat yield would increase at different degrees in the next 18 years in Northern Shaanxi region. Under three typical years (i.e. dry, normal and wet year), the winter wheat yield in 2020, 2025 and 2030 in Yulin would increase by 21.2%~31.8%, 25.4%~36.0% and 29.7%~40.7% respectively compared to that in 2012, whereas, the wheat yield in Yan'an would increase by

收稿日期: 2017-04-11

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—2010)

第一作者: 周英霞(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail: 193208448@qq.com

通信作者: 王全九(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水利工程研究。E-mail: wquanjiu@163.com

3.3%~8.3%, 4.4%~9.7% and 4.8%~10.5%, respectively. Therefore, it is suitable to increase the winter wheat planting area moderately to increase agricultural output in Northern Shaanxi.

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

气候变化对农业生产的潜在影响已成为社会公众关注的重大问题^[1-2]。20世纪70年代以来,气候变化对农业生产的影响,一直受到学术界和相关政府部门的广泛关注^[3-4]。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发表声明称,2015年CO₂浓度增幅达到历史最新高为3.05 μmol/mol,这是自1958年开展相关研究以来的最大增幅。气候变化导致作物种植制度、种植区域及产量发生变化,冬季变暖冬小麦生产区负积温逐渐减少,为冬小麦北移提供物候条件,呈现不同程度的北移现象^[5]。气温升高、CO₂浓度增加及降水不均匀使作物生长所需的水、气、热等因素改变,影响作物生长发育及产量的形成^[6-7]。可见气象因素是影响农作物产量的一个重要条件^[8]。因此,国内外学者,围绕气候变化对作物的影响进行了大量研究。

国内外学者如肖国举等^[7]和Tubiello等^[9]就C3植物对CO₂浓度的响应进行研究,结果表明C3植物对大气CO₂浓度增加较C4植物敏感,C3植物适应于低温下高CO₂浓度。此外,还有学者认为CO₂浓度升高引起小麦叶片净光合速率提高,从而使单位面积穗数和穗粒数增加^[10-11],大气CO₂浓度升高200 μmol/mol,小麦产量增加24.6%^[12]。就温度对作物生长的影响方面,田云录等^[13]和王鹤龄等^[14]认为增温条件下冬小麦单位面积产量增加,有效穗数提高,春小麦籽粒蛋白质增加。然而对于西北地区,目前大多数研究集中在气温或CO₂浓度等单因子变化对作物各生育期的影响,而对气温、CO₂浓度及气温和CO₂浓度同时变化对作物最终产量的影响研究较少。本文在分析陕北地区1957—2013年气温、降水等气象因子变化趋势的基础上,采用AquaCrop作物生长模型模拟分析气温、CO₂浓度及气温和CO₂浓度两者同时变化对陕北地区冬小麦产量的影响,并预测在未来气候变化条件下冬小麦产量的变化,为该地区冬小麦种植区域变化和农业生产提供一定的理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕北黄土高原位于东经107°28'—110°31',北纬35°21'—39°34',包括榆林市和延安市,海拔900~1500 m,地势西北高,东南低,总面积10.06万km²,占全省面积的48.9%,是西北黄土高原的主要组成部分^[15]。气温和降水量从东南到西北递减,具有明显的地域性差异。东南部年平均气温8.5~12℃,年平均降水量500~650 mm。西北部气温干燥,年平

均气温7~9℃,年平均降水量350~500 mm。

1.2 AquaCrop 模型基本原理

AquaCrop模型将土壤—作物—大气作为一个连续系统,整个模型由四大基本模块构成:气象模块、作物模块(包括作物生长发育和产量形成)、田间管理模块和土壤模块。该模型的主要作用在于模拟水分供应发生变化对作物产量和生物量的影响,模型以日土壤水分平衡机理模拟作物生长过程,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应作物最终产量。其计算原理图如图1所示。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/hm²);B为生物量(t/hm²);HI为收获指数;WP为生物量水分生产效率(t/(hm²·mm));T_r为作物蒸腾量(mm)。

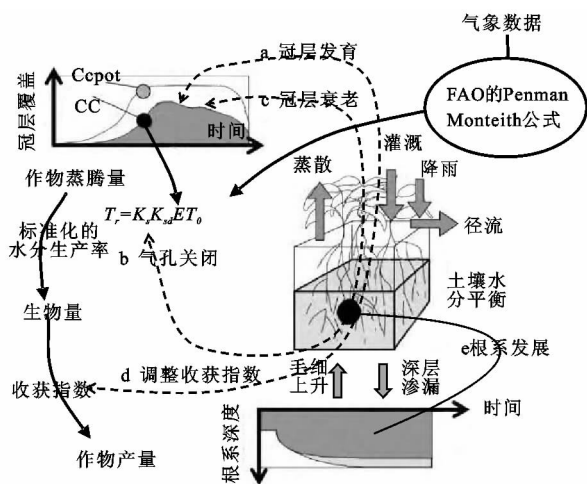


图1 AquaCrop模型的计算流程

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陕北地区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。土壤相关参数参照《陕西土壤》^[16]确定陕北地区榆林和延安土壤类型、质地及土壤其他物理特征值。通过查阅《陕西统计年鉴》^[17]得到冬小麦产量数据。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》^[18]。在进行AquaCrop模型模拟时所需参考作物蒸发蒸腾量由模型附带ET₀计算软件求得。CO₂浓度采用AquaCrop模型中默认数据—A1B。CO₂。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北半干旱地区冬小麦产量的影响。

采用线性回归方程拟合分析陕北地区 1957—2013 年气温和降水变化特征,依据此变化模拟 2003—2012 年冬小麦产量,通过分析气候变化前后冬小麦产量,得出气象因子对冬小麦产量的影响,并分析在气候变化条件下未来 18 年陕北地区冬小麦产量的变化趋势。

2 结果与分析

2.1 陕北气候变化特征分析

2.1.1 年际平均气温变化特征 通过统计榆林市和延安市 57 年最低、最高气温相加求平均值,得到陕北地区年际平均气温变化趋势。从图 2 可以看出,在全球气候变暖背景下,陕北地区 1957—2013 年平均气温呈上升趋势,上升速率为 0.22 ℃/10 a($R^2=0.17$),年际平均气温值为 10.6 ℃,在 1966—1975 年波动幅度最大,1973 年年际平均气温最高为 12.3 ℃,1984 年年际平均气温最低为 9.0 ℃,相差 3.3 ℃。1979—1997 年气温低于平均值,1997 年以后气温在高于平均值的范围波动。

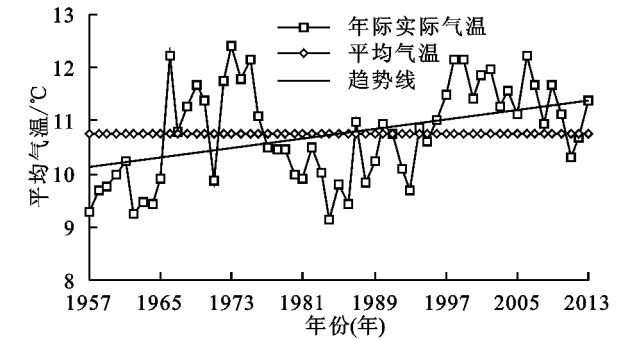


图 2 年际平均气温变化特征

2.1.2 年际平均降水量变化特征 通过统计榆林市和延安市 57 年降水资料,将两个地区逐年降水量相

加求平均值,得到陕北地区年际降水量变化趋势。从图 3 可以看出,陕北地区 1957—2013 年平均降水量呈下降趋势,下降速率为 0.15 mm/10 a,70 年代以前波动较大,其中 1964 年降水量 739.5 mm,1965 年为 57 年中降水量最少年份,仅有 245.8 mm 变幅较大,相隔 1 年降水量相差 493.7 mm。57 年中该地区年平均降水量为 458.5 mm,标准差为 105.9,有 30 年降水量均少于平均降水量,陕北地区 60 年代降水量较多,进入 21 世纪后降水量减少。

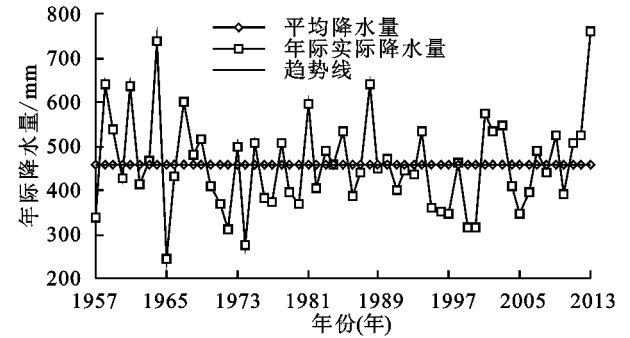


图 3 降水量变化趋势

2.2 AquaCrop 模型参数确定

AquaCrop 模型提供了冬小麦典型作物特性及相关生长参数。由于榆林与延安两地经纬度、作物种植结构及土壤质地等因素的不同,使两地冬小麦开花天数、冠层覆盖度及收获指数等参数产生差异。为了验证模型在两地的适应性,以《陕西省统计年鉴》给出冬小麦实测数据为目标函数,通过试差法来调节模型参数。在模型进行校准时通过参考 AquaCrop 模型给定的参数值范围和王翔翔^[19]研究结果对模型中参数进行调试修正,使实测产量与模拟产量之间相对误差控制在 10% 以内。得到适用于两地市作物参数值,如表 1 所示。

表 1 冬小麦典型参数调试

地区	播种到开花 天数/d	地表 覆盖度/%	冠层增长 系数/%	冠层衰减 系数/%	水分生产力/ (t·hm ⁻²)	参考收获 指数/%
榆林	230	1.95	3.0	12.8	17	49
延安	215	0.22	4.3	8.0	15	45

在模型验证时选择以下参数对模型在该地区的适应性进行评价:平均相对误差(AE)、均方根误差(RMSE)、残差聚集系数(CRM)、模拟性能指数(EF)和一致性系数(D)。实际值与模拟值之间的误差分析如表 2 所示。由表 2 可知,模型经过校准后,对于陕北地区榆林和延安两地冬小麦产量模拟均在误差允许范围内,模型模拟产量与实测产量之间线性相关系数 R^2 分别为 0.65 和 0.72。对于模型在该地区的适应性验证参数如表 3 所示。由表 3 可知,整体而言,模型在陕北地区具有较好地适应性,从 CRM 看出榆林相对于实测值,模拟产量偏低,而延安模拟产量相对偏高。

表 2 冬小麦模拟值与实测值误差计算

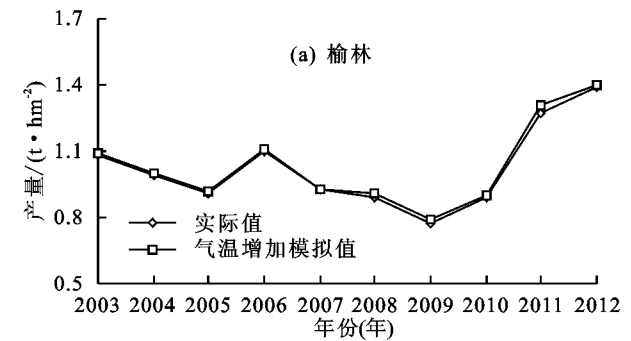
重复	榆林产量/(t·hm ⁻²)			延安产量/(t·hm ⁻²)		
	实测值	模拟值	误差/ %	实测值	模拟值	误差/ %
1	1.201	1.079	-9.8	2.157	2.240	3.9
2	1.007	0.989	-1.8	2.705	2.921	8.0
3	0.861	0.913	6.0	2.188	2.260	3.3
4	0.720	0.769	6.8	2.225	2.278	2.4
5	0.928	0.890	-4.1	2.536	2.328	-8.2

表 3 实测值与模拟值精度分析

地区	AE	RMSE	CRM	EF	D
榆林	-0.0154	0.0660	-0.0163	0.8291	0.9364
延安	0.0432	0.1448	0.0183	0.5615	0.9037

2.3 现状降水条件下气温和 CO₂ 浓度变化对冬小麦产量的影响分析

由陕北地区气候变化特征分析可知,陕北地区气温升高、降水量减少,根据夏威夷冒纳罗亚天文台测定大气中年平均 CO₂ 浓度逐年增加,陕北地区属于“暖干+高碳型”气候。为了进一步了解气温和 CO₂ 浓度变化对冬小麦产量的影响,在现状水分条件下,分析 CO₂ 浓度、气温等气候因子变化对陕北地区冬小麦产量的影响。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。

2.3.1 气温变化对冬小麦产量的影响 陕北地区气温以 0.22℃/10 a 速度上升,5 a 气温增量为 0.1℃,在 AquaCrop 模型中模拟气温年增幅为 0.1℃对榆林和延安两市冬小麦产量影响。由图 4 可知,当作物生育期内平均气温升高 0.1℃时,榆林和延安冬小麦产量平均增加 1.5% 和 0.5%。大量研究表明,在作物生育期内不同气温条件对作物产量影响程度不同,在适宜的温度区间内有利于作物产量形成,在一定范围内冬小麦产量随有效积温的升高而增加^[20-21]。

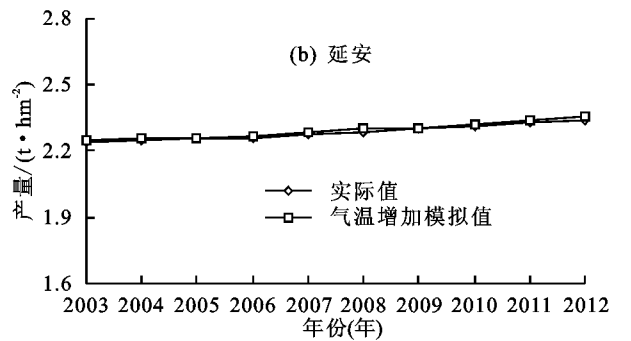
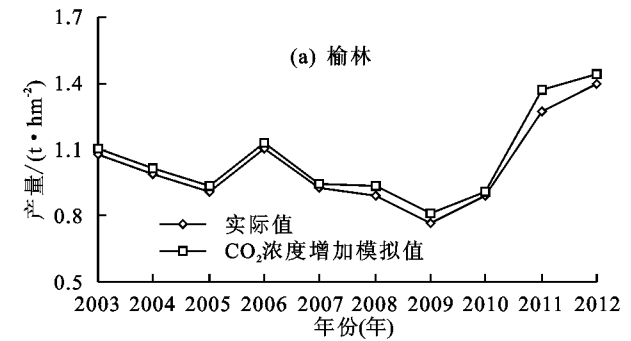


图 4 气温变化前后冬小麦产量对比

2.3.2 CO₂ 浓度变化对冬小麦产量的影响 由图 5 可知,当 CO₂ 浓度升高 10 μmol/mol,两地冬小麦平均增产 3.8% 和 2%。这是由于 CO₂ 是植物进行光合作用的原料,同时短期 CO₂ 浓度增加能够抑制作物线粒体中进行暗呼吸酶的活性^[22]。研究表明 CO₂



浓度升高促进叶面积指数增长,促进植物光合作用,产生更多碳的同化产物,增加生物量促进光合碳的富集进而提高作物产量^[23-24]。AquaCrop 模型为水分驱动模型,而榆林地区 2011 年降水量较多且为丰水年,冬小麦增产较大。

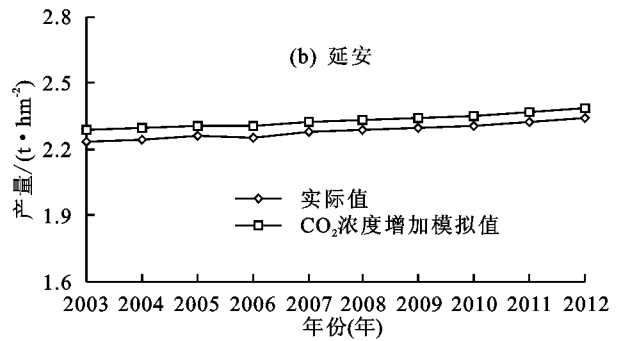


图 5 CO₂ 浓度变化前后冬小麦产量对比

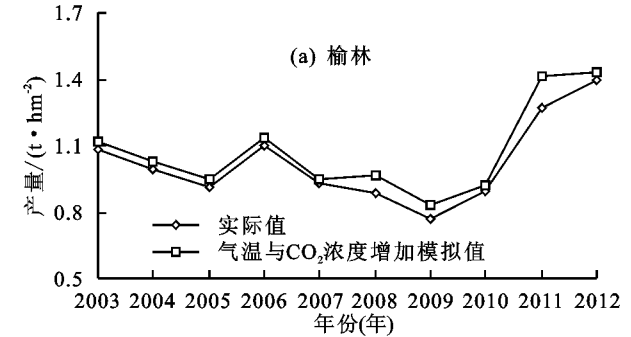
2.3.3 气温和 CO₂ 浓度同时变化对冬小麦产量的影响 榆林和延安两地区冬小麦生育期内平均气温在 3.9~5.2℃。由图 6 可知,气温升高 0.1℃同时 CO₂ 浓度增加 10 μmol/mol,冬小麦平均增产 5.1% 和 2.3%,气温与 CO₂ 浓度共同作用下冬小麦增产效果略低于 2 个因子单独作用之和。这是由于温度和 CO₂ 浓度变化对作物影响具有交互作用,当大气 CO₂ 浓度升高,气温增加,作物净光合作用最适温度相应增加,作物光合速率提高,生物量增加,进而增加作物产量^[22-24]。模型在进行产量模拟时,作物产量主要由可供应的土壤水分决定,2011 年榆林地区丰水年,水分较其他年份供应充足,在气温与 CO₂ 浓度共

同影响下,该年份冬小麦增产较大。

2.4 冬小麦产量对气候因子变化的响应

根据陕北地区气温变化特性,在 2012—2013 年冬小麦生育期实测气温的基础上,将冬小麦生育期内气温以 0.02℃/a 速率增加,得 2013—2030 年未来 18 年冬小麦生育期内平均气温。采用 AquaCrop 模型 A1B—CO₂ 模块所推荐 2013—2030 年大气中 CO₂ 浓度值,可得知榆林和延安两市未来 18 年冬小麦生育期内气温与 CO₂ 浓度值。采用 P—Ⅲ型频率曲线分析两市 57 年降水资料,得 3 种不同降水保证率下典型年,采用 AquaCrop 模型模拟预测 3 种不同降水保证率下,气温与 CO₂ 浓度升高陕北地区冬小麦对气候因子变化的响应。由表 4 可知,榆林与

延安未来 18 年在 3 种不同降水保证率下,气温和 CO₂ 浓度升高,2020 年、2025 年及 2030 年与 2012 年相比冬小麦增产程度不同。枯水年榆林地区增产 21.2%,26.4%,31.8%,延安地区增产 3.3%,5.1%,8.3%;平水年榆林地区增产 25.4%,30.6%,36.0%,延安地区增产 4.4%,7.2%,9.7%;丰水年



榆林地区增产 29.7%,35.1%,40.7%,延安地区增产 4.8%,8.7%,10.5%。相同降水条件下,气温与 CO₂ 浓度升高有利于陕北地区冬小麦增产。不同降水保证率下,气温和 CO₂ 浓度增幅相同,榆林冬小麦增产效果显著大于延安,这可能与两地经纬度、作物种植结构及土壤质地有关。

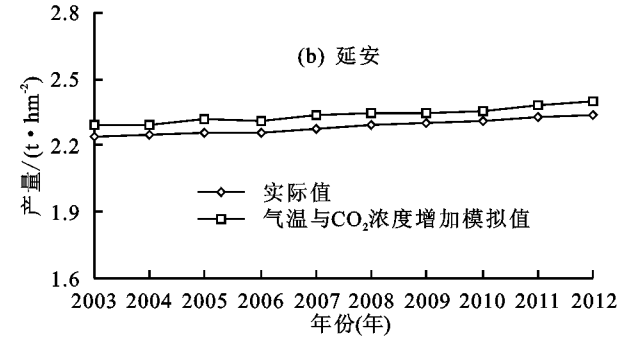


图 6 气温、CO₂ 浓度同时变化前后冬小麦产量对比

表 4 2013—2030 年冬小麦产量模拟

年份 (年)	榆林			延安		
	枯水年	平水年	丰水年	枯水年	平水年	丰水年
2020	1.690	1.748	1.808	2.420	2.444	2.454
2025	1.762	1.821	1.883	2.461	2.510	2.545
2030	1.837	1.896	1.961	2.536	2.571	2.587

3 结论与讨论

(1)陕北地区 1957—2013 年年际平均气温呈上升趋势,上升速率为 0.22℃/10 a ($R^2=0.17$),年平均气温为 10.6℃;年际降水量下降,速率为 0.15 mm/10 a,年平均降水量为 458.5 mm。

(2)榆林和延安两地气温和 CO₂ 浓度同时增加,分别增产 5.1%和 2.3%,其增产比 CO₂ 浓度增加高 1.3%和 0.3%;与气温升高相比高 3.6%和 1.8%。

(3)3 种不同降水保证率下(枯水年、平水年和丰水年),榆林地区 2020,2025,2030 年,丰水年比枯水年产量增加 0.118,0.121,0.124 t/hm²,与 2012 年相比丰水年比枯水年增产 8.5%~8.9%,延安地区 2020,2025,2030 年,丰水年比枯水年产量增加 0.034,0.084,0.051 t/hm²,与 2012 年相比丰水年比枯水年增产 1.5%~2.2%。未来 18 年两地区 2020,2025,2030 年与 2012 年相比,枯水年榆林增产 21.2%~31.8%,延安增产 3.3%~8.3%;平水年榆林增产 25.4%~36.0%,延安增产 4.4%~9.7%;丰水年榆林增产 29.7%~40.7%,延安增产 4.8%~10.5%。因此,根据本文的研究结果,冬小麦单位面积产量增加,可适当增加冬小麦在陕北地区的种植面积,提高该地区的农业产量。

文中在研究陕北地区气候变化,以点带面(选择延安和榆林代替整个区域气候的变化)具有一定的局限性。对于未来气候变化对作物产量影响,包括气温、降

水及 CO₂ 浓度等因素,如果不考虑降水的作用,在冬小麦生育期内水分供应不足,生长受到水分胁迫,叶面积指数减少,气孔导度减少,加之温度升高生育期缩短,干物质积累减少产量下降^[25-26]。在研究温度升高对作物产量的影响过程中,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陕北地区冬小麦产量,仅考虑了温度与 CO₂ 浓度 2 个变量,将其他参数作为固定值。因此,不能完全反应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] 虞凯浩,陈效民,陈旭.模拟气候变化条件下太湖地区典型农田氮素的动态变化[J].水土保持学报,2015,29(1):96-100.

[2] 张强,邓振镛,赵映东.全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J].生态学报,2008,28(3):1210-1218.

[3] 王柳,熊伟,温晓乐.温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响[J].农业工程学报,2014,30(21):138-146.

[4] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge:Cambridge University Press,2013.

[5] 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.

[6] Yang Y, Feng Z, Huang H Q, et al. Climate-induced changes in crop water balance during 1960—2001 in Northwest China[J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2008, 127(1/2):107-118.

[7] 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.

[8] 居辉,许吟隆,熊伟.气候变化对我国农业的影响[J].环境保护,2007,11(18):71-73.

- [9] Tubiello F N, Soussana J F, Howden S M. Crop and pasture response to climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19686-19690.
- [10] 崔昊, 石祖梁, 蔡剑, 等. 大气 CO₂ 浓度和氮肥水平对小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 979-984.
- [11] 徐玲, 赵天宏, 胡莹莹, 等. CO₂ 浓度升高对春小麦光合作作用和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(5): 867-872.
- [12] 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.
- [13] 田云录, 陈金, 邓艾兴, 等. 开放式增温下非对称性增温对冬小麦生长特征及产量构成的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 681-686.
- [14] 王鹤龄, 张强, 王润元. 增温和降水变化对西北半干旱区春小麦产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 67-75.
- [15] 王德丽, 殷淑燕, 王海燕. 近 50 年陕北地区的气候变化[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 262-267.
- [16] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [17] 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, 2003-2012.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 张德沛, 李跃华, 鲁建立. 开封市主要农作物对积温变化的响应分析[J]. 资源与环境科学, 2012(15): 218-220.
- [22] 陈鹏狮, 米娜, 张玉书, 等. 气候变化对作物产量影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2009, 2(1): 5-9.
- [23] 李小涵, 武建军, 吕爱锋. 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.
- [24] 马田, 刘肖, 李骏. CO₂ 浓度升高对土壤—植物(春小麦)系统光合碳分配和积累的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(12): 2238-2246.
- [25] 张延. 气候变化对关中地区冬小麦产量的影响及适应策略[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [26] 刘培, 蔡焕杰, 王健. 土壤水分胁迫对冬小麦生长发育、物质分配及产量构成的影响[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(3): 330-333.

(上接第 291 页)

- [8] 徐艳霞, 魏占彬, 王天亮. 不同施肥方式对夏玉米生长发育及产量的影响[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(18): 54-55.
- [9] 褚清河, 潘根兴, 李健英, 等. 不同施氮量下北方稻田一次与分次施氮对水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 82-86.
- [10] 李付国, 孟月华, 贾小红, 等. 供氮水平对“八月脆桃”产量、品质和叶片养分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 918-921.
- [11] 赵林, 姜远茂, 彭福田, 等. 苹果园春季土施尿素的利用及其在土壤中的累积[J]. 园艺学报, 2009, 36(12): 1805-1809.
- [12] Qin S, Zhang Z, Ning T, et al. Abscissic acid and aldehyde oxidase activity in maize ear leaf and grain relative to post-flowering photosynthetic capacity and grain-filling rate under different water/nitrogen treatments [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 70(1): 69-80.
- [13] Quartieri M, Millard P, Tagliavini M. Storage and remobilisation of nitrogen by pear (*Pyrus communis* L.) trees as affected by timing of N supply[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 17(2): 105-110.
- [14] 丁宁, 沙建川, 丰艳广, 等. 晚秋叶施尿素提高矮化苹果翌春生长及果实品质的效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1665-1671.
- [15] 房祥吉, 姜远茂, 彭福田, 等. 不同沙土配比对盆栽平邑甜茶的生长及¹⁵N 吸收、利用和损失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 131 - 134.
- [16] 李红波, 姜远茂, 魏绍冲, 等. ‘嘎啦’苹果对一次和分次施入¹⁵N—尿素的吸收、分配和利用[J]. 园艺学报, 2011, 38(9): 1727-1732.
- [17] 张守仕, 彭福田, 姜远茂, 等. 肥料袋控缓释对桃氮素利用率及生长和结果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 379-396.
- [18] 杨洪强, 范伟国. 苹果根系构型及其调控研究进展[J]. 园艺学报, 2012, 39(9): 1673-1678.
- [19] Richardson A E, Barea J, McNeill A M, et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms [J]. Plant and Soil, 2009, 321(1): 305-339.
- [20] 李朝苏, 汤永禄, 吴春, 等. 施氮量对四川盆地机播稻茬麦生长发育及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 271-279.
- [21] 张守仕, 彭福田, 齐玉吉, 等. 不同养分供应方式对盆栽桃树生长及其氮素吸收、分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 156-163.
- [22] 张进, 姜远茂, 束怀瑞, 等. 不同施肥期沾化冬枣对¹⁵N 的吸收、分配及利用特性[J]. 园艺学报, 2005, 32(2): 288-291.
- [23] 丁宁, 陈倩, 许海港, 等. 施肥深度对矮化苹果¹⁵N—尿素吸收、利用及损失的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 755-760.