

陇中旱地春小麦产量对降水与温度变化的响应模拟

任新庄^{1,2}, 闫丽娟², 李广^{1,3}, 聂志刚⁴, 王钧⁴, 罗永忠³

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学, 甘肃兰州 730070;

2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070; 3. 甘肃农业大学林学院, 甘肃兰州 730070;

4. 甘肃农业大学信息科学技术学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 为了探索降水与温度变化对旱地春小麦产量的影响, 本研究以定西市安定区 1971—2012 年共 42 年的逐日气象数据为基础, 运用 APSIM (agricultural production system simulation) 模型对不同降水 (逐日降水 $\pm 20\%$ 、 $\pm 15\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 0\%$) 与温度 (逐日温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0^\circ\text{C}$) 变化下的旱地春小麦产量进行了模拟, 并采用二次多项式回归、单因素边际效应和通径分析研究了温度和降水变化对春小麦产量的影响机制。结果表明: 在试验设计范围内, 春小麦产量 (Y) 与降水 (X_1) 和温度 (X_2) 变化编码值的回归方程为 $Y = 1452.24 + 2693.88X_1 - 287.25X_2 - 200.38X_2^2 - 344.47X_1X_2$ ($R^2 = 0.999, P < 0.01$)。当温度不变时, 降水与春小麦产量呈正线性关系, 由模拟结果可知, 降水每增加 5%, 春小麦产量最大增幅为 21.38%, 平均增幅为 14.31%; 当降水不变时, 温度与春小麦产量呈开口向下的二次函数递减关系。根据模拟结果, 温度每升高 0.5 $^\circ\text{C}$, 春小麦产量最大降幅为 4.92%, 平均降幅为 3.24%; 通径分析显示, 温度和降水之间存在负互作效应, 但降水增加对春小麦产量的增产效应远大于温度升高所造成的减产效应。

关键词: APSIM 模型; 气候变化; 春小麦; 产量; 模拟

中图分类号: S126 **文献标志码:** A

Simulation of the effects of precipitation and temperature change on spring wheat yield in dryland of Central Gansu

REN Xin-zhuang^{1,2}, YAN Li-juan², LI Guang^{1,3}, NIE Zhi-gang⁴, WANG Jun⁴, LUO Yong-zhong³

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Forest, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Climate change has a great impact on agricultural production, temperature and precipitation change are one of the most important factors. In the arid and semi-arid areas, this effect is even greater. Spring wheat is one of the most important food crops in this area. In order to explore the effects of change of precipitation and temperature on spring wheat yield in drylands. In this paper, based on the daily meteorological data of a total of 42 years from 1971 to 2012 in Anding District of Dingxi city, the simulation of spring wheat yield in different precipitation (Daily precipitation $\pm 20\%$, $\pm 15\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$, $\pm 0\%$) and temperature (Daily temperature $\pm 2^\circ\text{C}$, $\pm 1.5^\circ\text{C}$, $\pm 1^\circ\text{C}$, $\pm 0.5^\circ\text{C}$, $\pm 0^\circ\text{C}$) conditions using agricultural production system simulation model (APSIM), studied the influence of temperature and precipitation on spring wheat yield mechanism by adopting two polynomial regression, path analysis and marginal effect of single factor. The results showed that the yield of spring wheat (Y) and change encoding values of precipitation (X_1) and temperature (X_2) regression equation for $Y = 1452.24 + 2693.88X_1 - 287.25X_2 - 200.38X_2^2 - 344.47X_1X_2$ ($R^2 = 0.999, P < 0.01$) within the scope of the design of the experiment. when

收稿日期: 2017-03-03

修回日期: 2018-02-25

基金项目: 国家自然科学基金 (31560343, 31560378, 31660348); 甘肃省科技支撑计划 (144NKCA038); 甘肃省高等学校基本科研业务费项目, 甘肃省自然科学基金 (1308RJA272); 干旱生境作物学重点实验室开放基金 (GSCS-2010-11); 甘肃省高等学校科研项目 (2014A-058) 和甘肃省青年科技基金计划 (1506RJYA005)

作者简介: 任新庄 (1993—), 男, 甘肃渭源人, 硕士研究生, 研究方向为作物模拟模型。E-mail: 1358803468@qq.com。

通信作者: 李广 (1971—), 教授, 博士生导师, 主要从事农业信息技术等方面的研究。E-mail: lig@gsau.edu.cn。

the temperature is constant, precipitation and yield of spring wheat were positively linear relationship, the simulation results showed that the precipitation increased 5% each, yield of spring wheat biggest increase was 21.38%, the average growth of 14.31%; When precipitation unchanging, temperature and yield of spring wheat quadratic function decreasing relationship was open to the bottom, each elevated temperature of 0.5°C, the spring wheat yield biggest drop was 4.92%, the average decline of 3.24%. Path analysis showed that the existence of a negative interaction between temperature and precipitation effect, but the increased precipitation effect on the increase of spring wheat yield is greater than the temperature rise.

Keywords: APSIM model; climate change; spring wheat; yield; simulation

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC, 2013) 发布的第五次评估报告显示: 全球海陆表面平均温度在 1880—2012 年之间总共升高了 0.85°C, 未来将继续呈上升趋势^[1]。在气温持续升高的情况下, 全球各干湿地区之间, 同一地区干湿季节之间的降水差也将增大^[2]。气温和降水是作物生长发育的主要影响因素, 其影响程度在干旱半干旱地区更加明显, 所以, 气候变化将对该地区的粮食生产产生重要的影响。

小麦是世界上最重要的粮食作物之一, 其生产对气候变化非常敏感^[3]。全球气候变化的主要特点包括气候变暖和降水格局变化, 而温度与水分等生存因子的变化必然会影响小麦的生长发育过程, 从而对产量造成影响^[4-5]。光合作用是小麦产量形成的基础, 而其光合效率的高低与气温有着密切的关系^[6], 适宜的温度是高光合效率的重要前提之一, 而过高的温度则会造成小麦早熟或早衰, 缩短小麦的物候期持续时间^[7], 会从光合面积、光合速率、以及光合持续时间等方面来影响小麦的产量形成。水分作为小麦最重要的生存因子之一, 对小麦生长发育和产量形成的影响是决定性的, 所以降水格局的变化对于干旱半干旱且无灌溉条件地区的小麦生产的影响很大。大量研究表明, 在黄土高原陇中地区降水量少且年内分配极不均匀, 与小麦生育时期相错位, 这对该地区的小麦生产造成了很不利的影响^[8-9]。在温度与水分对小麦产量形成的综合影响方面, 有研究表明, 在水分条件较好时, 温度的升高能提高小麦叶片的光合效率, 但在低水分条件下, 温度的变化对小麦叶片光合速率的影响并不明显^[10], 其交互效应对小麦产量的研究目前还较少。

因此, 本研究运用 APSIM 模型, 针对未来可能出现的温度与降水变化情况, 对黄土高原定西市安定区的小麦产量进行模拟, 并分析温度与降水变化对小麦产量形成的交互效应, 为在未来气候条件下该地区小麦的合理生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 APSIM 模型简介

APSIM (Agricultural Production System Simulator) 是由隶属澳大利亚联邦科工组织和昆士兰州政府的农业生产系统组 (APSRU) 开发研制的一个农业生产系统模型^[11]。该模型对农业生产过程的模拟是以土壤过程为核心的, 并且可以模拟作物轮作系统。APSIM 主要由以下 4 个部分组成: 用于模拟农业生产中生物和物理过程的生物物理模块; 用于定义农业生产管理措施和控制模型过程的管理模块; 用于调用模拟过程中数据“进出”的输入输出模块和用于驱动模拟过程和控制其它模块的中心引擎。该模型可以根据用户需要连接不同的子模块到主引擎上, 用户也可以自行开发标准子模块, 从而满足不同的模拟需求。模型所需数据主要分为 4 个部分: 气候参数 (包括逐日太阳辐射量、逐日最高气温、逐日最低气温、逐日降水量、当地纬度、月平均气温和月均温变化等), 土壤属性参数 (包括土层深度、容重、萎蔫系数、最大持水量、饱和含水量、风干系数、土壤 N 含量和土壤 pH 值等), 作物属性参数 (包括作物的遗传特性参数和作物生长发育过程中的一些参数), 农田管理参数 (包括播深、播期、播量、施肥种类、施肥时期、施肥量、灌水时期和灌水量等)。本研究采用的模型已经经过李广等的校验, 模型相对均方根误差 (NRMSE) 为 4.85%, 有效性参数 (M_E) 为 0.908, 且已有很多研究者运用校正后的模型, 研究了日最高与最低温度、光照与 CO_2 以及光照与温度等对春小麦产量的影响机制^[12-15]。

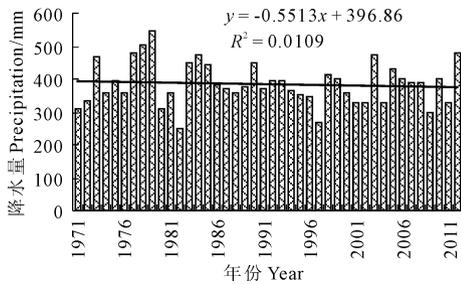
1.2 试验区概况

本研究区位于甘肃省定西市安定区李家堡镇, 属于陇中黄土高原, 为典型的雨养农业区, 一年一熟, 春小麦与豌豆轮作是该区的主要轮作方式。海拔为 2 000 m, 年均太阳辐射 592.9 $kJ \cdot cm^{-2}$, 年均气温 6.4°C, 年均 $\geq 0^\circ C$ 积温 2 933.5°C, 年均 $\geq 10^\circ C$ 积

温 2 239.1℃,无霜期 140 d,多年平均降雨量 391.0 mm,且降水量集中在 7—9 月份,占全年降水量的 60%以上,年蒸发量 1 531 mm。

1.3 模拟试验设计

本研究使用的基础数据为 1971—2012 年的定西市安定区逐日温度及降水数据。由图 1 可知 1971—2012 年安定区的年降水量呈减少趋势,降水量倾向率为 $-5.5 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$,平均气温呈升高趋势,气温倾向率为 $0.5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$;根据 IPCC 的第五次



评估报告,到本世纪末,在极端情况下,西北地区降水变化可达 10%~20%,气温变化可达 1.5℃~2.0℃。故本研究设计了降水与温度双因素耦合的模拟试验(表 1),其中降水以这 42 年的逐日降水为基准,在 $\pm 20\%$ 的变化范围内,以 5% 为间隔设置 9 个梯度;温度以这 42 年的逐日温度为基准,在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的变化范围内,以 0.5℃ 为间隔设置 9 个梯度。由于温度和降水的量级与量纲不同,故对变量采用“极差化”进行无量纲化编码处理^[15]。

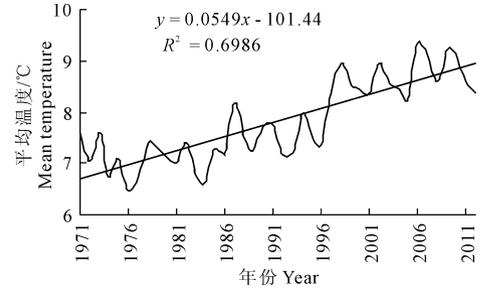


图 1 1971—2012 年安定区年降水量与年平均温度的变化

Fig.1 The changes of annual precipitation and annual mean temperature in An Ding District from 1971—2012

表 1 降水和温度的模拟试验设计

Table 1 Simulation design of precipitation and temperature

降水变化比例 Change of precipitation/%	编码 Code	年均降水量 Average annual precipitation/mm	温度变化量 Change of temperature	编码 Code	年均温度 Average temperature/°C
-20	0.000	308.0	-2.0	0.000	9.8
-15	0.125	327.3	-1.5	0.125	9.3
-10	0.250	346.5	-1.0	0.250	8.8
-5	0.375	365.8	-0.5	0.375	8.3
0	0.500	385.0	0.0	0.500	7.8
+5	0.625	404.3	+0.5	0.625	7.3
+10	0.750	423.5	+1.0	0.750	6.8
+15	0.875	442.8	+1.5	0.875	6.3
+20	1.000	462.0	+2.0	1.000	5.8

1.4 数据处理

将 APSIM 模拟各处理输出的小麦产量数据用 Excel 整理并做趋势图,用 SPSS 软件对数据进行方差、回归和通径分析。

2 结果与分析

2.1 春小麦产量对降水和温度变化的响应

在土壤属性、作物品种、管理方式等因素假定不变的情况下,运用 APSIM 模型对温度和降水二因素九水平交叉组合下的春小麦产量进行模拟。模拟结果表明(表 2),春小麦产量与降水和温度的变化有一定的关系,即当降水不变而温度增加时,春小麦产量逐渐下降;当温度不变而降水增加时,春小麦产量逐渐增加。

运用 SPSS 软件对春小麦产量进行方差分析,结果显示(表 3),降水和温度的 F 值分别为

2 905.222 和 200.088,不同降水和温度水平对春小麦产量的影响都极显著。通过在 5% 和 1% 显著性水平检验,进一步发现降水对春小麦产量的影响比温度更加显著。

2.2 春小麦产量和降水与温度变化的回归分析

以春小麦产量为因变量,降水变化和温度变化为自变量。用 SPSS 软件对其进行二次多项式逐步回归分析,得出回归方程:

$$Y = 1452.24 + 2693.88X_1 - 287.25X_2 - 200.38X_2^2 - 344.47X_1X_2 \quad (1)$$

式中, Y 为春小麦产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); X_1 为降水变化的编码值; X_2 为温度变化的编码值。回归方程的相关系数为 0.999, $F > F_{0.01}$,表明回归方程达到极显著水平。该方程能够反映春小麦产量变化与降水和温度变化之间的关系。

表 2 春小麦产量模拟值随降水和温度变化量的动态变化/(kg·hm⁻²)

Table 2 Dynamic changes of simulated spring wheat yield with the changes of precipitation and temperature

降水变化比例 Change of precipitation/%	温度变化量 Change of temperature/°C								
	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	+0.5	+1.0	+1.5	+2.0
-20	1499.14	1450.80	1402.96	1342.38	1301.53	1250.36	1194.45	1130.85	1071.65
-15	1762.41	1704.21	1645.77	1574.66	1500.78	1439.06	1376.19	1309.20	1247.95
-10	2124.47	2061.97	1988.44	1903.09	1804.92	1730.20	1663.88	1585.73	1513.54
-5	2443.12	2387.75	2349.25	2270.93	2190.89	2105.00	2010.65	1898.64	1808.45
0	2803.43	2749.00	2693.41	2627.73	2544.31	2468.71	2375.27	2263.76	2152.40
+5	3187.81	3108.73	3017.09	2965.61	2863.82	2780.36	2684.94	2587.97	2467.18
+10	3520.73	3463.72	3377.77	3285.37	3173.91	3055.23	2958.65	2863.46	2735.72
+15	3786.90	3751.02	3682.95	3608.22	3526.19	3354.92	3241.69	3113.11	2999.61
+20	4013.97	4003.10	3912.04	3868.70	3770.42	3650.10	3551.08	3418.81	3301.45

注:表中春小麦产量为 1971—2012 年各年产量的平均值。

Note: The yield of spring wheat in the table is the average value of 1971—2012 years.

表 3 春小麦产量模拟值与降水和温度的方差分析

Table 3 Variance analysis of simulated spring wheat yield and precipitation and temperature

变异来源 Variation source	方差 SS	自由度 df	均方差 MS	F	显著性 Sig.
降水 Precipitation	53762820.450	8	6720352.557	2905.222	0.000
温度 Temperature	3702752.426	8	462844.053	200.088	0.000
误差 Error	148044.662	64	2313.198		
总变异 Total variation	5.632×10 ⁸	81			

由于在回归过程中使用了无量纲化的编码,式中的偏回归系数已标准化,故其绝对值可以直接反映变量对产量的影响程度。降水(X_1)的偏回归系数为 2 693.88,为正效应;温度(X_2)的偏回归系数为 -287.25,为负效应。降水与温度对春小麦产量的影响为互逆过程,并且降水的正效应远远大于温度的负效应。

为了进一步明确各因素对春小麦产量的影响,对回归方程进行降维处理,即将两个因素中的任意一个因素固定为零水平,便得到各自因素对产量影响的子方程:

$$Y_{\text{降水}} = 1452.24 + 2693.88X_1 \quad (2)$$

$$Y_{\text{温度}} = 1452.24 - 287.25X_2 - 200.38X_2^2 \quad (3)$$

在本试验设计的各因素水平值范围内,将编码值代入方程(2)和方程(3)可得出各因素的产量效应关系图(图 2),从方程及其对应的关系图可知,降水变化比例对春小麦产量呈递增的线性关系;温度变化值对春小麦产量呈开口向下的二次曲线关系,在试验设计范围内,呈递减趋势。

2.3 降水与温度对春小麦产量的互作效应分析

运用 SPSS 软件进行途径分析,以春小麦产量(Y)为因变量,降水(X_1)和温度(X_2)为自变量。途径分析结果表明(图 3), $X_1 \rightarrow Y$ 的直接途径系数为

1.031, $X_1 \rightarrow X_1 \times X_2 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为 -0.066,说明温度条件不变的情况下,增加降水会使得春小麦产量提高。根据模拟结果,温度不变,降水每增加 5%,春小麦产量最大增幅为 21.38%,最小增幅为 6.93%,平均增幅为 14.31%。

$X_2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数为 -0.110,说明降水条件不变的情况下,温度升高会造成春小麦减产, $X_2 \times X_2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数为 -0.080, $X_2 \rightarrow X_1 \times X_2 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为 -0.066,这进一步说明了春小麦产量对温度升高呈减产效应。根据模拟结果,降水不变,温度每升高 0.5°C,春小麦产量最大降幅为 4.92%,最小降幅为 1.94%,平均降幅为 3.24%。

$X_1 \times X_2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数为 -0.102,这说明降水与温度对春小麦产量的交互作用为负,即降水与温度按试验设计梯度同时增加时,两者对春小麦产量的影响互相制约, $X_1 \times X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为 0.663, $X_1 \times X_2 \rightarrow X_2 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为 -0.071,表明由于降水对产量的正效应远远大于温度对产量的负效应,所以在两者按试验设计梯度同时增加时,最终表现为春小麦增产。根据模拟结果,降水增加 5%,温度升高 0.5°C,春小麦最大增产 17.00%,最小增产 3.51%,平均增产 10.29%。

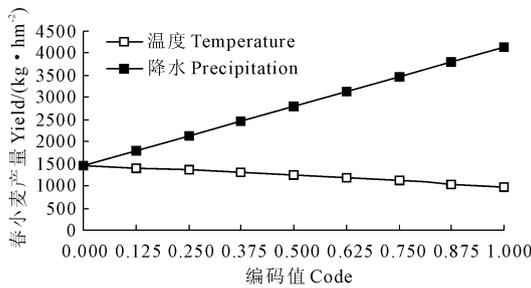


图 2 降水与温度单因素效应

Fig.2 The single factor effect of precipitation and temperature on spring wheat yield

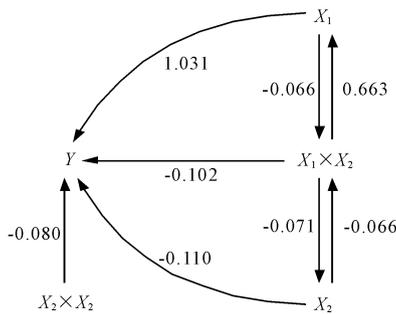


图 3 降水与温度对春小麦产量的通径分析

Fig.3 Path analysis of spring wheat yield to rain and temperature

3 结论

1) 当温度不变时,降水的增加对春小麦产量的影响为正效应。产量随降水的增加在试验设计范围内呈线性正相关。温度不变,降水每增加 5%,春小麦产量最大增幅为 21.38%,最小增幅为 6.93%,平均增幅为 14.31%。

2) 当降水不变时,温度的升高对春小麦产量的影响为负效应。产量随温度的升高呈二次抛物线递减变化。降水不变,温度每升高 0.5℃,春小麦产量最大降幅为 4.92%,最小降幅为 1.94%,平均降幅为 3.24%。

3) 降水对产量的正效应远远大于温度对产量的负效应,所以两者在按试验设计梯度同时增加时,最终表现为春小麦增产。但由于温度与降水之间存在负交互效应,即温度的升高减弱了降水增加带来的增产效果,所以当降水增加 5%,温度升高 0.5℃时,春小麦最大增产 17.00%,最小增产 3.51%,平均增产 10.29%。

4 讨论

根据 IPCC 第五次报告的预测,未来全球气温将呈现上升趋势,并且降水格局在时间和空间上差

异将进一步增加^[1-2]。故本文对将可能出现的温度与降水变化下的黄土高原陇中地区的春小麦产量变化进行了模拟研究。结果表明,在本试验设计的范围内,温度的升高会造成春小麦减产,降水增加则具有良好的增产效果,温度与降水之间存在负的交互效应。有许多研究认为,温度升高会造成春小麦早熟,缩短灌浆时间,从而导致产量下降^[16-18],这与本研究结果一致;且由于研究区降水量偏少,高温会增加农田土壤水分的蒸发,从而加剧旱情^[19];温度是光合作用的重要影响因素之一,适宜的温度是保持高光合效率的必要条件,较高的温度常会引起植物的“光合午休”现象,从而对生物量的生产起到消极作用^[20];本研究显示,春小麦产量与温度是呈二次曲线关系,且在试验设计范围内随着温度的升高呈递减趋势,所以一定范围内的降温会增加小麦产量。降水是该研究区土壤水分的唯一来源,降水增加必然改善土壤水分条件,杜瑞英等研究认为,当土壤水分含量低于小麦最适水分条件时,土壤水分的增加不但会同步提高光合速率和水分利用效率,而且会增加光合面积,从而增加小麦产量^[5,21];良好的土壤水分对小麦的蒸腾作用也有积极的意义,不但能促进物质的运输,还能适当降低叶片温度^[22],这对增加小麦产量也具有积极作用。对于温度与降水的交互效应,张凯等^[23]研究认为,在增加降水的情况下,增温对春小麦产量仍有不利影响;柯世省等通过对夏腊梅的研究,赵琴等对枸杞的研究,都认为温度增加会降低由于降水增加引起的光合速率上升的速度^[24-25];其原因可能是因为温度升高增加了土壤水分的无效蒸发,导致降水对小麦的增产作用有所减弱。

本研究采用的 APSIM 模型能够较好地模拟和表达作物生长过程与气候因子变化之间的关系,其适用性已经被广泛地验证,很多研究者已经运用此模型对气候变化与农业生产、管理措施与农业生产等各方面进行了研究。本研究只模拟了不同降水与温度变化对春小麦生产的影响,所以假定光照、大气、管理措施和春小麦品种参数等都是不变的。另外,此模型对病虫害以及极端气候条件的模拟还不成熟,这可能会对研究结果产生一定的影响。因此对气候变化中各因子的变化情况对春小麦生产造成的综合影响进行研究,将会更加有效地对未来黄土高原地区的春小麦生产提供理论支持。

- 望[J]. 甘肃农业科技, 1997(12): 31-32.
- [4] 黄占斌, 万会娥, 邓西平, 等. 保水剂在改良土壤和作物抗旱节水中的效应[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 52-55.
- [5] 侯贤清, 李荣, 何文寿, 等. 保水剂施用量对旱作土壤理化性质及马铃薯生长的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 325-330.
- [6] 黄占斌, 张国栋, 李秧秧, 等. 保水剂特性测定及其在农业中的应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 22-26.
- [7] 汪立刚, 武继承, 王林娟. 保水剂有效使用用的土壤水分条件及对小麦的增产效果[J]. 土壤, 2003, 35(1): 80-82.
- [8] 李开扬, 任天瑞. 高吸水性树脂在农业中的应用[J]. 过程工程学报, 2002, 18(1): 91-96.
- [9] 杜太生, 康绍忠, 魏华. 保水剂在节水农业中的应用研究现状与展望[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(5): 317-320.
- [10] 钟秋瓚, 郭伟, 肖先仪, 等. 保水剂对烤烟生长及产量的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(19): 18-22.
- [11] 左广玲, 叶红勇, 杜朝军, 等. 大豆秸秆基保水剂对南阳烟田土壤物理性状及烟叶生长的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 15-19.
- [12] 侯贤清, 李荣, 何文寿. 保水剂施用量对旱作马铃薯产量及养分吸收的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(10): 56-63.
- [13] 杨永辉, 武继承, 吴普特, 等. 保水剂对小麦生长及生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 133-137.
- [14] 吴湘琳, 王新勇, 葛春辉, 等. 在干旱条件下保水剂保水效果及其对棉花产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(27): 198-201.
- [15] 孙渭, 陈志强, 马英明, 等. 烤烟新品种秦烟 96 的选育及其特征特性[J]. 中国烟草科学, 2012, (02): 28-33.
- [16] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 34-35, 56-58, 81-83, 106-128.
- [17] 杜瑞华, 周松明. 连续流动分析法在烟草分析中的应用[J]. 中国测试技术, 2007(3): 76-78.
- [18] 王瑞新, 韩富根, 杨素勤, 等. 烟草化学品质分析法[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1990.
- [19] 史宏志, 邸慧慧, 赵晓丹, 等. 豫中烤烟烟碱和总氮含量与中性香气成分含量的关系[J]. 作物学报, 2009, 35(7): 1299-1305.
- [20] 耿伟. 不同覆盖方式对洛阳植烟土壤理化性状及烤烟品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010.
- [21] 时向东, 耿伟, 李钠钾, 焦枫, 智磊. 不同覆盖方式下烤烟根际土壤养分含量与酶活性的动态变化[J]. 中国烟草学报, 2010, 16(05): 50-54.
- [22] 侯贤清, 李荣, 何文寿, 等. 2 种保水剂对旱作土壤物理性状及马铃薯产量的影响比较[J]. 核农学报, 2015, 29(12): 2410-2417.
- [23] 郭清源, 丁松爽, 刘国顺, 等. 钾用量与灌溉量对不同土层钾素及烟叶钾含量的积累效应[J]. 中国烟草科学, 2015, 36(1): 61-67.
- [24] 周正红, 高孔荣, 张水华. 烟草中化学成分对卷烟色香味品质的影响及其研究进展[J]. 烟草科技, 1997(2): 22-25.

(上接第 129 页)

参考文献:

- [1] 苏布达, 王腾飞, 尹宜舟. IPCC 第五次评估报告关于气候变化影响的检测和归因主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(3): 203-207.
- [2] 董思言, 高学杰. 长期气候变化——IPCC 第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56-59.
- [3] 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.
- [4] 李永庚, 蒋高明, 杨景成. 温度对小麦碳氮代谢、产量及品质影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 164-169.
- [5] 姜东燕, 于振文. 土壤水分对小麦产量和品质的影响[J]. 核农学报, 2007, 21(6): 641-645.
- [6] 李卫民, 张佳宝, 朱安宁. 空气温湿度对小麦光合作用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 90-92.
- [7] 高素华, 郭建平, 赵四强, 等. “高温”对我国小麦生长发育及产量的影响[J]. 大气科学, 1996, 20(5): 599-605.
- [8] 李广, 黄高宝. 基于 APSIM 模型的降水量分配对旱地小麦和豌豆产量影响的研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 342-347.
- [9] 张立伟, 延军平, 李旭谱, 等. 黄土高原地区冬、春小麦对气候变化的适应度评价[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 214-223.
- [10] 廖建雄, 王根轩. 干旱、CO₂ 和温度升高对春小麦光合、蒸发蒸腾及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 547-550.
- [11] Asseng S, Keating BA, et al. Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia[J]. Field Crops Res, 1998, 57(2): 163-179.
- [12] 李广, 黄高宝, 王琦, 等. 基于 APSIM 模型的旱地小麦和豌豆水肥协同效应分析[J]. 草业学报, 2011, 20(5): 151-159.
- [13] 董莉霞, 李广, 刘强, 等. 旱地春小麦产量对逐日最低温度和最高温度变化响应的模拟与分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 1016-1022.
- [14] 杨楠, 李广. 免耕旱地小麦产量的光温效应[J]. 草业科学, 2014, 31(4): 705-710.
- [15] 雷娟娟, 闫丽娟, 李广, 等. 基于 APSIM 模型光照与 CO₂ 对小麦的影响机制[J]. 草业科学, 2015, 32(8): 1310-1316.
- [16] 郭叶航. 春小麦重要农艺性状响应高温胁迫的相关性分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [17] 房世波, 谭凯炎, 任三学, 等. 气候变暖对冬小麦生长和产量影响的大田实验研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(7): 1069-1075.
- [18] 邓振铺, 张强, 徐金芳, 等. 全球气候变暖对甘肃农作物生长影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1070-1078.
- [19] 张云兰, 王龙昌, 邹聪明, 等. 高温伏旱区旱地农作系统水分供需平衡特征与生态适应性研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 95-100, 105.
- [20] 牛立元, 茹振钢. 小麦旗叶光合生产力环境限制因子研究[J]. 华北农学报, 2004, 19(2): 49-52.
- [21] 杜瑞英, 杨武德, 许吟隆, 等. 气候变化对我国干旱/半干旱区小麦生产影响的模拟研究[J]. 生态科学, 2006, 25(1): 34-37.
- [22] 张红卫, 陈怀亮, 杨志清, 等. 土壤水分变化对冬小麦蒸腾速率的影响[J]. 河南农业科学, 2010, 39(7): 10-14.
- [23] 张凯, 王润元, 冯起, 等. 模拟增温和降水变化对半干旱区春小麦生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 161-170.
- [24] 柯世省, 金则新. 水分胁迫和温度对夏蜡梅叶片气体交换和叶绿素荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 43-49.
- [25] 赵琴, 潘静, 曹兵, 等. 气温升高与干旱胁迫对宁夏枸杞光合作用的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6016-6022.