

不同耕作措施旱地春小麦产量对温度变化的响应

董莉霞¹,李 广^{1,2},闫丽娟³,刘 强¹,燕振刚¹,罗珠珠⁴

(1.甘肃农业大学信息科学技术学院,甘肃 兰州 730070;
2.甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃 兰州 730070;
3.甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070; 4.甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为了探析温度变化对不同耕作措施春小麦产量的影响,利用 APSIM 模型对 2 因素 9 水平 3 种耕作措施下的春小麦产量进行了模拟,选择日最低温度和最高温度作为自变量因子对产量效应进行分析,并对 3 种耕作措施条件下最低温度和最高温度的互作效应进行通径分析。结果表明:不同耕作措施条件下,春小麦产量随最低温度升高呈二次抛物线上升型变化,会出现报酬递减,且传统耕作+秸秆还田和免耕覆盖的增产效应大于免耕耕作措施;传统耕作+秸秆还田和免耕耕作措施下,产量随最高温度升高呈二次抛物线递减型,并呈叠加递减,而免耕覆盖耕作措施下产量随最高温度升高呈负相关。3 种耕作措施下,最低温度和最高温度之间还存在正的协同效应,免耕覆盖耕作措施相比其它两种耕作措施,具有更好的协同促进效应。

关键词:耕作措施;最低温度;最高温度;小麦产量
中图分类号: S311 **文献标志码:** A

Reponses of spring wheat yield to temperature variations with different tillage measures in dryland

DONG Li-xia¹, LI Guang^{1,2}, YAN Li-Juan³, LIU Qiang¹, YAN Zhen-gang¹, LUO Zhu-zhu⁴

(1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
4. College of Resource and Environment Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to analyze the influence of the temperature variations on the yield of spring wheat with different cultivation measures, the spring wheat yields resulted from cultivation measures employing two-factor, nine-level and three-type were simulated by the APSIM model. Yielding-effect was analyzed by choosing the lowest and the highest day temperatures as the independent variable factors. Interacting effects between the lowest and the highest temperatures under three kinds of tillage measures were also investigated by a path analysis. It turned out that under the conditions of different tillage measures with the increase of the lowest temperature, the yield of spring wheat changed in a quadratic parabola rising pattern, displaying a decrease in rewards. The cultivation measure using conventional tillage, straw returning and no-tillage with mulch played a more important role in yield improvement than no-tillage cultivation. Under the condition of traditional tillage, straw returning and no-till farming measures, the yield decreased in a quadratic parabola type as highest temperature rose, showing a superposition of diminishing. Yield was negatively correlated with the highest temperature while the production was under covered no-till farming measures. Within the three kinds of cultivation measures, there was a positive synergy between the lowest temperature and highest temperature, and cultivation measure using no-tillage with mulch had a better synergistic promoting effect than the other two kinds.

Keywords: cultivation measures; the lowest temperature; the highest temperature; wheat yield

气候变化是近 100 年来最显著的地球环境变化,农业生产受其影响明显而且广泛^[1-4]。温度是

收稿日期:2014-05-08
基金项目:国家自然科学基金项目(31060178);干旱生境作物学重点实验室开放基金(GSCS-2010-11);甘肃省自然科学基金(1308RJZA272);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
作者简介:董莉霞(1981—),女,讲师,硕士研究生,研究方向为信息技术研究。E-mail: donglx@gsau.edu.cn。
通信作者:李 广(1971—),男,博士,教授,主要从事农业信息技术等方面的研究。E-mail: lig@gsau.edu.cn。

作物生长发育的关键气象因素,温度变化已成为气候变化的主要特征之一。小麦作为世界上大多数国家的基本粮食作物,也是我国三大主要粮食作物之一,对于维护国家粮食安全有着重要意义^[5]。中国西部的陇中黄土高原,以干旱为主要气候特征,小麦对温度变化的响应非常敏感,且适应能力非常脆弱。为了积极应对和主动适应温度变化对陇中黄土高原地区小麦生产的影响,需要准确认识温度变化对该地区小麦生产的影响规律,并在此基础上寻求趋利避害的科学对策,这对促进该地区农业生产活动具有明显的现实意义。

在温度变化对作物影响研究方面,国内外依据平均温度变化进行了许多统计或模型研究^[6-10]。邓振镛等研究表明:温度升高导致春小麦生长期缩短,干物质积累和产量下降^[11-14]。另外,陈素英等研究认为温度升高使麦田蒸发量增大,造成作物水分亏缺,从而引起春小麦的减产^[15-16]。只有少数观测统计研究考虑了昼夜增温的差异^[17-18],对于不同耕作措施条件下,温度变化对春小麦产量的影

响的研究较少。本试验以黄土丘陵区旱地春小麦为研究对象,运用 APSIM 模型评估了不同耕作措施下春小麦产量对最低温度和最高温度变化的响应和互作效应,为不同耕作措施小麦生产如何应对温度变化提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设在甘肃省定西市李家堡镇的甘肃农业大学旱农试验站,该试验站位于甘肃省中部偏南,属中温带半干旱区,无灌溉条件,是我国半干旱雨养农业的典型地区。海拔 2 000 m,年均太阳辐射 592.9 kJ·cm⁻²,日照时数 2 476.6 h,年均气温 6.4℃,年均≥0℃积温 2 933.5℃,年均≥10℃积温 2 239.1℃,无霜期 140 d,年蒸发量 1 531 mm,干燥度 2.53,80%保证率的降水量为 365 mm,试验地平坦无起伏,土壤为黄绵土,土壤容重 1.17 g·cm⁻³,pH 值 8.36,土壤有机质 12.01 g·kg⁻¹,全氮 0.76 g·kg⁻¹,全磷 1.77 g·kg⁻¹。

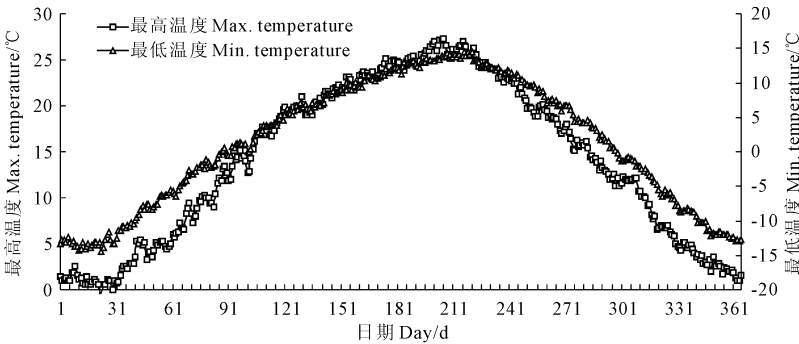


图 1 1970—2011 年研究区逐日最低温度和最高温度平均值

Fig.1 Mean temperatures of the daily minimaland maximaltemperatures from 1970 to 2011 in area of this study

1.2 模型简介

APSIM 模型是一种农业生产系统模型。该模型能够模拟作物产量对不同气候和管理条件的反应,可以实现不同年型动态决策和气候应变管理,还可以为新品种的应变管理提供参考^[19-20]。该模型对极端环境变化条件下预测产量变化和经济风险分析具有充分的敏感性,特别适用于评价农作系统生产潜力及耕作措施的经济效益受气候波动和气候变化的影响效果^[21]。该模型在澳大利亚降水变化率大的红壤、南澳州的胀缩土壤、西澳州的砂粘土和粘土、菲律宾的粘红壤以及欧洲大陆荷兰的粉砂壤土和粉砂粘土等土壤中均有应用^[22]。

1.3 模型参数

1.3.1 气候参数 气候属性模块是 APSIM 模型应用的基础。模型运行所需的最基本(最少)气象要素

包括:逐日太阳辐射量(MJ·m⁻²)、逐日最高气温(℃)、逐日最低气温(℃)和逐日降水量(mm),当地的纬度、月平均气温和月均温变化等参数项。本研究主要改变的是气候模块中的逐日最低气温(℃)和逐日最高气温(℃)两个参数。

1.3.2 土壤属性参数 在一定的气候条件下,土壤是影响作物生长的重要因素。该模块包含的参数有土层深度(mm)、容重(g·cm⁻³)、萎蔫系数(%)、最大持水量(%)、饱和含水量(%)、风干系数(%)等。

1.4 分析和检验方法

1.4.1 模型检验 运用 APSIM 模型模拟不同气象条件类型的小麦产量,根据实测产量数据和模拟产量数据进行模型的有效性检验,数据点分布在-15%~15%的误差线内,产量模拟值和实测值呈显著正相关,相关系数 R 为 0.9621*,归一化均方根

误差 $NRMSE$ 为 4.81%,模型有效参数 M_E 为0.999,表明用此模型模拟小麦产量有较高的准确性^[23-25]。

1.4.2 试验设计 试验在不同气象条件类型的基础上进行设计。设计 3 种耕作措施:传统耕作 + 秸秆还田(耕作方式同传统耕作,但在第一次耕作时将前作秸秆翻入土,秸秆用量平均每年为 4 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,编码:TS)、免耕(全年不耕作,播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种,收获后用 2,4-D 和草甘磷除草,编码:NT)、免耕覆盖(耕作、播种、除草方法同免耕,收获脱粒后将全部前茬作物秸秆切碎(5 cm 左右)后,均匀覆盖在原小区,秸秆用量平

均每年为 4 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,编码:NTS)。
ASPIIM 模型运行所需的温度要素是由逐日最低温度和逐日最高温度两个变量组成,为此设计了 2 因素 9 水平交叉组合模拟实验(表 1)。2 个因素分别为逐日最低温度和最高温度,9 个水平分别为逐日最低温度和最高温度在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,以 0.25 $^{\circ}\text{C}$ 为温度间隔变化时的 9 种情况。在 1970—2011 年每年逐日最低温度和最高温度原始数据的基础上,每升高、降低 0.25 $^{\circ}\text{C}$ 作为一个处理,然后运用 APSIM 模型模拟 1970—2011 年的小麦产量,并对 42 年小麦产量求平均值,作为该处理的小麦产量,以此类推分别模拟各种处理 42 年的小麦产量并求平均值。

表 1 日最低温度和最高温度模拟实验设计
Table 1 Simulation design of the minimaland the maximaltemperatures

因素 Factor	水平 Level								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
最低温度/ $^{\circ}\text{C}$ Minimal temperature	- 1	- 0.75	- 0.5	- 0.25	0	0.25	0.5	0.75	1
最高温度/ $^{\circ}\text{C}$ Maximal temperature	- 1	- 0.75	- 0.5	- 0.25	0	0.25	0.5	0.75	1

2 结果与分析

2.1 温度变化对不同耕作措施旱地春小麦产量的影响

在土壤类型、作物品种、管理和降水等要素完全相同的情况下,运用 APSIM 模型模拟 2 因素 9 水平 3 种耕作措施的春小麦产量。并对其进行简单的分析和描述。

通过分析,可以看出最低温度和最高温度单因素与小麦产量存在一定相关性,同时也存在两因素的互作效应。为此,选择最低温度(X_1)和最高温度(X_2)作为自变量因子,产量(Y)作为因变量,用 DPS 软件进行正交组合,通过二次多项式逐步回归设计,建立不同耕作措施条件下春小麦产量与最低温度和最高温度两因素的二次回归方程(表 2)。

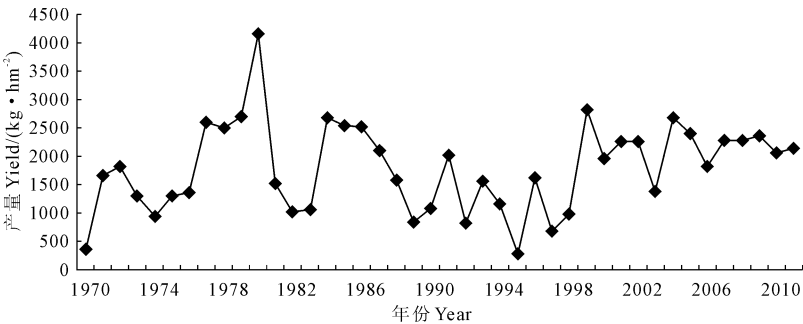


图 2 春小麦历年产量实际值
Fig.2 Historical yieldsof spring wheat

表 2 产量与各因素的回归模型
Table 2 Regression models of yields and factors

耕作方式 Tillage type	回归方程 Regression model	R	F 值
TS	$Y = 2275.51 + 139.33X_1 - 263.08X_2 - 14.29X_1^2 - 1.92X_2^2 + 6.09X_1X_2$	0.9757	297.966
NT	$Y = 1824.09 + 119.16X_1 - 192.05X_2 - 17.75X_1^2 - 3X_2^2 + 5.25X_1X_2$	0.9779	328.848
NTS	$Y = 2279.56 + 138.05X_1 - 263.11X_2 - 13.29X_1^2 + 7.22X_1X_2$	0.9748	362.923

对回归方程的显著性水平进行检验, $F > F_{0.05}$, 表明方程回归达到了显著水平。通过检验说明回归方程的产量(Y)与最低温度(X_1)和最高温度(X_2)之间有很好的数量化关系, 可以进行效应分析与预测。

3 种耕作措施的最高温度(X_1)一次项偏回归系数均为正值, 最低温度(X_2)一次项偏回归系数均为负值, 表明最低温度的直接效应为正效应, 而最高温度的直接效应为负效应。在 TS 和 NTS 下, 最低温度的一次项偏回归系数明显大于 NT 下最低温度的一次项偏回归系数, 表明随着最低温度的升高, TS 和 NTS 耕作措施下的春小麦产量的增加幅度要大于 NT 耕作措施春小麦产量的增加幅度, 因为秸秆覆盖措施使作物的残茬留在土壤表面, 从而能减少土壤水分的蒸发, 蓄水保墒的作用得到了显著改善, 提高了春小麦产量。TS 和 NTS 2 种耕作措施更有利于小麦产量的增加。3 种耕作措施的一次项偏回归系数绝对值: 最高温度(X_2) > 最低温度(X_1), 表明最高温度的减产效应大于最低温度的增产效应。

TS 和 NT 耕作措施下, 最低温度(X_1)和最高温度(X_2)的二次项偏回归系数为负值, 当最低温度不变时, 小麦产量随最高温度升高呈下降趋势, 且最高温度升高幅度越大, 小麦产量减产幅度越大; 当最高温度不变时, 小麦产量随最低温度升高呈增加趋势, 但连续提高最低温度, 小麦产量在达到某一峰值后, 产量将随着最低温度的升高会出现报酬递减。NTS 耕作措施下, 春小麦产量与最低温度呈二次抛物线上升趋势, 与最高温度的变化呈线性负相关, 春小麦产量随最高温度的升高而线性下降。

为了进一步分析单个因素的产量效应, 对回归模型进行降维处理, 即将两因素中任意一个因素固定为零水平, 则可得其中一因素对产量的一元二次子模型(表 3)。

在试验设计的各因素水平值范围内将变量代入一元二次子模型, 可实现各因子的产量效应关系(图 3)。当最高温度不变时, 最低温度每增加 0.25°C , 不同措施下的春小麦产量均呈二次抛物线上升变化; 当最低温度不变时, 最高温度每增加 0.25°C , TS 和 NT 耕作措施下的春小麦产量呈二次抛物线下降变化, 而 NTS 耕作措施下春小麦产量呈线性递减。不论是最低温度还是最高温度, TS 和 NTS 的变化效应优于 NT。这是由于秸秆还田和覆盖处理对太阳辐射的吸收、转化和热量传导产生明显的影响, 降低了土壤温度的升降幅度和速率, 同时也减少了人为活动对土壤环境的干扰, 有效抑制了土壤湿度的改变, 减缓了土壤有机质的分解速率, 有效地保持了土壤的养分, 提高了作物产量^[26]。

表 3 一元二次子模型		
Table 3 The sub-model of one-place quadratic		
耕作方式 Tillage type	因素 Factors	一元二次子模型 The sub-model of one-place quadratic
TS	最低温度 Minimum temperature	$Y = 2275.51 + 139.33X_1 - 14.29X_1^2$
	最高温度 Maximum temperature	$Y = 2275.51 - 263.08X_2 - 1.92X_2^2$
NT	最低温度 Minimum temperature	$Y = 1824.09 + 119.16X_1 - 17.75X_1^2$
	最高温度 Maximum temperature	$Y = 1824.09 - 192.05X_2 - 3X_2^2$
NTS	最低温度 Minimum temperature	$Y = 2279.56 + 138.05X_1 - 13.29X_1^2$
	最高温度 Maximum temperature	$Y = 2279.56 - 263.11X_2$

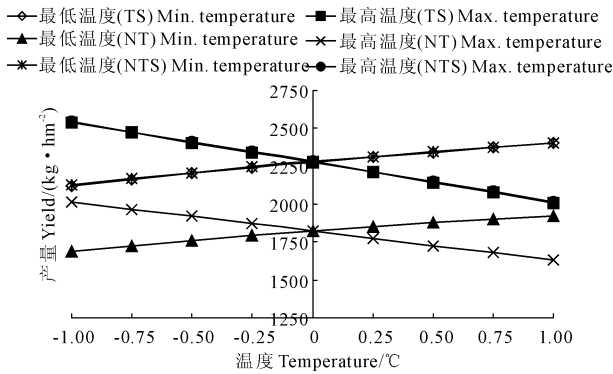


图 3 最低温度和最高温度对小麦产量的单因素效应
Fig.3 Single effects of minimal and maximal temperatures on wheat yield

2.2 不同耕作措施下最低温度和最高温度对春小麦产量的互作效应分析

以春小麦产量(Y)为因变量, 最低温度(X_1)和最高温度(X_2)为自变量进行途径分析(图 4~图 6)。TS 耕作措施下, X_2 (最高温度) $\rightarrow Y$ (产量)和 $X_2 * X_2$ (最高温度²) $\rightarrow Y$ (产量)的直接途径系数分别为 -0.8619 和 -0.0036 ; X_1 (最低温度) $\rightarrow Y$ (产量)和 $X_1 * X_1$ (最低温度²) $\rightarrow Y$ (产量)的直接途径系数分别为 0.4565 和 -0.0265 。由途径系数表明当最高温度不变, 最低温度升高时, 春小麦产量缓慢增加; 最低温度不变, 最高温度升高时, 春小麦产量急剧下降。和传统耕作措施温度未发生变化时春小麦产量的平均值相比, 最高温度不变, 最低温度每升高 0.25°C , 平均增产率为 26.2% 。

NT 耕作措施下, X_2 (最高温度) $\rightarrow Y$ (产量) 和 $X_2 * X_2$ (最高温度²) $\rightarrow Y$ (产量) 的直接通路系数分别为 -0.8301 和 -0.0074 ; X_1 (最低温度) $\rightarrow Y$ (产量) 和 $X_1 * X_1$ (最低温度²) $\rightarrow Y$ (产量) 的直接通路系数为 0.515 和 -0.0435 。以传统耕作措施温度未发生变化时的春小麦产量平均值为基准值, 最高温度保持不变, 最低温度每升高 0.25°C , 平均增产率为 4.38% 。

NTS 耕作措施下, X_2 (最高温度) $\rightarrow Y$ (产量) 直接通路系数分别为 -0.8628 ; X_1 (最低温度) $\rightarrow Y$ (产量) 和 $X_1 * X_1 \rightarrow Y$ (产量) 的直接通路系数分别为 0.4527 和 -0.0247 。以传统耕作措施温度未发生变化时春小麦产量的平均值为基准值, 最高温度不变, 最低温度每升高 0.25°C , 平均增产率可高达 26.5% 。秸秆覆盖可以使植物根系更好地发育, 极大地改善植物生理代谢功能, 并且为植物的生长提供了有利的土壤条件。

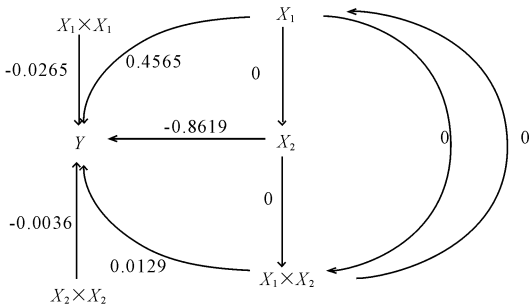


图 4 TS 下最低温度 (X_1) 和最高温度 (X_2) 对春小麦产量 (Y) 的通路分析

Fig.4 Path analysis of spring wheat yield (Y) to daily minimal temperature (X_1) and daily maximal temperature (X_2) in TS

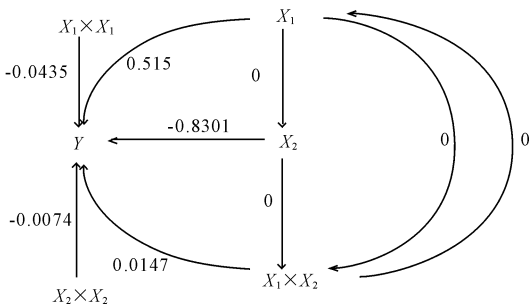


图 5 NT 下最低温度 (X_1) 和最高温度 (X_2) 对春小麦产量 (Y) 的通路分析

Fig.5 Path analysis of spring wheat yield (Y) to daily minimal temperature (X_1) and daily maximal temperature (X_2) in NT

由此可见, 传统耕作 + 秸秆还田 (TS) 和免耕覆盖 (NTS) 两种耕作措施下, 最低温度对小麦的增产效应明显大于免耕 (NT) 耕作措施。免耕覆盖 (NTS) 耕作措施下春小麦产量的增产效应略优于传统耕作

+ 秸秆还田 (TS) 耕作措施下春小麦产量的增产效应。传统耕作 + 秸秆还田 (TS) 和免耕覆盖 (NTS) 耕作措施的适应性较好, 可以提高作物的产量, 节约劳动力, 还可以提高经济效益。

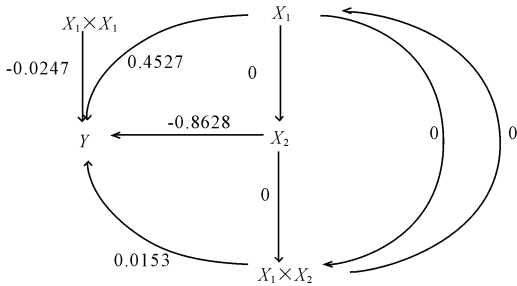


图 6 NTS 下最低温度 (X_1) 和最高温度 (X_2) 对春小麦产量 (Y) 的通路分析

Fig.6 Path analysis of spring wheat yield (Y) to daily minimal temperature (X_1) and daily maximal temperature (X_2) in NTS

3 种耕作措施下, $X_1 * X_2$ 的直接通路系数分别为 0.0129 、 0.0147 和 0.0153 , 最低温度和最高温度之间还有正交互效应, 即 X_1 、 X_2 对小麦产量的交互作用, 表明当一个因素水平提高时, 有助于另一个因子效应的发挥。

3 结论与讨论

为了分析温度变化对不同耕作措施春小麦产量的影响, 运用 APSIM 模型对 2 因素 9 水平 3 种耕作措施下的春小麦产量进行了模拟, 选择最低温度和最高温度作为自变量因子对产量进行效应分析, 主要结论如下:

- 1) 3 种耕作措施下, 小麦产量随最低温度的升高均呈二次抛物线上型变化。传统耕作 + 秸秆还田 (TS) 和免耕覆盖 (NTS) 2 种耕作措施, 其最低温度对小麦的增产效应大于免耕 (NT) 耕作措施。
- 2) 传统耕作 + 秸秆还田 (TS) 和免耕 (NT) 耕作措施下, 小麦产量随最高温度升高呈二次抛物线下型变化, 并呈叠加递减, 而免耕覆盖 (NTS) 耕作措施下产量随最高温度升高呈线性负相关。
- 3) 最低温度和最高温度之间存在正的协同效应, 但最低温度升高引起的小麦增产效应不能完全抵消最高温度升高所导致的减产效应。而免耕覆盖 (NTS) 耕作条件下最低和最高温对小麦产量形成具有更好的协同促进效应。

本研究基于 APSIM 模型模拟日最低温度和最高温度变化对春小麦产量的影响, 春小麦产量随日最高温度升高而降低, 这与王润元^[27]等的研究结论一致。而春小麦产量随最低温度的升高而增加, 不同的研究方法和试验对象, 结论不完全一致。Lobell

等用 GERES 模型模拟认为最低气温的升高可以提高作物的收获指数,最低温度升高,日较差减少,可以减少霜冻等自然灾害的发生,从而可以提高春小麦产量。使作物的产量增加^[17]。而房世波^[28]等利用红外辐射器作为增温装置,模拟大田条件下的夜间增温环境,认为春季夜间的增温,导致冬小麦减产。因此关于最低温度变化对春小麦产量的影响,因研究区域所处的环境不同,作物品种、试验条件和人为投入等各种因素不同,结论尚不一致,有待于进一步研究。

小麦产量随最高温度的升高而减产,但不同耕作措施对日最高温度的减产效应不同。传统耕作+秸秆还田(TS)和免耕覆盖(NTS)可以缓减日最高温度升高带来的负效应。温度的减产效应主要是由于温度的升高缩短了小麦的生育期、同时由于高温会使麦田的蒸发量增大,造成了春小麦水分的亏缺。而传统耕作+秸秆还田(TS)和免耕覆盖(NTS)可以平衡和改善耕层土壤温度状况,在土壤温度较低时具有保温作用,在土壤温度较高时具有降温作用,同时由于两种秸秆覆盖处理措施可以抑制地表蒸发,进而可以缓减小麦减产。同时还可以有效地防止表土板结,使土壤通透性变好,肥力条件得到极大改善。因此秸秆覆盖处理措施能稳定土壤的温度变化,合理地调节农田小气候^[29]。研究区位于我国西北黄土丘陵区,属于传统旱作农业区,该地区年降水量小,蒸发强,干旱频发。传统耕作+秸秆还田和免耕覆盖两种秸秆覆盖处理措施可以极大地改善作物的生长环境,有利于春小麦产量的提高,可以更好地应对温度变化。

参考文献:

- [1] 林而达.气候变化的危险水平与可持续发展的能力建设[J].气候变化研究进展,2005,1(2):76-79.
- [2] 缪启龙,丁园圆,王勇.气候变暖对中国亚热带北界位置的影响[J].地理研究,2009,28(3):634-642.
- [3] 巢清尘,胡国权,赵宗慈.气候变化的风险、挑战与决策[J].气候变化研究进展,2009,5(4):246-247.
- [4] 李爽,王羊,李双成.中国近30年气候要素时空变化特征[J].地理研究,2009,28(6):1593-1605.
- [5] 张宇,王石立,王馥棠,等.气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究[J].应用气象学报,2000,11(3):264-270.
- [6] Wolf J, vanOijen M, kempenaar C. Analysis of the experimental variability in wheat responses to elevated CO₂ and temperature[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 93:227-247.
- [7] Baigorria G A, Jones J W, o'Brien J J. potential predictability of crop yield using an ensemble climate forecast by a regional circulation model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008,14(8):1353-1361.
- [8] 潘洁,戴廷波,姜东,等.基于气候因子效应的冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型[J].中国农业科学,2005,38(4):684-691.
- [9] 刘颖杰,林而达.气候变暖对中国不同地区农业的影响[J].气候变化研究进展,2007,3(4):229-233.
- [10] 居辉,熊伟,许吟龙,等.气候变化对我国小麦产量的影响[J].作物学报,2005,31(10):1340-1343.
- [11] 邓振镛,王强,张强,等.中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J].生态学报,2010,30(22):6278-6288.
- [12] Polle H W. Implications of atmospheric and climate change for crop yield and water use efficiency[J]. Crop Science, 2002, 42(1):131-140.
- [13] Baker J T. Yield responses of southern US rice cultivars to CO₂ and temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004,122(3-4):129-137.
- [14] Bannayan M, Lontfabadi S S, Sanjani S, et al. Effects of precipitation and temperature on crop production variability in northeast Iran[J]. International Journal of Biometeorology, 2011,55(3):387-401.
- [15] 陈素英,张喜英,邵立威,等.农业技术和气候变化对农作物产量和蒸散量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(5):1039-1047.
- [16] 房世波,沈斌,谭凯炎,等.大气[CO₂]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.
- [17] Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I. Impacts of day versus night temperatures on spring wheat yields: a comparison of empirical and CERES model predictions in three locations[J]. Agronomy Journal, 2007, 99:469-477.
- [18] Peng S B, Jianliang H, Sheehy J E. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. PNAS, 2004, 101:9971-9975.
- [19] Sinclair T R, Seligman N. Criteria for publishing papers on crop modeling[J]. Field Crops Research, 2000,68:165-172.
- [20] McCown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research[J]. Agricultural Systems, 1996,50:255-271.
- [21] 王琳,郑友飞,于强,等.APSIM模型对华北平原小麦-玉米连作系统的适用性[J].应用生态学报,2007,18(11):2480-2486.
- [22] 沈禹颖,南志标, Bellotti B, 等. APSIM 模型的发展与应用[J].应用生态学报,2002,13(8):1027-1032.
- [23] 李广,黄高宝, Bellotti W, 等. APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J].生态学报,2009,29(5):2655-2663.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 孙小花,张仁陟,蔡立群,等.不同耕作措施对黄土高原旱地土壤呼吸的影响[J].应用生态学报,2009,20(9):2173-2180.
- [27] 王润元,张强,王耀琳,等.西北干旱区玉米对气候变暖的响应[J].植物学报,2004,46(12):1387-1392.
- [28] 房世波,谭凯炎,任三学.夜间增温对冬小麦生长和产量影响的实验研究[J].中国农业科学,2010,43(15):3251-3258.
- [29] 张仁陟,黄高宝,蔡立群,等.几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J].中国生态农业学报,2013,21(1):61-69.