

不同耕作措施下春小麦产量对温度变化的敏感性分析

董莉霞¹, 李 广^{1,2}, 闫丽娟³, 刘 强¹, 燕振刚¹

(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)

摘 要: 为了研究温度变化对不同耕作条件下春小麦产量的影响, 利用修正参数后的 APSIM 模型, 自变量因子分别为最低温度、最高温度, 在 9 种变化条件下对传统耕作 + 秸秆还田(TS)、免耕(NT)、免耕覆盖(NTS)3 种耕作措施下的春小麦产量进行了模拟, 并利用 Surfer 软件对产量变化率进行了敏感性分析。结果表明: 在三种不同耕作措施下, 春小麦产量变化率对最高温度的变化更为敏感, 最高温度升高, 产量变化率呈负敏感; 在传统耕作 + 秸秆还田和免耕覆盖耕作措施下, 春小麦平均产量分别是 $2\,268.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $2\,274.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 明显高于免耕耕作措施下的春小麦平均产量 $1\,815.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 传统耕作 + 秸秆还田和免耕覆盖耕作措施下, 小麦产量随温度变化相对稳定; 当最低温度和最高温度在一定区域范围内变化时, 传统耕作 + 秸秆还田和免耕覆盖产量表现更稳定。

关键词: APSIM 模型; 春小麦; 耕作措施; 敏感性
中图分类号: P467; S512.1⁺2 **文献标志码:** A

Sensitivity analysis of spring wheat to variations in temperatures under different tillage measures

DONG Li-xia¹, LI Guang^{1,2}, YAN Li-juan³, LIU Qiang¹, YAN Zhen-gang¹

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

Abstract: In order to study the influences of temperature variations under different tillage conditions on yield of spring wheat, a revised APSIM model was used. A simulation was implemented to analyze the yield of spring wheat by cultivation measures including conventional tillage & straw turnover (TS), no-till (NT), and no-tillage with mulch (NTS) under nine variable conditions using lowest and highest temperatures as the independent variable factors. Then the surfer software was used to complete the sensitivity analysis. The result shows that under three different cultivation measures, yield rate of the spring wheat was more sensitive to the variations of the highest temperature. When the highest temperature rose, yield rate showed a negative sensitivity. Under conventional tillage + straw returned and no-till cover tillage measures, the average yield of spring wheat are respectively $2\,268.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $2\,274.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, significantly higher than the average yield of spring wheat $1\,815.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of no-till tillage measures. Under traditional farming + straw returned and no-till cover tillage measures, wheat production seemed stable with the changes of temperatures. When the lowest and highest temperatures varied within a certain range, wheat production under traditional farming + straw returned and no-till cover condition was stable.

Keywords: APSIM model, spring wheat, tillage measures, sensitivity

收稿日期: 2014-06-20
基金项目: 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; 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)
作者简介: 董莉霞(1981—), 女, 甘肃泾川人, 硕士, 讲师, 主要从事农业信息技术方面的研究。E-mail: donglx@gsau.edu.cn。
通信作者: 李 广(1971—), 男, 内蒙古化德人, 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。

气候资源是重要的农业资源之一,农业生产与气候息息相关^[1],而温度又是重要的气候因子。西北地区与其他地区相比,温度升高幅度较大,近年来最低温度和最高温度均有升高的趋势^[2-3],且最低温度和最高温度的变化对陆地作物的生长和碳积累有显著影响。在甘肃省定西黄土丘陵区,小麦是主要的粮食作物之一,小麦生长对温度变化较为敏感^[4],产量受温度等气候因素的影响较为明显。

随着区域气候对全球气候持续变化的响应,小麦对温度的适应性将会极大地影响其生长发育以及产量的形成^[5]。目前关于最低温度和最高温度变化对作物生长影响的研究,主要采用温室和开顶式气室的试验方法模拟各种气候变化或极端气候事件对作物生长的影响^[6-9],而运用参数修正后的 APSIM 模型分析最低温度以及最高温度的改变对作物生长影响的研究报道较少,通过产量变化率进行敏感性分析的研究报道也较少,这制约着温度变化对作物影响机理的深入理解和准确模拟。为此,本文以黄土丘陵区旱地春小麦为研究对象,运用 APSIM 模型,选择最低温度和最高温度作为自变量因子,模拟了不同耕作措施下的春小麦产量,并利用 Surfer 软件对产量变化率进行了敏感性分析,为研究温度变化对农业的影响和农业适应气候变化提供了一定的依据。

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,该试验站地处中部偏南地区,没有充

足的灌溉条件,属于中西部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℃。

1.2 试验设计

试验在不同气象条件类型的基础上进行设计。设计有 3 种耕作措施:(1) 传统耕作 + 秸秆还田(TS,耕作方式与传统耕作方式相同,不同之处在于第一次耕作之前要将作物秸秆翻入土);(2) 免耕(NT,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);(3) 免耕覆盖(NTS,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,覆盖在原有区域之上)。

ASPIIM 模型正常运行时所需要的温度要素有两个:逐日最低温度和逐日最高温度,因此设计了 2 个变量在 9 种变化下的组合模拟实验(表 1)。2 个变量分别为逐日最低温度和逐日最高温度,9 种变化为逐日的最低温度和最高温度以 0.25℃ 为间隔,在 ± 1℃ 内变化的 9 种情形。

1.3 APSIM 模型简介

APSIM 是由澳大利亚农业生产系统研究小组 (APSRU) 研制开发的模块化模拟平台,它被用来模拟农业系统中的生物物理过程^[10]。APSIM 允许描述农业系统中关键组成部分的独立模块“插入”到平台中,研究者可以根据需要对独立模块进行灵活开发,适于比较准确地预测在不同的气候、品种、土壤和管理因素下作物产量、土壤水分变化等,同时分析在未来气候变化条件下作物生产的前景。

表 1 日最低温度和最高温度变化模拟试验设计
Table 1 Simulation design of the lowest and the highest temperatures

项目 Items	1	2	3	4	5	6	7	8	9
最低温度 Lowest temperature/℃	- 1	- 0.75	- 0.5	- 0.25	0	0.25	0.5	0.75	1
最高温度 Highest temperature/℃	- 1	- 0.75	- 0.5	- 0.25	0	0.25	0.5	0.75	1

在国外,APSIM 模型在水土保持评价、气候变化引起的作物响应等方面有大量应用。在我国,由于田间数据积累较少,该模型主要用于气候风险评估和水肥管理等方面。

1.4 敏感性的计算

小麦对气候变化的敏感性是指小麦生产对气候变化因素的响应程度或敏感程度,用小麦产量的变化率划分不同的等级来表示。春小麦产量对温度变

化的敏感性分析通过计算小麦产量变化率(无量纲)来表示,即:

$$\text{产量变化率}(\%) = (\text{预测产量} - \text{基准产量}) / \text{基准产量} \times 100\%$$

基准产量采用传统耕作方式下 1970—2011 年 42 年间最低温度和最高温度未发生变化时产量的平均值。产量变化率敏感性划分标准参照李广等^[10]的方法。

表 2 小麦温度变化的敏感性等级划分标准

Table 2 Classification on sensitivities of crops to climatic changes

项目 Items	中度负敏感 Moderately negative	轻微负敏感 Slightly negative	不敏感 Not sensitive	轻微正敏感 Slightly positive	中度正敏感 Moderately positive
产量变化 Yield change rate	- 15% ~ - 25%	- 5% ~ - 15%	- 5% ~ 5%	5% ~ 15%	15% ~ 25%
编码 Code	- 2	- 1	0	1	2

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施下春小麦产量的动态模拟分析

按照模拟试验设计,基于验证后的 APSIM 模型,通过计算机模拟 1970—2011 年传统耕作 + 秸秆还田(TS)、免耕(NT)和免耕覆盖(NTS)3 种耕作措施下小麦的产量进行动态分析。在传统耕作 + 秸秆还田(TS)、免耕(NT)和免耕覆盖(NTS)3 种耕作措施下小麦产量随温度的变化呈波动变化,没有显著的线性相关性,传统耕作 + 秸秆还田(TS)耕作条件下,小麦产量最高为 2 685.8 kg·hm⁻²,42 a 平均产量为 2 268.8 kg·hm⁻²;免耕(NT)耕作条件下,小麦产量最高为 2 128.4 kg·hm⁻²,42 a 平均产量为 1 815.4 kg·hm⁻²;免耕覆盖(NTS)耕作条件下,小麦产量最高为 2 697.5 kg·hm⁻²,42 a 平均产量为 2 274.0 kg·hm⁻²。

2.2 春小麦产量对温度变化的敏感性分析

利用 APSIM 模型模拟三种耕作条件下的春小麦产量值,通过计算各种组合下的产量变化率,得出最低温度的变化量、最高温度的变化量和产量变化率百分比三组数据。根据敏感性划分标准,得到敏感性等级编码,利用 Surfer 软件对产量变化率进行等高线作图,对三种不同耕作措施下春小麦产量的敏感性进行分析。由图 1、图 2 和图 3 可以看出,当最低温度不变时,最高温度下降,小麦的产量表现为正敏感和不敏感;最高温度上升,春小麦产量表现为不敏感和负敏感。同时,三种不同耕作措施下春小麦产量的敏感性分布规律均为:对角线区域集中为不敏感,左下角主要为正敏感区域,右上角主要为负敏感区域。这表明:在 3 种耕作措施下,当最低温度升高时,春小麦产量表现为正敏感;最高温度升高时,春小麦产量表现为负敏感;而当最低温度和最高温度的变化量相同时,春小麦产量大致表现为不敏感。

2.3 不同耕作措施下春小麦产量对温度变化的敏感性比较分析

在图 1、图 2 和图 3 中,右下半部分等值线相对左上半部分等值线较稀疏,且疏密度分布较均匀,左上半部分等值线较密集,疏密度相对不均匀。表明

在三种不同耕作措施下,春小麦产量随着最低温度的增加,产量变化都较小,而春小麦产量随着最高温度的增加,产量变化均较大。表明春小麦产量对最高温度的变化更敏感,最高温度的变化对春小麦产量的影响大于最低温度。

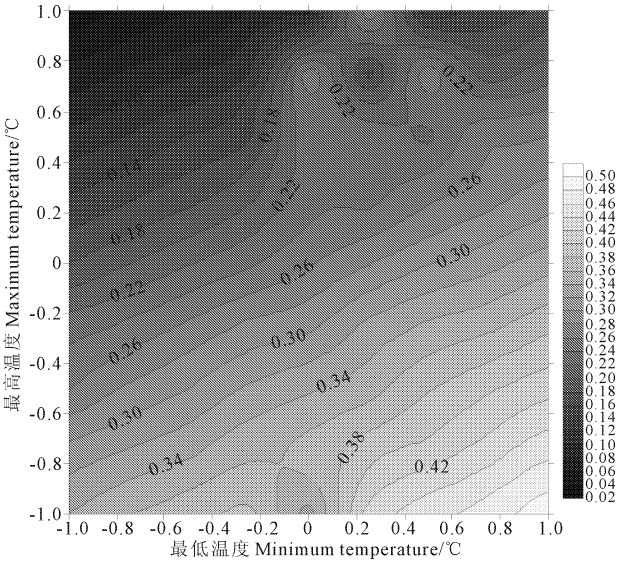


图 1 TS 耕作条件下最低温度和最高温度变化对小麦生产的敏感程度分布

Fig.1 Sensitivity distribution of wheat yield to variations of lowest and highest temperatures under TS

从图 1 可以看出,在 TS 耕作条件下小麦产量的敏感强度随最低温度和最高温度变化的分布不一致。最低温度的变化量从 -1℃ ~ 1℃ 时,春小麦产量的变化率为 0.34 ~ 0.42。最高温度的变化量从 -1℃ ~ 1℃ 时,春小麦产量的变化率为 0.34 ~ 0.1。以最高温度的变化量为 -0.2℃ 时的等高线(等高线值为 0.22)为分界线,右下半部分等值线相对左上半部分等值线较稀疏,且疏密度分布较为均匀。表明该区域属于不敏感区,春小麦产量相对稳定。与最低温度相比,最高温度的变化对春小麦产量的影响较敏感。而左上半部分等值线较为密集,分布不均匀,表明在该区域春小麦产量波动大,相对不稳定。

从图 2 可以看出,以最高温度的变化量为 -0.4℃ ~ -0.3℃ 时的等高线(等高线值为 -0.02)

为分界线,右下半部分等值线与图 1 相比较稀疏,疏密度分布均匀。表明该区域属于不敏感区,春小麦产量变化率随最低温度的变化较为稳定,随最低温度的升高变化幅度也较小。而在左上角部分等值线较密集,表明该区域属于敏感区,春小麦产量相对变动较大。图 2 和图 1 相比,稳产区域较小,等值线值较小,因为在春小麦生长的各个重要生育期内,传统耕作 + 秸秆还田方式相对地提高了土壤含水量,加强了土壤的蓄水保墒作用^[11]。

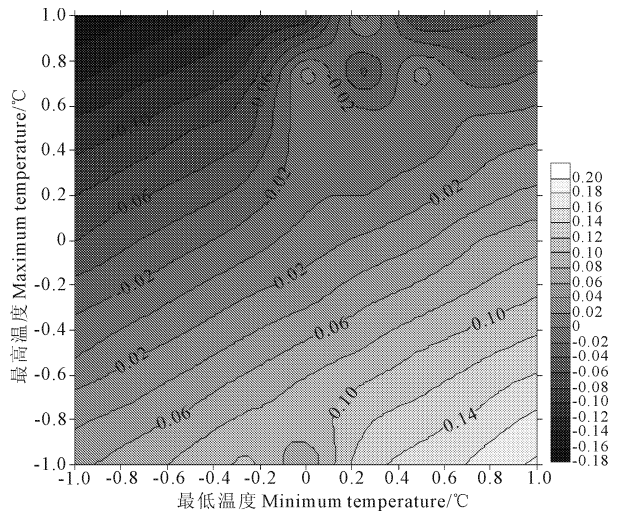


图 2 NT 条件下最低温度和最高温度变化对小麦生产的敏感程度

Fig.2 Sensitivity distribution of wheat yield to variations of lowest and highest temperatures under NT

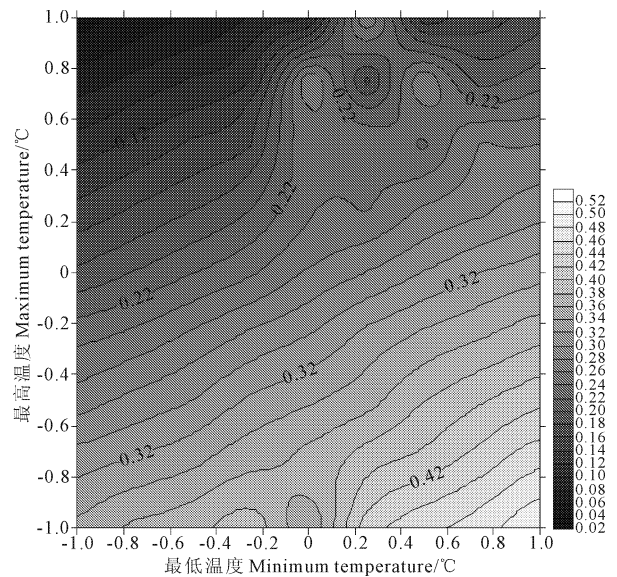


图 3 NTS 条件下最低温度和最高温度变化对小麦生产的敏感程度

Fig.3 Sensitivity distribution of wheat yield to variations of lowest and highest temperatures under NTS

从图 3 可以看出,以最高温度的变化量为 $-0.4^{\circ}\text{C} \sim -0.3^{\circ}\text{C}$ 时的等高线(等高线值为 0.22)为分界线,右下半部分等值线疏密度较为均匀,表明该区域属于不敏感区,春小麦产量相对稳定。与图 2 相比,图 3 稳定区域的面积较大,等值线值较高。而在图左上角部分,等值线随着最高温度的升高愈加密集,分布不均匀。表明该区域属于敏感区,春小麦产量变化明显。原因是免耕覆盖减缓了土壤中有机的挥发和水分的蒸发,提高了土壤中养分的利用率。当最低温度升高时免耕覆盖可以为小麦生产提供更好的土壤环境,满足小麦生长需求,使小麦产量增加。

三种耕作方式相比,等值线值的大小分别为: $\text{NTS} > \text{NT}, \text{TS} > \text{NT}$,表明传统耕作 + 秸秆还田(TS)和免耕覆盖(NTS)条件下春小麦产量明显高于免耕(NT)条件下;稳产区域面积的大小比较为: $\text{NTS} > \text{NT}, \text{TS} > \text{NT}$ 。表明采用传统耕作 + 秸秆还田(TS)和免耕覆盖(NTS)两种耕作措施,小麦产量受温度变化的影响相对较小,对最低温度和最高温度的变化敏感性较弱,小麦产量更为稳定。在这两种措施下,小麦应对气候变化风险的能力更强。这是因为 TS 和 NTS 可以改善土壤的供水和植物的吸水能力,促进植物光合作用;同时,秸秆覆盖处理的土壤表层墒情好,养分充足,小麦的出苗率高,冬前总茎数和春季总茎数均有所增加^[12]。

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 个因素 9 种变化 3 种耕作措施下的春小麦产量进行了模拟,利用 Surfer 软件对产量变化率进行了敏感性分析,结论如下:

- 1) 在三种不同耕作措施下,春小麦产量变化率对最高温度的变化更为敏感。最高温度升高,产量变化率在负敏感范围内。
- 2) 在传统耕作 + 秸秆还田和免耕覆盖耕作措施下,春小麦产量明显高于免耕条件下的春小麦产量。传统耕作 + 秸秆还田和免耕覆盖耕作措施下,小麦产量随温度的变化较稳定。
- 3) 当最低温度和最高温度在一定区域范围内变化时,传统耕作 + 秸秆还田和免耕覆盖产量表现更稳定。

中国是生态环境比较脆弱的国家,随着保护性耕作重要性的逐渐显现,有关保护性耕作措施的研究得到了更多人的关注^[13-14]。保护性耕作采取的各种措施作用于作物的生长环境,从而影响作物的

生长发育,只有系统地考虑耕作措施对作物生长发育的影响因素,制定有效的解决方案,才能解决实际问题。

本文利用 Surfer 软件对产量变化率进行分析,直观地反映了不同耕作措施下春小麦产量的变化趋势及稳定性,在应对温度变化,充分利用气候资源、合理利用耕作措施等方面有一定的应用前景。通过分析,传统耕作 + 秸秆还田和免耕覆盖两种耕作措施相比传统的耕作方式,具有更强的应对极端风险气候的能力。这与王晓娟^[15]等研究认为秸秆还田和免耕覆盖保护性耕作措施下小麦产量稳定且较高的结论是一致的。

参 考 文 献:

[1] 李 艳,王式功,马玉霞.全球气候变暖对我国小麦的影响研究综述[J].环境研究与监测,2006,19(2):11-13,33.
[2] 刘德祥,董安详,邓振毓.中国西北地区气候变暖对农业的影响[J].自然资源学报,2005,20(1):119-125.
[3] 崔 静,王秀清,辛 贤.气候变化对中国粮食生产的影响研究[J].经济社会体制比较,2011,154(2):54-60.
[4] Wolf J, van Oijen M, Kempenaar C. Analysis of the experimental variability in wheat responses to elevated CO₂ and temperature[J]. Agricultural, Ecosystems and Environment, 2002,93:227-247.
[5] 蒲金涌,姚小英,王位泰.气候变化对甘肃冬小麦气候适宜性的

影响[J].地理研究,2011,30(1):153-160.

[6] 郭建平,高素华.高温、高 CO₂ 对农作物影响的试验研究[J].中国生态农业学报,2002,10(1):17-20.
[7] 郝敬虹,李天来,孟思达,等.夜间低温对薄皮甜瓜果实糖积累代谢相关酶活性的影响[J].中国农业科学,2009,24(10):3592-3599.
[8] Norby R J, Edwards N T, Riggs J S, et al. Temperature controlled open-top chambers for global change research[J]. Global Change Biology,1997,3:259-267.
[9] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Dynamic and complex micro-climate responses to warming and grazing manipulations[J]. Global Change Biology, 2005,11:1440-1451.
[10] 李 广,李 玥,黄高宝,等.不同耕作措施旱地小麦生产应对气候变化的效应分析[J].草业学报,2012,21(5):160-168.
[11] 周 静,张仁陟.不同耕作措施下春小麦应对干旱胁迫的生理影响[J].干旱区研究,2010,27(1):39-43.
[12] 遂焕成.秸秆覆盖对土壤环境及冬小麦产量状况的影响[J].土壤通报,1999,30(4):174-175.
[13] 谢瑞芝,李少昆,李小君,等.中国保护性耕作研究分析——保护性耕作与作物生产[J].中国农业科学,2007,40(9):1914-1924.
[14] 谢瑞芝,李少昆,金亚征,等.中国保护性耕作试验研究的产量效应分析[J].中国农业科学,2008,41(2):397-404.
[15] 王晓娟,黄高宝,李卿沛,等.不同耕作措施下旱地春小麦田和豌豆田的蒸发蒸腾特性及产量效应[J].干旱区资源与环境,2010,24(5):172-177.

(上接第 35 页)

参 考 文 献:

[1] 程炳文,王 勇,罗世武,等.地膜玉米不同处理土壤水分和温度变化规律对产量的影响[J].玉米科学,2006,14(1):144-145.
[2] 王顺霞,王占军,左 忠,等.不同覆盖方式对旱地玉米田土壤环境及玉米产量的影响[J].干旱区资源与环境,2004,18(9):134-137.
[3] 李 兴,程满金,勾芒芒,等.黄土高原半干旱区覆膜玉米土壤温度的变异特征[J].生态环境学报,2010,19(1):218-222.
[4] Otegui M E, Bonhomme R. Grain yield components in maize *Yñ*. Ear growth and kernel set[J]. Field Crops Res, 1998,56:247-256.
[5] 金 益,张永林,王振华,等.玉米灌浆后期的百粒重变化的品种间差异分析[J].东北农业大学学报,1998,29(1):7-12.
[6] 李绍长,盛 茜,陆嘉惠,等.玉米籽粒灌浆生长分析[J].石河子大学学报,1999,3:1-5.
[7] 刘宗华,张战辉.玉米籽粒灌浆速率研究进展[J].东北农业大学学报,2010,41(11):148-153.
[8] 孙学保,杨祁峰,牛俊义,等.旱地全膜双垄沟播玉米增产效应研究[J].作物杂志,2009,3:32-36.
[9] 张军钱.旱地全膜双垄沟播玉米适宜覆膜时间研究[J].水土保持通报,2009,29(4):220-223.
[10] 李国华.全膜双垄沟播玉米不同覆膜时期水分生产效率研究[J].中国农学通报,2009,25(18):205-207.

[11] 高世铭.陇中黄土丘陵沟壑区生态环境建设与农业可持续发展研究[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
[12] 张文斌,杨祁峰,牛俊义,等.种植密度对全膜双垄沟播玉米籽粒灌浆及产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2010,45(2):74-78.
[13] 胡 芬,陈尚漠.旱地玉米农田地膜覆盖的水分调控效应研究[J].中国农业气象,2000,21(4):14-17.
[14] 王 敏,王海霞,韩清芳,等.不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响[J].作物学报,2011,37(7):1249-1258.
[15] 杨祁峰,岳 云,熊春蓉,等.不同覆膜方式对陇东旱塬玉米田土壤温度的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):29-33.
[16] 徐福利,梁银丽,汪有科,等.秸秆覆盖保护耕作法土壤水分和温度变化及玉米产量效应[J].土壤通报,2006,37(4):648-650.
[17] 鲍继友,孙顶太,孙月轩,等.夏玉米灌浆与温度、籽粒含水率的关系[J].耕作与栽培,1994,5:22-26.
[18] 刘宗华,张战辉.玉米籽粒灌浆速率研究进展[J].东北农业大学学报,2010,41(11):148-153.
[19] 张 雯,衣 莹,侯立白.辽西地区垄作保护性耕作方式对玉米产量效应的影响研究[J].玉米科学,2007,15(5):96-99,103.
[20] 张军钱.旱地全膜双垄沟播玉米适宜覆膜时间研究[J].水土保持通报,2009,29(4):220-223.
[21] 信东旭,张玉龙,黄 毅,等.不同时期覆膜对辽西旱地农田土壤墒情及春玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):114-118.