基于 APSIM 的旱地小麦叶面积指数模拟模型构建

聂志刚[1,2],李 广[2]

(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)

摘 要: 为了解旱地小麦叶片生长规律,建立基于 APSIM 的小麦叶面积潜在生长率模型和叶面积水、氮协同生长率模型,并在田间试验修订参数的基础上,连接到 APSIM 平台,模拟小麦叶面积指数动态变化过程,采用相关性分析方法定量分析小麦叶面积指数的变化规律。结果表明:基于 APSIM 的小麦叶面积潜在生长率模型和叶面积水、氮协同生长率模型对旱地小麦生长指标 *LAI* 的模拟有较高精度。小麦全生育期内叶面积指数模拟值与实测值呈显著正相关,相关系数(R)为 0.996,归一化均方根误差(*NRMSE*)范围在 3.08% ~ 9.38%,模型有效性指数(M_E)为 0.594 ~ 0.956,均大于 0.5。

关键词: APSIM;小麦;模拟模型;叶面积指数

中图分类号: S512.101 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-7601(2013)04-0094-05

Modeling of APSIM – based simulation of leaf area index of wheat in dryland

NIE Zhi-gang[1,2], LI Guang[2]

(1. *College of Information Science and Technology*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *China*;
2. *Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *China*)

Abstract: In order to understand the growth law of leaves of wheat in dryland, the APSIM-based model of leaf area potential growth and the leaf area growth model regarding to water and nitrogen stress were built. The parameters of APSIM were modified and verified according to the data collected from the field experiment, and the dynamic process of leaf area index (LAI) during the growth period of wheat was simulated by connecting the models to APSIM-Wheat. Furthermore, the change law of LAI of wheat was explored by using correlation analysis method. The results showed that the APSIM-based model of leaf area potential growth and the leaf area growth model regarding to water and nitrogen stress could be used to simulate the dynamic process of LAI of wheat with a high accuracy. During the whole growth period of wheat, the simulated and observed LAI values were positively correlated ($R = 0.996$), with the normalized root mean square error (*NRMSE*) within 3.08% ~ 9.38% and the effectiveness index (M_E) within 0.594 ~ 0.956.

Keywords: APSIM; wheat; simulation; leaf area index

叶片作为植物主要的光合器官,其生长和形态的模拟是虚拟作物研究的重要组成部分[1]。近年来,在水稻、小麦、玉米、棉花等作物叶片静态结构以及叶片的空间分布和几何参数等形态模拟方面取得了一定的研究成果[2-5]。由于叶片制造的光合产物对产量形成至关重要,群体光合速率又与群体叶面积紧密相关,所以对作物叶面积变化的模拟是研究作物叶片生长规律的有效方法,叶面积用叶面积指数 LAI(Leaf area index)表示[6]。国内外研究者用模型机理对作物叶面积指数进行了动态模拟研究。冯跃华等用 ORYZA2000 模型对贵阳地区水稻叶面积指数进行模拟[7],孙成明等进行了基于 FACE 试验的水稻叶面积指数动态模拟研究[8],熊伟等利用 DSSAT 中的 CERES – Wheat 模型分析了我国小麦区模型机理应用的效果及误差来源[9],赵虎等进行了基于 WOFOST 模型同化时序 HJCCD 数据反演叶面积指数方面的研究[10],马新明等在小麦生长模型(WCSODS)在河南省的适应性评价研究中也涉及到了叶面积指数的模拟[11],杨勤等应用 DSSAT 模型预测宁夏春小麦产量演变趋势时也模拟了小麦叶面积指数[12]。然而,利用农业生产系统模拟平台 APSIM (Agricultural production system simulator)定点定位模

收稿日期:2012-12-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(31060178);甘肃农业大学科技创新基金项目(GAU – CX1011)
作者简介:聂志刚(1980—),男,甘肃高台人,讲师,主要从事农业自动化和数字农业领域的研究。E-mail:niezg@gsau.edu.cn。
通信作者:李 广(1971—),男,内蒙古化德人,教授,博士生导师,主要从事作物模型与模拟方面的研究。E-mail:lig@gsau.edu.cn。

拟黄土丘陵沟壑区域旱地小麦叶面积指数动态变化还鲜有报道。本文在田间试验的基础上,确定典型区域 APSIM 模拟平台参数并连续测算小麦叶面积指数,建立小麦叶面积潜在生长率模型和叶面积水、氮协同生长率模型,并以此模型为模拟框架组建 APSIM-Wheat 作物属性模块,模拟了旱地小麦叶面积指数生长过程,定量分析了小麦叶面积指数的动态变化规律,为深入研究旱地小麦叶片生长规律提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　研究区概况与试验设计

1.1.1　*研究区概况*　大田试验时间跨度 2002—2005 年,地点位于甘肃省定西市安定区李家堡乡甘肃农业大学旱农试验站。试验点处于甘肃省中部偏南,海拔 2 000 m,气候属中温带半干旱区,年均太阳辐射 592.9 kJ·m^{-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[13-16]。试验地土壤为黄绵土,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}[13-16]。研究区域平坦,无灌溉条件,多年平均降雨量 391 mm,80% 保证率的降水量为 365 mm,年蒸发量 1 531 mm,是我国半干旱雨养农业典型区域,一年一熟制,春小麦是该黄土丘陵沟壑区域种植较广的作物。

1.1.2　*试验方案*　供试作物为定西 35 号春小麦。试验中施普通过磷酸钙(含 P_2O_5 14%),用量为 105 kg·hm^{-2},尿素(含纯 N46%)用量为 150 kg·hm^{-2},肥料作为基肥在播种时施入,不用农家肥。按定西地区常用播量 187.5 kg·hm^{-2},用甘肃农业大学研制的 2BMFS-5/10 型免耕播种机播种,播深均为 7 cm,行列距 0.25 m,试验小区面积 20 m×4 m,边行列 0.5 m 为保护,完全随机区组设置,田间管理与当地大田相同。每年 3 月份播种,7 月份收获,小麦生育期总共 134 d 左右,包括分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、灌浆期、乳熟期和蜡熟期 8 个阶段。

小麦从发芽开始到成熟,分别于各生长阶段在小区选取 10 株典型植株用长宽系数法[17]测算叶面积指数,每株每处理重复 3 次测量,取平均值即为该株该次测量的叶面积,所获 10 株相关叶面积数据取平均值并计算,即为本次处理所获小麦叶面积指数的测量值,每个生长阶段 4 次重复测量,取平均值为该阶段叶面积指数实测平均值。小麦生长 8 个阶段共得到 32 次测算值,8 组阶段平均实测值。

植株叶面积为叶长与叶宽乘积的 0.83 倍即为长宽系数法,叶枕到叶尖的距离为叶长,叶片最宽处的距离为叶宽,植株总叶面积与区域土地面积的比值为叶面积指数[18]。

1.2　APSIM 模拟平台

澳大利亚农业生产系统研究组(APSRU)从 1991 年开始研制农业生产系统模拟平台 APSIM (Agricultural production system simulator)。国外用 APSIM 在作物轮作专家决策、气候变化对作物的影响效应以及水土保持评价等方面取得了大量的研究成果,在我国,对 APSIM 的应用还只涉及到地域的适用性和气候风险评估与水肥管理等方面[13-16,19-21]。李广等已经对 APSIM 在黄土丘陵沟壑区的适用性、水肥管理以及产量影响等方面进行了系统研究[13-16],研究结果表明 APSIM 对旱地小麦全生育期生长模拟具有较高的精度。

由李广等的研究[13-16]可知,APSIM 模拟平台以研究区气候和土壤资料为基本知识库,气候库由甘肃省气象局提供的 1970—2001 年研究区气象数据和 2002—2005 年试验点测得的气象资料组成,土壤库以天气和管理措施引起的土壤特征变量的连续变化为库构建的核心[13-16]。作物属性模块是 APSIM 模拟各种一年生和多年生作物的通用生长模拟框架,只是要在模拟机理的约束下,以作物品种遗传特性、作物生长发育进程、植株形态与产量形成等变量为参数,在研究区定位田间试验基础上,经过修改和订正,建立适宜的多源作物属性参数集合,才能连接到平台中进行模拟[13-16]。本模拟试验参数均来源于李广等[15]在黄土丘陵沟壑区 APSIM 适用性研究中经过反复本土化修订的参数。

1.3　模型检验方法

模型检验方法主要采用均方根误差(*RMSE*)、归一化均方根误差(*NRMSE*)、模型的有效性指数(M_E)及相关系数(R)对模拟值与观测值的拟合度进行分析[13-16]。计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_{Obs} - Y_{Sim})^2} \quad (1)$$

$$NRMSE = 100\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_{Obs} - Y_{Sim})^2}}{Y_{mean}} \quad (2)$$

$$M_E = 1 - \frac{\sum(Y_{Obs} - Y_{Sim})^2}{\sum(Y_{Obs} - Y_{mean})^2} \quad (3)$$

式中,*RMSE*、*NRMSE* 分别为均方根误差,归一化均方根误差;Y_{Obs} 为实测值;Y_{Sim} 为模拟值;Y_{mean} 为实测平均值。*RMSE* 的值越小,表明模拟值与实测值之

间偏差越小，*NRMSE* 控制在 10% 以内表明模型的模拟有较高精度。M_E 为模型的有效性指数，Zhang X C[22] 认为当 M_E 大于 0.5 时，表明模型的模拟结果较好。

2 小麦叶面积生长模拟模型构建

2.1 小麦叶面积潜在生长率模型

小麦叶面积潜在生长变化符合经典的 Logistic 作物生长曲线规律，即假设叶面积可从拔节开始时的温度时间被计算出来，并且它与生物量的积累无关，则主茎上叶面积的生长过程和初始化的分蘖被看做是拔节后温度时间上的逻辑函数[23-24]。小麦叶面积潜在生长率模型，如公式(4) 所示：

$$g_{\text{pot}} = (S_{\text{today}} - S_{\text{yesterday}}) \times g_{\text{plants}} \times 10^{-4} \quad (4)$$

式中，g_{pot} 为叶面积潜在生长率；g_{plants} 为给定的作物密度。S_{today} 为当天作物的总面积；$S_{\text{yesterday}}$ 为前一天作物的总面积，作物的总叶面积为主茎叶面积与所有分蘖叶面积之和，主茎叶面积如公式(5)[25]，分蘖叶面积如公式(6)[25]。

$$tiller_{area}(1) = tiller_{area_\max}(1)/(1 + \exp(\alpha(1) \times (TT - \beta(1)))) \quad (5)$$

$$tiller_{area}(n) = tiller_{area_\max}(n)/(1 + \exp(\alpha(n) \times (TT - (1.5 + n) \times p - \beta(n)))) \quad (6)$$

式中，$tiller_{area}(1)$ 为主茎的叶面积；$tiller_{area}(n)$ 为第 n 个分蘖的叶面积($n > 1$)；TT 为从出苗以来的积温；α、β 分别为 Logistic 曲线的起飞点和拐点参数，分别取值为主茎($\alpha = 0.018$、$\beta = 400$) 和分蘖($\alpha = 0.027$、$\beta = 266.667$)[25-27]；p 为品种积温指数；$tiller_{area_\max}(n)$ 为第 n 个分蘖($n > 1$) 的最大叶面积，可以通过 100 倍的作物单个主茎时最大叶面积值(上限为 200 cm^2)[15] 与作物密度比值计算。

2.2 小麦叶面积水、氮素协同生长率模型

水和氮素协同因子的引入是为了分别研究水和氮素协同对叶面积生长的影响。在协同条件下，小麦叶面积协同生长率模型，如公式 (7) 所示：

$$g_{sts} = g_{pot} \times MIN(g_{w_\exp}, g_{n_\exp}) \quad (7)$$

式中，g_{sts} 为叶面积协同生长率，通过叶面积潜在生长率与水、氮素协同率中较小值的乘积计算。水和氮素协同影响的是叶面积的生长而不是干物质量[24]，由经典的 Logistic 作物生长规律为模型推演基础可得水和氮素协同率，如公式(8)、(9) 所示，$g_{w_\exp}$、$g_{n_\exp}$ 分别为水和氮素的协同率。

$$g_{w_\exp} = N \times leaf_{w_\text{ratio}} \quad (8)$$

$$g_{n_\exp} = N \times leaf_{N_\text{ratio}} \quad (9)$$

式中，N 为作物模型常数，小麦作物设置值为 1.0[15]；$leaf_{w_\text{ratio}}$、$leaf_{N_\text{ratio}}$，分别为叶片含水、氮率，如公式(10)[25-27]、(11)[25-27] 所示。

$$leaf_{w_\text{ratio}} = (leaf_{w_\text{conc}} - leaf_{w_\text{conc_min}})/(leaf_{w_\text{conc_crit}} - leaf_{w_\text{conc_min}}) \quad (10)$$

$$leaf_{N_\text{ratio}} = (leaf_{N_\text{conc}} - leaf_{N_\text{conc_min}})/(leaf_{N_\text{conc_crit}} - leaf_{N_\text{conc_min}}) \quad (11)$$

式中，$leaf_{w_\text{conc}}$、$leaf_{N_\text{conc}}$ 为叶片水、氮素含量；$leaf_{w_\text{conc_min}}$、$leaf_{N_\text{conc_min}}$ 为叶片水、氮素含量下限；$leaf_{w_\text{conc_crit}}$、$leaf_{N_\text{conc_crit}}$ 为叶片生长关键含水、氮素量。

当叶片中含水、氮素的量小于叶片水、氮素含量下限时，则叶片含水、氮率为负值，那么水、氮素协同率为负值，由公式(7) 可知叶面积协同生长率为负值，表明小麦叶片生长减缓；当叶片生长所需关键含水、氮素量小于作物水、氮素含量下限时，公式(10) 和公式(11) 无意义，叶片停止生长。强化约束条件为水的供需比例($leaf_{w_\text{conc}}/leaf_{N_\text{conc_crit}}$) 小于 1.1 时，叶生长率降低；如果比例小于 0.1 时，叶片将停止生长。水和氮素的协同将造成叶片或者分蘖的减少，直接表现为小麦叶面积指数较小。

3 结果与分析

针对旱地小麦叶面积指数影响的预测，以上述小麦叶面积潜在生长率模型和叶面积水、氮协同生长率模型为模拟框架组建 APSIM-Wheat 作物属性模块，并连接到 APSIM 模拟平台，分别于分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、灌浆期、乳熟期和蜡熟期 8 个阶段，以天(d)为单位进行模拟试验，与田间试验相同时间 4 次选取模拟值并求平均值。小麦生长 8 个阶段共得到 32 次模拟值，8 组阶段平均模拟值。

由图 1 可以看出，小麦全生育期叶面积指数呈单峰曲线变化[28]。分蘖期到拔节期增长缓慢，拔节过后小麦进入营养生长和生殖生长并进阶段[18]，叶片长势加速，叶面积指数迅速增加，孕穗期之后曲线斜率继续增大，叶片快速生长，曲线峰值出现在抽穗期，在这个过程小麦叶面积指数达到全生育期中最大值[18]，尔后开花期叶面积指数仍然在较高位置。但是由于下层叶片被遮荫，随着小麦生殖生长的加剧，开花期至灌浆期叶面积指数下降态势明显，从灌浆期到乳熟期叶面积指数又逐渐减小，在蜡熟期达到最小值。

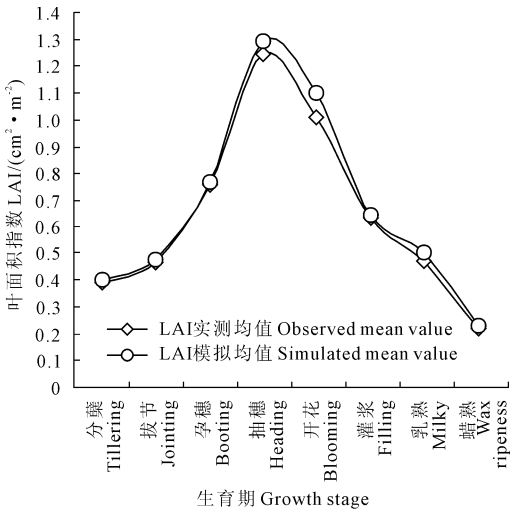

图 1　小麦叶面积指数模拟值和实测值动态变化

Fig.1　Dynamic changes of simulated and observed value of leaf area index of wheat

比较小麦全生育期的叶面积指数模拟值和实测值,分布表现了很好的一致性,均控制在 -15% ~ +15%误差线内(图 2),相关系数(R)为0.996,呈显著正相关。

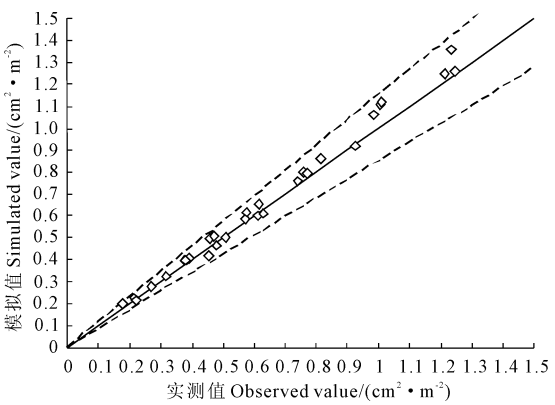

图 2　小麦叶面积指数模拟值和实测值相关分析

Fig.2　Correlation analysis of simulated and observed value of leaf area index of wheat

由表 1 可以看出,模型有效性指数(M_E)范围介于 0.594 ~ 0.956,各个生长阶段均大于 0.5,归一化均方根误差($NRMSE$)为 3.08% ~ 9.38%,控制在10%以内,表明以小麦叶面积潜在生长率模型和叶面积水、氮协同生长率模型为模拟机理约束组建的APSIM-Wheat 作物属性模块对小麦叶面积指数的模拟有较高精度。

4　结论与讨论

为了深入了解旱地小麦叶片生长规律,建立了小麦叶面积潜在生长率模型和叶面积水、氮协同生长率模型,以此模型组建 APSIM-Wheat 作物属性模块,并连接到 APSIM 平台模拟旱地小麦叶面积指数动态变化过程,结果表明:

表 1　小麦生育期间叶面积指数模拟值与实测值统计分析

Table 1　Statistical indices of simulated and observed value of leaf area index during different growth stage of wheat

品种 Variety	阶段 Growth stage	指标 Index	
		$NRMSE$/%	M_E
定西 35 号 Dingxi 35	分蘖期 Tillering	3.29	0.950
	拔节期 Jointing	6.44	0.808
	孕穗期 Booting	3.08	0.956
	抽穗期 Heading	4.72	0.897
	开花期 Blooming	9.38	0.594
	灌浆期 Filling	3.82	0.932
	乳熟期 Milky	7.09	0.768
	蜡熟期 Wax ripeness	9.12	0.616

1) 在小麦全生育期 8 个阶段,叶面积指数模拟预测值与实际测量值分布表现了很好的一致性,趋近 1∶1 线,均控制在 -15% ~ +15%误差线内,相关系数(R)大于 0.9,呈显著正相关;归一化均方根误差($NRMSE$)控制在 10% 以内;模型有效性指数(M_E)各阶段均大于 0.5。说明基于 APSIM 的小麦叶面积潜在生长率模型和叶面积水、氮协同生长率模型对旱地小麦叶面积指数的模拟有较高精度。

2) 从模拟结果来看,小麦分蘖期至孕穗期的模拟拟合度比较理想,但是在抽穗期至灌浆期模拟值高于实测值,乳熟期到蜡熟期模拟值有起伏。表明以小麦叶面积潜在和水、氮协同生长率模型为模拟框架约束的 APSIM-Wheat 作物属性模块能够反映黄土丘陵区旱地小麦叶面积指数的动态变化,但是此模型的建立只考虑到水分和养分的影响,对于病虫害、极端天气等影响因素考虑欠缺,从而导致在 APSIM 平台下模拟值较高和起伏的出现。

今后的研究要在进一步田间试验积累的基础上优化小麦叶面积生长模拟模型,并反复修订 APSIM 参数,使得 APSIM 模拟平台在区域尺度上达到当地品种物候特征本土化[13-16]的需求,进一步发展和提高预测的精确性。

参 考 文 献:

[1]　常丽英,顾东祥,张文宇,等.水稻叶片伸长过程的模拟模型[J].作物学报,2008,34(2):311-317.

[2]　Zhao C J, Wang J H, Wu H R, et al. Simulation models and deduction system for interspace description of wheat leaf shape[J]. Trans CSAE, 2002,18(5):221-225.

[3] 石春林,朱 艳,曹卫星.水稻叶片几何参数的模拟分析[J].中国农业科学,2006,39(5):910-915.
[4] 宋有洪,郭 焱,李保国,等.基于植株拓扑结构的生物量分配的玉米虚拟模型[J].生态学报,2003,23(11):2334-2341.
[5] Zhao Jun, Wang Yi-ming, Dong Qiao-xue, et al. Research advances of cotton dynamic simulation models[J]. Trans CSAE, 2007,23(3):257-266.
[6] 李 明,张长利,房俊龙.基于图像处理技术的小麦叶面积指数的提取[J].农业工程学报,2010,26(1):205-209.
[7] 冯跃华,黄敬峰,陈长青,等.基于ORYZA2000模型模拟贵阳地区一季中稻的适应性初探[J].中国农学通报,2012,28(9):26-32.
[8] 孙成明,庄恒扬,杨连新,等.FACE水稻叶面积指数的模拟研究[J].农业环境科学学报,2007,26(3):1003-1007.
[9] 熊 伟.CERES-Wheat模型在我国小麦区的应用效果及误差来源[J].应用气象学报,2009,20(1):88-94.
[10] 赵 虎,裴志远,马尚杰,等.WOFOST模型同化时序HJCCD数据反演叶面积指数[J].农业工程学报,2012,28(11):158-163.
[11] 马新明,张娟娟,刘合兵,等.小麦生长模型(WCSODS)在河南省的适应性评价研究[J].中国农业科学,2006,39(9):1789-1795.
[12] 杨 勤,许吟隆,林而达,等.应用DSSAT模型预测宁夏春小麦产量演变趋势[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):41-48.
[13] 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.
[14] 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.
[15] 李 广,黄高宝,William Bellotti,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.
[16] 李 广,李 玥,黄高宝,等.基于APSIM模型旱地春小麦产量对温度和CO_2浓度升高的响应[J].中国生态农业学报,2012,20(8):1088-1095.
[17] 黄占斌,山 仑.水分利用效率及其生理生态机理研究进展[J].生态农业研究,1998,6(4):19-23.
[18] 练宏斌.不同耕作措施对旱地春小麦光合生理生态特性的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
[19] Asseng S, Keating B A, Fillery I R P, et al. Performance of the APSIM-wheat model in western Australia[J]. Field Crops Res, 1998, 57(2):163-179.
[20] Asseng S, Keulen H V, Stol W, et al. Performance and application of the APSIM N-wheat model in the Netherlands[J]. Europ J Agronomy, 2000, 12(1):37-54.
[21] 王 琳,郑有飞,于 强.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] Zhang X C. Calibration, efinement, and application of the WEPP model for simulation climatic impact on wheat production[J]. National Aeronautics and Space Administration, 2004,47(4):1075-1085.
[23] 刘铁梅,王 燕,邹 薇,等.大麦叶面积指数模拟模型[J].应用生态学报,2010,21(1):121-128.
[24] 刘铁梅,曹卫星,罗卫红,等.小麦叶面积指数的模拟模型研究[J].麦类作物学报,2001,21(2):38-41.
[25] 张学艺,张 磊,黄 峰,等.宁夏灌区春小麦叶面积指数的动态模拟[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):193-196.
[26] 王美丽,何东健.基于L系统的小麦根系可视化模拟研究[J].农机化研究,2008,(3):36-39.
[27] 钟 南,罗锡文,秦 琴.L系统理论在植物根系生长模拟中的应用研究[J].系统仿真学报,2008,20(7):1896-1897.
[28] 高聚林,刘克礼,刘瑞香,等.不同栽培条件对春小麦叶面积指数的影响[J].麦类作物学报,2003,23(3):85-89.

(上接第78页)

5) 全膜覆土穴播技术能显著提高旱地小麦的经济效益。全膜覆土穴播、膜侧沟播和露地条播小麦产投比分别为4.06元·元$^{-1}$、2.04元·元$^{-1}$和1.66元·元$^{-1}$。

参 考 文 献:

[1] 李 福,李城德,刘广才,等.甘肃发展旱地全膜覆土穴播技术的重要意义[J].农业科技与信息,2010,(23):3-4,27.
[2] 李 福,李城德,刘广才,等.旱地全膜覆土穴播免耕多茬种植技术[J].中国农技推广,2011,27(1):24-25,19.
[3] 李 福,刘广才.甘肃省小麦全膜覆土穴播技术的增产效果[J].农业科技与信息,2011,(23):3-4.
[4] 刘广才,李 福,李城德.小麦全膜覆土穴播技术推广中存在的主要技术问题及解决办法[J].农业科技与信息,2011,(23):11-13.
[5] 杨 琳,徐兆师,鲁 燕,等.宁夏南部山区春小麦抗旱性鉴定研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):173-178.
[6] 刘广才,杨祁峰,李来祥,等.旱地玉米全膜双垄沟播技术土壤水分效应研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):18-28.
[7] 侯慧芝,吕军峰,张绪成,等.陇中半干旱区全膜覆土穴播小麦的土壤水分及产量效应[J].作物杂志,2010,(1):21-25.
[8] 刘晓伟,何宝林,康恩祥,等.播种方式对旱区冬小麦产量及土壤水分、土壤温度的影响[J].作物杂志,2011,(5):77-81.