APSIM模型对冬小麦生长模拟的适应性研究

李 艳[1,2] 薛昌颖[3] 刘 园[2] 杨晓光[2] 王 靖[2] 王恩利[4]

（1. 北京华风气象影视信息集团有限责任公司，100081；2. 中国农业大学资源与环境学院；
3. 河南省气象科学研究所；4. 澳大利亚联邦科工组织土地与水研究所）

提 要：利用山东禹城综合农业试验站1998—1999年、2000—2001年田间试验以及北京东北旺2004—2005年水肥耦合试验数据，基于APSIM模型对冬小麦生长动态、叶面积指数和产量进行模拟和调参，获取模型所需的作物参数，包括光周期敏感系数、春化敏感系数、干物质分配系数、最大灌浆速率、辐射利用效率和蒸腾系数等，检验了模型对北京和禹城冬小麦生长模拟的适应性。模型调试和验证结果表明：禹城2000—2001年冬小麦地上部总生物量和叶面积指数的归一化均方根误差分别为32%和36%，禹城1998—1999年冬小麦地上部总生物量和叶面积指数的归一化均方根误差分别为23%和57%；北京2004—2005年试验冬小麦地上部总生物量的归一化均方根误差分别为18%和15%；北京2004—2005年试验冬小麦叶面积指数的归一化均方根误差分别为28%和51%；模型对禹城和北京冬小麦产量的归一化均方根误差为21%。APSIM模型对冬小麦生物量和产量具有较好的模拟结果。表明调参和验证后APSIM在北京和山东禹城具有较好的适应性。

关键词：APSIM模型 冬小麦 模型调试 模型验证

引 言

华北平原是我国主要产麦区，该区小麦产量的高低对全国粮食安全具有举足轻重的作用。由于华北平原地处我国东部季风区的中纬度地带，受季风影响气候特点表现为雨热同季，降水量的年际变异性较大，水分亏缺成为该地区小麦产量最主要限制因素。通过选用作物模型对该区冬小麦的生长发育进行模拟，可为冬小麦生长季内科学制定灌溉管理决策，保障冬小麦产量提供技术支持[1-2]。

APSIM（Agricultural Production System Simulator）是澳大利亚农业生产系统研究组开发的一种具有模块化结构的作物生产模拟系统。与其他作物模型相比[3-7]主要特色是在极端环境变化条件下，预测产量变化有充分的敏感性；对干旱和半干旱地区作物产量与水分关系具有较强的分析能力；可模拟多种作物，已在世界各地得到广泛应用并发挥了强大的作用[8-10]。目前，国外学者应用APSIM模型在小麦生产管理决策以及干旱风险管理等方面已做了大量的工

作[11-13]。由于APSIM模型结构较复杂、参数较多等原因，该模型在我国的适应性验证及其应用还较少，只是近几年有学者尝试应用该模型研究冬小麦干旱风险[14-15]以及小麦-玉米连作适应性的研究[16]。模型参数的本地化及适应性验证是模型得到进一步应用的基础，本文利用田间试验资料，研究APSIM模型在北京和禹城两个地区冬小麦生长模拟中的适应性，并确定一套较为合理准确的模型参数，以其为模型今后的进一步应用奠定基础。

1 资料来源与研究方法

1.1 田间试验

田间试验数据来源包括1998—1999年和2000—2001年在山东禹城综合试验站进行的冬小麦水肥优化管理试验以及2004—2005年在北京东北旺进行的冬小麦水肥耦合试验两部分。试验中所用的冬小麦品种分别为科禹13（禹城）和京411（北京）。

山东禹城综合试验站（36°57′N、116°36′E、海拔20m），属暖温带半湿润季风气候区，近30年平均值全年≥0℃积温4999℃·d，无霜期180～230天。该地四季分明，光能资源充足，年均降水量600mm，降水季节差异大，夏季（6—8月）降水量占全年总量的68%，冬春降水量只占全年总量的15%，容易发生春旱。

北京海淀区东北旺乡属华北平原北部山前冲积平原区（39°48′N，116°28′E、海拔31m），气候条件属于暖温带半湿润大陆季风气候，近30年平均值全年≥0℃积温在4752℃·d，无霜期190～200天，气候资源较为丰富。年平均降雨量为551mm，降雨主要集中在夏季6—8月，其降雨量占年降雨量的70%以上。

禹城1998—1999年及2000—2001年田间试验为当地水肥优化管理试验，播期为10月12日，播量为130kg·hm^{-2}。小麦生长季内，纯氮施入量均为250kg·hm^{-2}，基肥施入50kg·hm^{-2}纯氮，拔节期施入纯氮200kg·hm^{-2}。1998—1999年及2000—2001年冬小麦生育期降水量分别为101.4mm和111.7mm，全生育期灌溉4次：分别为越冬水、拔节水、开花水和灌浆水，每次灌水量均为100mm。冬小麦返青后每隔5天测定地上部总生物量和叶面积指数，收获时测定产量。

北京东北旺2004—2005年的田间试验为冬小麦水肥耦合试验，播期为10月7日，播量为260kg·hm^{-2}，冬小麦生育期内降水量为165.3mm。基肥各处理间都一致：N—P_2O_5—K_2O分别为48kg·hm^{-2}—104kg·hm^{-2}—135kg·hm^{-2}。共设了两个处理：

（1）处理1：生育期内灌水施肥各2次，灌溉时间分别为11月15日（越冬水）和4月1日（起身水），每次灌溉量为75mm，起身期施入纯氮120kg·hm^{-2}。

（2）处理2：生育期内灌水施肥各2次，灌溉时间分别为11月15日（越冬水）和4月17日（拔节水），每次灌溉量为75mm，拔节期施入纯氮120kg·hm^{-2}。

北京东北旺水肥耦合试验：冬小麦返青后在拔节、孕穗、抽穗、开花、成熟等关键时期测定地上部总生物量以及叶面积指数，收获时测定产量。

1.2 气象资料

APSIM模型运行需要的气象数据包括逐日最高气温、最低气温、降水量、相对湿度以及太阳总辐射等。APSIM模型的气象数据要求输入的是太阳辐射值，因此需要把原始气象文件中的日照时数转换成太阳总辐射。目前可供选择的公式较多，本文采用的

是彭曼-蒙特斯方法[17]：

$$R_m = 0.77(0.25 + 0.5 \times nN^{-1}) \times R_a \quad (1)$$

$$R_a = 37.6d_r(W_s\sin\Phi\sin\delta + \cos\Phi\cos\delta\sin w_s) \quad (2)$$

$$d_r = 1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (3)$$

$$\delta = 0.409\sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (4)$$

$$w_s = \arccos(-\tan\Phi\tan\delta) \quad (5)$$

$$N = \frac{24}{\pi}w_s \quad (6)$$

式中：R_m：总辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；R_a：晴空太阳总辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；n：日照时数；N：可照时数（h）；d_r：日地相对距离；J：日序；δ：太阳的磁偏角（rad）；W_s：日落时角度（rad）；ϕ：纬度。

1.3 土壤资料

APSIM模型需要初始化土壤的理化性质：凋萎系数、田间持水量、饱和含水量、容重、有机质含量和土壤碳氮比等参数。表1和表2列出了两试验地土壤的主要理化性质。

1.4 模型简介及参数确定

APSIM是澳大利亚系列作物模型的总称，是将各种不同的作物模型集成到一个公用的平台，该模型以日为时间步长，可以较为准确地动态模拟小麦地下和地上部分生长、土壤水分和土壤氮素运移情况。

表1 山东禹城农业综合试验站土壤理化性质

深度/cm	容重 /g·cm^{-3}	饱和含水量 /cm^3·cm^{-3}	凋萎系数 /cm^3·cm^{-3}	田间持水量 /cm^3·cm^{-3}	质地
0～20	1.2	0.40	0.08	0.29	砂壤土
20～65	1.39	0.41	0.08	0.33	砂壤土
65～97	1.4	0.42	0.28	0.37	砂壤土
97～104	1.42	0.44	0.28	0.37	砂壤土
104～150	1.39	0.46	0.28	0.37	砂壤土

表2 北京东北旺试验地土壤理化性质

深度/cm	容重 /g·cm^{-3}	饱和含水量 /cm^3·cm^{-3}	凋萎系数 /cm^3·cm^{-3}	田间持水量 /cm^3·cm^{-3}	质地
0～20	1.41	0.44	0.10	0.33	重壤土
20～40	1.57	0.48	0.11	0.33	轻粘土
40～60	1.44	0.46	0.12	0.32	重壤土
60～80	1.54	0.46	0.10	0.31	重壤土
80～100	1.71	0.51	0.13	0.32	中壤土
100～120	1.64	0.46	0.15	0.34	重壤土
120～140	1.70	0.42	0.09	0.41	轻壤土
140～160	1.69	0.47	0.13	0.41	中壤土

本研究应用的主要模块包括小麦模块、土壤水模块、土壤氮模块、地表有机质模块、管理模块、灌溉模块和施肥模块。由于模型庞大、结构复杂，需要输入大量的参数，如模型中所需调试的作物参数包括生育期各阶段的积温、光周期敏感系数、春化敏感系数、干物质分配系数、最大灌浆速率、辐射利用效率和蒸腾系数等，部分参数参考

已应用模型的经验值，部分参数由作物的生物特性及田间试验资料确定。其中辐射利用效率（*RUE*）通过植物光合产物贮存的能量（总生物量）占截获辐射量的百分比得到，截获辐射量与总生物量、总辐射量、消光系数及叶面积指数平均值有关；蒸腾效率（*TE*）在模型中以蒸腾效率系数（k）反映，其与总生物量、水汽压差及蒸腾量有关。

$$RUE = \frac{DM}{R1} \tag{7}$$

$$R1 = RT[1 - \exp(-\alpha \cdot \overline{LAI})] \tag{8}$$

式中：DM：总生物量（$kg \cdot hm^{-2}$）；$R1$：截获辐射量（$MJ \cdot m^{-2}$）；RT：总辐射量（$MJ \cdot m^{-2}$）；α：消光系数；$\overline{LAI}$：叶面积指数平均值。

$$TE = \frac{k}{\Delta e} = \frac{DM}{T_e} \tag{9}$$

其中：

$$\Delta e = e_s - e_a \tag{10}$$

$$e_s = 0.6108\exp\left[\frac{17.27T}{T+273.3}\right] \tag{11}$$

$$e_a = RH \times e_s \tag{12}$$

式中：k：蒸腾效率系数；T_e 蒸腾量（mm）；Δe：水汽压差（kPa）；e_s：饱和水汽压（kPa）；e_a：实际水汽压（kPa）；T：气温（℃）；RH：相对湿度（%）。

1.5 模型评价方法

一个模型在应用之前，要经过一系列的调参和验证。本文根据禹城1999—2000年以及北京2004—2005年试验处理1的田间试验结果获得了APSIM模型中所需的基本作物参数。并根据试验地土壤条件，修改了模型中土壤的碳氮比。利用禹城1998—1999年以及北京2004—2005年处理2的试验结果对APSIM模型模拟冬小麦生长发育和产量形成进行验证和评价。

检验模型模拟结果通常有很多指标，文中选择目前国际上通用的方法和指标对APSIM模型模拟冬小麦的生长发育和产量形成的适应性进行检验。通过图形来比较模拟值与实测值之间的吻合程度，并选择以下统计参数作为检验指标，包括模拟结果与实测结果间线性回归系数（a）、截距（β）、决定系数（R^2）、均方差（*RMSE*）、相对均方差（*NRMSE*）。

（1）决定系数 R^2

决定系数 R^2 反映模拟值与实测值之间的一致性。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(MEA_i - \overline{MEA})(SIM_i - \overline{MEA})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(MEA_i - \overline{MEA})^2 \sum_{i=1}^{n}(SIM_i - \overline{SIM})^2}} \tag{13}$$

$$R^2 = r^2$$

（2）斜率 α 和截距 β

当 $\alpha \to 1$ 和 $\beta \to 0$ 时，认为模型的模拟值与实测值一致性好。

（3）均方差 *RMSE*、相对均方差 *NRMSE*

均方差 *RMSE* 和相对均方差 *NRMSE* 对模拟值与观测值之间的符合度进行统计分析。*RMSE*、*NRMSE* 值越小，表明模拟值与观测值之间的一致性越好。表达式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(MEA_i - SIM_i)^2}{n}} \tag{14}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{A_{MEA}} \times 100\% \tag{15}$$

式中：MEA_i 为实测值，SIM_i 为模拟值，A_{MEA} 为实测值的平均值，n 为样本个数。

2　结果分析

2.1　模型调试

2.1.1　生物量模拟结果

图1给出了禹城2000—2001年以及北京2004—2005年（处理1）地上部总生物量的模拟值与实测值的比较，各项评价指标列于表3。可以看出禹城生物量的模拟值与实测值的回归系数 α 较接近1，截距 β 相对较小，且决定系数 R^2 达到了0.98。从模拟值与实测值的比较图可以看出，禹城地上部总生物量中大部分的模拟值与实测值较接近。北京地上部总生物量的模拟值与实测值也同样非常接近，决定系数 R^2 达到了0.93，禹城和北京的 *NRMSE* 分别为32%和18%（表3）。各项指标均表明模型对禹城和北京地区地上部总生物量的模拟效果较好。

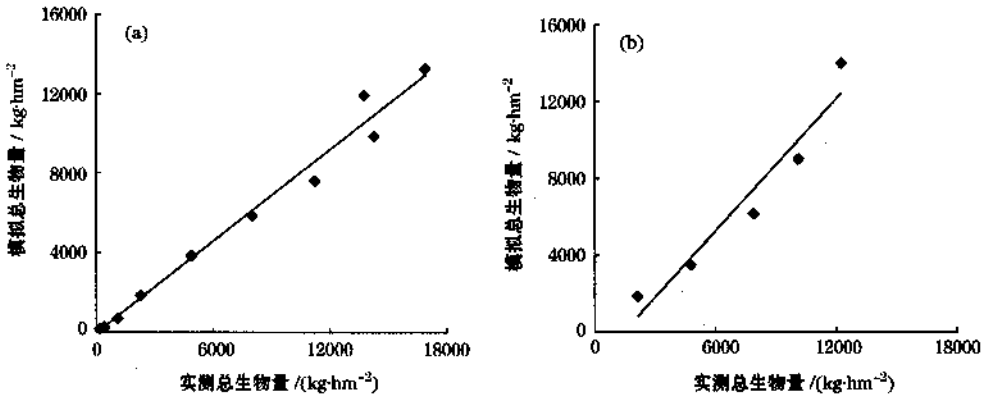


图1　模型模拟的冬小麦生物量与实测结果的比较

（a）禹城2000—2001年；（b）北京2004—2005年处理1

2.1.2　叶面积指数模拟结果

图2给出了模型对禹城2000—2001年以及北京2004—2005年试验处理1冬小麦叶面积指数模拟的动态变化结果（图中抛物线为模型模拟值，点为实测值），从图2中可见，禹城和北京的模拟值与实测值之间吻合的效果较好，但在冬小麦生长后期，实测值要略低于模拟值，但整体的趋势比较吻

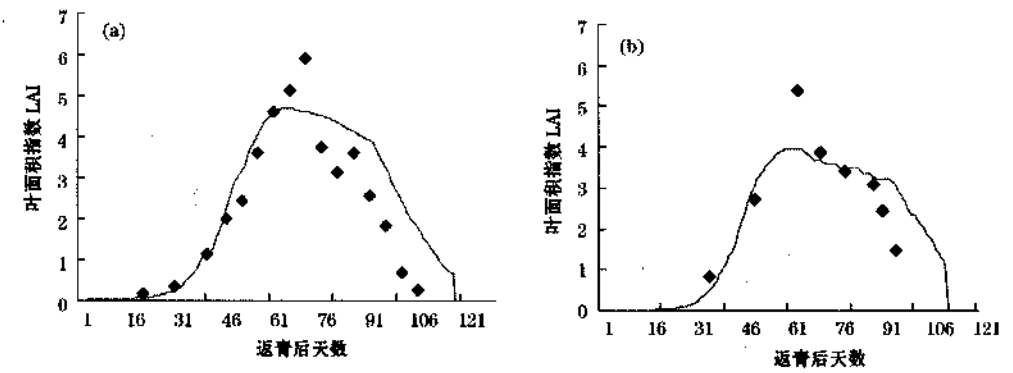


图2　模型对冬小麦叶面积指数的模拟效果

（a）禹城2000—2001；（b）北京2004—2005年处理1

合。图形比较直观地说明了模型的模拟效果。表3列出了APSIM模型对冬小麦叶面积指数模拟结果的各项统计参数评价指标，禹城和北京的截距均较小，分别为1.07和1.31；归一化均方根误差NRMSE分别为36%和28%。综合来看，模型对冬小麦叶面积指数的模拟趋势较好。

表3 模型对禹城和北京冬小麦生物量和叶面积指数模拟结果的各项评价参数指标

		N	X_{mea} (SD)	X_{sim} (SD)	α	β	R^2	$RMSE$ /(kg·hm^{-2})	$NRMSE$ /%
2000—2001年（禹城）	地上部总生物量	10	7312 (6380)	5511 (4951)	0.77	−106	0.98	2379	32
2004—2005年处理1(北京)	地上部总生物量	5	7429 (3758)	6879 (4821)	1.15	−1662	0.93	1346	18
2000—2001年（禹城）	叶面积指数	16	3.55 (1.34)	3.08 (1.58)	0.78	1.07	0.79	0.94	36
2004—2005年处理1(北京)	叶面积指数	8	2.91 (1.37)	3.04 (1.07)	0.59	1.31	0.62	0.83	28

2.2 模型验证

通过利用禹城1999—2000年和北京2004—2005年试验处理1的田间试验数据对APSIM模型中所需的作物参数进行校证，获取适合华北地区冬小麦生长的作物参数，然后应用禹城1998—1999年以及北京2004—2005年试验处理2的试验结果对APSIM模型模拟华北地区冬小麦生长发育适应性进行检验和评价。

2.2.1 生物量模拟结果验证

图3分别给出了模型对1998—1999年禹城冬小麦以及2004—2005年北京地区试验处理2冬小麦生物量模拟值与实测值的比较结果。从图中可见，模型对禹城1998—1999年地上部总生物量的模拟效果都比较好，2004—2005年模型模拟的北京地区试验处理2冬小麦的地上部总生物量的模拟结果比实测结果略偏低，但总体吻合较好。

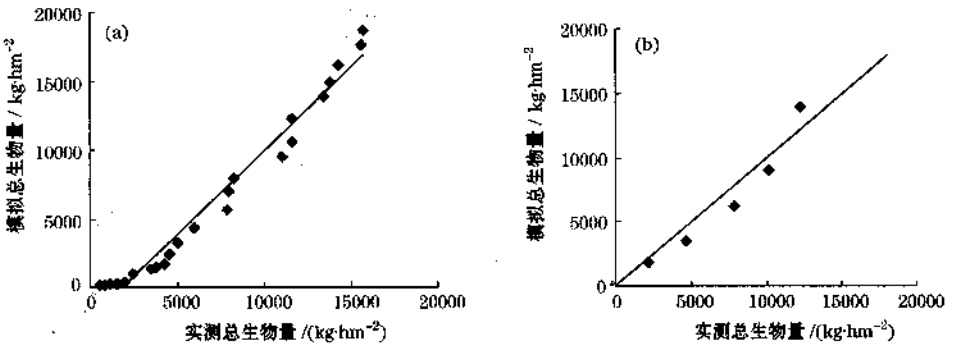


图3 模型模拟的冬小麦生物量与实测结果的比较

(a) 禹城1998—1999年；(b) 北京2004—2005年处理2

2.2.2 叶面积指数模拟结果验证

图4为叶面积指数的验证结果。从图中可以看出（图中抛物线为模型模拟值，点为实测值），禹城冬小麦生长前期，模拟值偏

低于实测值，而拔节后期，模拟值均比实测值偏高。北京试验处理2的模拟效果相对好一些，不过也存在同样的问题，冬小麦生长后期，模拟的叶面积指数比实测值偏高。叶面积指数模拟存在差异的原因可能是华北平原冬小麦存在一个漫长的越冬期，模型对该阶段考虑得不够充分，因此可能导致冬小麦生长前期模拟值偏低，此外，拔节后无效分蘖不断死亡，下部叶片变黄，导致拔节后叶面积实际值低于模拟值。

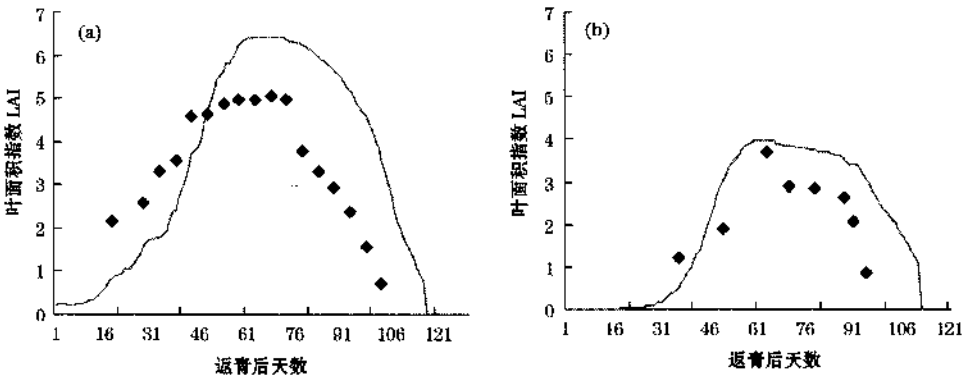


图4　模型对冬小麦叶面积指数的模拟效果

(a) 禹城1998—1999年；(b) 北京2004—2005年处理2

表4　模型对禹城和北京冬小麦生物量和叶面积指数模拟结果的各项评价参数指标

		N	X_{mea} (SD)	X_{sim} (SD)	α	β	R^2	$RMSE$ /kg·hm^{-2}	$NRMSE$ /%
1998—1999年（禹城）	地上部总生物量	24	7030 (5160)	6291 (6349)	1.21	−2250	0.98	1639	23
2004—2005年处理2(北京)	地上部总生物量	5	7420 (4654)	6553 (4664)	0.99	−764	0.97	1145	15
1998—1999年（禹城）	叶面积指数	17	3.55 (1.34)	3.46 (2.46)	1.21	−0.22	0.52	1.74	57
2004—2005年处理2(北京)	叶面积指数	8	2.27 (0.92)	3.17 (1.09)	0.84	1.27	0.53	1.16	51

各项评价指标列于表4。可以看出禹城和北京生物量的模拟值与实测值的回归系数α分别为1.21和0.99，从决定系数来看，禹城和北京地上部总生物量的决定系数R^2分别为0.98和0.97，效果较好。从*NRMSE*来分析，禹城和北京地上部总生物量的*NRMSE*也均较小，分别为23%和15%，说明模型模拟禹城北京地区冬小麦地上部总生物量的模拟效果不错。

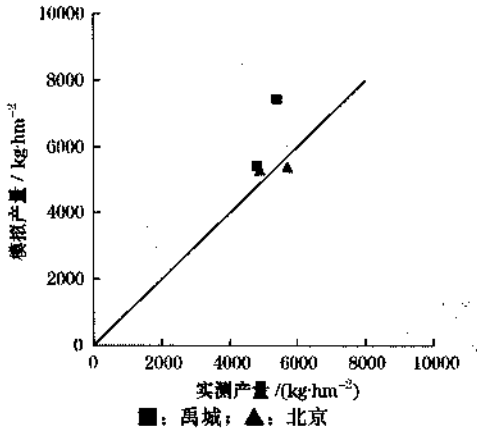
2.2.3　产量的模拟结果

作物生长模型对产量的模拟效果准确与否至关重要。图5为模型模拟的北京2004—2005年（两个处理）和禹城1998—1999年、2000—2001年冬小麦的产量与实测产量的比较，从图上看来，除禹城1998—1999年模拟产量比实测产量的误差较大外，其余的年份模拟值与实测值都较接近，吻合的效果较好，同时，从表5中的统计指标中可以得到模拟值与实测值的平均值都比较接近，另外，归一化均方根误差（*NRMSE*）为21%，也相对较小，总体看来，APSIM模型对冬小麦产量的模拟效果

表5 模型对禹城和北京最终产量模拟结果的评价指标

年份	项目	N	X_{mea} (SD)	X_{sim} (SD)	α	β	R^2	$RMSE$ /kg·hm^{-2}	$NRMSE$ /%
1998—1999年 2000—2001年 2004—2005年	产量	4	5204 (418)	5858 (1038)	0.75	1942	0.66	1082	21

较好。



■：禹城；▲：北京

图5 模型模拟的北京和禹城冬小麦最终产量与实测产量的关系

3 结 论

通过上述模型对生物量的动态模拟，模型模拟结果与实测结果的图形比较以及各项评价指标，特别是 *NRMSE* 值分析可以看出，模型能够较准确地模拟冬小麦地上部总生物量的动态变化，模型的模拟结果与田间实测结果达到了较好的吻合度，表明 APSIM 模型在模拟冬小麦生物量的动态变化上具有较好的准确性。冬小麦叶面积指数的模拟值的趋势与实测值的趋势比较一致，但模拟值在前期低于实测值而后期略高于实测值，一方面是模型对冬小麦越冬期和后期下部叶片衰老考虑不够，另一方面，冬小麦叶面积实际测定时也有可能存在误差，这都有待今后进一步研究。APSIM 模型对冬小麦产量的模拟效果较好，能够较为准确地模拟冬小麦的产量变化。通过对模型分析和验证，APSIM 模型在北京和禹城两地能较好地模拟冬小麦的生长发育，并可以应用该模型对冬小麦的生产潜力以及灌溉降低冬小麦的干旱风险进行研究。

感谢：中国科学院地理科学与资源研究所于强研究员、中国农业大学农学与生物技术学院王璞教授为本研究提供作物数据。

参考文献

[1] 沈禹颖，南志标，Bill Bellotti，等. APSIM 模型的发展与应用 [J]. 应用生态学报，2002，13 (8)：1027-1032.

[2] 朱自玺，赵国强，方文松，等. 干旱综合防御技术对小麦生长和产量的影响 [J]. 气象，2002，28 (7)：9-12.

[3] 冯利平，孙 宁，刘荣花，等. 我国华北冬小麦生产影响评估模型的研究 [J]. 中国生态农业学报，2003，11 (4)：73-76.

[4] 谢文霞，王光火，张奇春. WOFOST 模型的发展及应用 [J]. 土壤通报，2006，37 (1)：154-158.

[5] 刘建栋，王馥棠，于 强，等. 华北地区农业干旱预测模型及其应用研究 [J]. 应用气象学报，2003，14 (5)：593-604.

[6] 刘建栋，傅抱璞，金之庆，等. 应用 ARID CROP 模型对中国黄淮海地区冬小麦气候生产潜力的数值模拟研究 [J]. 自然资源学报，1997，12 (3)：282-287.

[7] 刘 洪. 基于作物模型的棉花生产潜力和气候风险分析 [D]. 北京：中国农业大学，2002.

[8] Meinke, H, Hammer, G. L., Van Keulen, H. Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping systems perspective: water and nitrogen effects on spring wheat in a semi-arid environment [J]. European Journal of Agronomy, 1997, 7: 75-88.

[9] Asseng. S, Jamieson. P. D, Kimball. B. Simulated wheat growth affected by rising temperature,

increased water deficit and elevated atmospheric CO_2 [J]. Field Crops Research, 2004, 85: 85-102.

[10] Asseng. S, van Keulen. H, Stol. W. Performance and application of the APSIM Nwheat model in the Netherlands [J]. European Journal of Agronomy, 2000, 12: 37-54.

[11] Asseng. S, Keating. B. A, Fillery. I. R. P., et al. Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia [J]. Field Crops Research, 1998, 57: 163-179.

[12] Probert, M. E., Dimes, J. P., Keating, B. A., et al. APSIM' s water and nitrogen modules and simulation of dynamics of water and nitrogen in fallow systems [J]. Agricultural Systems, 1998, 56: 1-28.

[13] Enli, W., Smith, C. J. Modelling the growth and water uptake function of plant root systems a review [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2004, 55: 501-523.

[14] 孙　宁，冯利平. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估 [J]. 农业工程学报，2005，21 (2)：106-110.

[15] 李　艳. 华北平原冬小麦生产潜力及干旱风险评估——以北京和禹城为例 [D]. 北京：中国农业大学，2006.

[16] 王　琳，郑有飞，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.

[17] 刘　钰，L. S. Pereira，J. L. Teixeira，等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比 [J]. 水利学报，1997，(6)：27-33.