

水分和氮素营养胁迫下春小麦 生长模拟模式的研究*

陈振林 王馥棠

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

根据田间试验资料, 在前人工作基础上进一步探讨了水分和氮素营养胁迫对作物生长的影响, 并建立了大田生产实际条件下春小麦生长模式. 经初步检验, 模式对总干重的模拟相对误差小于5%, 穗重模拟小于10%, 根、茎、叶等器官重、根层土壤水分含量、作物总耗氮量和籽粒氮浓度以及叶面积指数等的模拟也取得了较好的结果.

关键词: 水分胁迫; 氮素营养胁迫; 春小麦; 模拟模式.

引 言

作物生长模拟研究自本世纪中叶开始迅速发展. 在国外, 从水肥适宜下的一层模式(光温模式)发展到水分胁迫下的二层模式, 进而到水分和氮素营养胁迫下的三层模式, 综合考虑了气象、土壤、作物品种和田间管理等因素对作物生长的影响. 近年来, 为适应气候变化影响评估研究的需要, 在三层模式的基础上又考虑了CO₂直接影响问题.

我国的作物生长模拟研究起步较晚^[1], 在水稻和小麦方面做的工作比较多^[2~6]. 但已有的模式基本上都是建立在水肥适宜基础上的一层模式, 对二层和三层模式涉及较少. 本文拟在前人工作的基础上, 根据田间试验资料, 从作物生长的主要生理过程入手, 将现有的春小麦生长模拟一层模式作进一步的改进和完善, 并在此基础上探讨大田生产实际水分和氮素营养胁迫对作物生长的影响, 试图建立适于我国应用的二层和三层模式.

1 春小麦生长模拟的数学描述

资料取自内蒙古呼和浩特毕克齐农业气象试验基地1985~1991年进行的田间试验. 设分期播种、控制灌水和控制施肥等多种处理. 文中以1988、1989、1990 3年试验的18个样本为主, 并参考了其它年份的试验资料.

* 国家自然科学基金资助项目.

1993-11-26收到, 1994-08-01收到再改稿.

辐射、温度、降水等气象资料取自距试验基地以西 18 km 处的察素齐镇气象站。

模式以 10 天为计算步长,主要由生长子模式、同化物分配与转移子模式、土壤-作物-大气水分平衡子模式、氮素营养平衡子模式等组成。

1.1 生长子模式

1.1.1 发育阶段 参照春小麦一层模式^[3],采用 de Wit 的方法表示发育阶段 DVS 。

$$\left. \begin{aligned} DVS &= \Sigma T / T_K && (\text{开花前}) \\ DVS &= (\Sigma T - T_K) / T_C + 1 && (\text{开花后}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

1.1.2 叶面积(LAI)动态 根据田间试验资料,采用改进的 Logistic 生长函数描述。在水分和氮素营养适宜条件下:

$$\left. \begin{aligned} LAI &= L_{\max} \cdot (1 / (1 + \exp(a + b \cdot DVS)) - FD) \\ FD &= C \cdot DR / (1 + (C - 1) \cdot DR) \\ DR &= 0.005231 \cdot \exp(2.7525 \cdot DVS) \quad (DVS > 0.4) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, L_{\max} 为一定气象条件下春小麦可能最大绿叶面积; FD 为黄叶面积所占比例; DR 为黄叶率(黄叶重占总叶重之比)^[2]; C 为黄叶率的换算系数。

在实际水分和氮素营养胁迫条件下:

$$\left. \begin{aligned} RLAI(i) &= RLAI(i-1) + DLAI \\ DLAI &= (LAI(i) - LAI(i-1)) \cdot \min(SWF, SNF 1) && (DVS \leq 0.9) \\ DLAI &= (LAI(i) - LAI(i-1)) \cdot (1 + (1 - \min(SWF, SNF 1))) && (DVS > 0.9) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $RLAI(i)$ 、 $RLAI(i-1)$ 为实际水分和氮素营养胁迫下 i 时和 $i-1$ 时的叶面积指数; $LAI(i)$ 、 $LAI(i-1)$ 为水肥适宜条件下 i 时和 $i-1$ 时的叶面积指数; $DLAI$ 为叶面积指数增量; SWF 、 $SNF 1$ 分别为水分和氮素营养胁迫订正因子。

1.1.3 光合作用 作物的光合作用受光、温、水、肥及作物自身群体的影响,可表示为:

$$P = P_s \cdot F_L \cdot TF \cdot \min(SWF, SNF 1) \cdot A \quad (4)$$

式中, P 为单位时间内经光合作用的同化产物($\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{d}$); P_s 为经实际辐射状况订正后的郁闭冠丛的 CO_2 同化速率($\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{d}$),参照春小麦一层模式^[3],采用 de Wit 提出,经 Goudriaan、van Laar 修正的方法, TF 、 SWF 、 $SNF 1$ 分别为温度、水分、氮素营养胁迫影响因子。

温度对光合作用影响的修正:

$$TF = 1 - B \cdot (T(i) - T_o)^2 \quad (5)$$

式中, $T(i)$ 为第 i 旬的平均温度($^{\circ}\text{C}$); T_o 为光合作用适宜温度,本文取 20°C ^[3]; B 为系数,根据试验资料及计算机赋值试验取值。

1.1.4 呼吸作用

$$\left. \begin{aligned} R_t &= R_m + R_g \\ R_m &= R_{m0} \cdot Q_{10}^{(T(i)-T_{m0})/10} \cdot TDW \\ R_g &= (1 - CVF) \cdot (P - R_m) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, R_t 为总的呼吸消耗; R_m 和 R_g 分别为维持呼吸和生长呼吸消耗; R_{m0} 为维持呼吸系数,取值参照文献[3]和[8]; TDW 为植株总干重; CVF 为初级光合产物转化效率。

1.1.5 生物量增量(DMI) 植物生长量的增长,取决于光合作用(P)和呼吸作用(R_m)的大小^[8],表示为

$$DMI = CVF \cdot (P - R_m) \quad (7)$$

1.2 同化物分配与转移子模式

作物各器官的生长是以同化物在各器官中的分配和转移为基础的,用下式表示春小麦各器官的生长过程:

$$\left. \begin{aligned} W_j^{i+1} &= W_j^i + F_j \cdot DMI - FT_j \cdot W_j \quad (j = 1, 2, 3) \\ W_4^{i+1} &= W_4^i + F_4 \cdot DMI + \sum_{j=1}^3 FT_j \cdot W_j \\ \sum_{j=1}^4 F_j &= 1 \\ F_j &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, W_j 分别表示根(W_1)、茎(W_2)、叶(W_3)、穗(W_4)的干重; DMI 为植株在*i*至*i*+1时段的生物量增量; F_j 、 FT_j 分别为各器官的分配和转移系数。

假定中等程度的水分和营养胁迫对同化物的分配转移没有明显影响^[10],故本文仍采用春小麦一层模式的分配转移系数^[3]。

1.3 土壤 - 作物 - 大气水分平衡子模式

1.3.1 简化土壤水分平衡方程

$$S_i = S_{i-1} + P_i + I_i - ET_{a_i} + DMR_i \quad (9)$$

式中, S_{i-1} 、 S_i 分别为旬初和旬末根层土壤水分含量; P_i 为旬降水量; I_i 为旬有效灌溉量; ET_{a_i} 为旬实际蒸散量; DMR_i 为旬内因根系生长而进入土壤 - 作物系统的水分,即新增根层的土壤水分含量。

$$\left. \begin{aligned} ET_{a_i} &= K_{cr_i} \cdot (S_{i-1} - S_p) / (S_k - S_p) \cdot PET_i \\ DMR_i &= WNR_{i-1} \cdot RG / DNR_{i-1} \\ WNR_i &= WNR_{i-1} - DMR_i \\ DNR_i &= RD_{\max} - RD_{i-1} \\ RD_i &= RD_{i-1} + RG \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, K_{cr_i} 为作物栽培系数,参照文献[7]取值; PET_i 为旬潜在蒸散量,用改进的 Penman 公式计算^[9]; S_k 、 S_p 分别为土壤临界含水量和最大吸湿度^[9]; DNR_i 为旬潜在长根层中尚未长根土层总含水量; WNR_i 为旬潜在长根层中尚未长根土层厚度(cm); RD_{\max} 为最大根层深度^[8]; RD_i 为旬根系深度; RG 为旬根系增长量,本文取 12 cm^[8]。

1.3.2 土壤水分胁迫参数化

Doorenbos 和 Kassam(1979)^[11]建立了相对产量和相对蒸散量之间的线性关系式:

$$\left. \begin{aligned} (1 - Y_a/Y_m) &= K_y \cdot (1 - ET_a/WRE) \\ Y_a &= Y_m \cdot SWF \\ SWF &= 1 - K_y \cdot (1 - ET_a/WRE) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, Y_a 为实际产量, Y_m 为最高产量(无水分胁迫); K_y 为产量反应因子(本文根据试验资料确定其为 DVS 的函数); ET_a 为作物实际蒸散; WRE 为作物需水量,即最大蒸散(无水分胁迫); SWF 为水分胁迫影响因子,与生长模式嵌套时用于对光合作用和叶面积动态进

行水分胁迫的影响订正。

经检验,我国春麦区作物实际蒸散量(ET_o)、作物需水量(WRE)与根层土壤实际含水量(S_t)和有效含水量(S_{at})之间的关系^[12]可表示为

$$ET_o/WRE = 1.03 - \exp(-3.5 \cdot S_t/S_{at}) \quad (12)$$

1.4 氮素营养平衡子模式^[17]

1.4.1 土壤有效氮素的供给

$$\left. \begin{aligned} TRNU &= N_t + CFN \\ N_t &= N_o \cdot (1 - \exp(-KH \cdot t)) \cdot (a \cdot S_t/s_{at} - b) \\ CFN &= CFNP - (CFNP \cdot c \cdot \Sigma T)/(c + d \cdot \Sigma T) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中, $TRNU$ 为土壤有效氮供给总量; N_t 为土壤有机质矿化氮量; N_o 为土壤氮的矿化势; KH 为矿化速率,在实际水热条件下随温度变化^[13]; t 为时间; S_t 、 S_{at} 分别为 t 时的土壤水分含量和有效水分含量,两者由水分平衡子模式求出; CFN 为化肥提供的有效氮; $CFNP$ 为可利用的化肥氮总量; ΣT 为从施肥开始的累积温度;系数 a 、 b 、与 c 、 d 分别参考文献^[13]与^[6]取值。

1.4.2 作物对氮素的吸收

$$\left. \begin{aligned} NDEM &= TNDEM + RNDEM \\ TNDEM &= WT \cdot (TCNP - TANC) + WTI \cdot TCNP \\ RNDEM &= WR \cdot (RCNP - RANC) + WRI \cdot RCNP \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中, $NDEM$ 为作物总需氮量; $RNDEM$ 、 $TNDEM$ 分别为根部和茎叶需氮量; WR 、 WT 分别为根和茎叶已有干重; WRI 、 WTI 分别为根与茎叶潜在干重增长量; $RCNP$ 、 $TCNP$ 分别为根与茎叶临界含氮浓度; $RANC$ 、 $TANC$ 分别为根与茎叶实际含氮浓度。

若土壤供氮量($TRNU$)大于作物需氮量($NDEM$),则作物氮素吸收量 $NUP = NDEM$;反之则 $NUP = TRNU$ 。

被作物吸收的氮在作物体内依各营养器官的相对需求而分配,向籽粒的传输则取决于籽粒需氮量和营养器官中可供转移的氮素含量^[14~17]。

1.4.3 氮素营养胁迫参数化

$$NFAC = 1 - (TCNP - TANC)/(TCNP - TMNC) \quad (15)$$

式中, $NFAC$ 为反映作物氮素余缺动态变化的因子(0~1); $TMNC$ 为茎叶最低含氮浓度。

由于作物不同的生理过程对氮胁迫的敏感性不同,所以由 $NFAC$ 分别计算氮胁迫影响因子 $SNF1$ 和 $SNF2$ 。

$$\left. \begin{aligned} SNF1 &= A \cdot NFAC \\ SNF2 &= NFAC \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中, $SNF1$ 为氮素营养胁迫对光合作用和叶面积动态的影响因子; $SNF2$ 为氮素营养胁迫对籽粒氮浓度的影响因子; A 为系数,根据计算机赋值试验取值1.25^[15,16]。

2 模式的有效性检验与结果分析

为了检验模式的有效性,对1988~1990年试验的全部样本进行了计算,因篇幅所

限,仅给出 1989 年第 3 期的模拟与实测结果(图 1 ~ 图 4)。

2.1 发育期和叶面积指数的模拟

对主要发育期的模拟,开花期平均偏差为 2 ~ 4 天,成熟期为 1 ~ 2 天,模拟效果较好. 图 1 为叶面积指数实测值和模拟值动态变化曲线,模拟与实测的差异主要与该子模式经验性强,黄叶率的估算尚不够完善以及观测误差等有关。

2.2 生物量的模拟

根、茎、叶等营养器官干重模拟与实测动态变化曲线见图 2. 模拟与实测基本吻合. 相比之下,后期误差大于前期,这与生物量在各器官之间的分配模式尚不够完善有关。

总干重和穗重的模拟见图 3 和图 2(d). 可以看出,无论生长前期、中期还是后期,模拟与实测值均吻合较好. 最终总干重和穗重的模拟结果见表 1. 这是对不同施肥处理的各试验期次(存在不同程度的营养胁迫) 分别用二层与三层模式进行模拟的效果比较. 不考虑氮素营养胁迫的二层模式对干重和穗重的模拟其相对误差的平均值分别为 14.13%、16.16%。考虑营养胁迫的三层模式对二者的模拟,其相对误差平均值则分别为 3.20%、8.29%。可见,随着对环境影响模拟层次的增加,模拟结果更加趋近于实测值. 而

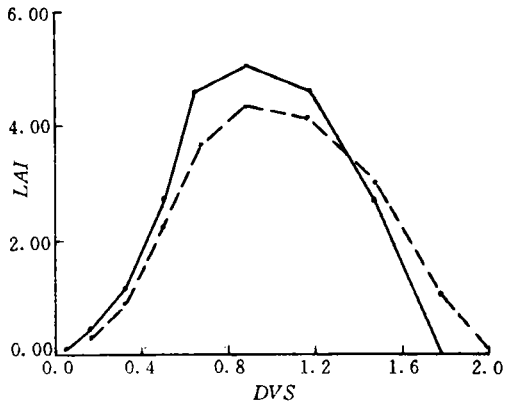


图 1 LAI 模拟与实测值动态变化曲线

Fig. 1 The dynamic variation curves for modelling and measuring of LAI

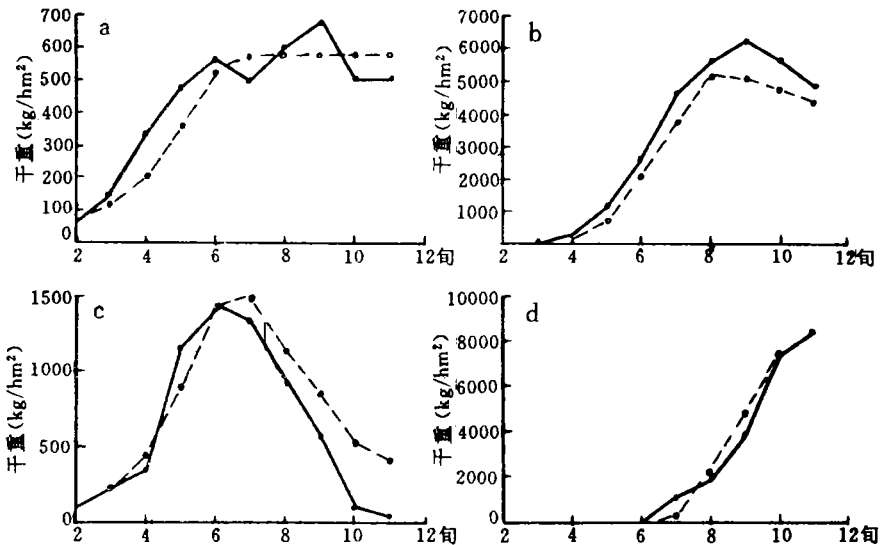


图 2 根(a)茎(b)叶(c)穗(d)干重模拟(虚线)与实测(实线)值动态变化曲线

Fig. 2 The dynamic variation curves for modelling(dashed line) and measuring(solid line) of dry matter weight of root(a),stem(b),leaf(c) and spike(d)

当氮素营养充分满足,仅存在水分胁迫影响时,二层模式对各期次总干重和穗重的模拟,其相对误差平均值分别为4.63%、8.17%,效果较好(见表2)。

2.3 土壤水分含量的模拟

图4为水分平衡子模式模拟的0~50cm土壤水分体积含水量(%)与实测值的变化曲线。模拟值与实测值基本吻合,但模拟值普遍偏大于实测值,这说明该子模式尚需进一步的运行、调试,以期达到更加令人满意的模拟效果。

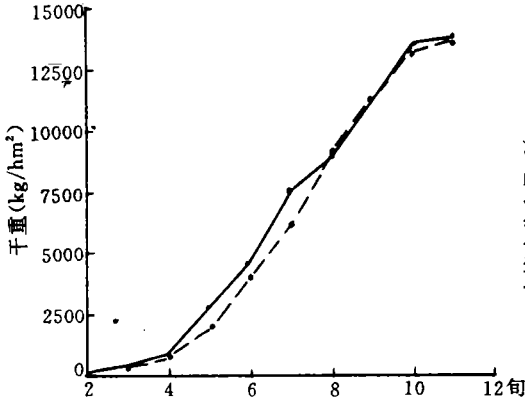


图3 总干重模拟(实线)与实测值(虚线)动态变化曲线
Fig.3 The dynamic variation curves for modelling (solid) and measuring (dashed) of gross dry matter weight

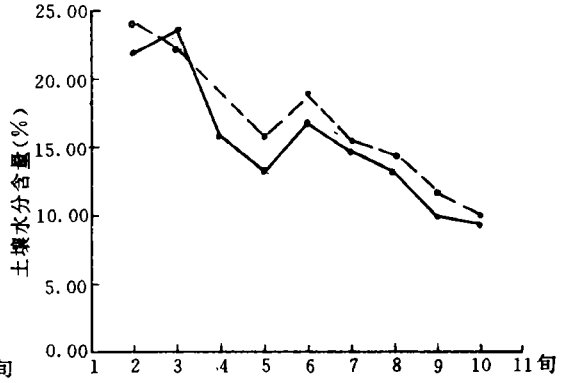


图4 0~50cm土壤水分含量模拟(实线)与实测值(虚线)
Fig.4 The modelling (solid) and measuring (dashed) curves of soil water content within 0~50cm depth

表1 氮素营养不能充分满足时二层模式与三层模式模拟效果

Table 1 The simulation effects of 2-level and 3-level models under deficient nitrogen nutrition conditions

		1989年					1990年			
期次		3	4	5	6	7	4	5	6	7
实测	总干重	12279.60	11630.20	12084.10	13304.40	13088.70	11046.48	11940.24	12425.02	14831.24
	穗重	8605.50	7000.19	7396.80	7854.00	7921.50	6730.01	6492.23	8160.00	9161.20
二层模式	总重	13727.52	13751.05	13746.42	13722.66	13755.48	14682.21	14685.19	14680.89	14671.35
	误差	11.79	18.24	13.76	3.14	5.09	32.91	22.99	18.16	-1.08
	穗重	8595.40	8589.25	8582.03	8581.68	8582.45	9141.30	9139.38	9140.74	9141.25
	误差	-0.16	22.7	16.02	9.34	8.34	35.83	40.77	12.02	0.22
三层模式	总重	12134.20	12137.34	12167.16	11787.02	12230.43	11276.74	11822.20	12524.22	14672.76
	误差	-1.18	4.36	0.69	-11.40	-6.56	2.08	-0.65	0.80	-1.07
	穗重	8013.98	7988.69	8016.16	6877.82	7056.32	6989.70	6728.50	6983.37	9141.96
	误差	-6.87	14.12	8.37	-12.40	-10.92	3.86	3.64	-14.40	-0.21

注:重量单位:kg/hm²,误差为%。

2.4 不同灌溉水平对春小麦生长的影响

表2为二层模式模拟的不同灌溉水平对春小麦最终总干重和穗重的影响。可以看出:随着灌水量的增加,模拟与实测总干重和穗重基本呈增加的趋势,其中1988年第3期总干重和穗重模拟与实测值均不及第2和第4期。从该期各旬水分胁迫因子来看,存在因短期水分过多而造成的不利影响($SWF = 0.90$),可见灌水量过剩导致了产量下降。从模拟效果来看,除1988年第1期总干重和穗重及1990年第1期穗重实测值明显偏低而导致模

拟误差偏大外, 其余均取得了较好的模拟效果. 而实测值偏低可能系取样及测量误差所致.

表 2 不同灌溉水平对春小麦最终总干重和穗重的影响

Table 2 The impacts of different irrigation managements on the gross dry matter weight and dry matter weight of spike

期次	灌水量 (mm)	总干重 (kg/hm ²)			穗重 (kg/hm ²)			
		模拟	实测	误差 (%)	模拟	实测	误差 (%)	
1988	1	126	13193.94	10829.82	21.82	8032.94	6754.00	18.9
	2	196	13591.88	13832.50	-1.74	8265.13	8407.40	-1.69
	3	362	13229.46	12599.20	5.00	7873.99	7561.50	4.13
	4	278	13605.48	13865.8	-1.88	8301.62	8781.30	-5.46
1989	1	85	13405.94	13559.40	-1.13	8294.12	8838.20	-6.16
	2	190	13687.76	13680.43	0.05	8576.96	8778.00	-2.29
1990	1	0	14090.58	13294.51	5.99	8938.22	7452.90	19.93
	2	28	14165.36	13987.85	1.27	8946.91	8147.28	9.81
	3	147	14674.78	15088.24	-2.74	9142.75	8692.16	5.18

表 3 春小麦总耗氮量、籽粒含氮浓度模拟值与实测值的比较

Table 3 Comparisons between simulated and measured values of the total nitrogen uptaked by wheat and grain nitrogen content

期次 (1990)	4	5	6	7	
施肥量 (kg/hm ²)	0	80	120	200	
总耗氮量	模拟	144.06	165.92	188.82	242.95
(kg/hm ²)	实测	110.43	126.74	160.68	205.22
籽粒含	模拟	0.020	0.021	0.021	0.025
氮浓度	实测	0.019	0.019	0.024	0.026

2.5 作物总耗氮量和籽粒氮浓度的模拟

表 3 给出了 1990 年 4 期施肥处理试验春小麦总耗氮量和籽粒氮浓度实测值与三层模式的模拟值. 可以看出, 随着施肥量的增加, 作物总耗氮量和籽粒氮浓度基本呈上升趋势, 模拟值与实测值变化趋势一致. 由于作物根系实际测量比较困难, 根部生物量损失较多, 使作物总耗氮量的实测值偏低.

3 结论与讨论

(1) 本文综合考虑了气象、土壤、作物品种和田间管理等因素的影响, 建立了在大田生产实际水分和氮素营养胁迫下的春小麦二层和三层模式. 模式软件以旬为计算步长, 运行速度快, 可在水肥适宜、仅受水分胁迫影响、受水分和氮素营养胁迫影响 3 个不同层次上模拟再现春小麦生长发育和产量形成过程, 并能提供大量的输出信息.

(2) 经初步检验, 模式对最终总干重的模拟相对误差小于 5%, 穗重模拟小于 10%, 对根、茎、叶等器官重和根层土壤水分含量、作物总耗氮量、籽粒氮浓度以及叶面积指

数等的模拟也取得了较好结果. 说明模式性能较好, 具有一定的实用价值和潜在的应用前景.

(3) 本模式虽属机理性模式, 但仍含有一定的经验成分. 水分、氮素营养胁迫对同化物分配与转移的影响、群体密度的变化、穗与产量的关系等都有待于进一步的试验研究. 此外, 杂草、病虫对作物生长的影响以及 CO_2 浓度增加的直接影响等问题亦需继续探讨.

参 考 文 献

- 1 王馥棠, 李郁竹, 王石立. 农业产量气象模拟与模型引论. 北京: 科学出版社, 1990. 110~134.
- 2 王馥棠, 李友文, 王石立等. 春小麦黄叶率发生规律及其模拟模式的研究. 应用气象学报, 1990, 1 (3): 305~312.
- 3 王石立, 王馥棠, 李友文等. 春小麦生长简化模拟模式研究. 应用气象学报, 1991, 2 (3): 294~300.
- 4 侯琼, 郭友三, 王馥棠等. 春小麦产量与养分供应关系的模拟研究. 见: 中国气候变化对农业影响的试验研究. 北京: 气象出版社, 1991. 117~123.
- 5 南京气象学院水稻数值模拟组. 晚稻生长简化模式研究. 见: 中国气候变化对农业影响的试验研究. 北京: 气象出版社, 1991. 137~145.
- 6 高亮之, 金之庆, 黄耀等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统. 江苏农科院, 1991.
- 7 陈力. 最大蒸发量的计算、分析及其利用. 气象学报, 1982, 40 (2): 219~227.
- 8 van Keulen H & Wolf J. 农业生产模型-气候、土壤和作物. 杨守春等译. 北京: 中国农业科技出版社, 1988.
- 9 裴步祥. 蒸发与蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989. 99~107.
- 10 Pening de Vrise F W T et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Pudoc, Wageningen, 1988.
- 11 Doorenbos J and Kassam A H. Yield response to water, irrigation and Drainage paper No. 33, Rome. FAO, 1979.
- 12 FAO. A study of the agroclimatology of the humid tropics of southeast Asia. Technical Report, Rome: FAO, 1982.
- 13 Stanford G. Assessment of soil nitrogen availability. In: Stevensol G J. (ed.), Nitrogen in agricultural soil. Amer. Soc. Agr., Crop Sci. Soc, Amer., and Soil Sci. Soc. Amer. Madison, Wisconsin, 1982. 651~688.
- 14 van Keulen H & Seligmean NG. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. Pudoc, Wageningen: 1986.
- 15 Jonse C A, Kiniry J R & Ritchie J T et al. CERES-maize: a simulation model of maize growth and development. Texas A. and M. University Press. Temple, 1987.
- 16 Ritchie J T et al. IBSNAT and the CERES-rice models. weather and rice. IRR, 1987.
- 17 陈振林. 氮素营养胁迫与作物生长模拟. 气象科技, 1993, (4) : 74~79.

A SIMULATION MODEL OF SPRING WHEAT GROWING UNDER CONDITIONS OF ACTUAL WATER SUPPLY AND NITROGEN DEFICIENCY

Chen Zhenlin Wang Futang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Base on field experimental data, the influences of soil water stress and nitrogen deficiency on the crop growing are investigated, and the simulation model of spring wheat growing is established. Comparing with the field experimental data (1988 ~ 1990), the simulation results show that the mean relative error is less than 5% for the weight of total dry matter and 10% for the spike weight. In addition, leaf area index, total nitrogen-uptaked content and grain nitrogen content, other organs weight and soil water content within root depth etc. are also simulated well.

Key words: Water stress; Nitrogen nutrition deficiency; Spring wheat; Simulation model.