

冬小麦生长模式及其在干旱影响评估中的应用*

王石立**

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

在前人理论研究和田间试验的基础上, 考虑水分胁迫影响的滞后性及作物不同发育阶段对水分胁迫的敏感性, 研制出实际水分条件下的冬小麦生长模拟模式. 经与不同水分处理的实测资料对比, 模拟效果基本令人满意, 平均误差为 10% 左右. 利用生长模式得到实际水分条件下的干物重减少率, 进行了干旱影响实时评估的尝试. 并分别在返青后、拔节后和成熟前展望了干旱对最终生物量的可能影响.

关键词: 水分胁迫订正 冬小麦 生长模式 干旱评估

引 言

我国季风气候显著, 气候灾害频繁. 其中干旱以其发生程度重、影响时间长、波及范围大而成为制约农业可持续发展的主要不利因素. 因此, 客观评估干旱对农业生产的影响, 为制定防灾、减灾、救灾对策提供科学依据, 是气象为农业服务的一个重要方面.

目前, 常用的干旱对农业影响评估模型主要有作物产量与降水量或土壤水分等要素的经验统计模型和基于作物生产与水分关系的静态模式, 如 FAO 产量与水分关系模式^[1]. 随着作物生长模拟技术的不断发展, 利用以作物与环境间的能量和物质转换为基础、机理性较强的作物生长模式进行干旱影响评估, 具有十分积极的意义.

本文吸取了诸多冬小麦生长模式的特点, 对冬小麦发育期模拟、冬前生长与返青生长过程的衔接、越冬期冻害和水分胁迫影响等方面进行了改进, 建立了考虑水分条件的冬小麦生长模式, 并在此基础上进行了干旱影响实时评估和展望性评估的尝试.

1 方法与资料

在前人理论研究和部分田间试验基础上, 运用计算机技术, 对作物光合作用、呼吸消耗、干物质积累、同化物分配等一系列生理过程及其与辐射、温度、降水等环境气象条件的相互关系进行数学模拟, 并充分利用生长模式得到的信息进行干旱影响的实时及

*国家科委 85-006-01-17 增补专题资助. **李光华同志参加部分工作.

1997-01-16 收到, 1997-03-20 收到修改稿.

展望评估。

模式以日为时间步长, 光合、呼吸的计算基本采用目前公认的理论 and 参数^[2,3]。干物质分配、叶面积动态及水分胁迫影响等参数的确定主要根据山东泰安、河北固城两地 1992~1994 年小麦分期播种和泰安 1983~1986 年水分田间试验资料, 后者共 5 种水分处理, 即小麦拔节期、抽穗期的土壤相对湿度分别为 <40%、40%~60%、60%~80%、>80% 和对照。

2 冬小麦生长模式的数学描述

2.1 发育期子模式

正确模拟越冬和返青开始日期是冬小麦发育期模拟的基本要求。根据冬小麦生物学特性和农业气象观测规范, 确定越冬期开始和返青开始日的标准。

模式以发育所需积温为指标, 以实际积温占所需积温的比值表示发育阶段 (DVS)。根据适时播种冬小麦冬前长一片叶子需 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 80~90 $^{\circ}\text{C}$, 冬前一般长 7~8 片叶以及播种至出苗约需积温 100 $^{\circ}\text{C}$ 的估计^[4], 确定冬前所需积温。对于早播或晚播造成的旺苗或达不到壮苗, 模式是通过 DVS 及其与叶面积增长的关系控制的。返青—开花和开花—成熟所需积温因气候、品种特性而异, 根据文献和试验资料分别确定。表 1 为冬小麦部分发育期的模拟结果。

表 1 冬小麦发育期模拟结果(月·日)

地点	年代	越冬期开始		返青期开始		开花期		成熟期	
		模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测
泰安	1983~1984	12.18	12.18	3.11	3.12	5.11	5.11	6.08	6.08
	1984~1985	12.17	12.17	2.03	2.10	5.08	5.10	6.03	6.10
	1985~1986	12.08	12.10	3.03	2.24	5.06	5.08	6.04	6.09
	1992~1993	12.05	—	2.11	2.11	5.04	5.03	6.01	—
	1993~1994	11.21	11.19	2.17	2.14	5.04	5.05	5.31	5.31
固城	1992~1993	11.27	11.26	3.03	3.02	5.13	5.14	6.14	6.15
	1993~1994	11.20	12.04	3.14	3.15	5.13	5.12	6.13	6.11

2.2 叶面积动态子模式

叶面积的扩大或减小与叶重变化有关, 借助于比叶面积值可由叶重得到叶面积指数 (LAI)。然而, 比叶面积受作物发育和水分胁迫影响, 变化很大, 而模拟的误差将在叶重-叶面积-光合-生长-叶重这一反馈环中起到加大误差的效果。因此, 研究中利用实测的 LAI 资料, 独立于叶重进行模拟。首先建立水分适宜条件下的 LAI 随作物发育阶段变化的函数, 然后进行订正得到实际水分条件下的 LAI 值。

2.3 光合作用子模式

冠层光合作用的计算是作物生长模拟的基础。本模式采用 Goudriaan 对叶片在时间、空间的光合作用瞬时速率进行积分的概要模型^[3]。光-光合作用反应曲线用负指数函数

描述^[3]。温度对光合作用的影响体现在叶片最大光合速率和初始光能利用率上。小麦在光合适宜温度 10~25 °C 内的最大光合速率为 40 kg/hm²·h(对 CO₂)，在此范围外光合速率线性下降^[2]。初始光能利用效率随温度升高而降低，根据对标准温度效率值^[3]内插得到。

冠层深度分为 3 层，先根据各层叶片吸收的直射、漫射光合有效辐射通量计算瞬时光合速率，再用高斯积分对 3 个深度加权平均，乘以群体叶面积，得到某时刻冠层光合速率。

在时间尺度上，假定上午、下午光合速率相同，计算午时至日落间 3 个时刻点上的冠层瞬时光合速率，加权平均后乘以日长，计算出冠层光合作用日总量。

2.4 呼吸作用子模式

小麦维持呼吸率(每日形成 1 g 干物质所消耗的 CH₂O)先取 20 °C 下 0.015 g/g·d，再根据实际温度进行订正。光合产物与维持呼吸量的差值乘以转换效率(0.7 g/g·d)，得到一天的生长速率。

2.5 同化物分配子模式

目前关于同化物分配的内部调节规律仍了解甚少，基本还是通过试验收集资料确定关系。基于同化物分配过程是作物发育的函数的认识，利用试验资料，按冬前和返青后分别确定了根、茎、叶、穗各器官比例随 DVS 的演变规律。其中假定开花后同化物全部分配到储存器官，同时，茎的生长一旦停止，原先分配到茎中的暂时储存物将部分转移到储存器官。转移速率为每日总储存量的 10%，小麦开花时茎中储存物占茎重的 40%^[3]，因此，每日由茎转移到储存器官的同化物重量为茎重的 4%。用模拟穗重推算的籽粒重量与实测籽粒重相近(表 2)，说明对储存器官的分配及转移的估算基本正确。

2.6 越冬子模式

冬前获得的生物量用于春季生长的数量是冬小麦生长模拟中一个特殊问题。黄河以南地区一般年份小麦带绿过冬，但叶尖或部分叶身死亡；黄河以北地区绿色叶片基本冻死。若遇强低温，可发生冻害，造成死苗。因此，模式假定黄河以北地区冬小麦越冬期间叶片全部冻死，返青时叶重从零开始计算。黄河以南地区绿叶重减少比例依冬季冷暖程度而异。根据泰安资料，由日最低温度小于 -10 °C 的天数确定偏冷、一般、偏暖年型，至返青时叶重分别减少 70%、50% 和 30%。同时，将华北地区冬小麦冻害研究结果^[6]嵌入本模式，确定出现强低温造成的干物重损失比例。

2.7 水分胁迫子模式

(1) 土壤水分平衡子模式 土壤水分不足时，植物水分吸收减少，气孔阻力增强，实际蒸腾小于潜在蒸腾，光合强度降低。为了确定水分胁迫及其对光合作用的影响，需计算作物根区土壤水分平衡：

$$\Delta W = I + P + dM_r - E_a - T_a \quad (1)$$

式中 W 为根区土壤水分变化量； I 、 P 分别为灌溉量和降水量； dM_r 为随着根系向下伸长补充到植物-土壤系统中的水分，根据根系最大可能伸长范围内的土壤含水量和每日根的扎根深度计算^[2]； E_a 、 T_a 分别为实际蒸发和实际蒸腾。先按照 FAO 1992 年推荐的 Penman-Monteith 公式业务计算方法^[7]估算潜在蒸散。由作物系数得到农田最大蒸散 ET

后,根据植株郁蔽状况估算最大蒸发量 E_m 和最大蒸腾量 T_m :

$$E_m = ET \cdot e^{-K \cdot LAI} \quad (2)$$

式中 K 为消光系数, LAI 为叶面积指数. 实际蒸发量(E_a)由下式估算:

$$E_a = E_m \cdot (SM_r - SM_a) / (SM_{fc} - SM_a) \quad (3)$$

式中 SM_r 为模拟的根区水分含量(cm^3/cm^3), SM_a 为蒸发完全停止时的土壤含水量,约为凋萎湿度的 $1/3$ ^[2], SM_{fc} 为田间持水量.

作物冠层表面最大蒸腾量的估算如下:

$$T_m = ET \cdot (1 - e^{-K \cdot LAI}) \quad (4)$$

实际蒸腾量(T_a)根据土壤临界水分含量 SM_{cr} 与上一时刻土壤含水量 SM_r 确定:

$$T_a = \begin{cases} T_m & \text{当 } SM_r \geq SM_{cr} \\ T_m \cdot (SM_r - SM_w) / (SM_{cr} - SM_w) & \text{当 } SM_r < SM_{cr} \end{cases} \quad (5)$$

$$SM_{cr} = (1 - p)(SM_{fc} - SM_w) + SM_w \quad (6)$$

式中 SM_w 为凋萎湿度, p 为土壤耗水系数,与作物种类和最大蒸腾量有关^[2].

(2) 水分胁迫影响 水分胁迫的影响首先表现在光合强度上,通常用实际蒸腾和最大蒸腾的比值(T_a/T_m)表示影响大小.但是,当连续数日出现水分胁迫后某日有降水或灌溉时, T_a/T_m 立即变大,直接使用 T_a/T_m 便意味着该日干旱影响马上解除.考虑到胁迫的出现和解除有一个渐进及后效的过程,通过试验确定以 T_a/T_m 的 10 日滑动平均值作为水分胁迫系数.

另外,作物不同发育阶段对水分亏缺的敏感程度不同.分析统计了不同水分处理,特别是严重干旱和适宜水分处理下各发育阶段干物质增量的差别.返青—拔节期内的不同水分处理没有造成干物质增量的显著差别,用 T_a/T_m 估计水分胁迫偏大.抽穗—乳熟初期水分处理间的干物重增量差别较大,滑动平均相对蒸腾的差别与干物质增量变化基本一致.乳熟期以后,水分胁迫影响的差别再度变小.由上述事实 and 资料,以 FAO 的产量反应系数为初值进行数值模拟试验,得到了不同发育阶段水分敏感系数.

水分胁迫的影响还表现在叶重和叶面积的变化.叶重受水分胁迫的影响也采用 10 日滑动平均相对蒸腾计算:

$$RDL = 0.03(1 - T_a/T_m) \quad (7)$$

式中 RDL 为叶重减少率, $0.03 \text{ kg/kg} \cdot \text{d}$ 为叶片最大凋萎速率^[2].

实际水分状况下的叶面积指数通过对适宜水分条件的叶面积指数进行订正得到,订正系数为滑动平均相对蒸腾的函数,根据实测资料建立.

2.8 模式检验

用泰安 1983~1984 年、1984~1985 年两个年度不同水分处理的实测干物重和最终产量与模拟值进行了比较.处理 1~4 和处理 6~9 分别代表小麦拔节期和抽穗期处于干旱、轻度干旱、水分适宜和偏多 4 种水分状况.处理 5 和处理 10 为对照,依靠天然降水.图 1 为 1984~1985 年度处理 6、7、8、10 的模拟总干重与实测值的比较.除个别观测值偏离模拟曲线外,模拟的干物重变化趋势和实际观测结果基本一致.表 2 为模拟的最终总干重和籽粒产量与实测值比较,大部分期次二者比较接近,总体平均误差为 10% 左右.

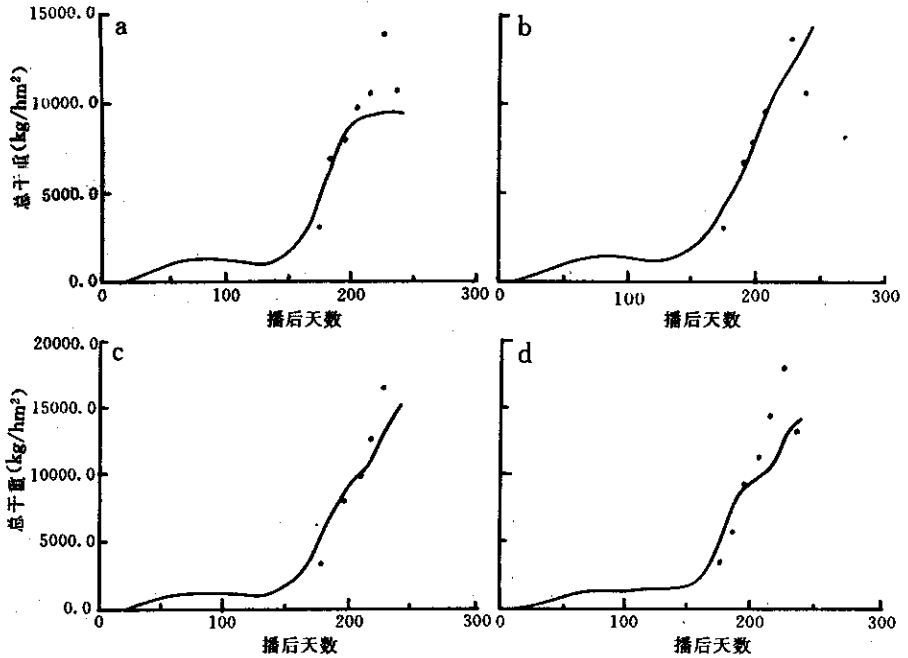


图1 泰安1984~1985年度水分处理6(a)、7(b)、8(c)、10(d)的总干重模拟结果与实测值比较(实线:模拟值,点:实测值)

表2 总干重和产量的模拟值与实测值比较(kg/hm²)

年	水分处理	总干重			产量		
		实测	模拟	相对误差(%)	实测	模拟	相对误差(%)
1983~	1	11566	10668	8	6330	5655	11
	2	12670	11942	6	7545	6075	20
	3	16905	14472	23	8340	6855	18
	4	15257	14922	2	8130	7005	14
1984	5	15469	12330	21	7950	6210	22
	6	10162	8210	9	5775	4035	30
	7	14664	13723	6	7350	6915	6
	8	18641	15130	19	7785	7530	3
	9	17690	16315	8	7710	7650	1
	10	13730	14719	7	5730	7260	26
1984~	2	14681	15412	5	7305	7395	1
	3	18414	16776	9	7740	7455	4
	4	16257	17345	7	7350	7485	2
	5	14191	14594	3	7200	6990	3
1985	6	10807	9339	8	4320	4305	1
	7	12666	14181	12	6270	6795	8
	8	14908	15124	1	7530	7185	5
	9	16555	15355	7	7755	7350	5
	10	13289	14594	10	7380	6990	5
	平均			9			10

3 冬小麦生长模式在干旱影响评估中的应用

3.1 实时评估

利用冬小麦生长模式可以逐日模拟实际水分条件下的干物质累积过程。然而,在进行干旱影响评估时,人们还希望了解干旱发生时的生物量相对于正常情况下的减少程度。本研究以水分适宜时的最大干物质累积量为比较标准,同步模拟每日实际水分条件下和适宜水分条件下的干物质累积量,并计算该日干物质减少率:

$$RWT = \frac{WT_0 - WT}{WT_0} \quad (8)$$

式中 RWT 为干物重减少率, WT_0 为适宜水分下的最大干物重, WT 为实际水分条件下的干物重。根据各时刻计算的 RWT , 可以评估水分胁迫对干物重的影响。

图 2 a 为泰安 1984~1985 年度处理 6、7、8、9、10 干物重减少率的时间演变图。处理 6 全生育期无灌溉, 无降水。随着生长进程中小麦需水的增加和土壤水分的消耗, 水分胁迫不断加剧。干物重减少率持续上升, 抽穗—开花期为 0.35~0.42, 生长后期高达 0.5 左右。整个生育期内干物重减少率一直大于其它处理。对照图 2 b 可以看出, 处理 6 的实测干物重曲线始终位于其余处理的下方。另外, 处理 6 的实测产量比水分基本适宜的处理 8 和处理 9 低 40% 左右。图 2 a 中处理 7 和处理 8 前期 RWT 上升到 0.3 左右。抽穗期起进行灌溉, RWT 不再增加。处理 8 灌溉量较大, RWT 有所下降, 最终为 0.25。处理 9 水分状况最好, 干物重减少率最低, 抽穗期起 RWT 逐渐下降至 0.2。图 2 b 中处理 7、8、9 的 3 条实测总干物重曲线依次从低到高, 恰与水分供应状况由差到好的变化相吻合。处理 10 虽无灌溉, 但抽穗—开花期间雨水较多, 干物重减少率介于处理 8 与处理 7 之间。图 2 b 处理 10 的实测干物重也与处理 8 较接近, 最终产量相差 2%。

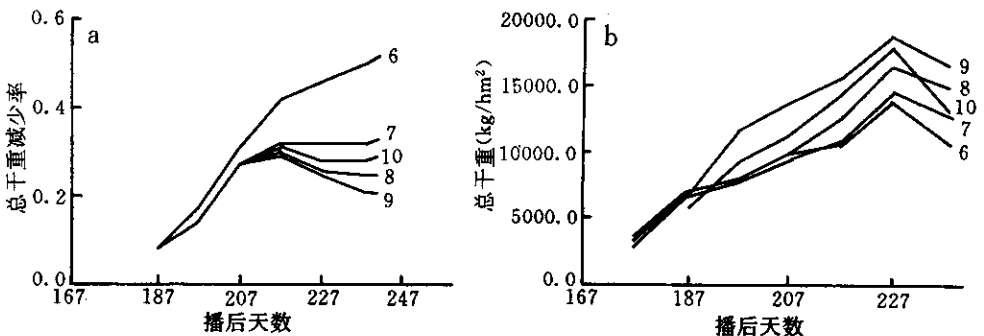


图 2 泰安 1984~1985 年度处理 6、7、8、9、10 的 (a) 水分胁迫干物重减少率演变图和 (b) 实测总干物重曲线

上述实例表明, 水分胁迫干物重减少率较好地反映出小麦生长过程中水分供应状况及其对生长的影响。同时, 不同处理干物重减少率之间的差别也与实测干物重及最终产量的差别基本吻合。因此, 可以利用本模式实时评估干旱对小麦生长的影响。

3.2 展望评估

气象因子对农业生产过程的影响具有持续性和滞后性。同时,作物对气象条件的反应也有一定的前后相关性。因此,生长前期的气象条件对最终生物量有一定的预示作用。计算了泰安不同水分处理的小麦返青—拔节、拔节—抽穗以及抽穗以后3个时段的平均水分亏缺量:

$$RTD_i = \sum [(T_m - T_a)/T_m]/N_i \quad (9)$$

式中*i*为时段,*i*=1为返青至拔节,*i*=2为拔节至抽穗,*i*=3为抽穗以后,*N*为时段内的天数。分别建立了模拟的成熟时总干重减少率*RWT*与3个时段平均水分亏缺量的回归方程:

$$RWT = 0.1598 + 0.8609 RTD_1 \quad (10a)$$

$$RWT = 0.05 + 0.8072 RTD_1 + 0.2877 RTD_2 \quad (10b)$$

$$RWT = 0.06 + 0.3451 RTD_1 + 0.1502 RTD_2 + 0.3177 RTD_3 \quad (10c)$$

表3为方程统计检验结果。相关系数和方差分析均通过0.01显著性水平检验。不难看出,选用的时段越长,越临近生长后期,相关关系越好。

表3 *RWT*与3个时段*RTD*的回归方程统计检验结果

	因子	相关系数	F值	均方差
模拟总干重 减少率	<i>RTD</i> ₁	0.633	11.38	0.09
	<i>RTD</i> ₁ , <i>RTD</i> ₂	0.811	15.33	0.08
	<i>RTD</i> ₁ , <i>RTD</i> ₂ , <i>RTD</i> ₃	0.95	45.9	0.04
实测总干重 减少率	<i>RTD</i> ₁	0.44	4.08	0.11
	<i>RTD</i> ₁ , <i>RTD</i> ₂	0.75	10.28	0.08
	<i>RTD</i> ₁ , <i>RTD</i> ₂ , <i>RTD</i> ₃	0.86	14.64	0.06

利用式(10),分别在返青期结束、拔节期结束和临近成熟时动态地展望、预测最终总干重减少率。以1983~1984年度为例(见表4),返青期结束时,处理1和处理6没有灌溉,水分亏缺量最大,预测的最终总干重减少率最大。其它处理因水分状况不同由处理1至处理4,处理6至处理9依次下降。拔节期结束时,处理1和处理6仍未灌溉,预测*RWT*继续加大,其余处理水分状况改善,*RWT*变小。临近成熟时预测始终未灌水的处理6,*RWT*持续上升,其余处理变小或基本不变。可以看出,此时评估结果与模拟总干重减少率十分接近。

表4 泰安1983~1984年度各时段*RWT*预测结果与模拟结果比较

处 理	预 测			模 拟
	返青期结束	拔节期结束	成 熟 前	
1	0.41	0.48	0.42	0.40
2	0.38	0.32	0.31	0.33
3	0.22	0.12	0.17	0.18
4	0.21	0.15	0.17	0.16
5	0.29	0.26	0.28	0.31
6	0.41	0.45	0.52	0.54
7	0.29	0.26	0.25	0.23
8	0.29	0.26	0.19	0.15
9	0.21	0.10	0.09	0.08

作为比较,还建立了实测最终总干重相对于最大总干重减少率的评估方程.由于试验取样误差,方程效果略差一些(见表3).第一个时段通过信度0.05的显著性检验,但后两个时段都通过信度0.01的显著性检验,展望趋势正确,误差在允许范围内.

由此看来,小麦生长前期一定时段内的水分亏缺量与最终生长状况有较好的关系,可以利用生长模式得到的信息,动态地展望、预测水分对最终生长量的影响.

4 结语及讨论

(1) 本文研制的小麦生长模式较好地模拟出冬小麦主要发育期,解决了冬前生长与返青后生长之间的衔接问题,嵌入了适合华北地区的冻害指标.模式考虑到水分胁迫的后效性及作物不同发育阶段对水分胁迫的敏感性,利用滑动平均相对蒸腾对潜在光合强度、叶面积指数、叶片重等进行水分胁迫订正.经与不同水分状况下的实测资料比较,模拟效果基本令人满意,平均误差在10%左右.

(2) 实际水分条件干物重相对于适宜水分条件的干物重减少率可以用于干旱影响的实时评估.利用小麦生长前期水分亏缺量进行干旱对最终生物量影响的展望性评估也取得了较好的结果.因此,充分利用作物生长模式的各种输出信息,可以对干旱影响作出较科学的评估.

(3) 土壤-作物-大气系统内的水分运动十分复杂,本模式对土壤各层间的水分交换、根长和吸水量的估算比较简单,可能会影响土壤水分平衡计算的准确性.限于资料不足,同化物分配系数、叶面积发育、水分胁迫影响等参数还存在一定的局限性.欲使作物生长模式真正用于干旱影响评估业务,还需收集更多的资料,结合气候生态类型和作物品种特性,在参数的区域化上进一步深入研究.

致谢:山东泰安农业试验站提供水分试验资料,特此表示感谢.

参考文献

- 1 杜林博斯 J, 卡萨姆 A H. 产量与水的关系. 粮农组织灌溉及排水丛书 No. 33, 联合国粮食与农业组织, 罗马, 1979.
- 2 Penning de Vires F W T, Jansen D M, ten Berge H F M, et al. Simulation of Plant Growth and Crop Production. Centre for Agricultural, Publishing and Documentation, the Netherlands. 1992.
- 3 Penning de Vires F W T, Jansen D M, ten Berge H F M, et al. 几种一年生作物生长的生态生理过程模拟. 朱德峰等译. 北京: 中国农业科技出版社, 1991.
- 4 龚绍先主编. 粮食作物与气象. 北京: 北京农业大学出版社, 1988. 27~29.
- 5 Kropff M J, et al. (eds). ORYZA1-a Basic Model for Irrigated Low Land Rice Production. IRRI, Philippines-Wageningen, 1993.
- 6 史定珊, 毛留喜. 冬小麦生产气象保障概论. 北京: 气象出版社, 1994. 116~120.
- 7 Martin Smith. CROPWAT. A Computer Program for Irrigation Planning and Management. FAO irrigation and Drainage Paper No. 46, FAO, Rome, 1992.

GROWTH SIMULATION MODEL OF WINTER WHEAT AND ITS APPLICATION IN DROUGHT ASSESSMENT

Wang Shili

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Based on the previous research and field experimental data, a growth simulation model of winter wheat under actual water conditions was developed in consideration of lag effects of water stress and the different sensitivity of wheat to water stress in various developmental stages. The simulated results are fairly satisfied in comparison with the measured data of different water treatments, the average error is about 10%. The calculated weight reduction of total dry matter caused by water stress was successfully used to assess the influence of drought on growth of winter wheat. The possible effects of drought on final biomass were prospected in the end of return green and jointing stage and prior to maturity stage.

Key words: Water stress correction Winter wheat Crop growth simulation model
Drought assessment