

春小麦黄叶率发生规律及其模拟

王馥棠

李友文

王石立

郭友三 魏玉荣

(国家气象局气象科学研究所)

(内蒙古气象局气象科学研究所)

提 要

黄叶率的变化直接反映出光合器官——叶片的消长与功能,是作物生长模拟的重要环节之一。本文以田间试验(1985—1988年)为基础,分析了春小麦黄叶率的演变过程,确立了其与作物自身发育过程的函数关系,并进一步探讨了环境温度和水分条件影响绿叶变黄过程的模拟和订正,建立了模拟黄叶率动态演变的集成模式。试验表明,该模式的模拟效果是令人满意的。

一、引 言

植物的叶片是植物进行光合、呼吸、蒸腾作用的重要器官。叶片的出生、生长和衰老枯黄,除与植物本身的生命活动和生理变化密切相关外,还深受气象等外界环境条件的影响。然而,反映叶片枯黄程度的黄叶率,其随发育进程及外界环境条件的变化,正是这一过程中各有关参数变化的反映。对此,国内外均有研究报道。如 de Wit 等^[1]在作物的生长模拟模式中把作物的黄叶率从某个物候发育期起假定为一个不变的常数,冯定原等^[2]在水稻的天气产量数值模拟研究中以黄叶率与作物生长时间的关系来定量地表示叶片的衰老枯黄变程等。本文根据4年的田间试验,试图用统计方法确立春小麦叶片的黄叶率与发育阶段的函数关系,并初步建立因温度和水分等气象因子协迫绿叶变黄的黄叶率动态模拟模式。

二、田间试验和资料

1. 田间试验

田间试验在内蒙古呼和浩特地区毕克齐镇农业气象试验田里进行,供试品种为当地有代表性的7704中晚熟品种,试验共进行了4年(1985—1988年)。

试验设分期播种和控制灌水两种处理。以当地适播期(3月31日)为基准,自3月20日开

始取10天为步长,进行早播、适播和晚播等3个播期的试验;灌溉处理为灌1—3次水,分别在拔节前、孕穗前后和开花后灌浆前进行;灌水的标准为主要根层土壤的含水量达到田间持水量的70%以上。整个试验设计为交叉试验,3次重复,随机排列。文中所使用的田间试验资料从1987、1988两年的11个处理为主,并参考了1985、1986年的8个处理的资料。

叶片观测项目分别为绿叶面积、绿叶重和黄叶重。1985—1987年试验为每旬取样,1988年试验加密为每候取样。

2. 气象资料来源

辐射、温度、降水量、风速等气象资料均取自距试验站以西15km处察素齐镇气象站。每旬末在试验田测定土壤湿度。

三、黄叶率的变化及其与气象条件的关系

1. 发育阶段和黄叶率的数学描述

(1)发育阶段的定量表达方法很多^[1-5]。本文采用 de Wit 的方法,即把植物的生长发育和成熟衰老过程与热量的累积进程相联系,用从出苗日起至某一发育时段的实际积温与出苗—开花,开花—成熟阶段所需积温之比来衡量作物的发育程度,即发育阶段(DVS)。其值为0至2,其中0至1表示从出苗到开花的前期生长阶段,1至2为开花到成熟的后期生长阶段。如0.2左右为分蘖期,0.4为拔节期,0.8抽穗,1.0开花,1.9黄熟,2.0成熟。具体计算式如下:

$$\begin{cases} DVS = \frac{\Sigma T}{\Sigma T_K} & (\text{开花前}) \\ DVS = \frac{\Sigma T - \Sigma T_K}{\Sigma T_c} + 1 & (\text{开花至成熟}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ΣT 为从出苗至某时段中的累积温度和, ΣT_K 为从出苗到开花所需的积温指标, ΣT_c 为从开花到成熟所需的积温指标。

在前人工作的基础上通过试验得出春小麦7704品种的 $\Sigma T_K = 920^\circ\text{C}$, $\Sigma T_c = 700^\circ\text{C}$,则全生育期所需的积温值为1620 $^\circ\text{C}$ 。

(2)黄叶率的数学表达式可写为:

$$DR = \frac{L_y}{L_w} \quad (2)$$

其中, DR 为黄叶率, L_y 为黄叶重, L_w 为总叶重,因总叶重等于黄叶重与绿叶重之和,故(2)式又可写作:

$$DR_i = \frac{L_{yi}}{L_{yi} + L_{gi}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 为黄叶率相应的时间序列, L_{gi} 为某时段绿叶重。

当春小麦开始出现黄叶后,用该式便可得到不同时段的 DR_i 值序列。由此式可见, DR 是一个相对的累积值,其取值范围在0—1之间。

2. 黄叶率与发育阶段的基本关系

以 DVS 为横坐标, DR 为纵坐标, 用1988年试验资料点图如下。

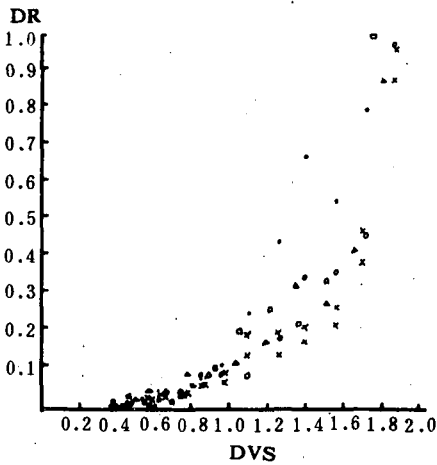


图1 不同试验处理的发育阶段(DVS)与黄叶率(DR)的关系

(●灌溉1次, ○灌溉2次, ×灌溉3次,
△适期播种, □晚播10天)

黄叶率与发育阶段的关系表达为如下数学方程:

$$DR = 0.005231 \times e^{2.7525 \times DVS} \quad (4)$$

经统计检验, $R = 0.9374$, $S^2 = 0.01245$, $F = 570.7183 >> F_{0.01} = 7.17$, $N = 51$ 。关系是很显著的。显然, 这一指数型关系式可作为进一步分析和研究温度和水分的影响, 以及最终建立黄叶率动态变化模拟模式的基础。

3. 温度对黄叶率动态变化的影响

众所周知, 小麦的播种时间不同, 其生长过程中所遇到的气温环境也不相同, 从而对小麦生长发育产生不同的影响。由图2可以明显地看出, 不同播期下的 DVS 与 DR 的关系是不相同的。尤其在 $DVS > 0.8$ 以后, 更为明显。即晚播小麦的黄叶率比适播和早播的都大, 早播的为最小。晚播小麦的 DR 在 DVS 为1.66前就已达到1.0; 适播小麦的 DR 在 DVS 为1.84以前才达到1.0, 而早播小麦的 DR 则在 DVS 为1.9时才达到1.0。

分析发现, 从三叶期到开花期间, 其平均气温与所需生长发育的天数呈极好的负相关关系 ($r = -0.9833$, $N = 13$), 而从开花到黄熟期间的平均气温几乎呈稳定的常温值。这表明, 如果在生殖生长阶段内不发生高温危害, 则温度对春小麦发育期的影响, 主要表现在营养生长阶段。若在营养生长时期遇到不适宜的高温环境, 则将明显缩短生长前期各发育期的天数, 从而使得小麦在生殖生长时期内植株绿叶面积迅速减少, 干物质累积过程加快, 最终导致籽粒产量下降。另一方面, 若在营养生长期遇到低温影响, 也将抑制小麦生长

从图1可以看出, 黄叶率的变化具有以下特征: 当发育阶段 $DVS > 0.4$ (约拔节期) 时, 植株开始出现黄叶; 而后, 随着 DVS 的增大, 黄叶率逐渐呈现为指数型变化; 当 DVS 达到1.9左右时 (即黄熟后期) 黄叶率最大, 其 DR 值为1。图中点子分布表明开花前 DR 的变化呈现为一个比较平稳的累积增值过程; 开花后, 由于植株的光合产物大部分已向生殖器官 (穗部) 转移, 而植物其它器官 (根、茎、叶) 贮存的同化物也开始向籽粒转移, 进而加速了叶片的衰亡过程^[1,2,6], 因此黄叶率迅速增大。此外, 在灌水越少和播期越晚的情况下, DR 的动态变化过程会大大加快, 提前达到1.0而结束。在一定程度上, 这正表明, 温度和水分对 DR 的动态变化也具有明显的影响。

根据上述试验资料, 经统计分析, 做为第一步, 可以将适宜光、温、水条件下小麦黄

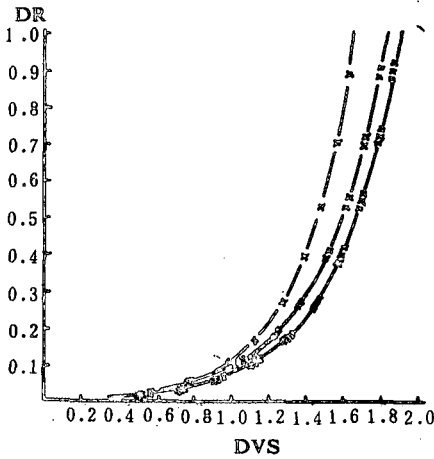


图2 不同播期处理下 DVS 与 DR 的关系
(\times —晚播10天, $\times\times$ —适播期,
 $\times\times\times$ —早播10天)

前期的发育进程致使后期的干物质累积过程减慢,推迟成熟,从而增加了多雨等不利天气影响的机遇,同样将使最终产量明显受损。实际上,在不适宜的温度环境下春小麦的 DVS 进程,会产生一定程度的伸缩性波动,使得上述两种影响变得更为复杂。

换言之,上述小麦生长前期的不适宜高温或低温对 DR 的影响将在生长后期得到充分的反映,它将导致植株绿叶的过早枯黄(或称超前效应)或延迟枯黄(或称延迟效应)。这种超前或延迟效应实际上是不适宜的温度条件对植株正常生长发育进程影响的结果。显然,它可以用对适宜条件下的发育阶段进行温度订正的方法加以估算,即

$$DVS' = DVS - (1 - K) \quad (5)$$

式中, DVS' 为订正后的发育阶段, K 为温度订正系数,即

$$\begin{cases} K = \frac{T}{\bar{T}} (T \geq \bar{T}) \\ K = \frac{T - 1}{\bar{T}} (T < \bar{T}) \end{cases}$$

其中, T 为小麦从出苗至 DVS 为 0.8 时的平均气温, \bar{T} 为 T 的试验年度的同期平均气温。经计算, $\bar{T} = 16.7^\circ\text{C}$ 。

将(5)式代入(4)式得:

$$DR = 0.005231 \times e^{2.7525 \times (DVS - (1 - K))} \quad (6)$$

利用(6)式模拟水分条件适宜,而温度环境不同情况下小麦叶片 DR 的变化,可取得较好的结果。

4. 水分与黄叶率动态变化的关系

小麦叶片除了光合作用外,另一个重要生理功能是蒸腾耗水,而蒸腾量的大小主要取决于土壤中水分含量的多少。土壤含水量充足则蒸腾量大,反之蒸腾就会减弱。如果土壤水分发生严重亏缺,植株便得不到正常生长所需要的水分,从而造成叶片生长减慢或停止,过早地产生枯黄脱落现象,并影响最终产量^[1,2,6]。图3为1988年控水试验中的实测黄叶率与发育阶段的关系。比较各曲线,可以发现,当 $DVS \geq 0.8$ 以后,随着 DVS 的进程,不同灌溉次数之间黄叶率的差值很快加大;灌溉次数越少, DR 越大。这表明土壤水分状况对 DR 动态变化的影响十分明显。

为了定量表示 DR 随水分的变化,笔者基于上述原理,从土壤含水量出发,建立了黄叶率与蒸腾量关系的模型。首先计算实际蒸腾量^[1]。若根层土壤含水量(SM_r)大于临界含

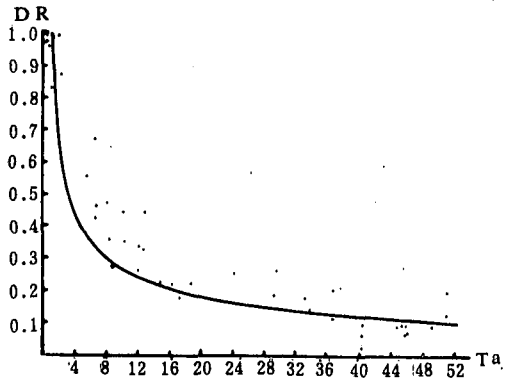
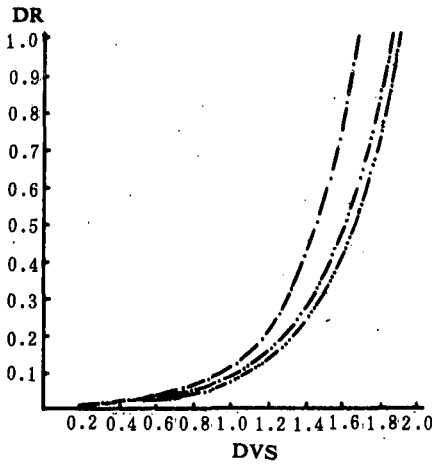


图3 不同灌水处理下的 DVS 与 DR 的关系

(--- 灌水 1 次, - · - 灌水 2 次, — 灌水 3 次)

图4 实际蒸腾(T_a)与黄叶率(DR)的关系

(· 实际黄叶率, — 模拟曲线)

水量(SM_{cr}), 即 $SM_r > SM_{cr}$, 则

$$T_a = T_p$$

T_a 为实际蒸腾量, T_p 为可能蒸腾量。

若 $SM_r < SM_{cr}$, 则

$$T_a = T_p \times \frac{(SM_r - SM_w)}{(SM_{cr} - SM_w)} \tag{7}$$

式中, SM_{cr} 可由下式求出:

$$SM_{cr} = (1 - p) \times (SM_{fc} - SM_w) + SM_w \tag{8}$$

式中, SM_{fc} 为田间持水量 (cm^3/cm^3), SM_w 为凋萎湿度 (cm^3/cm^3), p 为作物的土壤水分消耗系数, 由作物种类和可能蒸腾量所决定。($SM_r - SM_w$) 为根层土壤的有效含水量; ($SM_{cr} - SM_w$) 为根层土壤的最大有效含水量。

可能蒸腾可由文献[1]、[7]中的有关公式(包括叶面积订正等)推算求得。

根据(7)式和(8)式求出 T_a 后, 即可进行 $DVS \geq 0.8$ 以后每 5 天的 T_a 与 DR 值相互关系的分析。结果表明, 两者呈幂函数关系(如图 4):

$$DR = 0.96155 \times T_a^{-0.5544} \tag{9}$$

经检验, $R = 0.5223$, $S^2 = 0.06036$, $F = 139.96 >> F_{0.01} = 7.17$, $N = 47$ 。

四、黄叶率的集成模式模拟结果

1. 集成模式

由(6)式和(9)式可知, 春小麦在生长初期 ($DVS < 0.8$), 其黄叶率的大小可视为植物本身生理调控的反映; 而 $DVS \geq 0.8$ 以后, 则与实际蒸腾的大小密切相关。当然, 前期对黄

叶率的影响还会在后期黄叶率的变化中产生累积性的效应。可见,随着 DVS 的进程, DR 的动态变化不仅取决于植物本身的生理特性,还受制于植株蒸腾失水后所产生的胁迫作用,并且往往是 DVS 越大(即生长即将结束),土壤含水量越少,水分亏缺的胁迫作用就越大。计算表明,黄叶率的集成模式中,生长后期的这种水分影响可以(9)式的平方加以处理集成。故黄叶率的集成模式可写成为:

$$\begin{cases} DR = 0.005231 \times e^{2.7525 \times DVS} & 0.4 \leq DVS < 0.8 \\ DR = 0.005231 \times e^{2.7525 \times (DVS - (1-K))} + (0.96155 \times T_a^{-0.5544})^2 & DVS \geq 0.8 \end{cases} \quad (10)$$

在使用(10)式进行回代的过程中发现,当作物临近成熟,其叶面积指数接近或小于 0.1 时,所测得的 T_a 值过小,导致模式估算的 DR 值失真。为除此失真现象,应给定一个限制开关。分析表明,这是一个受温度(T)影响的可调数值开关,其方程式如下:

$$Y_K = - (1.2634 \times 10^{-14} \times e^{1.721 \times T}) \quad (11)$$

($R=0.9815, S^2=0.009111, F=63.5458 >> F_{0.01}=10.0, N=5$)。式中, Y_K 为消除 DR 失真的可调数值开关,它可以在黄叶率(DR)为 1 时,比较分析 DVS 值与 T 值来加以确定。

使用限制开关后的模拟结果见图 5(以适期播种 2 次灌水处理和水分适宜处理为例)。

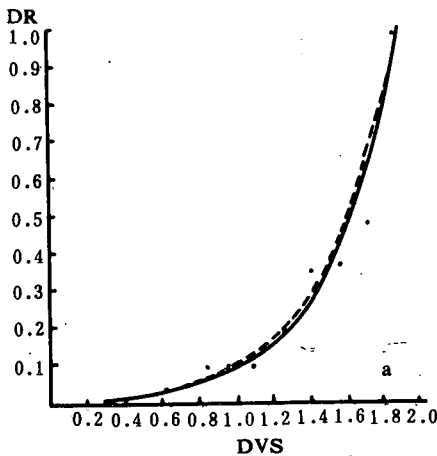


图 5(a) 2 次灌水处理的黄叶率实测值与模拟曲线的比较

(· 黄叶率实测值, — 模式(4)模拟曲线, - - 模式(10)模拟曲线)

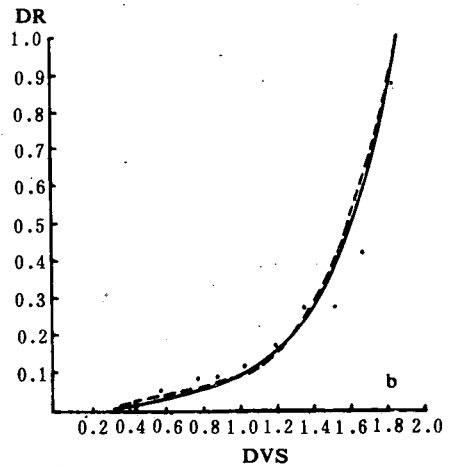


图 5(b) 适宜水分处理的黄叶率实测值与模拟曲线的比较

(· 黄叶率实测值, — 模式(4)模拟曲线, - - 模式(10)模拟曲线)

2. 模拟结果

图 6 比较了 1987 年适期播种 2 次灌水处理的实测黄叶率与集成模式的模拟曲线,两者吻合一致。另外,经计算灌水 1 次、2 次或 3 次处理的模拟值与实测值的差值平方和分别是 0.08539、0.007184、0.01257,可见模式的模拟效果是比较好的。这充分说明,春小麦叶片的生长与衰老过程可由春麦本身的生育进程和环境气象条件的变化加以综合模拟和描述。

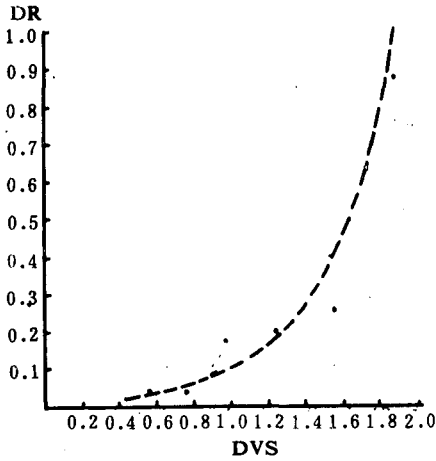


图6 实测黄叶率与集成模式模拟曲线的比较
(· 实测黄叶率, ---集成模式模拟曲线)

叶片枯黄过程的这种动态模拟不仅可以进一步完善和提高小麦生长的模拟效果,更有利于天气产量预报模式的改进和发展,促使新一代的动力统计预报模式的研制和应用。

五、结 语

1. 本文的试验研究表明,春小麦黄叶率的变化可分为两个阶段加以模拟。在生长前期,主要受环境温度较大幅度变化的影响。实质上,它是春麦在环境温度变化的影响下,对其生育进程进行自身生理调控的反映。而生长后期黄叶率的变化主要与实际蒸腾密切相关,在某种程度上还受前期影响——超前或延迟效应的调节。在上述基础上再综合为统一的集成模式。与实测值比较,其模拟效果是令人满意的。因此,笔者建立了分两阶段进行模拟的春小麦黄叶率演变的集成模式。

2. 本文研制的黄叶率模拟模式属作物生长动态模拟的基础性研究。由于选用因子时着重考虑了资料容易获取、模式适用性强和物理意义明确等特点,因此仍不失其广泛的应用性。

3. 本模式中的 \bar{T} 值是根据现有试验资料计算求得,是否稳定,其变动是否与成熟前夕黄叶率过大有关系,后者又在多大程度上受其影响等均尚需作进一步的试验和分析完善。

参 考 文 献

- [1] Keulen H. Van and J. Wolf, Modelling of agricultural production, weather, soil and crops, Pudoc, Wageningen, 1986.
- [2] 冯定原、夏海峰,水稻产量预报的数值模拟方法研究,南京气象学院学报,10,1,1987.
- [3] 沈国权,影响作物发育速度的非线性温度模式,气象,6,6,1980.
- [4] 王石立,农业产量模拟方法,气象科技,6,1984.
- [5] 王馥棠主编,我国粮食产量气象预测预报研究,气象出版社,1989年.
- [6] Сиротенко О. Д. (裘碧梧译),农业生态系统的水——热状况和产量的数学模拟,气象出版社,1985.
- [7] 裴步祥、邹耀芳,三种计算可能蒸发方法的比较,气象,12,7,1986.

ON THE EVOLUTION OF YELLOWED LEAVES RATE OF SPRING
WHEAT AND ITS SIMULATIVE MODEL

Wang Futang Wang Shili

(Academy of Meteorological Science, SMA)

Li Youwen Guo Yousan Wei Yurong

(Meteorological Institute of Inner Mongolia Autonomous Region)

Abstract

The variation of yellowed leaves rate of spring wheat is one of the important keys in simulative model of crop growth. It directly affects the growth and function of photosynthetic organ—green leaves. Based on the field experiments (1985—1988), the evolution of yellowed leaves rate of spring wheat is analysed. The function relationship between yellowing process of green leaves and growth stages of spring wheat itself is established. Furthermore, modelling and correcting for green leaves yellowing process affected by temperature and moisture status are discussed. Finally, the synthetic model for simulating the dynamic evolution of yellowed leaves rate is constructed, and the numerical experiments show that the modelling effect of the model is satisfactory.