

棉花耗水规律和灌溉随机控制*

朱自玺 赵国强 邓天宏 方文松 牛现增

(河南省气象科学研究所, 郑州 450003)

提 要

根据5年田间试验资料,分析了棉花产量与耗水量的抛物线关系,确定了棉花最佳耗水量;根据棉花植株在不同土壤湿度情况下气孔阻力、蒸腾强度和蕾铃脱落率的变化,确定了不同生育阶段的适宜水分指标和干旱指标.在此基础上,研制了棉花灌溉随机控制模型,可以动态预报棉田土壤有效水分含量和实际蒸散量,并从经济效益和水分利用效率的角度提出优化灌溉决策.

关键词:棉花 耗水量 水分指标 灌溉 随机控制

引 言

在作物-水分关系的研究中,过去对小麦、玉米研究较多,对棉花研究较少.在棉花栽培条件的研究中,多集中在肥料、密度、化控和气象条件等方面,而对耗水规律和灌溉的研究甚少.事实上,棉花耗水量较大,对水分也十分敏感.水分胁迫可造成幼蕾失水萎缩,使脱落率增加,且棉铃小,纤维短,产量下降;土壤湿度过大,则造成主茎或分枝顶端生长加快,养分供不应求,同样加重脱落,且伏前桃、伏桃比例减少,秋桃比例增加,导致产量降低、品质下降.我国北方棉区降水年际变化大,伏旱不断发生,棉花灌溉不仅对干旱地区来说是取得高产优质的必要条件,对广大半干旱、半湿润地区来说,也具有十分重要的意义.

1 试验设计和方法

试验于1991~1995年在郑州市南郊农业气象试验基地进行.供试品种为中棉16.土壤类型为砂壤,肥力中等,容积田间持水量为29.8%,容积凋萎湿度为6.3%,土壤容重 $1.49\text{g}/\text{cm}^3$.5月20日前后育苗,麦收后移栽.试验是在人为控制水分的条件下进行的.场内设有大型活动式防雨棚和57个试验小区,每个小区面积 11m^2 ,周围设有2.5m深的地下隔离层,防止土壤水分在水平方向上交换.为研究不同水分状况对棉花生长发育和产量形成的影响,试验共设4种不同的土壤水分处理,分别占田间持水量的45%以下、45%~60%、60%~80%和80%以上,并设自然降水区作为对照.每种处理安排了3个小区.为了研究不同生育阶段棉花对不同水分状况的反应,上述水分处理分别在现蕾一开花、开花

—花盛、花盛—裂铃和吐絮期进行. 试验期间, 每 10 天进行一次土壤湿度的测定, 深度为 2.0m, 同时进行作物发育期观测. 现蕾后进行蕾铃脱落率调查, 每 5 天一次. 收获后进行考种和品质分析.

2 结果与分析

2.1 棉花全生育期最佳耗水量的确定

棉花在完成生长发育的过程中, 对水分有一定的要求. 虽然耗水量在年际间会发生一定的变化, 但仍具有一定的稳定性. 为了消除年际间其它因子的影响, 突出水分在产量形成过程中的作用, 取相对产量(Y_{ri})和相对蒸散量(ET_{ri})进行分析, 即

$$Y_{ri} = Y_i / Y_m \quad (1)$$

$$ET_{ri} = ET_i / ET_p \quad (2)$$

式中 Y_{ri} 为某年第 i 个水分处理的棉花相对产量, Y_i 为同年第 i 个水分处理的棉花实际产量, Y_m 为同年各水分处理的最高产量, ET_{ri} 为某年第 i 个水分处理的棉花相对蒸散量, ET_i 为同年第 i 个水分处理的棉花实际蒸散量(耗水量), ET_p 为同年棉花生育期间的潜在蒸散量(用联合国粮农组织(FAO)修订过的 Penman 公式^[1]求得).

相对产量 Y_{ri} 与相对蒸散量 ET_{ri} 的关系如图 1 所示, 可以看出, 相对产量和相对蒸散量呈现出明显的抛物线关系, 与 Wayne 的研究结果完全一致^[2]. 即在相对蒸散量 ET_{ri} 比较小时, 相对产量 Y_{ri} 较低, 并随着 ET_{ri} 的增大, Y_{ri} 明显增加; 当 ET_{ri} 增大到一定程度时, Y_{ri} 不再增加, 继之出现下降趋势. 其拟合方程($n=50, r=0.5427, F^{**}=8.929$)为:

$$Y_{ri} = -0.0943 + 1.2607 ET_{ri} - 0.4581 ET_{ri}^2 \quad (3)$$

对式(3)求导, 并令 $dY_{ri}/dET_{ri} = 0$ 可求得极值点 M, 对应的最高相对产量 $Y_{ri, \max} = 0.773$, 相对蒸散量 $ET_{ri, \max} = 1.38$. 经计算, 试验期间棉花全生育期潜在蒸散平均值 $\overline{ET_p} = 413\text{mm}$, 则对应棉花最高产量(皮棉 1125.0 kg/hm^2)的实际蒸散量即耗水量($ET_m = ET_{ri, \max} \times \overline{ET_p}$)为 569.9mm . 一些国家正是利用这个对应最高产量的耗水量作为计划灌溉的指标. 但是, 从水分利用效率的角度看, 用这个数值作为指标并不十分恰当. 从图 1 曲线上可以看出, 在 M 点附近, Y_{ri} 随 ET_{ri} 变化甚微, 曲线斜率 dY_{ri}/dET_{ri} 很小, 水分利用效率和经济效益很低. 为此, 对曲线斜率总体 $\left| \frac{dY_{ri}}{dET_{ri}} \right|$ 进行最优分割^[3], 最优分割点 K 的相对蒸散值 $ET_{ri, k} = 1.1$, 相应的耗水量为 $ET_k = 454.3\text{mm}$, 称为棉花最佳耗水量. 与此对应的皮棉产量为 1074.0 kg/hm^2 , 用此指标作为确定棉田灌溉定额或进行棉花气候条件评价的依据是具有重要意义的.

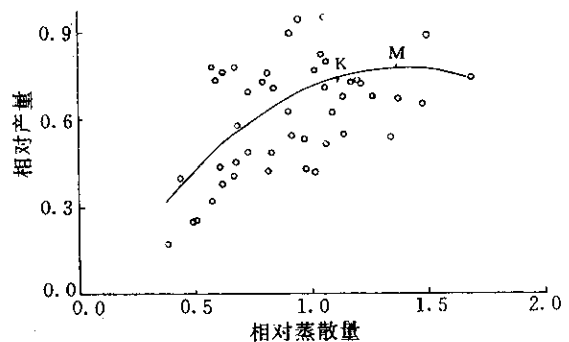


图 1 棉花相对产量和相对蒸散量

2.2 棉花日耗水过程线

在棉田灌溉工作中,仅研究棉花全生育期耗水总量是不够的,还必须研究棉花耗水的时间分布,取水分状况比较适宜的55%~80%的处理进行分析.这里,引入日耗水比的概念,即日耗水量占全生育期总耗水量的百分比,以消除年际间气候因素的影响.根据5年试验资料绘制了棉花日耗水比随时间变化曲线(如图2),其拟合方程($n=14, r=0.9439, F^{**}=44.942$)为:

$$R_d = 1.7625 \times 10^{-3} + 2.196 \times 10^{-4}t - 1.454 \times 10^{-6}t^2 \quad (4)$$

式中 R_d 为日耗水比, t 为移栽后天数.

令 $dR_d/dt=0$, 得出 $t=76$ 天时,即在8月15日前、后日耗水比达到最大值,此时正值开花盛期,日耗水量可达5.1mm.以后随着气温的下降和绿叶面积的减少,日耗水比逐渐减小,整个日耗水过程线基本上以开花盛期为对称轴,前、后期相互对称.峰值区是棉花需水临界期.

2.3 棉花阶段耗水量和产量反应系数

在5年试验期间,棉花平均移栽日期是6月8日,历经现蕾(7月8日)、开花(7月24日)、开花盛期(8月8日)、吐絮(9月15日)4个发育阶段.各发育阶段的移栽后天数分别为30、46、61、99,移栽至拔杆历经134天.如表1所示,各阶段的耗水量和耗水强度各不相同,水分在产量形成过程中的作用也不一样.通过对式(4)进行积分,可得出不同生育阶段耗水量占全生育期总耗水量的百分比

$$R_p = \int_{t_1}^{t_2} R_d dt \quad (5)$$

用最佳耗水量 $ET_k(454.3\text{mm})$ 乘以 R_p , 可得阶段耗水量 ET_i ; 即

$$ET_i = ET_k \int_{t_1}^{t_2} R_d dt \quad (6)$$

从表1可看出,开花盛期耗水量最大,吐絮期次之,蕾期最小.日耗水强度以开花盛期最大,达4.5mm/d;开花期位居第二,为4.3mm/d,而移栽—现蕾期最小,为2.1mm/d.其主要原因是在开花盛期以后,植株群体达到最大,时间又已处于8月上、中旬高温季节,棉田蒸散量大;而移栽—现蕾阶段,植株幼小,以土壤蒸发为主,加之气温不高,故耗水量小.

表1 棉花不同生育阶段耗水量和耗水强度

发育期	移栽—现蕾	现蕾—开花	开花—花盛	花盛—吐絮	吐絮—拔杆
间隔天数	30	16	15	38	35
阶段耗水比(%)	13.3	12.3	13.4	36.0	25.0
阶段耗水量(mm)	60.4	55.9	60.9	163.5	113.6
日耗水比(%)	0.47	0.80	0.94	1.00	0.76
日耗水量(mm)	2.1	3.6	4.3	4.5	3.5

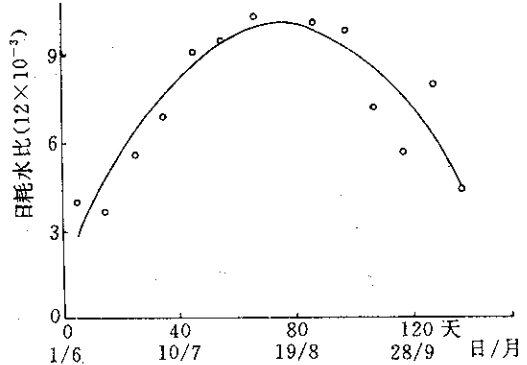


图2 棉花日耗水比随时间的变化

在棉花产量形成的过程中,各阶段水分对产量形成的贡献是不同的.这不完全取决于某一阶段耗水量的多少,还取决于作物对水分的敏感程度.如果在这一阶段缺水,则对产量会发生明显的影响.棉花产量与各阶段水分供应状况的关系,可用下述模型表示:

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i ET_i \quad (7)$$

式中 Y 为皮棉产量(kg/hm²); A_0 为方程平衡项; A_i 为第 i 个生育阶段水分-产量反应系数,即单位耗水量对产量的贡献; ET_i 为第 i 个生育阶段的耗水量, n 为时段数.用多元线性回归求出 A_0 和不同生育阶段产量反应系数 A_i (表 2),方程的复相关系数 $R=0.9765$.

表 2 棉花各生育阶段水分-产量反应系数

A_0	移栽—现蕾 A_1	现蕾—开花 A_2	开花—花盛 A_3	花盛—吐絮 A_4	吐絮—拔杆 A_5
-380.376	1.7430	1.2405	26.7435	3.0885	2.5635

可以看出,棉花在开花—开花盛期水分-产量反应系数最大,开花盛期—吐絮期次之.在这两个阶段,棉花群体达到最大,植株营养生长与生殖生长并进,花铃并存,是增蕾保铃的关键时期.如果水分供应不足,则导致蕾铃大量脱落,严重影响产量.现蕾—开花期的产量反应系数在各发育阶段中是最小的,甚至小于苗期.这与农谚所说的“播前浇好水,花前蹲好苗”是基本一致的.

2.4 棉花生育期土壤水分指标

棉花对水分胁迫十分敏感,短暂的水分亏缺,可使生理代谢受阻,导致蕾铃脱落.一旦目测到棉株受害再去灌水,已失之过晚.因此,应从棉株生理特征的变化来确定适宜的土壤水分指标和干旱指标,做到防患于未然.

试验在棉花不同生育阶段,对不同水分处理棉花叶片的气孔阻力、蒸腾强度和蕾铃脱落率作了测定,发现它们与土壤湿度的关系十分密切.当土壤湿度保持在一定范围时,气孔阻力、蒸腾强度比较稳定,蕾铃脱落率小;但当土壤湿度降低到一定程度时,则气孔阻力、蒸腾强度会发生突变,蕾铃脱落率骤然增大.图 3 是 1991 年在开花盛期—吐絮期测定的气孔阻力随土壤湿度的变化曲线,其拟合方程 ($n = 18, r = 0.9805, F^{**} = 49.916$) 为

$$R_s = 4193.96 \exp(-0.69492W + 0.017741W^2) \quad (8)$$

式中 R_s 是气孔阻力(s/cm), W 为容积土壤湿度百分率(1.6m 深度平均值),取其分子

表示.可以看出,在 d 点气孔阻力发生转折,在该点左侧,由于土壤湿度减小,气孔关闭,阻力急剧增大.因此可以此点的土壤湿度作为干旱指标.为确定 d 点的位置,运用最优分割法^[3]得出 $W_d = 12.8\%$.通过对式(8)求导,并令 $dR_s/dW = 0$,可求得气孔阻力的极小

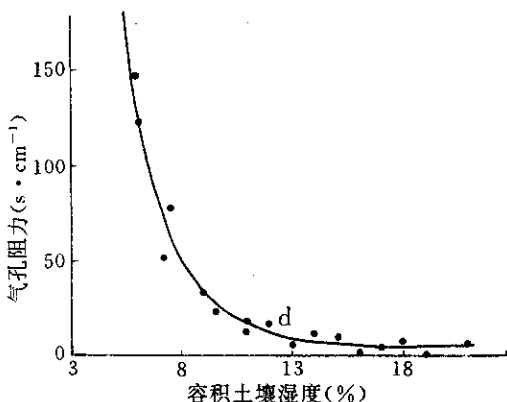


图 3 棉花气孔阻力随土壤湿度的变化曲线

值,与其对应的土壤湿度 $W_p = 19.6\%$,即为花铃期土壤湿度的适宜指标,此时叶片气孔完全张开,可以进行正常的呼吸和光合作用.还建立了蒸腾强度和蕾铃脱落率与土壤湿度的关系,也可以用来确定棉花的干旱指标和适宜水分指标.其拟合方程分别为:

$$T_r = -53.2916 + 38.4536 \ln W - 6.5176 (\ln W)^2 \quad (9)$$

$$(n=18, r=0.9517, F^{**}=19.25)$$

$$r_a = \exp(7.1931 - 0.33893W + 8.92746 \times 10^{-3}W^2) \quad (10)$$

$$(n=21, r=0.7976, F^{**}=15.74)$$

式中 T_r 为蒸腾强度 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$), r_a 为蕾铃脱落率 (%), 取其分子. W 为容积土壤湿度百分率, 取其分子. 综合上述几种方法, 可得出棉花不同生育阶段的水分指标^[4].

表 3 棉花不同生育阶段的土壤水分指标

发育期	干旱指标		适宜水分指标下限	
	容积土壤湿度 (%)	占田间持水量 (%)	容积土壤湿度 (%)	占田间持水量 (%)
移栽—现蕾	12.1	41	16.3	55
开花—吐絮	14.5	49	19.5	66
吐絮—拔秆	13.2	45	17.8	60

由表 3 可以看出,不同生育阶段棉花要求的土壤湿度是不同的.开花—吐絮期植株生长旺盛,蕾铃大量生成,加之气温高,日照长,要求有足够的土壤水分供应,所以干旱指标和适宜水分指标比较大.吐絮以后由于气温有所下降,水分指标略有降低,此期土壤水分主要促进桃的发育,增加铃重及绒长,提高品质.现蕾前水分指标较低,有利于根系下伸、株型紧凑、生长稳健,这是取得高产所要求的前提条件.

2.5 棉花灌溉随机控制模型

除了棉花对水分条件的要求外,天气条件能否满足要求,如何掌握灌溉时机,存在一个随机控制问题.为此,需要建立一套棉田土壤水分监测、预报和灌溉决策的随机控制系统,并有与之相配套的计算机软件,以回答灌或不灌、灌多少和何时灌的问题,从而达到既能保证棉花正常生长的需要,又有节约用水之目的.

2.5.1 土壤水分预报模型

考虑到我国气象台站土壤湿度测定和长期天气预报以旬为时段的特点,根据水分平衡原理,提出棉田土壤水分预报方程如下^[5]:

$$W_{(T)} = W_{(T-1)} + P_{(T-1)} - 10K_{(T-1)} \cdot ET_{O(T-1)} \quad (11)$$

式中 $W_{(T)}$ 和 $W_{(T-1)}$ 分别为预报旬和前一旬初计划层土壤有效含水量 (mm), $P_{(T-1)}$ 为前一旬扣除植株冠层截留^[6]的有效降水量 (mm), $K_{(T-1)}$ 为前一旬平均相对蒸散量, $ET_{O(T-1)}$ 为前一旬平均潜在蒸散量 (mm/d) (由 FAO-Peman 公式^[1]求得), $K_{(T-1)}$ 是土壤湿度和作物叶面积系数的函数:

$$K_{(T-1)} = -1.3367 + 0.3212 \ln W_{(T-1)} + 0.7238 \ln (LAI_{(T-1)} + 1) \quad (12)$$

$$(n=78, r=0.719, F^{**}=37.74)$$

式中 $LAI_{(T-1)}$ 为前一旬棉花叶面积系数.

LAI 与棉花品种和生长日数有关,其关系式($n=8, r=0.98, F^{**}=122.5$)为:

$$LAI = LAI_{\max} / \exp[B_0 + B_1 \sum T + B_2 (\sum T)^2] \quad (13)$$

其中 LAI_{\max} 是与品种有关的最大叶面积系数,中棉 16 的 $LAI_{\max}=6.0$, $\sum T$ 为自播种之日起的活动积温; B_0 、 B_1 、 B_2 为系数,分别为 5.574 、 -5.309×10^{-3} 和 1.449×10^{-6} 。

通过逐旬输入未来气象要素和 LAI 的数值,即可预报下一旬旬初的土壤有效含水量,并可递推任一时段。

2.5.2 灌溉随机决策模型

在取得当前和未来土壤有效含水量资料后,即应与作物在这个发育阶段所要求的适宜水分指标和干旱指标进行比较,并考虑到灌溉后所引起的产量反应和所投入的费用,从经济效益和社会效益的角度作出决策^[7]。

设在第 i 个阶段 $W_{(T)}$ 表示土壤有效含水量预报值, $W_{(P)}$ 表示适宜水分指标, $W_{(d)}$ 表示干旱指标。一般情况下,如果 $W_{(T)} > W_{(d)}$, 不进行灌溉, $W_{(T)} \leq W_{(d)}$ 则进行灌溉。但在某些情况下,特别在 $W_{(d)} < W_{(T)} < W_{(P)}$ 时,是否进行灌溉、灌溉量为多少,则应进行随机灌溉决策。这里需要引入一个以效益为出发点的目标函数,动态分析灌与不灌以及不同灌溉量所引起的效益变化,即

$$\text{目标函数: } B_{ij} = C_1 \Delta Y_{ij} - C_2 H_{ij} - C_3 S_i \quad (14)$$

$$\text{约束条件: } H_{ij} \leq F_{(c)} - I_{(f)} - W_{(T)} \quad (15)$$

式中 S_i 为灌溉开关因子,将当前或未来土壤有效含水量与棉花要求的水分指标进行对比,决定在第 i 个生育阶段是否进行灌溉, $S_i=0$, 不灌; $S_i=1$, 灌溉; H_{ij} 为第 i 个生育阶段施行的第 j 个灌溉量 ($j=1, 2, 3, \dots$); ΔY_{ij} 为第 i 个生育阶段施行第 j 个灌溉量后所引起的产量变化; C_1 、 C_2 和 C_3 为系数,分别为棉花价格(元/kg)、水费(元/mm·hm²)和每灌水一次所投入的劳力、机器折旧等费用(元/次); $F_{(c)}$ 为田间持水量(mm); $I_{(f)}$ 为凋萎湿度(mm)。其中

$$\Delta Y_{ij} = A_i \cdot H_{ij} \quad (16)$$

A 为第 i 个生育阶段的产量反应系数。

当计划灌溉时,设 $S_i=1$, 然后按式(15)给定一组灌溉量 $H_{i1}, H_{i2}, H_{i3}, \dots$, 计算相应的目标函数值 B_{ij} 。当 $B_{ij} \leq 0$ 时,表示施行灌溉量 H_{ij} 后收入小于或等于支出,则不进行灌溉;当 $B_{ij} > 0$ 时,取不同灌溉量情况下 B_{ij} 的最大值,即

$$B_{ij}^* = B_{ij\max} \quad (j=1, 2, 3, \dots) \quad (17)$$

与 B_{ij}^* 相对应的 H_{ij}^* , 即为该时段的灌溉量。应当说明,在水资源有限的地区,应当优先保证棉花花铃期用水,使有限的水分发挥更大的效益。

2.5.3 灌溉随机控制流程

灌溉随机控制流程如图 4 所示,首先输入土壤、作物和气象资料,运用 FAO-Penman 公式和预报模型作出未来土壤有效含水量预报,经过与该阶段棉花所要求的土壤水分指标对比,确定开关因子,灌或不灌。在需要灌溉的情况下,分析不同灌溉量的目标函数值,与最大目标函数相对应的灌溉量即为该阶段最佳灌溉量。

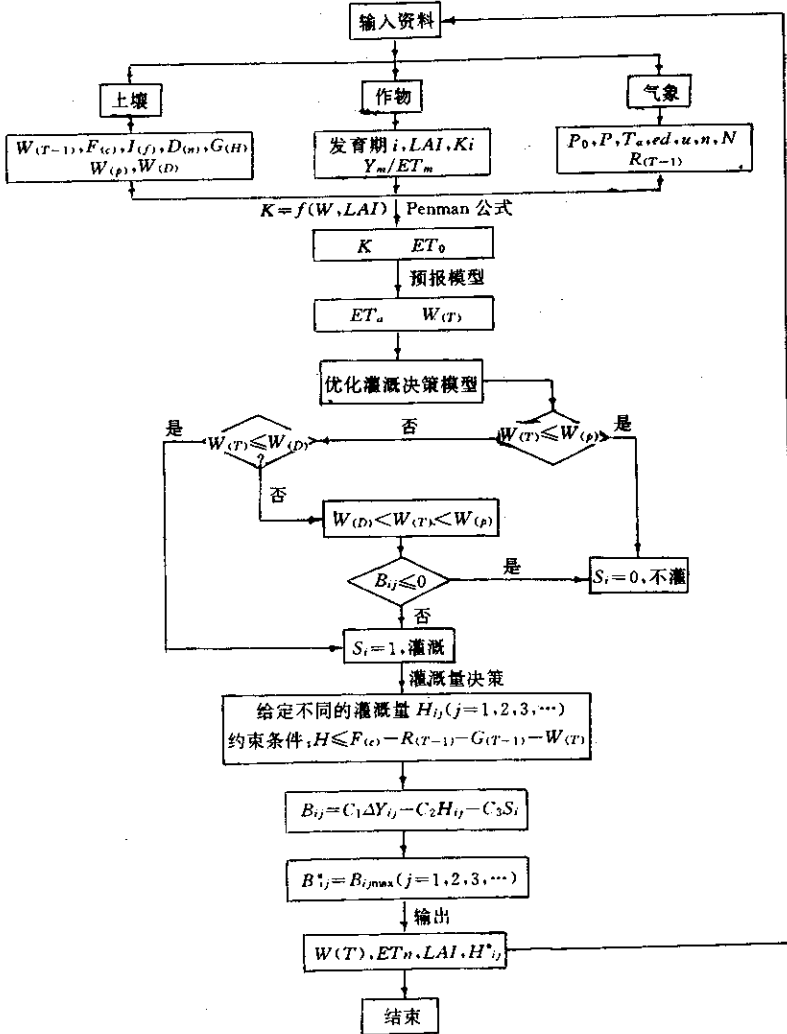


图 4 棉花灌溉随机控制流程图

3 小结

本文以提高水分利用效率和经济效益为出发点,系统研究了棉花的耗水规律、最佳耗水量和不同生育阶段的适宜水分指标和干旱指标.在此基础上,为保证棉花始终处于适宜的水分环境中,研制了一套包括土壤水分监测、预报和灌溉决策在内的随机控制系统,较全面地揭示了棉田墒情变化,对当前和未来的棉田提出灌或不灌、灌多少和何时灌的问题.传统的灌溉制度从经验上注重棉花的需水规律,但未能考虑未来土壤水分状况,也未能考虑灌溉所引起的效益变化,本系统可以较好地解决这些问题.

土壤-植物-大气是一个连续体,作物的适宜水分指标和干旱指标不可避免地要受到

土壤类型的影响. 本文提出的指标是就砂壤土而言的, 应用时最好转换成适合当地土壤类型的水分指标. 此外, 土壤水分预报和未来叶面积系数的计算, 主要以未来气象要素, 特别是降水和温度的预报值为基础, 其确定性在一定程度上会受到长期天气预报的影响. 但由于温度年际变化幅度较小, 降水在预报模型上只是其中的一个分量, 其影响程度是有限的, 该模型仍不失其在生产上的意义.

参考文献

- 1 Frere M and Popov G F. Agrometeorological crop monitoring and forecasting. FAO Plant Production and Protection Paper, 1979. 42~45.
- 2 Wayne R J. Cotton, In crop-water relations. Edited by Teare I. D. & Peat M M. A Wiley-Interscience Publication, 1982. 237~240.
- 3 朱自玺, 牛现增. 冬小麦主要生育阶段水分指标的生态分析. 气象科学研究院院刊, 1987, 2(1): 81~87.
- 4 王宝英, 张学. 农作物高产的适宜土壤水分指标研究. 灌溉排水. 1996, 15(3): 35~39.
- 5 朱自玺, 牛现增, 侯建新. 冬小麦水分动态分析和干旱预报. 气象学报. 1988, 46(2): 202~209.
- 6 Monteith J L. Vegetation and atmosphere, 1. Principles. London: Academic Press, 1975. 130~144.
- 7 朱自玺, 赵国强, 邓天宏. 冬小麦优化灌溉模型研究及其应用. 华北农学报, 1995, 10(4): 26~33.

WATER CONSUMPTION AND STOCHASTIC CONTROL OF IRRIGATION FOR COTTON

Zhu Zixi Zhao Guoqiang Deng Tianhong Fang Wensong Niu Xianzeng
(Henan Province Research Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003)

Abstract

Based on experimental data for 5 years, the parabolic relations between cotton yield and water consumption are analysed, and the optimal water consumption for cotton is determined. According to the variations of stoma resistance, transpiration of leaves, abscission of squares and bolls in different soil moistures, the suitable soil moisture and drought indices in different stages of cotton are decided. The stochastic control model of irrigation for cotton could be used to predict dynamically effective soil water content and actual evapotranspiration of cotton and make the decision aiming at obtaining maximum economic benefit and water utilization efficiency.

Key words: Cotton Water consumption Water index Irrigation Stochastic control