

# 风沙区春小麦作物系数试验研究

孙景生, 刘祖贵, 张寄阳, 段爱旺

(中国农业科学院农田灌溉研究所)

**摘要:** 作物系数是利用参考作物法计算作物需水量的重要参数之一。该文利用水量平衡法反求春小麦的作物系数, 分析了风沙区春小麦作物系数在生育期内的变化规律, 建立了春小麦作物系数与播后天数、生育期累积积温关系的函数曲线, 同时还采用 FAO 分阶段直线法构建了春小麦作物系数曲线。结果表明, 春小麦作物系数与播后天数和生育期累积积温之间分别呈现出良好的 6 次多项式关系和 4 次多项式关系, 回归曲线与数据点拟合得非常好, 相关系数( $R^2$ )均在 0.94 以上; 采用 FAO 分阶段直线法得到的 3 个典型值分别为: 初始生长期 0.57, 生育中期 1.70, 收获时 0.55。

**关键词:** 春小麦; 水量平衡; 作物系数; 风沙区

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2002)06-0055-04

作物系数 ( $k_c$ ) 定义为作物的实际蒸发蒸腾量 ( $ET_c$ ) 与实测的或估算的参考作物蒸发蒸腾量 ( $ET_0$ ) 的比值。用水量平衡法制定灌溉制度, 需要根据作物系数曲线对每天的作物耗水量进行估算, 因此作物系数曲线应该反映出作物在整个生长季耗水的变化率。

以时间为变量的曲线形式常被用来推导并建立作物系数曲线。Wright 和 Jensen (1978)<sup>[1]</sup> 采用 3 次多项式, 将作物系数曲线分成播种至完全覆盖和完全覆盖至收获两个大的时段进行了详细的研究。Steele 等人 (1996)<sup>[2]</sup> 以播后天数为变量, 采用 5 次多项式进行回归, 分析确定了玉米的作物系数曲线。FAO 提出了一种基于 4 个生育时段长度和 3 个作物系数值, 采用直线连接的作物系数曲线的简化构建方法 (Doorenbos 和 Pruitt, 1977)<sup>[3]</sup>。由于不同地点、不同年份的作物发育速率有所不同, 因此许多研究者还提出了另一种构建作物系数曲线方法, 即以热量指标为变量, 将作物系数曲线与形态发育更为直接地联系起来。在这类方法中, 温度指标通常采用生长过程中的累积积温 (cumulative growing degree, 简称 CGD)<sup>[4-8]</sup>。Sammis 等人 (1985) 的研究表明, 在 New Mexico, 对于玉米和高粱, 用 CGD 作为变量构建作物系数曲线, 与用时间作变量构建的作物系数曲线相比, 可减少不同地理位置之间作物系数的差异<sup>[4]</sup>; Stegman (1988) 指出, 以 CGD 为变量的玉米作物系数曲线, 在 Kansas 与 North Dakota 之间以及在 Nebraska 与 North Dakota 之间具有高度的一致性<sup>[5]</sup>。彭世彰和李荣超 (2001)<sup>[9]</sup> 综合考虑覆膜旱作技术对水稻生理生态的影响, 提出了涵盖水稻冠层叶面积指数、天顶角绿叶覆盖率、含遮荫地表植被有效覆盖率及移栽后天数等稻株生长影响因素在内的多因子线性公式和多因子非线性公式, 计算覆膜旱作水稻的综合作物系数。

作物系数的研究成果虽然较多, 但这些研究结果大多是在 FAO 定义的标准气候 (白天平均最低相对湿度 45% 左右, 平均风速 2 m/s 左右的半湿润气候) 条件下取得的, 而专门针对干旱风沙区作物系数的研究资料还非常少。在我国西北干旱多风地区, 春小麦是一种主要的粮食作物, 种植面积很大, 为此, 本文利用 FAO 最新修正的 Penman-Monteith 公式计算参考作物  $ET_0$ , 尝试用不同方式构建春小麦作物系数曲线, 以期对风沙区春小麦作物需水量的计算提供依据。

## 1 试验地点基本情况与试验设计

### 1.1 试验地点基本情况

试验于 2001 年 4 月~7 月在内蒙古包头市达拉特旗水利部牧区水科所的试验基地进行。该基地位于东经 109°58'、北纬 40°26', 地处内蒙古伊克昭盟达拉特旗境内的树林昭乡, 北近黄河、南临库布齐沙漠, 为库布齐沙漠和黄河南岸冲积平原的交接带, 海拔高程在 1 003~1 007 m 之间。该区降雨少 (294.34 mm/a), 蒸发量大, 冬、春两季多风, 土壤为壤质砂土, 具有典型风沙区的特点。试验地的土壤容重为 1.48 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量 13.68% (占干土重的百分数, 下同), 凋萎点含水率 4.2%。供试作物为春小麦 (品种为“1608”), 于 4 月 15 日播种, 行间距 14 cm, 播量 375 kg/hm<sup>2</sup>, 小畦规格为 2.7 m × 20 m, 整地前撒施二铵 150 kg/hm<sup>2</sup>、羊粪约 30 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 作为底肥, 于 5 月 10 日、5 月 23 日和 6 月 5 日追施尿素 3 次, 用量分别为 187.5 kg/hm<sup>2</sup>、225 kg/hm<sup>2</sup> 和 225 kg/hm<sup>2</sup>。收获日期为 7 月 18 日。

### 1.2 试验设计

将春小麦全生育期划分为苗期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期和灌浆成熟期 5 个生育阶段, 在每个生育阶段设计轻度亏缺和重度亏缺 2 个水分处理, 土壤水分下限控制指标分别为田间持水量的 55%~60% 和 45%~50%, 以全生育期适宜土壤水分作为对照。适宜水分处理的 下限指标除抽穗开花期为 75% 外, 其余各生育阶段均为 70%, 每个处理重复 3 次, 不同处理间设置宽度为 2.7 m 的保护小区。用取土烘干称重法测定

收稿日期: 2002-03-13

基金项目: 科技部公益院所基金项目“风沙区农业灌溉用水定额的修订与制定”

作者简介: 孙景生, 男, 副研究员, 河南省新乡市 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453003

土壤水分, 取土深度 120 cm, 每 10 cm 土层取一样, 苗期取土时间间隔为 7~10 d, 其它生育时段为 5~7 d; 灌后或雨后第 2 d 加测 1 次, 5 个生育阶段的灌水计划湿润层深度分别为 40、60、80、100、100 cm, 当各阶段计划湿润层土壤含水率的平均值达到设计的灌水控制下限时, 采用低压管道灌水, 水表计量水量。作物出苗后, 每半个月左右进行一次作物地上形态发育调查, 调查项目主要包括苗数、株高、叶面积和干物重等。

## 2 研究方法

根据作物生育期内土壤水分的观测结果, 利用根区水量平衡模型模拟春小麦各灌溉处理试验。根区水量平衡的基本方程为

$$\Delta W = I + P_e + G - D - k_c k_s ET_0 \quad (1)$$

式中  $\Delta W$  —— 相邻两次取土测定土壤水分时间间隔内根区土壤储水量的变化, mm;  $I$  —— 时段内的灌水量, mm;  $P_e$  —— 时段内的有效降水量, mm;  $G$  —— 时段内根区下层土壤水分的向上补给量, mm;  $D$  —— 时段内的深层渗漏量, mm;  $k_c$  —— 作物系数;  $k_s$  —— 土壤水分胁迫系数;  $ET_0$  —— 为时段的参考作物蒸发蒸腾量, mm, 用 Penman-Monteith 公式计算。

为了简化作物根区深度的确定, 模拟时, 根据作物的形态发育调查结果, 按 FAO 的方法将作物全生育期划分为 4 个大的生育阶段, 即生长初期、快速发育期、生育中期和成熟期, 各生育阶段的主要根系活动层深度分别定为 60、80、100、100 cm。由于试验地点的土壤为壤质砂土, 土壤内的毛细孔隙多为大孔隙, 地下水位又相对较深, 因此模拟时可以将时段内根区下层土壤水分的向上补给通量忽略不计。春小麦生育期降水量很少, 未形成深层渗漏; 灌水产生的深层渗漏量用水量平衡方程, 根据灌水前后两次的取土结果计算, 公式如下

$$D = I - 10\gamma H (\theta_{灌后} - \theta_{灌前}) \quad (2)$$

式中  $\gamma$  —— 土壤干容重,  $\text{kg}/\text{cm}^3$ ;  $H$  —— 设定的根系层深度, m;  $\theta_{灌前}$ 、 $\theta_{灌后}$  —— 灌水前和灌水后测定的根系层土壤平均含水率, (占干土重的 %); 其它符号意义同前。

在用水量平衡方程反求各时段作物系数  $k_c$  值时, 除了土壤水分胁迫系数  $k_s$  值外, 其它参数均可用实测的资料计算得到。土壤水分胁迫系数  $k_s$  值采用如下公式计算

$$k_s = 1.0 \quad \text{当 } D_r > RAW$$

$$k_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1-p)TAW} \quad \text{当 } D_r \leq RAW \quad (3)$$

其中:  $TAW = 1000\gamma Z_r(\theta_c - \theta_p)$  (4)

$$D_r = 1000\gamma Z_r(\theta_c - \theta) \quad (5)$$

式中  $TAW$  —— 作物主要根系层总的土壤有效储水量, mm;  $RAW$  —— 为  $TAW$  中易于为作物根系吸收利用的根区土壤储水量, mm;  $D_r$  —— 作物根区的土壤水分亏缺量, mm;  $p$  —— 根区中易于为作物根吸收利用

的土壤储水量与总的有效土壤储水量的比值, 其值在 0~1.0 之间;  $\gamma$  —— 土壤容重,  $\text{kg}/\text{cm}^3$ ;  $Z_r$  为作物根系主要活动层深度, cm;  $\theta_c$  —— 根系层土壤的平均田间持水量(占干土重的 %, 下同);  $\theta_p$  凋萎点土壤含水率;  $\theta$  —— 时段初作物根系层的平均土壤含水率。

不同的作物,  $p$  值不同。对于同一种作物而言,  $p$  值是大气蒸发力的函数。在 FAO 56 《Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements》<sup>[10]</sup> 中, 列表给出了当  $ET_0 = 5 \text{ mm/d}$  时的各种作物的  $p$  值。对于春小麦,  $p = 0.55$ 。当  $ET_0$  值不是  $5 \text{ mm/d}$  左右时,  $p$  值可采用下式进行修正:

$$p = 0.55 + 0.04(5 - ET_0) \quad (6)$$

用根层土壤平均含水率模拟值与实测之间的绝对误差和相对误差评价模拟值与实测的吻合程度, 其计算公式<sup>[11]</sup>为

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\theta_{实测} - \theta_{模拟}| \quad (7)$$

$$RAE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\theta_{实测} - \theta_{模拟}}{\theta_{实测}} \right| \quad (8)$$

式中  $AAE$  —— 平均绝对误差;  $RAE$  —— 平均相对误差;  $\theta_{实测}$  —— 根层土壤含水率的实测值;  $\theta_{模拟}$  —— 根层土壤含水率的模拟值;  $n$  为观测值数量。

## 3 结果与分析

表 1 为根据春小麦生育期的实际观测资料, 利用水量平衡模型反推求得的春小麦相邻两次取土测定土壤水分时间间隔内的平均作物系数的结果。从表中可以看出, 春小麦作物系数在生育期内的变化规律是前期小、中期大、后期又小, 其中最高值为 1.81, 出现在播后 55 d 左右, 即春小麦孕穗期。与春小麦叶面积系数在生育期内的变化规律相比较, 发现二者的变化基本同步, 即春小麦作物系数先是随着叶面积系数的增大而增大, 进入灌浆期以后又随着叶面积系数的减小而减小。从表 1 还可以看出, 用反推法求解春小麦作物系数, 模拟计算的土壤水分与实测值相比的平均绝对误差  $AAE$ , 最高

表 1 播后不同时期春小麦作物系数  $k_c$  的模拟计算结果

Table 1 Simulating results of crop coefficients  $k_c$  at different stages after planting for spring wheat

播后天数/d	积温/	$k_c$	$AAE/\%$	$ARE/\%$
2	9.2	0.57	1.06	8.1
13	123.3	0.65	0.84	6.4
16	179.5	0.57	0.69	5.3
29	310.6	0.82	0.74	5.9
33	463.0	1.44	0.77	5.8
39	591.5	1.59	0.62	5.6
44	644.4	1.72	0.64	5.9
49	783.4	1.78	0.84	6.2
55	933.7	1.81	0.41	4.8
61	1041.3	1.51	0.66	6.2
67	1190.6	1.48	0.56	5.3
75	1366.0	1.36	0.61	6.6
79	1490.7	1.19	0.55	6.8
84	1621.2	0.76	0.72	6.9
93	1851.6	0.55	0.61	6.8

值出现在春小麦播后, 为 1.06%, 平均相对误差均不超过 9%, 精度较高, 因此, 采用该法确定作物的作物系数是合理可行的。

利用表 1 中的第 1 列、第 2 列和第 3 列数据, 以春小麦作物系数  $k_c$  作为因变量, 分别绘出了春小麦作物系数  $k_c$  随播后天数 (DAP) 和春小麦作物系数  $k_c$  随生育期累积积温 (CGD) 的变化规律, 结果见图 1 和图 2。分

别用 4 次、5 次和 6 次多项式对上述 2 种关系进行回归分析, 根据多项式曲线与数据点的拟合程度及相关系数的大小, 发现春小麦作物系数  $k_c$  与播后天数的关系可用 6 次多项式进行良好地表达, 而春小麦作物系数  $k_c$  与生育期累积积温的关系则呈现为 4 次多项式关系, 回归分析参数与统计结果列于表 2 中。较高的回归确定系数 ( $R^2$ ) 表明两条曲线与数据点拟合都非常好。

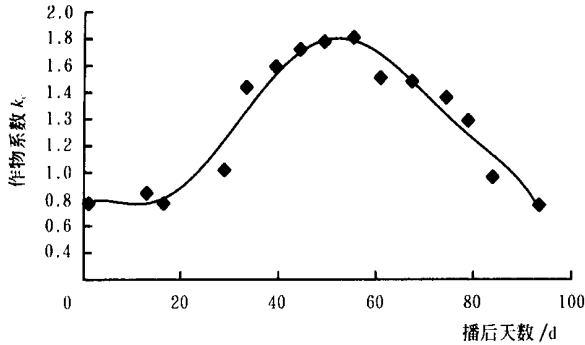


图 1 以播后天数为变量的春小麦作物系数曲线  
Fig 1 Relationship between crop coefficient and days after planting (DAP) for spring wheat

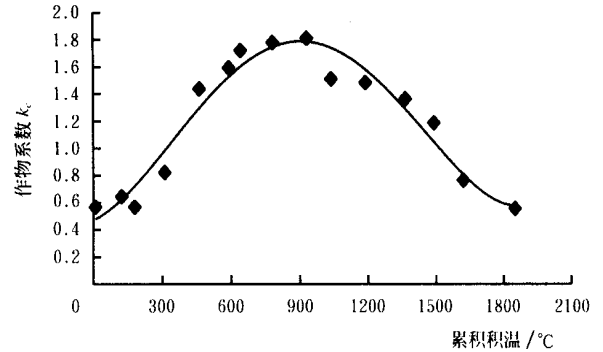


图 2 以累积积温为变量的春小麦作物系数曲线  
Fig 2 Relationship between crop coefficient and cumulative growing degree (CGD) for spring wheat

表 2 春小麦作物系数  $k_c$  作为播后天数 (DAP) 和生育期累积积温 (CGD) 函数的回归系数

Table 2 Regression coefficients for  $k_c$  as a function of days after planting (DAP) and cumulative growing degree (CGD) for spring wheat

变量	回归系数							$R^2$	$Se(k_c)$	$n$
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$			
DAP	0.562066	0.0202	$-4.22 \times 10^{-3}$	$2.83 \times 10^{-4}$	$-6.50 \times 10^{-6}$	$6.27 \times 10^{-8}$	$-2.2 \times 10^{-10}$	0.9450	0.1493	15
CGD	0.470956	$7.89 \times 10^{-4}$	$4.24 \times 10^{-6}$	$-5.18 \times 10^{-9}$	$1.45 \times 10^{-12}$			0.9420	0.1371	15

根据对作物生长发育的观测记录与计算结果, 按照 FAO - 56 指南中确定作物生育阶段的方法及模拟计算得到的作物系数  $k_c$  (表 1), 确定了用分阶段直线法构建作物曲线的参数, 结果见表 3。利用表 3 中的参数构建的分段直线作物系数曲线见图 3。由图 3 可见, 用该方法确定的春小麦初始生长期的作物系数  $k_{cini}$  (0.57) 与成熟期的作物系数  $k_{cend}$  (0.55) 与作物系数  $k_c$  与播后天数关系曲线及作物系数  $k_c$  与生育期累积积温关系曲线的初始值和最终值相似, 但生育中期的作物系数  $k_{oned}$  (1.70) 较上述 2 条曲线的最大值 (1.80) 要小些, 其结果为时段内  $k_c$  的均值。与 FAO - 56 指南中提供的 3 个参数  $k_{cini}$  (0.3)、 $k_{oned}$  (1.15)、 $k_{cend}$  (0.4) 值相比, 本研究得到的 3 个参数值都较大, 尤其是生育中期的  $k_{oned}$  值比指南中的  $k_{oned}$  值要大得多。分析其原因发现, FAO - 56 指南中的  $k_c$  值是在标准气候条件下, 即白天平均最低相对湿度 45% 左右、平均风速 2 m/s 的半湿润区测得的, 而本研究区位于干旱地区中的干旱少雨时段, 平均风速较高, 大气蒸发力强, 平流交换明显, 因此春小麦作物系数值要高些。这也充分说明了利用当地试验资料进行修正的必要性。

表 3 用分阶段直线法构建作物系数曲线的春小麦生育时段长度和作物系数

Table 3 Length of spring wheat growth stages and  $k_c$  parameters used to constructed the "Straight Line" crop coefficient curve

春小麦生育时段	时段长度/d	作物系数/ $k_c$
初始生长期	25	0.57
快速发育期	17	0.57~1.70
生育中期	21	1.70
成熟期	31	1.70~0.55

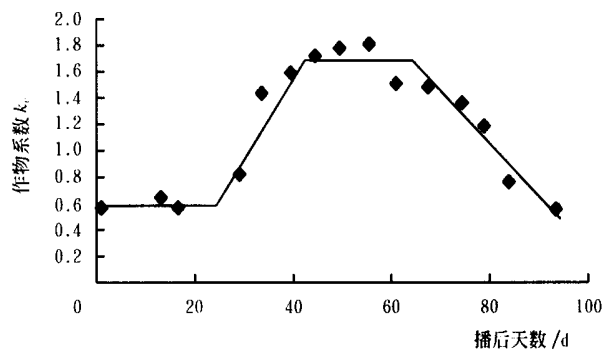


图 3 用分段直线法构建的春小麦作物系数曲线  
Fig 3 Crop coefficient curve for spring wheat constructed by "Straight Line" Method

## 4 结 论

1) 用水量平衡法反求春小麦作物系数, 模拟计算的土壤水分与实测值相比的平均相对误差不超过 9%, 精度较高, 因此, 采用该法确定春小麦的作物系数是合理可行的。

2) 春小麦作物系数与播后天数和生育期累积积温之间分别呈现出良好的 6 次多项式关系和 4 次多项式关系, 回归曲线与数据点拟合得非常好, 相关系数 ( $R^2$ ) 均在 0.94 以上。

3) 采用 FAO 分阶段直线法得到的风沙区春小麦作物系数的 3 个典型值  $k_{cin}$ 、 $k_{med}$  和  $k_{cend}$  分别为 0.57、1.70 和 0.55, 其结果比 FAO 提供的标准状况下的 3 个典型值都大, 因此在参考使用 FAO 提供的数值时应根据当地的实际情况进行必要的修正。

### [参 考 文 献]

- [1] Wright J L, Jensen M E. Development and evaluation of evapotranspiration models for irrigation scheduling [J]. Trans of the ASAE, 1978, 21(1): 88~ 96
- [2] Steel D D, Sajid A H, Pruity L D. New corn evapotranspiration crop curves for southeastern North Dakota [J]. Trans of the ASAE, 1996, 39(3): 931~ 936
- [3] Doorenbos J, Pruitt W O. Crop water requirements [M]. Irrigation and Drain. Paper No. 24 Rome, Italy: Food

- and Agric Organization of the United Nations 1977
- [4] Sammis T W, Mapel C L, Lugg D G, et al. Evapotranspiration, crop coefficients predicted using growing-degree-days [J]. Trans of the ASAE, 1985, 28(3): 773~ 780
- [5] Stegman E C. Corn crop curve comparison for the Central and Northern Plains of the U. S [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1988, 4(3): 226~ 233
- [6] Ayars J E, Hutmacher R B. Crop coefficients for irrigating cotton in the presence of groundwater [J]. Irrigation Science, 1994, 15(1): 45~ 52
- [7] Slack D C, Martin A E, Sheta F A. Crop coefficients normalized for climatic variability with growing-degree-days [A]. ASAE Proc Int Conf on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling [C], 1996, 892~ 898
- [8] Hunsaker D J. Basal crop coefficients and water use for early maturity cotton [J]. Trans of the ASAE, 1999, 42(4): 927~ 936
- [9] 彭世彰, 李荣超. 覆膜旱作水稻作物系数试验研究 [J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 312~ 317.
- [10] Allen R G, Luis S P, Raes D, et al. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements [M]. FAO Irrigation and Drainage, 1998, 56
- [11] 许迪, 蔡林根, 刘钰等. 农业可持续发展的农田水土管理研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000

## Crop Coefficients of Spring Wheat in Windy Dust Area

Sun Jingsheng, Liu Zugui, Zhang Jiyang, Duan Aiwan

(Fam land Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453003, China)

**Abstract:** Crop coefficient is one of the most important parameters needed for crop water requirements using the reference crop method. In this paper, crop coefficients of spring wheat ( $k_c$ ) were calculated by using the water balance method. The change of  $k_c$  during spring wheat growing period in windy dust area was analyzed. The  $k_c$  as functions of days after planting (DAP) and cumulative growing degree (CGD) were derived, and the third  $k_c$  was derived from the data using the FAO "Straight-Line" Method. The results showed that there were good sixth-order polynomial and fourth-order polynomial relations between  $k_c$  and DAP and CGD, respectively. The high coefficients of determination ( $R^2 > 0.94$ ) for the DAP and CGD regressions indicate that the curves fit the data well. The three typical  $k_c$  values, derived by using the FAO "Straight-Line" Method at the initial, middle growth stages and at harvest data were 0.57, 1.70, 0.55, respectively.

**Key words:** spring wheat; water balance; crop coefficient; windy dust area