

文章编号: 1001-6791(2001)03-0312-06

# 覆膜旱作水稻作物系数试验研究

彭世彰, 李荣超

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 分析了覆膜旱作水稻需水量试验资料, 得出覆膜旱作水稻各生育阶段综合作物系数。综合考虑了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、含遮阴地表植被有效覆盖率及移栽后天数等稻株生长影响因素等综合作物系数计算公式。计算结果与实测值较吻合, 经  $F$  检验具有极显著性水平, 可以用于覆膜旱作水稻实际蒸发蒸腾量的计算。

**关键词:** 水稻; 覆膜旱作; 作物系数; 节水灌溉

**中图分类号:** S 512.7      **文献标识码:** A

## 1 问题的提出

国内外许多研究成果常采用计算参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  后, 考虑植株因素函数项即作物系数  $K_c$ , 换算出作物实际蒸发蒸腾量  $ET_c$  [1]。当土壤水分胁迫时, 还考虑土壤因素函数项即土壤水分应力系数  $K_s$ , 对作物实际蒸发蒸腾量  $ET_c$  进行估算 [2]。

然而, 不同作物、不同节水灌溉技术条件下, 作物蒸发蒸腾量计算中需要确定适宜的作物系数  $K_c$  或确定适宜的  $K_c$  计算方法, 是目前急需试验解决的问题之一。

覆膜旱作水稻栽培技术研究 20 世纪 60 年代始于日本 [3], 80 年代我国北方诸省也开展了此类栽培试验研究 [4]。在本项试验中, 采用早育稀植育秧和移栽方式, 大田覆膜旱作早管, 以覆膜后水稻根层土壤水分作为调控指标, 在水稻非关键生长期控制灌水, 充分利用天然降雨。在水稻关键生长期, 适时适量灌水补充膜下土壤水分, 达到促控水稻生长和节水高产的目的。

## 2 试验设计

试验中将水稻全生育期分为分蘖前期、分蘖后期、拔节孕穗、抽穗开花期和乳熟期生育阶段, 分别以各自不同土壤水分控制下限进行组合试验 (如表 1)。共 9 个处理, 每一处理设三次重复计 27 个小区, 安排在 1.1 m × 1.0 m × 1.5 m 带廊道有底蒸渗仪内。

收稿日期: 2000-05-31; 修订日期: 2000-06-30

基金项目: 水利部水利科技重点项目 (SZ9827)。

作者简介: 彭世彰 (1959-), 男, 上海人, 河海大学水利水电工程学院教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

表1 水稻土壤水分适宜下限试验处理设计

Table 1. Design of lower water content suitable for rice growth

处 理	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗抽穗开花期	乳熟期
1	80%	70%	80%	80%
2	70%	60%	80%	80%
3	60%	50%	80%	80%
4	80%	70%	90%	80%
5	80%	70%	70%	80%
6	80%	70%	60%	80%
7	80%	70%	80%	70%
8	80%	70%	80%	60%
9	70%	60%	90%	70%

注：表中“%”为占田间持水量的百分比。

### 3 覆膜的水稻综合作物系数 $K_{mc}$

作物系数主要体现实际田间作物和参考作物四个方面的区别<sup>[5]</sup>：

(1) 作物高度 作物高度影响空气动力学阻力项  $r_a$ ，以及水汽从作物向大气的扩散。如  $r_a$  项在彭曼-蒙太斯 (Penman - Monteith) 公式的完全表达式中出现了两次。

(2) 作物-土壤表面的反射率 反射率受植被覆盖率和土壤表层湿润程度影响。由于作物-土壤表面的反射率不同，冠层接受的大气净辐射也会发生变化，从而改变了蒸腾过程的热交换。

(3) 冠层阻力 作物水汽扩散的阻力由叶面积 (气孔数量)，叶龄和叶片生长状况以及气孔开度等因素控制。冠层阻力的变化直接引起表层阻力  $r_s$  变化。

(4) 土壤蒸发，尤其是裸地蒸发。

覆膜旱作水稻的作物系数与已有成果中水稻作物系数  $K_c$  的不同，主要反映在覆膜后的水稻蒸发蒸腾量  $ET_c$  变化上。由于采用了覆膜旱作栽培方式，水稻需水规律有其特殊性，即薄膜覆盖抑制了棵间蒸发，根系吸收的水分在理论上更集中于作物蒸腾，而作物自身冠层发育有别于覆膜的情况，其潜在蒸腾有增强的趋势。同时由于控制供水，根系土壤有效含水量不再总是处于易蒸发水的理想条件，根系对水分的吸收受到土壤应力影响，作物的潜在蒸腾因而受到不同程度的制约。在两方面因素的相互作用下，覆膜旱作水稻的作物系数有其新的变化规律。

在作物蒸发蒸腾量计算中，不受种植密度、病虫害、杂草及盐压影响，综合考虑来自不同途径的土壤蒸发效果，作物实际蒸发蒸腾量在各生长阶段内的估计<sup>[5]</sup>：

$$ET_c = (K_{cb} + K_c) ET_0 \quad (1)$$

式中  $ET_c$  为作物实际蒸发蒸腾量； $ET_0$  为参考作物蒸发蒸腾量； $K_{cb}$  为基础作物系数，是表层土壤干燥而根区平均含水量不构成土壤水分胁迫条件下  $ET_c/ET_0$  的比值，侧重反映了作物潜在的蒸腾的影响作用； $K_c$  为表层土壤蒸发系数，代表了作物地表覆盖稀疏的苗期和前期生长阶段中，除  $K_{cb}$  中包含的残余土壤蒸发效果外，在灌溉或降雨发生后由大气蒸发力引起的表层湿润土壤的蒸发损失比，其值随作物地表覆盖率的增加、土壤蒸发能力的下降而减少，该值可达 1.0~1.2，取决于气候、土壤湿润深度和地表湿润比例等因素。该式由 Wright (1982) 最早提出并已被世界粮农组织 (FAO) 作物需水量专家咨询组 (Allen 等, 1996) 采纳和修正。

在考虑覆膜保墒作用的基础上, 可以不考虑表层土壤蒸发的影响, 因此假定覆膜旱作水稻  $K_e = 0$ , 得出覆盖旱作水稻需水量计算为

$$ET_c = K_{mc}ET_0 \quad (2)$$

式中  $K_{mc}$  为覆膜旱作条件下的综合作物系数, 考虑作物特性和旱作方式改变土壤应力后对蒸发蒸腾量的影响;  $ET_0$  为参考作物蒸发蒸腾量 mm/d, 可采用彭曼-蒙太斯 (Penman-Monteith) 公式计算。

### 3.1 覆膜旱作水稻的综合作物系数 $K_{mc}$ 实测值

根据彭曼-蒙太斯公式理论计算结果和覆膜旱作水稻实际蒸发蒸腾量的实测值, 得到覆膜旱作水稻的综合作物系数, 在各生育阶段的数值  $K_{mc_j}$  见表 2。

表 2 覆膜旱作水稻各生育阶段综合作物系数  $K_{mc_j}$

Table 2. Synthetic crop coefficient  $K_{mc_j}$  of rice in plastic film mulched dryland during the different growth stages

处 理	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	全生育期
1	0.47	0.57	1.18	1.92	1.44	1.04
2	0.30	0.77	1.49	1.80	1.33	1.07
3	0.43	1.33	1.31	1.64	1.34	1.08
4	0.41	0.53	1.43	1.81	1.21	1.03
5	0.41	0.30	1.63	1.62	1.42	1.12
6	0.37	0.41	1.16	1.41	1.77	1.05
7	0.37	0.23	1.13	1.90	1.19	0.91
8	0.31	0.83	1.66	1.62	1.09	1.05
9	0.43	0.63	1.50	2.03	1.16	1.07
平 均	0.39	0.62	1.39	1.75	1.33	1.05

### 3.2 拔节孕穗前覆膜旱作水稻作物系数 $K_{mc}$ 的确定

拔节孕穗前是冠层发育阶段, 覆膜旱作有效地抑制了水稻的棵间蒸发, 该阶段作物实际蒸发蒸腾量与浅湿晒灌溉水稻差异明显。从试验结果分析, 在 6 月至 7 月中上旬的气象条件下, 处理 1 至处理 9 控制供水后, 根层土壤水分条件接近, 实际蒸发蒸腾量变化趋势较一致, 可直接将该阶段  $ET_c$  与  $ET_0$  的平均值作为覆膜旱作水稻分蘖期的作物系数(表 3)。

表 3 覆膜水稻分蘖期的综合作物系数  $K_{mc_j}$

Table 3. Synthetic crop coefficient  $K_{mc_j}$  of rice in plastic film mulched dryland during the tillering stage

移栽后天数/d	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50
作物系数	0.216	0.767	0.346	0.352	0.752

### 3.3 拔节孕穗后覆膜旱作水稻综合作物系数 $K_{mc}$ 理论计算

覆膜旱作水稻因地膜覆盖和控制土壤水分后节水灌溉, 稻株高度、茎蘖数量、冠层上方  $0^\circ$  天顶角位置绿叶覆盖率和冠层有效蒸腾叶面积指数  $CLAI$ <sup>[5,6]</sup> 成为水稻实测蒸发蒸腾量的主要影响之一。覆膜旱作调控土壤水分后, 水稻冠层随太阳光路的转移对地表的遮荫效果即含遮阴地表的植被有效覆盖率  $f_{eff}$  也存在差别, 从而影响棵间蒸发。综合考虑覆膜旱作水稻不同阶段作物的平均株高  $h$ , 冠层叶面积指数  $CLAI$ , 天顶角为  $0^\circ$  的绿叶覆盖率  $CC_0$ , 含遮阴地表的植被有效覆盖率  $f_{eff}$  以及时间因子移栽后天数  $X$ , 可以涵盖气象因子对覆膜旱作水稻植株形态的综合影响。

在水稻封垄后, 使用植物冠层图像分析仪 CI-100 定时定点观测水稻  $CLAI$ , 平均叶倾角和

不同高度的太阳光穿透冠层后的直接辐射透过率及其消光系数，进而计算出同期水稻 0° 的  $CC_0$  及  $f_{eff}$  等指标，可以综合分析计算覆膜旱作水稻封垄后各生育阶段的  $K_{mc_j}$ ，其表达式分为线性与非线性两种：

(1) 多因子线性公式

$$K_{mc_j} = \alpha X + \beta CLAI + \gamma CC_0 + \eta f_{eff} + \lambda h + \rho \quad (3)$$

式中  $X$  为移栽后天数， $d$ ； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\eta$ 、 $\lambda$  和  $\rho$  为经验系数； $j$  为水稻在第  $j$  个生育阶段。

为简便起见，记  $CLAI$  为  $L$ ，冠层消光系数为  $K$ ，直射散射透过率为  $\tau(\theta)$ ，其中  $\theta$  为天顶角， $\tau$  是  $\theta$  的函数： $\tau(\theta) = \exp(-KL)$ 。

① 0° 天顶角水稻绿叶覆盖率  $CC_0$  计算

从  $CC_0$  的含义可知， $CC_0 = 1 - \tau(\theta = 0)$ ，而  $\frac{\ln \tau_1}{\ln \tau_2} = \frac{K_1}{K_2} = p$ ， $\therefore \tau(\theta_1) = \tau(\theta_2)^p$ 。

$$\text{当 } \theta_1 = 0^\circ \text{ 时, } p = \left[ \frac{x^2}{x^2 + \tan^2 \theta_2} \right]^{1/2}$$

式中  $x$  为椭球模型的水平半轴与垂直半轴的比率，可按水平投影和垂直投影的比求算。

根据 G.S. Campbell (1986) 的研究，冠层的消光系数  $K$  可应用叶角度分布的椭球模型表达为

$$K = \frac{(x^2 + \tan^2 \theta)^{1/2}}{x + 1.744(x + 1.182)^{-0.733}}$$

若  $x$  未知，可令  $x = 1$ 。由此， $CC_0 = 1 - \tau(\theta_2)^p$

② 含遮荫地表植被有效覆盖率  $f_{eff}$  计算<sup>[5]</sup>

$$f_{eff} = f_c \left[ 1 + \frac{HWR}{\tan(\eta)} \right] \leq 1$$

式中  $f_c$  为植被覆盖率； $HWR$  为单株或单排作物从东西向方计算的高宽比； $\eta$  为蒸发蒸腾高峰期（一般为 12:00）太阳的地平线以上的平均角度，rad；正午时： $\sin(\eta) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)$ ， $\varphi$  为纬度，rad； $\delta$  为日倾角，rad。

代表性处理的多因子线性公式各因子的经验系数见表 4。典型处理（处理 6）覆膜旱作水稻各生育阶段的综合作物系数  $K_{mc_j}$  的理论计算值和实测值的分析比较结果见表 5。

表 4 多元线性回归系数

Table 4. Coefficients of the multiple linear regression

处理	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\eta$	$\lambda$	$\rho$	$R^2$
1	0.021	0.260	0.0021	1.859	-0.02	-0.474	0.969502
2	0.021	0.853	-0.639	1.0645	-0.02	-1.102	0.929832
4	0.079	-0.165	104.582	-115.859	0.33	17.644	0.947079
6	-0.207	1.65	-176.2	318.076	-0.89	-22.17	0.995518
7	-0.016	0.3384	-56.149	64.673	-0.19	-11.118	0.693968
8	-0.060	1.583	-72.928	60.699	-0.17	-1.761	0.950345
9	-0.055	0.118	-24.596	21.106	0.00	-1.300	0.816205

表 5 处理 6 综合作物系数  $K_{mc_j}$  计算值与实测值比较Table 5. Comparison of calculated and measured values of synthetic crop coefficient  $K_{mc_j}$  for the treat 6

$X$ /d	$h$ /cm	$CLAI$	$CC_0$	$f_{eff}$	$K_{mc_j}$ 实测值	$K_{mc_j}$ 计算值	相对误差 /%
47	70.0	1.69	0.72	0.69	0.798	0.773	3.23
58	78.8	2.09	0.78	0.75	1.026	1.098	-6.56
62	82.3	2.43	0.86	0.81	0.984	0.922	6.72
73	90.3	3.00	0.76	0.78	2.204	2.203	0.05
80	99.4	2.69	0.82	0.84	0.799	0.842	-5.11
90	101.0	2.45	0.74	0.81	1.624	1.626	-0.12
96	110.5	2.45	0.72	0.83	1.596	1.562	2.18
104	105.0	1.80	0.74	0.84	2.451	2.456	-0.20

表 6 处理 6 多元线性回归统计值

Table 6. Statistical value of multiple linear regression for the treat 6

处 理	$R^2$	回归平方和	残差平方和	$F$ 观察值	$F_{0.01}$	$F_{0.05}$
6	0.995518	2.852106	0.012841	88.84214	99.3	19.3

由表 6 统计值可见有极显著水平。

(2) 多因子非线性公式

$$K_{mc_j} = \alpha'X + \beta' \exp(CLAI) + \gamma' \ln(CC_0) + \eta' \exp(f_{eff}) + \lambda'h + \rho' \quad (4)$$

式中  $\alpha'$ 、 $\beta'$ 、 $\gamma'$ 、 $\eta'$ 、 $\lambda'$  和  $\rho'$  为经验系数，其它符号意义同前。

代表性处理的多因子线性公式各因子的经验系数见表 7。典型处理(处理 4)综合作物系数  $K_{mc_j}$  理论计算值和实测值的分析比较结果见表 8。由表 9 统计值可见有显著水平。

表 7 多元非线性回归系数

Table 7. Coefficients of multiple unilinear regression

处理	$\alpha'$	$\beta'$	$\gamma'$	$\eta'$	$\lambda'$	$\rho'$	$R^2$
1	0.027	0.0385	1.645	-0.594	-0.02	3.429	0.979901
2	0.025	0.067	-0.012	0.499	-0.02	-0.659	0.926569
4	-0.129	-0.031	-44.376	35.183	-0.094	-99.513	0.990100
6	0.087	0.094	-12.217	10.304	-0.19	-15.167	0.933344
7	0.032	-0.042	11.725	-8.482	0.06	23.662	0.697619
8	0.0287	0.1121	7.701	-11.361	0.05	26.766	0.847856
9	-0.033	0.017	1.0936	-1.183	0.06	2.372	0.802679

表 8 处理 4 综合作物系数  $K_{mc_j}$  计算值和实测值比较Table 8. Comparison of calculated and measured values of synthetic crop coefficient  $K_{mc_j}$  for the treat 4

$X$ /d	$h$ /cm	$CLAI$	$CC_0$	$f_{eff}$	$K_{mc_j}$ 实测值	$K_{mc_j}$ 计算值	相对误差 /%
47	69.40	1.76	0.42	0.75	0.77	0.76	1.32
58	80.80	2.03	0.41	0.78	1.36	1.39	-2.16
62	83.90	2.75	0.41	0.79	1.23	1.17	5.13
73	95.80	3.15	9.73	1.11	2.16	2.15	0.47
80	104.40	2.73	0.43	0.87	1.56	1.62	-3.70
90	107.00	2.20	0.42	0.88	1.84	1.76	4.55
96	110.45	2.13	0.47	0.94	1.28	1.27	0.79
104	99.00	1.88	0.39	0.84	1.16	1.17	-0.85

表9 处理4多元非线性回归统计值

Table 9. Statistical value of multiple unlinear regression for treat 4

处理	$R^2$	回归平方和	残差平方和	F 观察值	$F_{0.01}$	$F_{0.05}$
4	0.9901	1.2703	0.0127	40.642	99.3	19.3

## 4 结 论

(1) 用多因子线性公式计算覆膜旱作水稻综合作物系数，表达方法相对简洁，计算结果与实测值误差在 0.12% ~ 6.56% 范围；多因子非线性公式表达相对复杂，计算结果与实测值误差在 0.79% ~ 5.13% 范围。两种计算方法都能满足生产实践的精度要求，均可用于覆膜旱作水稻综合作物系数的计算。

(2) 在具备植物冠层图像分析仪 CI-100 条件下，可通过求算多因子线性公式或多因子非线性公式中各项因子，利用相应公式(3)或(4)，得出覆膜旱作水稻各生育阶段的综合作物系数  $K_{mc}$ ，再通过彭曼-蒙太斯 (Penman-Monteith) 公式计算参考作物蒸发蒸腾量，与  $K_{mc}$  相乘得到覆膜水稻实际蒸发蒸腾量。

(3) 在生产实践中，也可参考表 1 中实测值  $K_{mc}$  推算覆膜旱作水稻实际蒸发蒸腾量  $ET_c$ 。

### 参考文献：

- [1] 陈玉民, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995. 50 - 128.
- [2] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999. 47 - 64.
- [3] 赵其良. 日本东北地区水稻旱地膜覆盖栽培技术[J]. 辽宁农业科学, 1982, (3): 52 - 56.
- [4] 罗守进. 稻类旱作研究[J]. 安徽农业科学, 1997, 25(4): 333 - 337.
- [5] Allen R G, Pereira L S, Raes, D, Smith M. Crop Evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [A]. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 17 - 156.
- [6] Allen R G, Hatfield J L. Evapotranspiration Estimates Under Deficient Water Supplies[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 9/10, 301 - 308.

## Test for Crop Coefficients of Rice in Plastic Film Mulched Dryland

PENG Shi-zhang, LI Rong-chao

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The synthetic crop coefficients are evaluated by analyzing the experiment data on water requirement of rice in plastic film mulched dryland (RPFMD). In consideration of the effect of physiological and ecological indexes in RPFMD, the calculation formulas of the synthetic crop coefficient are proposed concerning on rice growth factors including canopy leaf area index, green leaves coverage of zenith angle, the effective fraction of soil surface shaded by vegetation and days after transplant. The calculation results are agreement with measured values, and the F test reaches an extreme significance level. The formulas are accurate enough to be applied to the calculation of actual evapotranspiration of RPFMD.

**Key words:** rice; plastic film mulched dryland; crop coefficient; water-saving irrigation