

控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量及作物系数试验研究

丁加丽^{1,2}, 彭世彰¹, 徐俊增^{1,2}, 李道西^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要 根据国家“863”节水农业重大专项江西示范区晚稻节水灌溉试验资料, 分析了控制灌溉条件下晚稻移栽后各周蒸发蒸腾量变化规律和影响因素, 研究了控制灌溉条件下水稻作物系数的变化。研究表明 控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾在拔节孕穗期以及抽穗开花期保持较大值, 其他时期则较小。蒸发蒸腾量与冠层净辐射量、饱和水汽压差等气象因素以及田间土壤水分状况关系密切, 叶面积指数不是关键的影响因子。利用冠层净辐射量等气象因子及土壤水分系数表示的冠层阻抗与蒸发蒸腾量呈明显负相关关系。双季晚稻全生育期作物系数 K_c 平均值为 1.27, 生育中期的作物系数值稍大于 FAO 推荐参考值。

关键词 蒸发蒸腾量 冠层阻抗 作物系数 控制灌溉 水稻

中图分类号 S275

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2006)03-0239-04

目前, 国内外对非充分供水条件下水稻需水量变化规律及其影响因素的研究较少。由于试验区气候条件以及灌溉模式的不同, 对水稻蒸发蒸腾量影响因素的研究尚无确定性结论^[1-3]。研究大多定性分析水稻蒸发蒸腾量与影响因素的关系, 或者建立水稻蒸发蒸腾量与影响因子的单因素或多因素回归模型, 而没有考虑这些因子对蒸发蒸腾量的综合影响。本文对控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量的变化规律进行了分析, 从冠层能量吸收、田间土壤水分变化以及作物冠层发育的角度研究蒸发蒸腾量的影响因子。引入冠层阻抗 r_c , 分析蒸发蒸腾量与冠层净辐射等气象因素及田间土壤水分状况的关系。

FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)推荐了不同地区主要农作物、草类及树类的作物系数典型值^①。刘钰等^[4-5]利用这种简化的 4 个生育阶段 3 个作物系数的方法构建了冬小麦等旱作物的作物系数曲线。而针对水稻作物系数的相关研究则较少。本文研究了控制灌溉条件下水稻的作物系数 K_c , 并与 FAO 推荐的 K_c 值进行了比较和分析。

1 试验区概况与试验方法

1.1 试验区概况

2003 ~ 2004 年, 在江西省鹰潭余江示范区(北纬 28°15', 东经 116°55')进行了控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量及作物系数试验。试验区为典型的中亚热带低丘岗地区, 土壤主要为中潜灰潮沙泥田, 0 ~ 40 mm 土壤密度为 2.65 g/cm³; 年平均温度 17.2 ~ 18.1℃, 大于 10℃ 积温为 5 627.6℃; 无霜期为 262.1 d, 年均日照为 1 852.4 h, 日照时数百分率 42%, 年均太阳辐射量为 4 523 MJ/cm²。年降水量为 1 752.1 mm, 但降雨时空分布不均, 季节性干旱严重。农业生产以种植水稻为主。

1.2 实验方法

试验采用水稻控制灌溉模式, 设 3 次重复。除返青期田间保持 5 ~ 25 mm 的水层和黄熟期自然落干以外, 其他各生育期均不建立灌溉水层。土壤含水率上限为饱和含水率, 分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗前期、拔节后期、抽穗开花期及乳熟期的根层土壤含水率下限分别取饱和含水率的 70%, 65%, 60%, 70%, 75%, 80% 和 70%。2003 年试验采用的双季晚稻品种为“晚粳 923”, 7 月 23 日插秧, 10 月 30 日收割, 本田生育

收稿日期 2005-09-15

基金项目 国家“863”节水农业重大专项资助项目(2002AA2Z4331) 江苏省高等学校研究生创新计划资助项目(xm04-42)

作者简介 丁加丽(1979—), 女, 江苏东台人, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论及技术研究。

① ALLEN R G, LUIS S P, RASE D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, 1998 56.

期为 100 d. 2004 年试验采用的双季晚稻品种为“4015”, 7 月 27 日插秧, 11 月 2 日收割, 本田生育期为 99 d. 水稻全生育期内, 每日上午 8 00 观测田间水层或土壤水分变化, 利用 6050X1 型 Trase 系统(TDR)测定土壤含水率. 利用 CI-100 植物冠层图像分析仪测定作物冠层叶面积指数(CLAI)等冠层参数. 气象资料由县级气象站提供.

2 水稻蒸发蒸腾量变化规律及影响因素

2.1 蒸发蒸腾量 ET_c

根据田间水量平衡方程计算水稻移栽后各周(W_{AT})平均日蒸发蒸腾量 ET_c , 结果如表 1 所示. 控制灌溉条件下, 水稻的 ET_c 在全生育期内逐渐增大, 达到最大值后逐渐减小, 生育末期水稻的 ET_c 最小. 2003 年和 2004 年水稻 ET_c 最大值分别为 8.61 mm/d 和 7.10 mm/d, 分别出现在 $W_{AT} = 6$ 和 $W_{AT} = 8$, 分别为水稻生育期的抽穗开花期和拔节孕穗期. 最小值分别为 2.36 mm/d 和 2.40 mm/d, 均出现在 $W_{AT} = 11$ 时, 为水稻生育期的乳熟期. 在 $W_{AT} = 6 \sim 9$ 时间段内, ET_c 保持较大值. 晚稻全生育期内, ET_c 在拔节孕穗期以及抽穗开花期较大, 而在乳熟期较小, 此变化规律与已有研究结果一致.

2.2 ET_c 影响因素分析

控制灌溉条件下, 冠层净辐射量 R_n 、空气温度 T_a 及饱和水汽压差 D_{pv} 与水稻的 ET_c 变化密切相关(图 1、图 2). 相关性分析表明, 2003 年水稻移栽后, ET_c 与 D_{pv} 、 R_n 和 T_a 的相关系数 r 分别为 0.79, 0.68 和 0.64; 2004 年, 则主要与 R_n 相关($r = 0.61$), 与 D_{pv} 和 T_a 的相关性较低. 水稻生育期内, R_n 总量达 $935 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 占太阳辐射 R_s 的 62.5%, 是影响 ET_c 的主要气象因子之一. 图 1 表明, ET_c 基本上随 R_n 的增大而增大, 随 R_n 的减少而降低.

控制灌溉条件下, 水稻蒸发蒸腾量与田间土壤水分状况关系较为密切. 图 3 表示的是水稻生育期内降雨量(P)、灌溉量(I)与土壤水分系数(K_s)的变化过程曲线. 返青期内, 由于田间土壤含水率较高, R_n 、 T_a 和 D_{pv} 较大, 导致 ET_c 较高. 而在乳熟期($W_{AT} = 10 \sim 11$), 田间土壤含水率持续较低是导致作物 ET_c 保持较小值的主要原因. 从图 1 和图 3 看出, 降雨及灌溉后, 虽然土壤含水率均处于饱和状态, 但由于气象条件不同, 对作物蒸发蒸腾量的影响也不同. 降雨后, 由于空气温度和辐射均较低, 导致作物蒸发蒸腾量较小. 灌溉一般在天气晴朗时进行, 土壤蒸发作用加强, 且经过缺水锻炼的作物在恢复灌水后蒸腾量明显提高, 导致作物 ET_c 明显增大. 分析表明, 气象因子与田间土壤水分状况交互影响水稻蒸发蒸腾量, 需要综合考虑它们的影响.

全生育期内, 水稻冠层叶面积指数 CLAI 随着作物冠层的发育逐渐增大(图 4). 在乳熟期($W_{AT} = 10$ 时)达到最大值 3.5, 然后随着作物叶片的衰败而降低; $W_{AT} = 1 \sim 9$ 时, ET_c 随 CLAI 值的增大逐渐增大; $W_{AT} = 6 \sim 9$ 时, CLAI 值 ≥ 3 , 认为大部分的太阳净辐射被冠层

表 1 晚稻生育期内 ET_c 计算结果

Table 1 Values of ET_c for late rice in growing season

W_{AT}	$ET_c/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$		W_{AT}	$ET_c/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	
	2003 年	2004 年		2003 年	2004 年
1		5.14	7	6.53	5.34
2	6.42	6.52	8	5.37	7.10
3	3.38	4.32	9	6.32	5.30
4	4.50	3.01	10	2.73	4.98
5	5.15	5.66	11	2.36	2.40
6	8.61	4.53			

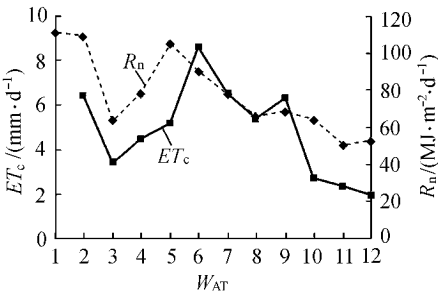


图 1 ET_c 与 R_n 变化过程曲线

Fig.1 Curves of ET_c and R_n

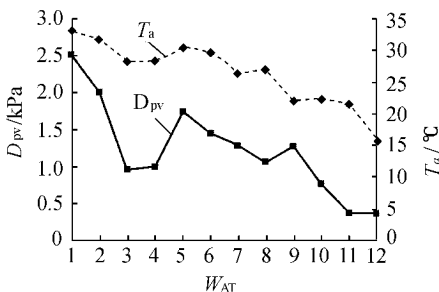


图 2 D_{pv} 与 T_a 变化过程曲线

Fig.2 Curves of D_{pv} and T_a

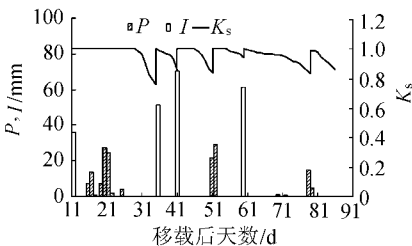


图 3 P 、 I 和 K_s 变化过程曲线

Fig.3 Variation of P , I and K_s in growing season

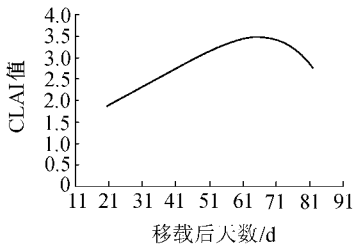


图 4 CLAI 值变化过程曲线

Fig.4 Curve of CLAI

截留, ET_c 在该时段保持较大值. 虽然以后各周 $CLAI$ 值继续增大, 但由于田间土壤水分含量控制在较低水平、净辐射 R_n 在 10 月出现降低趋势以及叶片在水稻生育后期活力降低, 导致 ET_c 减小.

由上述分析可知, 在控制灌溉条件下, 尤其是在水稻生育后期田间土壤水分较低条件下, 水稻冠层叶面积指数与蒸发蒸腾量关系并不密切. 因此, 应综合考虑冠层净辐射量等气象因素以及土壤水分状况对水稻蒸发蒸腾量产生的影响.

2.3 蒸发蒸腾量与冠层阻抗

冠层阻抗反映了水汽从土壤和植株向大气传输过程中受到的阻力, 是 Penman-Monteith 模型中计算作物蒸发蒸腾量的一个重要参数. Farias 等^[6]研究了大豆蒸发蒸腾量与冠层阻抗的日变化关系, 认为二者之间存在明显的函数关系, 为估算作物蒸发蒸腾量提供了另一途径. Faria 等^[6]在冠层阻抗空间分析的基础上, 考虑了冠层阻抗对冠层水平上可获得的能量、气象条件以及田间土壤水分状况的反应, 将受大气以及土壤水分条件综合影响的冠层阻抗 r_c 表示为

$$r_c = \frac{\rho_a C_p D_{pv}}{\Delta (R_n - G) C_F F} \tag{1}$$

式中: r_c ——冠层阻抗, m/s ; ρ_a ——空气密度, kg/m^3 ; C_p ——空气的定压比热, $1\,013\,J/(kg \cdot ^\circ C)$; D_{pv} ——饱和水汽压差, kPa ; Δ ——饱和水汽压差与空气温度曲线斜率, $kPa/^\circ C$; R_n ——作物冠层净辐射量, $MJ/(m^2 \cdot d)$; G ——土壤热通量, $MJ/(m^2 \cdot d)$; C_F ——转化系数, $680\,W \cdot m^{-2}/(mm \cdot h^{-1})$; F ——标准化后的土壤含水率, $F = 0 \sim 1$.

控制灌溉条件下, 水稻冠层阻抗计算结果表明, r_c 变化范围为 $26.4 \sim 95.9\,s/m$, 基本保持在 $50\,s/m$ 左右. r_c 在生育期内随冠层的发育逐渐增大, 在抽穗开花后期达到最大值, 最小值

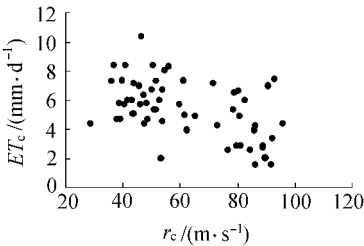


图 6 ET_c 与 r_c 的关系

Fig.6 Relation between ET_c and r_c

出现在拔节孕穗期后期以及乳熟期初期, 随后 r_c 又逐渐增大. 图 5 中 ET_c 增大时, 则 r_c 减小, 反之亦然, 这种趋势在移栽后天数大于 $62\,d$ 的生育后期表现不太明显, 原因可能在于利用水量平衡方程计算大田作物 ET_c 的精度不高, 不能反映真正的蒸发蒸腾日变化规律. 如图 6 所示, 在水稻移栽后 $W_{AT} = 3 \sim 9$ 周内, ET_c 随 r_c 的增大而减小, 并且减小的幅度随 r_c 的增大明显增大, 二者之间呈较明显的负相关关系, 但是明确的函数关系还需要进一步研究.

3 水稻作物系数

作物蒸发蒸腾量最常用的估算方法是先计算参考作物蒸发蒸腾量, 再乘以作物系数 K_c , 得到各计算时段的蒸发蒸腾量. 因此有关作物系数的研究亦成为作物需水量研究的关键问题. 控制灌溉条件下, 水稻田间土壤水分处于非饱和状态, 需要考虑土壤水分胁迫系数 K_s , 则非充分灌溉条件下水稻作物系数可用下式推求:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0 K_s} \tag{2}$$

式中: ET_c ——作物蒸发蒸腾量, mm , 采用试验实测数据; ET_0 ——参考作物蒸发蒸腾量, mm , 根据 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算; K_c ——作物系数; K_s ——土壤水分胁迫系数, 根据李远华^[7]提出的公式计算.

控制灌溉条件下, 双季晚稻全生育期作物系数 K_c 的平均值为 1.27 . $W_{AT} = 1 \sim 6$ 时段内 K_c 值从 0.9 逐渐上升到 1.59 在 $W_{AT} = 7$ 时达到最大值 1.69 , 随后逐渐减小 在 $W_{AT} = 12$ 时降低至 1.03 (图 7). 即在 $CLAI$ 值 ≥ 3 的第 7 周作物系数达到最大, 并在进入乳熟期后随着田间土壤含水量的减少以及作物叶面的衰败而迅速减小. 拔节孕穗以及抽穗开花期 ($W_{AT} = 6 \sim 9$), 灌溉后, 作物蒸发蒸腾量的增大也是 K_c 较大的原因之一. 由于 2004 年空气温度、太阳静辐射均小于 2003 年同期的值, 导致参考作物蒸

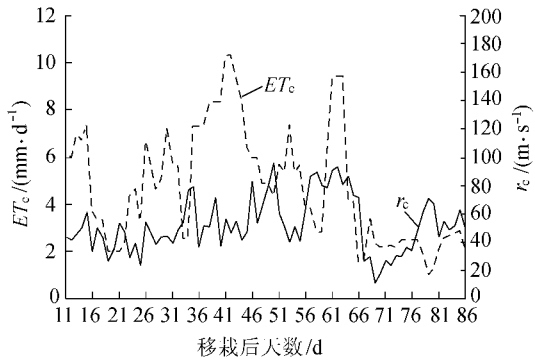


图 5 ET_c, r_c 的变化过程曲线

Fig.5 Curves of ET_c and r_c

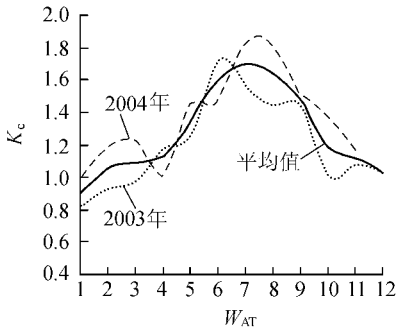


图 7 作物系数 K_c 实测值

Fig.7 Values of K_c measured in 2003 and 2004

发蒸腾量 ET_0 小于 2003 年同期数值,而田间土壤水分含量则大于 2003 年同期值,则除移栽后第 4 周和第 6 周,其余各周 K_c 值均大于 2003 年相应的 K_c 值。

控制灌溉条件下,水稻 4 个生育阶段 3 个作物系数分别为 1.01,1.60 和 1.03,生育中期以及后期的 K_c 值均大于 FAO 推荐参考值,分别为 1.05,1.20 和 0.90~0.60(表 2)。文献[8]中试验得出的 K_c 值较 FAO 参考值偏大,认为在半干旱气候条件下,Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量偏小;另外,也可能是由于土壤密度、种植密度和作物种类不同所致。因此,需要根据试验地区具体气候状况研究适合当地条件的 K_c 值,同时,也需要采用更加精确的作物需水量测量方法,从而保证实测数据的精度。

4 结 论

- a. 控制灌溉条件下,全生育期水稻蒸发蒸腾量在拔节孕穗期和抽穗开花期保持较高,在分蘖期和乳熟期较小,与已有研究结果一致。水稻蒸发蒸腾量与冠层净辐射量、饱和水汽压差等气象因素以及田间土壤水分状况关系密切,水稻生育后期,叶面积指数不是影响 ET_c 的关键因子。
- b. 冠层阻抗与蒸发蒸腾量呈负相关关系,但明确的函数关系还需要进一步研究。这一结论为作物蒸发蒸腾量的估算提供了一定的参考,也为利用 Penman-Monteith 方程直接计算作物蒸发蒸腾量奠定了基础。
- c. 控制灌溉条件下,水稻作物系数全生育期 K_c 平均值为 1.27。生育中期和后期的 K_c 值分别为 1.60 和 1.03,均大于 FAO 推荐参考值(1.20 和 0.90~0.60),可能是由于当地气候条件下,Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量偏小所致。

参考文献:

[1] 李远华,崔远来.非充分灌溉条件下水稻需水规律及影响因素[J].武汉水利水电大学学报,1994,27(3):314-319.
[2] 李荣超,彭世彰.覆膜旱作水稻需水规律试验研究[J].灌溉排水,2000,19(3):24-29.
[3] TYAGI N K,SHARMA D K,LUTHRA S K.Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter[J].Agricultural Water Management,2000,45:41-54.
[4] 刘钰,PEREIRA L S.对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J].农业工程学报,2000,16(5):26-30.
[5] 樊引琴,蔡焕杰.单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J].水利学报,2002(3):50-55.
[6] FARIAS S O,OLIOSE A.Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration[J].Irrigation Science,2004,23:1-9.
[7] 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,1999:63-64.
[8] 孙景生,刘祖贵,张寄阳.风沙区春小麦作物系数试验研究[J].农业工程学报,2002,18(6):55-58.

Experimental study on evapotranspiration and crop coefficient of rice under controlled irrigation

DING Jia-li^{1,2}, PENG Shi-zhang¹, XU Jun-zeng^{1,2}, LI Dao-xi^{1,2}
(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Science Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Based on experimental data about water-saving irrigation in a demonstration region for late rice planting in Jiangxi Province, an “863” national special project, the variation of weekly averaged evapotranspiration after transplanting and its influencing factors were analyzed under controlled irrigation, and the variation of crop coefficient was discussed as well. Some conclusions are drawn: evapotranspiration keeps high at shooting-booting stage and heading-flowering stage under controlled irrigation; soil-water condition and some meteorological factors, such as the canopy net radiation and saturation vapor pressure, rather than the index of leaf area, are the key factors affecting evapotranspiration; the canopy resistance obtained is negatively related to evapotranspiration; the mean value of crop coefficient for late rice in the whole growing season is 1.27, while in the middle period, it is a little higher than the reference values recommended by FAO.

Key words evapotranspiration; canopy resistance; crop coefficient; controlled irrigation; rice

表 2 FAO-56 推荐作物系数与实测作物系数比较

Table 2 Comparison of measured data of crop coefficient with that recommended by FAO-56

水稻生育时段	FAO 推荐 K_c 值	实测 K_c 值
初始生长期	1.05	1.01
快速发育期	1.05~1.20	1.01~1.60
生育中期	1.20	1.60
成熟期	0.90~0.60	1.03