

文章编号: 0559 9350 (2001) 06-0045-06

不同光照条件下作物蒸腾量计算的研究

刘贤赵¹, 康绍忠²

(1. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 作物蒸腾量的计算是水资源开发利用和农业生产运筹的关键参数之一. 本文以彭曼-蒙特斯方程为基础, 通过引入临界阻力, 根据实测资料建立冠层阻力和空气动力学阻力比值与临界阻力和空气动力学阻力比值二者之间的函数关系, 得到一个只需气象参数就能计算作物蒸腾量的简单方法. 文章对该方法进行了理论分析, 并用实例给予验证. 结果表明, 该方法在理论上和实践上都是可行的, 是一个值得研究和发展的新方法. 作物蒸腾量的日变化表明, 炎热夏季晴天中午遮光处理后作物蒸腾量的增大是可能的.

关键词: 蒸腾; 不同光照条件; 彭曼-蒙特斯方程; 棉花

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

水分蒸腾过程是作物本身不同器官和它所在的环境相互作用、反馈影响的结果. 作物所吸收的大部分水分(98%~99%)均通过蒸腾作用以水蒸汽的方式散失到大气中. 因此, 能否定量精确计算蒸腾量, 将直接影响土壤水分的计算精度、灌溉系统的设计、管理以及作物产量模拟和水文计算等方面. 然而在农业生产实践中都不同程度地存在着水分亏缺和水资源利用不合理等问题, 加上作物蒸腾量的计算不尽合理, 造成供水与需水之间的不平衡. 例如一些研究者(Denmead and Millar^[1]、Squire^[2]、Fuchs and Moresnet^[3]、Fuchs^[4]) 在计算蒸腾量时仅局限于充分光照条件下的叶片, 忽视了遮阴叶片因蒸腾造成的水分损失, 使计算结果与实际蒸腾量相差很大. 尽管有的研究者(Jagtap and Jones^[5]、Petersen^[6]) 在计算蒸腾量时考虑了遮阴叶片的蒸腾失水, 但他们在利用彭曼-蒙特斯模式计算蒸腾量的过程中把气孔导度(G_s)与光合有效辐射(PAR)近似为简单的线性关系. 事实上, 在炎热夏季晴天中午 11:40~14:00 之间, 遮阴叶片的 G_s 大于充分光照下的 G_s ^[7], 亦即 G_s 与 PAR 此时不具线性关系, 因此他们的计算方法在应用中仍有一定困难. 再者, 关于夏季晴天中午遮阴对作物蒸腾量的影响说法不一. Cohen^[8] 认为不同程度的遮阴使蒸腾量增大, 气孔导度增加, 而 Philip^[9] 认为减少太阳辐射(如人工遮光)将引起快速的气孔关闭, 导致蒸腾量大幅度下降. 为克服上述蒸腾量计算存在的限制, 本文以彭曼-蒙特斯模式为基础, 通过引入临界阻力 r^* , 借鉴 Katerji 和 Perier 的研究成果, 根据实测资料建立冠层阻力(r_c)和空气动力学阻力(r_a)比值与临界阻力(r^*)和空气动力学阻力(r_a)比值之间的函数关系, 得到一个只需气象参数就能计算作物蒸腾量的简明模式. 该文就这一方法从理论上进行了分析, 并用实测资料进行验证, 试图探讨遮阴对蒸腾量影响的机理, 以期在不同光照下作物蒸腾量的计算提供科学依据.

1 理论分析

彭曼通过对作物水分蒸腾生理机制的研究, 首次提出了单个叶片气孔蒸腾的计算模式, 蒙特斯在

收稿日期: 2000 03 30

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(49725102)、中国科学院国内地区访问进修计划项目资助.

作者简介: 刘贤赵(1970-), 男, 湖南隆回县人, 博士, 助理研究员, 主要从事 SPAC 水循环与调控、作物生理生态和水土保持等方面的研究.

彭曼等人工作的基础上提出了以能量平衡和水汽扩散理论为基础适用于作物蒸腾量计算的阻力模式, 即彭曼-蒙特斯 (Penman-Monteith) 模式, 为作物蒸腾量的计算开辟了一条新途径. 70 年代后, 随着不同形式气孔计的问世, 该模式得到了广泛的应用和发展, 成为当前国内外作物蒸腾量计算的通用模式. 康绍忠^[10]对该模式及其参数的确定作了较全面的分析, 认为对于郁闭冠层, 因冠层下土壤蒸发很小, 叶-汽界面水汽交换可根据彭曼-蒙特斯模式进行计算. 该模式如下:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + [\rho c_p(e_s - e_a)]/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (1)$$

式中: E 为蒸腾量 (mm s^{-1}); R_n 为净辐射通量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线上的斜率 ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数 ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$, 取 65.19); λ 为蒸发潜热 (MJ kg^{-1}); $\lambda = 247.713$; ρ 为空气密度 (kg m^{-3}); $\rho = 1.2447$; c_p 是空气定压比 ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); $c_p = 0.1012$; e_s 为大气饱和水汽压 (Pa); e_a 为大气实际水汽压 (Pa); r_a 为空气动力学阻力 (sm^{-1}); r_c 为作物对水汽传输的冠层阻力 (sm^{-1}); G 为土壤热流通量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 通常取 R_n 的 5%. 式 (1) 变形可得到:

$$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \frac{[1 + \rho c_p(e_s - e_a)]/[\Delta(R_n - G)r_a]}{1 + \gamma/(\Delta + \gamma)(r_c/r_a)} \quad (2)$$

引入临界阻力 $r^{* [11]}$, 并令 $r^* = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta \gamma} \frac{\rho c_p(e_s - e_a)}{R_n - G}$ (3)

把式 (3) 代入式 (2), 经整理即可得到彭曼-蒙特斯方程的简明模式:

$$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \frac{1 + [\gamma/(\Delta + \gamma)](r^*/r_a)}{1 + [\gamma/(\Delta + \gamma)](r_c/r_a)} \quad (4)$$

考虑气压订正, 式 (4) 可改写成

$$\lambda E = \frac{p_0/p \Delta}{p_0/p (\Delta + \gamma)} (R_n - G) f \quad (5)$$

式中: f 为一无量纲的权重系数, 其值与作物种类、生长状况、气象要素等因素有关. 用式表示为:

$$f = \frac{1 + [\gamma/(p_0/p (\Delta + \gamma))](r^*/r_a)}{1 + [\gamma/(p_0/p (\Delta + \gamma))](r_c/r_a)} \quad (6)$$

很显然, 使用式 (5)、式 (6) 计算作物蒸腾量时, 首先需要确定式中的各个参数. 由上述分析可知, 在所有参数中 f 是最重要的参数, 而确定 f 中的 r_c 和 r_a 又是其关键.

1.1 空气动力学阻力 r_a 的确定 空气动力学阻力是不同作物类型风速廓线的函数, 其准确测定相当困难, 本文用下式

$$r_a = r_g + r_b \quad (7)$$

进行计算. 式中: r_a 为空气动力学阻力 (ms^{-1}); r_g 为湍流传输阻力 (ms^{-1}); r_b 为叶片边界层阻力 (ms^{-1}). 对于 r_g 可由式 (8) 计算:

$$r_g = \frac{\ln[(z - d)/z_0][\ln(z - d)/z_E]}{k^2 u(z)} \quad (8)$$

式中: z 为参考高度 (m); d 是零平面位移高度 (m); z_0 是动量粗糙度参数 (m); z_E 是热量传输粗糙度参数 (m); k 为卡曼常数 (取 0.41); u 是参考高度 z 处的风速 (ms^{-1}). d 、 z_0 、 z_E 的计算分别采用经验公式 $d = 0.7H$, $z_0 = 0.13H$, $z_E = 0.2z_0$ 进行, 其中 H 为冠层高度 (m).

叶片边界层阻力 r_b 与叶片特征宽度、风速有关, 由叶片边界层理论可表示为:

$$r_b = 1/[c(u_j)/w]^{0.5} \quad (9)$$

式中: w 是叶片特征宽度 (m), 对于棉花叶片取 0.03m 较合适 (Fuchs, 1987); c 是经验常数, 取 $0.01 \text{ms}^{-0.5}$; u_j 是不同光照处理下单株棉花光照冠层顶端 ($j = 1$) 或遮阴冠层顶端 ($j = 2$) 的风速 (ms^{-1}), u_1 可简单近似为 $z = H$ 处的风速, u_2 可通过冠层内风速衰减基本关系式^[12]进行求解:

$$u_2 = u_1(H) \exp(-n(1 - z/H)) \quad (10)$$

式中: n 为与植被类型有关的衰减系数, 取值范围为 2~ 4, 本文取 $n=3$, 其它符号含意同前.

1.2 冠层阻力 r_c 的确定 一般情况下, 作物冠层阻力可通过单个叶片的气孔阻力和叶面积指数来计算. 但由于水汽传输不仅受冠层结构和叶片气孔的影响, 而且还受土壤含水量、土壤质地等因素的制约, 因此 r_c 的确定十分困难. 为解决这一问题, Katerji^[13] 和 Perrier^[14] 进行了大量的试验研究, 发现 (r_c/r_a) 与 (r^*/r_a) 具有很好的线性关系, 且 (r_c/r_a) 随 (r^*/r_a) 值的增大而增加, 其数学表达式为:

$$r_c/r_a = a(r^*/r_a) + b \quad (11)$$

式中: a 、 b 为经验系数 (a 、 b 值的确定将在 2.3 中述及). 一旦 a 、 b 确定, 将式 (11) 代入式 (6) 并结合式 (5), 即可得到一个只需气象参数就可计算作物蒸腾量的彭曼- 蒙特斯模式:

$$\lambda E = \frac{p_0/p(\Delta + \gamma)}{p_0/p(\Delta + \gamma)}(R_n - G) \frac{1 + [\gamma/(p_0/p(\Delta + \gamma))](r^*/r_a)}{1 + [\gamma/(p_0/p(\Delta + \gamma))][a(r^*/r_a) + b]} \quad (12)$$

1.3 其它参数的确定 使用式 (12) 计算作物蒸腾量时, 为减少计算误差, 还需考虑气压对计算精度的影响. 当试验地海拔高度超过 500m 时, 需用下式进行气压订正:

$$p_0/p = 10^{L_H/18400(1+T/273)} \quad (13)$$

式中: L_H 为海拔高度 (m), T 为气温 ($^{\circ}\text{C}$).

为便于求解及提高计算精度, 饱和水汽压可由下面的多项式计算:

$$e_s = 617.4 + 42.22T + 1.675T^2 + 0.01408T^3 + 0.0005818T^4 \quad (14)$$

而饱和水汽压- 温度曲线上的斜率 Δ 可由式 (14) 通过对 T 求导, 即 $\Delta = \frac{\partial e_s}{\partial T} \Big|_{T=T_z}$ 获得, 其中 T_z 为参考高度 z 处的温度. 其它与计算有关的参数均由实测资料获取.

2 应用实例

2.1 试验简介 为验证上述计算方法的可行性及其计算精度, 作者于 1999 年 4~ 9 月在西北农业大学节水灌溉试验站 (北纬 $34^{\circ}20'$, 东经 $108^{\circ}24'$, 海拔 521m) 进行了不同光照条件下作物蒸腾特性的研究. 供试棉花于 3 月底播种于温室盆内 (盆内径 18cm, 深 21cm, 每盆装有干沙、石砾、混合肥料及容重为 $1.25\text{g}/\text{cm}^3$ 、田间持水量为 24.3% 的中壤土, 总计 6kg). 从播种至出苗, 温室温度控制在 $25 \sim 15^{\circ}\text{C}$, 光照 14h, 相对湿度 50%~ 70%. 定苗后, 每盆保留大小一致的棉苗一株. 试验观测从苗期开始, 至花期结束. 观测过程中, 棉株被搬至室外水平空地上 2m 高的遮阳网下, 遮阳网 (面积 $4\text{m} \times 3\text{m}$) 分不遮光 (透光率为 100%, CK, 下同)、遮光 40% (透光率为 60%, SN, 下同) 和遮光 75% (透光率为 25%, DN, 下同) 3 个水平, 每种处理 3 个重复. 盆内土壤水分时用域反射仪 (TDR, USA) 监控在田间持水量的 $75\% \pm 5\%$. 测定时, 选取不同光照处理下每株棉花典型光照叶片和遮蔽叶片各 3~ 5 片, 用美国 CID 公司生产的 CI- 301PS 快速光合仪于晴天 11: 40~ 14: 00 进行测定. 测定项目有蒸腾速率 (E)、空气相对湿度 (RH)、气孔阻力 (R)、气温 (T_a) 和叶温 (T_l) 等. 用三杯风速仪测定距地面 1.5m 高处和冠层顶端风速, 用 DYMI 型辐射仪测定净辐射. 另外每 3d 量测一次株高并分别量测各处理棉株所有光照叶片和遮蔽叶片的叶面积指数. 除上述测定外, 每周还对蒸腾速率、相对湿度、气孔阻力、叶温、气温和净辐射测定一次日变化.

2.2 实测蒸腾量的确定 把作物冠层分为光照冠层和遮蔽冠层两部分, 于是不同光照条件下单株棉花的蒸腾量可通过光合仪测定的单叶蒸腾量的平均值与叶面积指数来计算, 即

$$E_i = \sum E_j L_j \quad (15)$$

式中: E_i 是单株棉花的蒸腾量 (mms^{-1}) ($i=1$ 表示 CK; $i=2$ 表示 DN, $i=3$ 表示 SN), E_j 表示光合仪测定的单株棉花光照部分 ($j=1$) 或遮蔽部分 ($j=2$) 单叶的蒸腾量 (mms^{-1}), 各取 3~ 5 片叶的平均值, L_j 表示单株棉花光照部分或遮蔽部分的叶面积指数.

2.3 系数 a 、 b 的确定 将式 (6) 中的 (r_c/r_a) 做为未知数, 根据由气象资料计算的 (r^*/r_a) 值和 2.2 中确定的实测蒸腾量并结合式 (5) 可计算出 (r_c/r_a) 的值, 利用最小二乘法确定式 (11) 中的系数 a 、 b 。根据这一方法, 利用 6 月 1 日、6 月 4 日和 6 月 7 日测定的数据资料, 分别求得 3 种不同光照条件下 (r_c/r_a) 与 (r^*/r_a) 的函数关系式:

$$CK: (r_c/r_a) = 0.6269(r^*/r_a) + 2.3515, R^2 = 0.7332, F_{0.001} = 76.96, n = 31 \quad (16a)$$

$$DN: (r_c/r_a) = 0.2950(r^*/r_a) + 2.6686, R^2 = 0.6161, F_{0.001} = 46.54, n = 31 \quad (16b)$$

$$SN: (r_c/r_a) = 0.4392(r^*/r_a) + 2.4096, R^2 = 0.7445, F_{0.001} = 84.49, n = 31 \quad (16c)$$

结果表明, 不同光照处理下 b 值 (即截距) 变化十分微小, a 值 (斜率) 变化差异显著且随遮光程度的增加而减小, a 值的大小主要与不同光照条件下的气孔阻力关系密切。原因是炎热夏季晴天中午作物遮光后有可能避免强光胁迫产生光抑制而引起气孔关闭, 结果使气孔阻力表现为 $CK > SN > DN$ 。

2.3 应用实例及结果分析 根据上述确定的系数 a 、 b 值, 利用 7 月 5 日、7 月 8 日、7 月 13 日和 7 月 16 日的实测资料分别计算了 3 种不同光照处理下棉花的蒸腾量, 并与实测值 (确定方法同 2.2) 进行比较, 结果如图 1。图 1 表明, 不同光照处理下棉花蒸腾量显示出较大的差异性, 蒸腾量的大小依次为 $DN > SN > CK$ 。蒸腾量变化的结果我们可以从机理上做出分析: 充分供水条件下作物最有效的光利用是大部分叶子处于中等光照水平, 且蒸腾速率受控于气孔行为。中午遮光后, 一方面改变了作物对光的吸收与分配, 另一方面对减轻光合作用的光抑制非常有效, 结果使 DN 和 SN 处理下的棉花有可能避免强光胁迫而引起的气孔关闭, 从而打破了作物的“午休”现象, 使 DN 和 SN 下的气孔处于全部开放或部分开放状态, 而 CK 处理的棉花为避免强光高温形成的高蒸发力产生脱水有可能使气孔几乎全部关闭, 最终导致 CK 的蒸腾量最小。相关分析表明, 3 种不同光照条件下的计算值与实测值均吻合较好, 相关系数分别为 0.9099 (CK)、0.9172 (DN) 和 0.9573 (SN)。另外作者还逐一计算了不同光照条件下作物蒸腾量的计算值与实测值的绝对误差, 并分别计算其平均绝对误差, 采用的计算式为:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{ik} - E_{io})^2 / n} \quad (17)$$

式中: $\bar{\varepsilon}$ 为平均绝对误差, E_{ik} 为某一时刻的计算值, E_{io} 为某一时刻的实测值。经统计, 计算值与实测值的绝对误差平均值在 CK 处理条件下为 0.011mm/h, 最大绝对误差为 0.0546mm/h; DN 处理下的平均误差为 0.018mm/h, 最大误差为 0.0489mm/h; SN 处理下的平均误差为 0.0154mm/h, 最大误差为 0.068mm/h。表明使用上述计算方法得到的计算值与实测值相差很小, 说明该方法是可行的, 计算精度是可靠的。

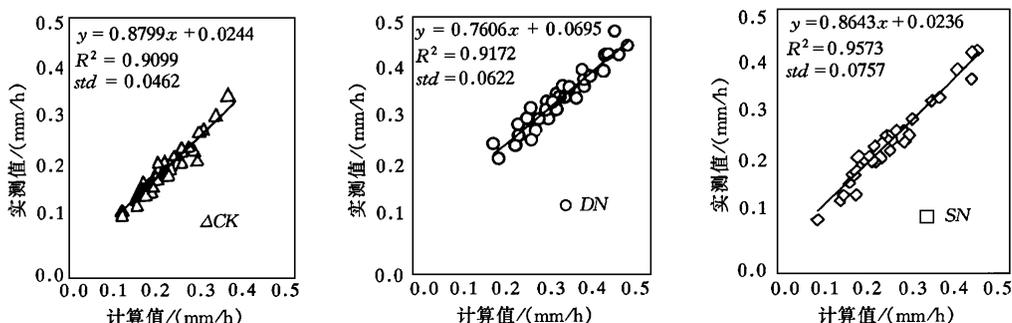


图 1 不同光照处理下棉花蒸腾量计算值与实测值比较

图 2 是 1999 年 7 月 21 日 3 种不同光照处理下棉花蒸腾量计算值与实测值的日变化过程。由图 2 可以发现不同光照条件下棉花蒸腾量的日变化均表现为上、下午有峰值、午间有一低谷的“M”字形特征。其中 CK 的蒸腾量在上午略高于 DN 和 SN 处理的蒸腾量, 下午差别微小。蒸腾量差别最大的时段出现在 11:00–15:00 之间, 其中 DN 处理下的蒸腾量明显大于 SN 和 CK , 其平均值分别是 SN 和 CK 蒸腾量的 1.08 倍和 1.34 倍。不同光照条件下棉花蒸腾量的日变化与 7 月 21 日气孔导度的日变化

(图3) 密切相关, 二者变化趋势具有很好的一致性, 这说明炎热夏季晴天午间遮光后气孔开度增大是蒸腾量增加的根本原因^[15]。另外, 图2还显示, 日变化过程中棉花蒸腾量的计算值与实测值也十分接近, 这进一步说明上述蒸腾量的计算方法具有一定的可靠性, 同样适合于研究不同光照条件下作物蒸腾量的日变化。

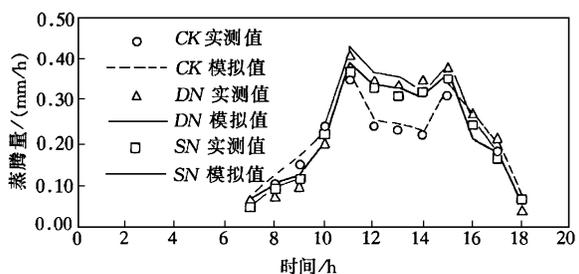


图2 不同光照条件下棉花蒸腾量计算值与实测值日变化比较

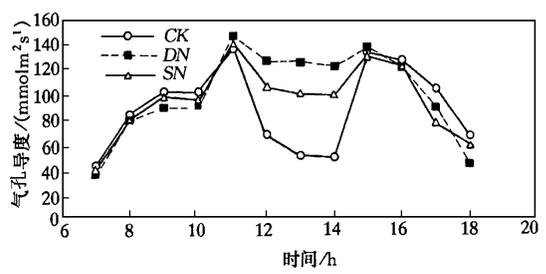


图3 不同光照条件下棉花气孔导度的日变化过程(7月21日测定)

3 结语

本文以彭曼-蒙特斯方程为基础, 通过引入临界阻力提出的计算作物蒸腾量的方法避免了计算冠层阻力的困扰, 在理论上和实践上是可行的, 是一个值得进一步研究和发展的新方法。由于临界阻力的估算取决于气象数据的获取, 因而具有很大的随机性, 本文在计算过程中把它假定为一特定常数。另外, 本文计算蒸腾量使用的参数 a 、 b 值是在一定地区、特定作物和不同处理下获得的, 对于不同的地区和作物条件需采用不同的参数, 因此该方法的推广应用还存在一定的困难。从生产应用的角度出发, 不同光照条件下作物蒸腾量的计算更重视其客观效果, 而难以按照本试验条件分别测个体叶片不遮光、遮光及其比例等, 如果能从盆栽过渡到整个植株总体状况, 其条件可能更接近于实际, 所以本研究重在其机理认识。如何使不同光照条件下作物蒸腾量的计算具有更大的实用性, 还有待于广大科技工作者进一步的努力。

参 考 文 献:

[1] Denmead O T, B D Millar. Field studies of the conductance of wheat leaves and transpiration [J]. *Agron. J.* 1976, 68: 307- 311.

[2] Squire G R. The response of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. and H.) to atmospheric humidity [J]. *J. Exp. Bot.* 1979, 30: 925- 933.

[3] Fuchs M, S Moreshet. Theoretical analysis of modeled transpiration of irrigation and drainage [R]. 1984, INRA publications, Paris. 1985.

[4] Fuchs M, Y Choen, S Moreshet. Determining transpiration from meteorological data and crop characteristics for irrigation management [J]. *Irig. Sci.* 1987, 8: 91- 99.

[5] Jagtap S S, J W Jones. Stability of crop coefficients under different climate and irrigation management practices [J]. *Irig. Sci.* 1989, 10: 231- 244.

[6] Petersen K L, S Moreshet, M Fuchs. Stomatal responses of field-grown cotton to radiation and soil moisture [J]. *Agron. J.* 1991, 83: 1059- 1065.

[7] Liu X Z, Kang S Z *et al.* Effect of shading on gas exchange of cotton leaves under conditions of different soil water contents [J]. *Pedosphere.* 2000, 10 (1): 77- 80.

[8] Cohen S, Moreshet S. Response of citrus trees to modified radiation regime in semi arid conditions [J]. *J. Exp Bot.* 1997, 48 (306): 35- 44.

[9] Philip A, Alan K. Response to short term reductions in light in soybean leaves: Effects of leaf position and drought Stress

- [J]. *J. Plant Sci.* 1998, 159 (5): 805– 811.
- [10] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章著. 土壤- 植物- 大气连续体水分传输理论及其应用 [R]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [11] Daudet, F A, Perrier, A. Etude de l' evaporation ou de la condensation a la surface d' un crop a partir du bilan energetique [J]. *Rev. Gen. Them.* 1968, 76: 353– 364.
- [12] 刘昌明, 王会肖, 等著. 土壤- 作物- 大气界面水分传输过程与节水调控 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [13] Katerji, N, Perrier, A. Modelisation de l' evapotranspiration reelle d' une parcel de luzerne: role d' une coefficient cultural [J]. *Rev. Agron.* 1983, 3 (6): 513– 521.
- [14] Perrier A, *et al.* Etude ' in situ' de l' evapotranspiration reelle d' une culture de ble [J]. *Agric. Meteorol.* 1980, 21: 295– 311.
- [15] 刘贤赵, 康绍忠, 邵明安, 等. 土壤水分与遮阴水平对棉花叶片光合特性的影响研究 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11 (3): 377– 381.

Study on computation of crop transpiration under the conditions of different light densities

LIU Xian zhao¹, KANG Shao zhong²

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China;*

2 *Northwest Agriculture Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China*)

Abstract: Based on the Penman-Monteith energy conservation, the relation between the ratio of canopy resistance to aerodynamic resistance and the ratio of introduce critical resistance to aerodynamic resistance is established. A simple method for computing crop transpiration under different light densities is attained according to climatological parameters. The theoretical analysis and example show that the method is valid and applicable in estimating crop transpiration. Daily course of crop transpiration shows that the transpiration may increase after shading regime at noon in summer.

Key words: transpiration; different light densities; Penman-Monteith formula; cotton