

文章编号: 1007-4929(2007)02-0001-03

参考作物蒸发蒸腾量的气象因子响应模型

张瑞美^{1,3}, 彭世彰^{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. 河海大学节水研究所, 江苏 南京, 210098; 3. 河海大学现代农业工程系, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于江苏省南通市 2000~2004 年的旬气象资料, 用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算了参考作物蒸发蒸腾量, 研究了参考作物蒸发蒸腾量与最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、日照时数、风速和气压等气象因素间的关系, 建立了参考作物蒸发蒸腾量的响应模型。结果表明, 参考作物蒸发蒸腾量与“温度因子”的关系最强, 其次为“湿度和日照因子”, “风速因子”也有一定的影响, “气压因子”影响作用则稍弱; 建立的气象因子响应模型模拟精度较高, 可以简化参考作物蒸发蒸腾量计算。

关键词: 参考作物蒸发蒸腾量; Penman-Monteith 公式; 因子分析; 偏最小二乘回归; 响应模型

中图分类号: S274 文献标识码: A

Response Model of Reference Evapotranspiration to Meteorologic Factors

ZHANG Rui-mei^{1, 3}, PENG Shi-zhang^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Water-saving, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Agriculture Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the ten-day meteorological data of Nantong city of Jiangsu province from 2000 to 2004, reference evapotranspiration (ET_0) was calculated by Penman-Monteith formula. Relationship between ET_0 and several factors, such as maximum air temperature, minimum air temperature, average temperature, relative humidity, hours of sunshine, wind speed, air pressure and so on, was studied by factors analysis method. The response model of reference evapotranspiration to meteorologic factors was constructed. The results indicated that the relationship between ET_0 and temperature factors was the most remarkable, followed by humidity and sunlight factors, wind speed factor and air pressure factor. The response model can be substituted for Penman-Monteith formula to calculate ET_0 briefly with high precision.

Key words: reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith formula; factors analysis; partial least squares regression; response model

通过参考作物蒸发蒸腾量间接计算作物需水量的方法是目前世界范围内应用最广泛的方法之一^[1], 关于参考作物蒸发蒸腾量, 各国学者提出了许多计算方法、理论和模型, 包括经验公式法、水汽扩散法、能量平衡法、综合法和神经网络法等几大类^[2~7], 其中 Penman-Monteith 公式(综合法)是目前 FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)专家组唯一推荐的标准计算方法^[2], 具有较高的精度和较好的通用性^[8~11], 但计算公式复杂, 需要的参数众多, 实际生产中往往难以推广。因

此选取容易获得的重要因素, 建立参考作物蒸发蒸腾量的气象因子响应模型, 简化计算方法具有较大的实际应用意义。

1 材料和方法

试验站设在南通市崇川区水利科学研究所试验基地, 处于长江口北岸, 属长江三角洲冲击平原, 地处南通市东郊 6km 的观音山镇南, 地理位置东经 120°56′、北纬 32°01′。该地区属亚热带和暖温带季风气候, 气候温和、四季分明、雨水充沛, 年平

收稿日期: 2006-10-06

基金项目: 河海大学院士学科建设基金项目(2084/4021E7)。

作者简介: 张瑞美(1980-), 女, 博士研究生。

均气温 15℃左右,年日照 2 100~2 200 h,多年平均降水量 1 079.2 mm。地下水位较高,常年地下水埋深在 0.2~2.0 m 间变化。本文基于江苏南通 2000~2004 年的旬气象资料,利用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算得到了江苏南通的旬参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 ,用因子分析法研究了 ET_0 与各气象因子的关系,并进一步用偏最小二乘回归建立了 ET_0 的气象因子响应模型。

1.1 Penman-Monteith 公式

Penman-Monteith 公式以能量平衡和水汽扩散理论为基础,既考虑了作物的生理特征,又考虑了空气动力学参数的变化,具有较充分的理论依据和较高的计算精度^[5]。公式非常复杂,需要的参数很多,计算公式如下^[1]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \lambda(1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量,mm/d; R_n 为净辐射, MJ/(m²·d); G 为土壤热通量, MJ/(m²·d); T 为平均气温,℃; u_2 为 2 m 高度处的风速, m/s; e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压, e_s 与 e_a 的差值为饱和水汽压差, kPa; Δ 为饱和水汽压—温度曲线上的斜率, kPa/℃; γ 为湿度常数, kPa/℃。

1.2 因子分析法

因子分析法(Factors analysis)是寻找对观察结果起支配作用的潜在因子(latent variable)的探索性统计分析方法,对数据进行标准化处理,消除量纲的影响,用于揭示观测变量间的内在关联性,在尽可能保存原有信息的前提下,用较少的维度表示原来的数据结构,简化数据(降维),便于发现规律或本质,但仍可以再现原始变量与“因子”之间的相关关系。假设 m 个可能存在相关关系的 z_1, z_2, \dots, z_m 含有 P 个独立的公共因子 $F_1, F_2, \dots, F_p (m \geq p)$, 每个变量 z_i 含有特殊因子 $U_i (i = 1, \dots, m)$, 诸特殊因子 U_i 互不相关,且与 $F_j (j = 1, \dots, p)$ 也互不相关,每个 z_i 可由 P 个公共因子和自身对应的特殊因子 U_i 线性组合,因子分析的一般数学模型表达为: $Z = AF + CU$ 。式中: A 称为因子载荷矩阵,其元素 a_{ij} 表示第 i 个变量(z_i) 在第 j 个公共因子 F_j 上的载荷,简称因子载荷。因子分析的目的就是以 F 代 Z , 由于一般有 $p < m$, 从而达到简化变量维数的目的。

1.3 偏最小二乘回归法

偏最小二乘回归(Partial Least Squares Regression, PLS)是 S Wold 和 C Albano 等首次提出的一种新型统计分析方法,集多元线性回归分析、典型相关分析和主成分分析的基本功能于一体,将建模预测类型的数据分析方法与非模式的数据认识性分析方法有机结合在一起。偏最小二乘回归方法吸收了主成分回归提取成分,简化数据结构的优良思想,克服了主成分回归不能辨识噪声与信息不足,从而使模型精度、稳健性、实用性都得到提高^[12~14]。设有单因变量 y 和 p 个自变量 $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$, 偏最小二乘回归分别在自变量 X 与因变量 Y 中提取成分 t_h 和 $u_h (h = 1, 2, \dots)$, 所提取的成分既能很好的概括自变量系统的信息,又能最好地解释因变量。在第一个成分 t_1 和 u_1 被提取后,实施 X 和 Y 对 t_1 的回归,如果回归方程已经达到满意的精度,则算法终止;否则,将利用 X 和 Y 被 t_1 解释后

的残余信息进行第二轮成分提取。究竟应该选取多少个成分为宜,可通过考察增加一个新的成分后,能否对模型的预测功能有明显的改进来考虑,通常用交叉有效性进行判别。记 y_i 为原始数据, $t_1 \dots t_h$ 是在偏最小二乘回归过程中提取的成分, y_{hi} 是使用全部样本点并取 $t_1 \sim t_h$ 个成分回归建模后,第 i 个样本点的拟合值, $\hat{y}_{h(-i)}$ 是在建模时删去样本点 i , 取 $t_1 \sim t_h$ 个成分建模后,再用此模型计算的 y_i 的拟合值, 记 $Q_h^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{h(-i)})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{(h-1)i})^2} \geq 0.0975$ 时,表明加入成分能改善模型质量,否则不能。

2 结果与分析

2.1 因素分析

参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 受最高气温 T_{\max} 、旬最低气温 T_{\min} 、旬平均气温 T 、旬平均湿度 RH 、日照时数 n 、风速 u 和气压 P 等诸多气象因素的共同作用,这些因素是彼此影响、互为消长。因子分析能解决变量间的相关性,通过对气象因素因子分析可以得到相关系数矩阵、规格化特征向量矩阵、特征值及所占百分率(%)和累计百分率(%)、主因子数、因子载荷矩阵和因子载荷矩阵方差。主因子的特征值累积比例临界值,一般取系统默认为 0.9, 本研究中主因子数 $M = 4$, 4 个主因子所包含的信息量占总体信息量的 94.36%(表 1), 相应得到因子载荷矩阵(表 2)。为进一步简化结构,进行方差极大旋转,系统取旋转精度为 $1e^{-7}$ 。经 5 次旋转,得到方差极大正交旋转结果(表 3), 因子载荷矩阵方差 0.545 29。

表 1 特征值及所占百分率

| 序号 | 特征值 | 百分率/% | 累计百分率/% |
|----|----------|-----------|------------|
| 1 | 3.517 44 | 50.249 07 | 50.249 07 |
| 2 | 1.560 22 | 22.288 81 | 72.537 88 |
| 3 | 0.941 68 | 13.45 255 | 85.990 43 |
| 4 | 0.585 83 | 8.368 940 | 94.359 37 |
| 5 | 0.379 46 | 5.420 820 | 99.780 18 |
| 6 | 0.014 39 | 0.205 560 | 99.985 74 |
| 7 | 0.001 00 | 0.014 260 | 100.000 00 |

表 2 因子载荷矩阵

| | 因子 1 | 因子 2 | 因子 3 | 因子 4 | 共同度 | 特殊方差 |
|--------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| $x(1)$ | 0.979 17 | 0.005 06 | -0.059 13 | 0.142 03 | 0.982 46 | 0.017 54 |
| $x(2)$ | 0.969 95 | 0.157 55 | -0.067 64 | 0.125 26 | 0.985 90 | 0.014 10 |
| $x(3)$ | 0.980 20 | 0.080 87 | -0.068 20 | 0.136 16 | 0.990 52 | 0.009 48 |
| $x(4)$ | 0.097 93 | 0.879 42 | -0.213 33 | 0.055 14 | 0.831 52 | 0.168 48 |
| $x(5)$ | 0.396 58 | -0.761 10 | 0.217 96 | 0.203 52 | 0.825 48 | 0.174 52 |
| $x(6)$ | 0.013 35 | 0.417 97 | 0.899 99 | 0.116 04 | 0.998 32 | 0.001 68 |
| $x(7)$ | -0.700 02 | 0.038 44 | -0.161 13 | 0.688 11 | 0.990 96 | 0.009 04 |
| 特征值 | 3.517 44 | 1.560 22 | 0.941 68 | 0.585 83 | | |
| 累计贡献 | 0.502 49 | 0.725 38 | 0.859 90 | 0.943 59 | | |

表3 方差极大正交旋转结果

| | 因子1 | 因子2 | 因子3 | 因子4 |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $x(1)$ | 0.964 69 | -0.101 17 | -0.015 94 | -0.203 36 |
| $x(2)$ | 0.969 03 | 0.047 12 | 0.024 55 | -0.209 90 |
| $x(3)$ | 0.973 43 | -0.026 84 | 0.000 17 | -0.205 53 |
| $x(4)$ | 0.234 31 | 0.871 44 | 0.107 23 | 0.075 63 |
| $x(5)$ | 0.324 16 | -0.848 59 | -0.014 97 | -0.008 26 |
| $x(6)$ | -0.002 76 | 0.091 34 | 0.994 50 | -0.030 57 |
| $x(7)$ | -0.400 47 | 0.076 85 | -0.039 06 | 0.907 28 |
| 方差贡献 | 3.137 56 | 1.506 93 | 1.003 13 | 0.957 53 |
| 累计贡献 | 0.448 22 | 0.663 50 | 0.806 80 | 0.943 59 |

观察因子载荷矩阵同一因子上不同载荷的变量进行排序,第一主因子主要由 T_{max} 、 T_{min} 和 T 决定,所反映的信息量占总信息量的 44.82%,可以归为“温度因子”,由变量共同度知,4个主因子对温度因子的依赖性最强。参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 与温度因子正相关,随温度的升高而升高。第二主因子主要由 RH 和 n 决定,所反映的信息量为 21.53%,可以归为“湿度和日照因子”, ET_0 与湿度负相关,而与日照因子正相关。第三主因子由 u 决定,所反映的信息量为 14.33%,可以归为“风速因子”, ET_0 随风速的增加而增加。第四主因子由 P 决定,所反映的信息量为 13.68%,可以归为“气压因子”, ET_0 随气压的增加而降低。

2.2 模型建立

考虑到有些实验站没有最高温度计和最低温度计,只选用容易获得的平均气温 T 、平均湿度 RH 、日照时数 n 、风速 u 和气压 P ,进行偏最小二乘回归,建立参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 的气象因素响应模型。

提取成分通过交叉有效性检查来控制,以 $Q_i^2 \geq 0.0975$ 作为是否显著的标志。在引用第二个成分时,算得 $Q_2^2 = 0.0058$ 不满足要求,表明加入第二个成分不能改善模型质量,所以只需采用 t_1 进行偏最小二乘回归,建立 ET_0 在各因素上的回归方程为: $ET_0 = 28.523114 + 0.067836 T - 0.008181 RH + 0.187869 n + 0.185637 u - 0.276456 P$,决定系数 $R^2 = 0.95$,南通旬 ET_0 拟合值与 P-M 计算值对比图见图 1。

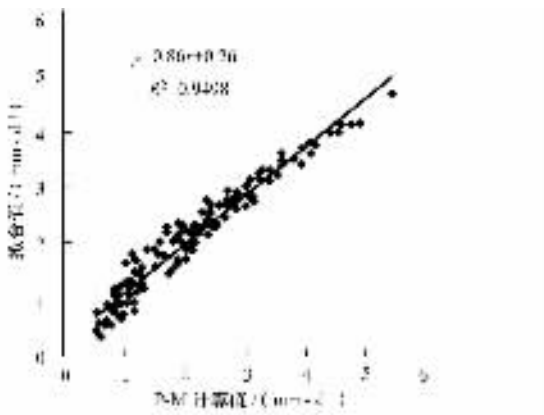


图1 ET_0 拟合值与 P-M 计算值对比图(南通,2000~2004 年)

采用江苏射阳 2001 年的日气象资料,对建立的参考作物蒸发蒸腾量气象因子响应模型进行验证,射阳日 ET_0 模拟值与 P-M 计算值对比散点图见图 2,模型模拟值与 P-M 计算值间相关系数 $R^2 = 0.84$,模拟结果较为满意。

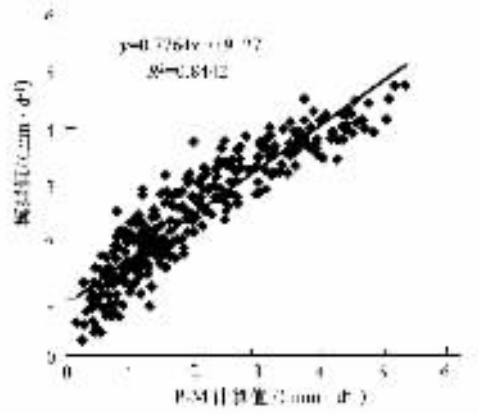


图2 ET_0 模拟值与 P-M 计算值对比图(射阳,2001)

3 结语

(1)对影响参考作物蒸发蒸腾量的气象因素进行因子分析,“温度因子”对 ET_0 的影响作用最为显著,“湿度和日照因子”的影响作用其次,“风速因子”对 ET_0 也有一定的影响,“气压因子”对 ET_0 影响较弱。

(2)参考作物蒸发蒸腾量与温度、日照和风速呈现正相关,与相对湿度和气压负相关。

(3)用偏最小二乘回归建立了参考作物蒸发蒸腾量的气象因子响应模型,拟合效果满意,可以用该模型做简化替代计算,具有实际应用意义。

参考文献:

- [1] 刘 钰, L S Pereira. 气象数据缺测条件下参照蒸发量的计算方法[J]. 水利学报, 2001, 11(3): 11-17.
- [2] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirement [M]. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [3] S Irmak, R G. Allen, E B Whitty. Daily Grass and Alfalfa-Reference Evapotranspiration estimates and Alfalfa-to-Grass Evapotranspiration Ratios in Florida[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 129(5): 360-370.
- [4] 杜尧东, 刘作新, 张运福. 参考作物蒸散量及其计算方法[J]. 河南农业大学学报, 2001, 35(1): 57-61.
- [5] 刘晓英, 林而达, 刘培军. Priestley-Taylor 与 Penman 法计算参照作物蒸发量的结果比较[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 32-36.
- [6] 霍再林, 史海滨, 陈亚新, 等. 参考作物潜在蒸散量的人工神经网络模型研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 40-43.
- [7] Raghuwanshi N S, Wallender, W W. Forecasting daily evapotranspiration for a grass reference crop[J]. International Agricultural Engineering 2000, 9(1): 1-16.

表3 模拟方案及结果

| 模拟方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 灌溉次数/次 | 20 | 10 | 7 | 5 | 4 | 3 |
| 灌溉强度/mm | 15 | 30 | 43 | 60 | 75 | 100 |
| 灌溉总量/mm | 300 | 300 | 301 | 300 | 300 | 300 |
| 根系吸水量/mm | 148.05 | 163.41 | 167.94 | 166.98 | 161.31 | 150.27 |
| 蒸发量/mm | 199.16 | 171.92 | 158.68 | 138.74 | 119.50 | 93.37 |
| 渗漏量/mm | -12.13 | -7.35 | 5.17 | 35.68 | 61.70 | 93.68 |
| 土壤水变化量/mm | -35.07 | -27.98 | -30.79 | -41.40 | -42.51 | -37.32 |
| 作物吸收率 | 0.493 502 | 0.544 687 | 0.557 941 | 0.556 589 | 0.537 686 | 0.500 911 |

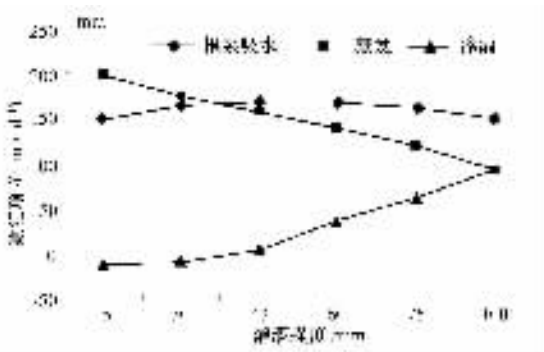


图1 源汇项与灌溉强度关系

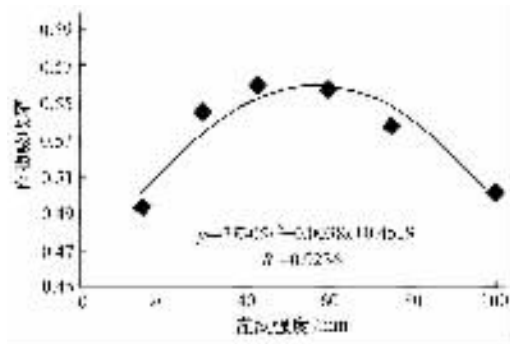


图2 作物吸收率与灌溉强度关系

从图1可见,在总灌溉量一定时,随每次灌溉强度的增加,蒸发量在逐渐减小,而渗漏量在逐渐增大。根系吸水量变化较小,总体上随灌溉强度的增加,其值先增大后减小,在灌溉强度

为50 mm左右达到最大值。可见,灌溉强度的大小直接影响着蒸发、渗漏和根系吸水量。

在灌溉强度小于43 mm时,渗漏量都是很小的(负值表示下边界为补给边界)。但蒸发量很大,若采取一些有效的蓄水保墒措施来减少蒸发量,低强度高频率灌溉将非常有利于根系吸水。

从图2可见,灌溉强度的大小对作物吸收率影响十分显著,即合理的制定灌溉强度可有效节约灌溉水量。一般经验灌溉强度多为0.9万t/hm²,相当于90 mm。根据模拟结果这样的灌溉强度偏大,应调整为0.525万t/hm²可以使作物吸收率最大。另一方面也说明,在其他条件一定的情况下,可以用作物吸收率作为制定灌溉强度的指标之一。

参考文献:

- [1] 裴冬,张喜英,陈素英,等.局部灌水方式对冬小麦产量与水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2004,22(4):60-64.
- [2] Nunzio Romano, Bruno Brunone, Alessandro Santini, 1998. Numerical analysis of one-dimensional unsaturated flow in layered soils[J]. Advances in water resources, 21:315-324.
- [3] Lai, C.-T., Katul, G., 2000. The dynamic role of root-water uptake in coupling potential to actual transpiration[J]. Advances in water resources, 23:427-439.
- [4] R. H. Brooks and A. T. Corey. Hydraulic properties of porous media[J]. Hydrol. Pap. 3, Colorado State University, Fort Collins, CO(1964).
- [5] 白文明,左强,黄元仿,等.乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究[J].植物生态学报,2001,25(1):35-41.
- [6] ches as reference—evapotranspiration inputs for modeling maize water—use under Mediterranean conditions a[J]. Agricultural Water Management, 2004, 66(3):205-219.
- [7] 彭世彰,徐俊增.参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J].灌溉排水学报,2004,23(6):5-9.
- [8] 邓念武,徐晖.单因变量的偏最小二乘回归模型及其应用[J].武汉大学学报(工学版),2001,34(2):14-16.
- [9] 付强.基于偏最小二乘回归的水稻腾发量建模[J].农业工程学报,2002,18(6):9-12.
- [10] 李林,付强.偏最小二乘回归模型的城市水资源承载能力研究[J].水科学进展,2005,16(6):822-825.
- [8] Nandagiri, Lakshman, Kovoov, Gicy M. Sensitivity of the food and agriculture organization Penman—Monteith evapotranspiration estimates to alternative procedures for estimation of parameters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(3): 238-248.
- [9] Temesgen, Bekele, Eching, Simon, Davidoff, Baryohay et al. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1):73-84.
- [10] Utset, Angel, Farre, Imma, Martinez—Cob, Antonio et al. Comparing Penman—Monteith and Priestley—Taylor approa-

(上接第3页)