

不同 e_a 计算方法对 Penman-Monteith 公式的影响

张瑞美^{1 2} 彭世彰^{1 2} 徐俊增^{1 2} 丁加丽^{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)

摘要 实际水汽压 e_a 是 Penman-Monteith 公式中计算参考作物蒸发蒸腾量的重要过程参数. 为了研究在湿度缺测条件下,露点温度法替代相对湿度法计算 e_a 在我国长江三角洲地区的适用性,选用江苏南通 2000~2004 年的旬气象资料,采用 FAO 推荐的相对湿度法和露点温度法两种方法计算了实际水汽压 e_a 和旬参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 ,分析了这两种方法计算结果的误差及其与影响因素间的关系. 结果表明:这两种方法计算结果间误差较小,有 98% 以上的计算结果其误差小于 20%;实际水汽压间的误差差异与最高最低温差相关关系最强,旬参考作物蒸发蒸腾量间的误差差异与最低温度的相关性最强;在湿度缺测条件下,可以采用露点温度法替代相对湿度法计算 e_a 并进一步计算 ET_0 .
关键词 Penman-Monteith 公式;实际水汽压;参考作物蒸发蒸腾量;露点温度;相对湿度
中图分类号 S274 **文献标识码** A **文章编号** :1000-1980(2006)06-0660-04

Penman-Monteith 公式是由联合国粮农组织 FAO 推荐的参考作物蒸发蒸腾量计算公式^[1],具有较高的精度和较好的通用性,许多学者在世界不同地区对该公式进行了验证^[2-7]. 用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量时需要 4 项气象要素:气温、湿度、风速、太阳辐射或日照^[8]. 其中当一些气象因素缺测时,FAO 也推荐了相应的替代计算方法^[1]. 但是,对于这种替代计算的精度检验问题,探讨验证较少. 本文基于江苏省南通 2000~2004 年的旬气象资料,采用 FAO 推荐的相对湿度法和露点温度法两种方法计算了实际水汽压 e_a 和参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 ,并对计算结果进行了检验和评价,验证了在湿度缺测条件下,露点温度法替代相对湿度法计算 e_a 和 ET_0 在我国长江三角洲地区的适用性.

1 模型及参数

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]. 该公式非常复杂,需要的参数很多. 计算公式如下^[1]:

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

(1)

式中: ET_0 ——参考作物蒸发蒸腾量,mm/d; R_n ——净辐射,MJ/($m^2 \cdot d$); G ——土壤热通量,MJ/($m^{-2} \cdot d^{-1}$); T ——平均气温, $^{\circ}C$; u_2 ——2m 高度处的风速,m/s; e_s 、 e_a ——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 ——饱和水汽压-温度曲线的斜率,kPa/ $^{\circ}C$; γ ——湿度计常数,kPa/ $^{\circ}C$.

式(1)中实际水汽压 e_a 采用式(2)计算,记为 e_{aRH} . 在相对湿度资料缺失的条件下,可以采用露点温度计算实际水汽压 e_a ,如式(3)所示,记为 e_{adew} .

$$e_a = e_{aRH} = \frac{RH_{mean}}{100} \frac{e(T_{max}) + e(T_{min})}{2}$$

(2)

$$e_a = e_{adew} = e(T_{dew}) = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right)$$

(3)

其中

$$e(T_{\max}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T_{\max}}{T_{\max} + 237.3}\right) \tag{4}$$

$$e(T_{\min}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right) \tag{5}$$

2 计算结果与分析

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,属长江三角洲冲积平原,地处南通市东郊 6 km 的观音山镇南,地理位置为东经 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,分别利用 FAO 推荐的相对湿度法和露点温度法计算了实际水汽压 e_a ,在此基础上进一步用 Penman-Monteith 公式计算了江苏南通的旬参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 ,并对 e_a 和 ET_0 进行了比较和分析。

2.1 实际水汽压 e_a 计算

采用相对湿度法和露点温度法这两种方法计算实际水汽压(以下分别简称为 e_{aRH} 和 e_{adew}),计算结果如图 1 所示,虽然 e_{adew} 和 e_{aRH} 值总体趋势相差并不是很大,但除个别点外大体上还是 e_{aRH} 比 e_{adew} 值稍大。
 e_{adew} 和 e_{aRH} 两者之间的关系如图 2 所示,可以用 $e_{adew} = 0.9894 e_{aRH} - 0.0509$ ($R^2 = 0.9948$)表示,与 $y = x$ 的 45°斜线吻合较好,且随着实际水汽压计算数值的增大,数据点更加贴近 $y = x$ 的 45°线,误差越小。对两种方法算得的 e_a 进行 F 检验, $P(F \leq f)$ 单尾值为 0.42 大于 0.05,认为方差相等。再进行 t -检验双样本等方差假设, $P(T \leq t)$ 单尾值为 0.26 大于 0.05,认为两种方法得到的结果差异不显著。在相对湿度数据缺失的条件下,可以考虑用露点温度代替相对湿度计算实际水汽压。

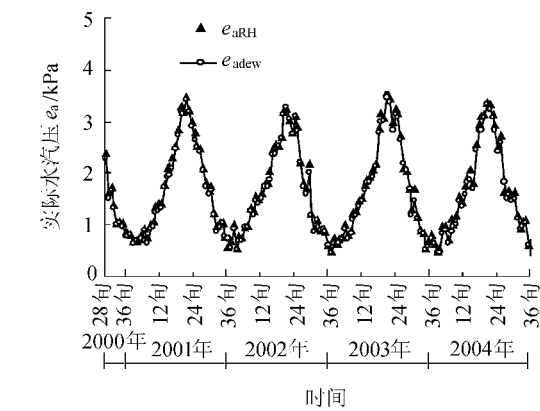


图 1 两种方法计算的 e_a 结果对比
Fig.1 Comparison of
calculated results e_a by two methods

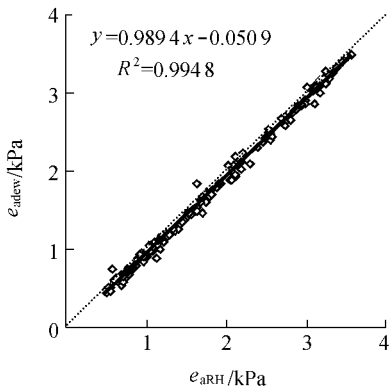


图 2 两种方法计算得到的 e_a 间相关关系
Fig.2 Correlation between
calculated results e_a by two methods

2.2 参考作物蒸发蒸腾量计算

采用相对湿度和露点温度两种方法计算得到的参考作物蒸发蒸腾量(以下分别简称为 ET_{ORH} 和 ET_{OdeW}),计算结果如图 3 所示。由图 3 可知,虽然 ET_{ORH} 和 ET_{OdeW} 值相差并不是很大,但除个别点外大部分点 ET_{ORH} 比 ET_{OdeW} 值稍小。分析 ET_{ORH} 和 ET_{OdeW} 两者之间的关系(图 4)可以用 $ET_{OdeW} = 0.9977 ET_{ORH} + 0.0848$ ($R^2 = 0.9973$)表示,与 $y = x$ 的 45°斜线吻合较好,且随着 ET_0 计算数值的增大,数据点更加贴近 $y = x$ 的 45°线,误差越小。对两种方法最终算得的 ET_0 进行 F 检验, $P(F \leq f)$ 单尾值为 0.46 大于 0.05,认为方差相等。再进行 t -检验双样本等方差假设, $P(T \leq t)$ 单尾值为 0.32 大于 0.05,认为两种方法得到的结果差异不显著。因此,在相对湿度缺测条件下,可以考虑用露点温度法代替相对湿度法计算参考作物蒸发蒸腾量。

2.3 误差分析

由上述两种方法计算得到的实际水汽压 e_a 和参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 误差分析见表 1。
两种方法算得的实际水汽压和参考作物蒸发蒸腾量之间的相对误差的绝对值都较小(图 5),误差小于

20%的计算结果合格率都能达到98%以上,只是在2001年12月下旬、2002年1月中旬和2004年3月中旬3个数据点误差较大.其原因可能是相对湿度较大、温度较低所致,此种条件下作物蒸发蒸腾量较低.对两种方法计算的实际水汽压和参考作物蒸发蒸腾量的误差进行相关性分析可知,两种方法算得的实际水汽压的误差与最高最低温差的相关关系最强,其次为相对湿度,参考作物蒸发蒸腾量之间的误差与最低温度的相关性最强,平均温度次之,而与相对湿度的相关性最弱.对比图13和5发现,在年中 e_a 和 ET_0 出现峰值,而两种方法测得的 e_a 和 ET_0 的差异值都出现谷值,年末 e_a 和 ET_0 出现谷值,而两种方法测得的 e_a 和 ET_0 的差异值都出现峰值.

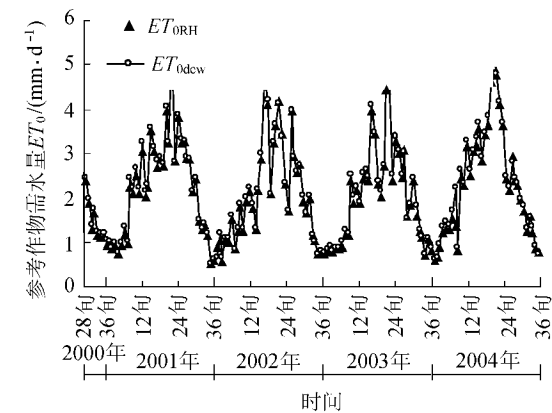


图3 两种方法计算的 ET_0 结果对比

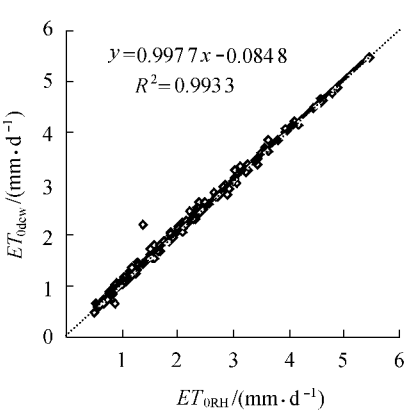


图4 两种方法计算得到的 ET_0 间相关关系

Fig.3 Comparison of calculated results ET_0 by two methods Fig.4 Correlation between calculated results ET_0 by two methods

表1 用两种方法计算得到的 e_a 和 ET_0 误差分析

e_a								
最大绝对误差/ kPa	最大相对误差/ %	最小绝对误差/ kPa	最小相对误差/ %	平均绝对误差/ kPa	平均相对误差/ %	合格天数/ d	不合格天数/d	合格率/%
0.2568	26.46	0.0011	0.17	0.0770	5.44	150	3	98.69

ET_0								
最大绝对误差/ (mm·d ⁻¹)	最大相对误差/ %	最小绝对误差/ (mm·d ⁻¹)	最小相对误差/ %	平均绝对误差/ (mm·d ⁻¹)	平均相对误差/ %	合格天数/ d	不合格天数/d	合格率/%
0.8584	62.82	0.0011	0.02	0.0870	5.43	150	3	98.04

由于两种方法计算得到的 e_a 和 ET_0 间误差都较小,因此在相对湿度缺失的情况下,可以考虑用露点温度代替相对湿度得到 e_a 和 ET_0 .

3 结 论

- a. 用相对湿度法和露点温度法计算 e_a 和 ET_0 ,经过F检验和t检验,结果表明两种方法算得的 e_{aRH} 、 e_{adew} 和 ET_{0RH} 、 ET_{0dew} 间均无显著差异.在相对湿度缺测的条件下,可以考虑用露点温度法代替相对湿度法计算 e_a 和 ET_0 .
- b. 对比分析 e_{aRH} 、 e_{adew} 和 ET_{0RH} 、 ET_{0dew} ,虽差异不显著,但仍有 e_{aRH} 比 e_{adew} 值稍大、 ET_{0RH} 比 ET_{0dew} 值稍小的大体趋势.通过分析 e_{adew} 与 e_{aRH} 之间的误差和 ET_{0RH} 与 ET_{0dew} 之间的误差,可知绝对误差和相对误差值都较小,误差小于20%的计算结果合格率均能达到98%以上.

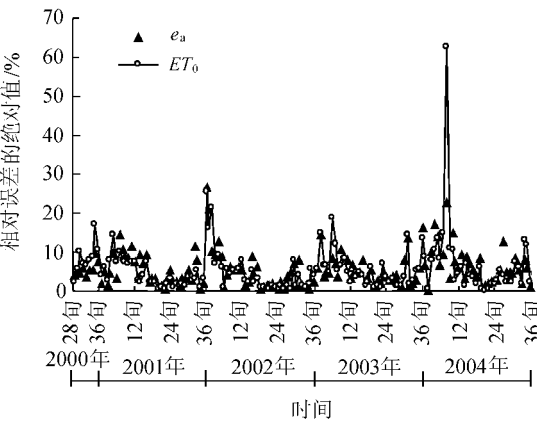


图5 误差分析对比
Fig.5 Comparative analysis of errors

c. 当年中 e_a 和 ET_0 出现峰值时,两种方法算得的 e_a 和 ET_0 误差出现谷值;而当年末 e_a 和 ET_0 出现谷值时,两种方法算得的 e_a 和 ET_0 误差出现峰值。

d. 采用相对湿度法和露点温度法这两种方法计算得到的实际水汽压的误差与最高最低温差相关关系最强,其次为相对湿度,得到的参考作物蒸发蒸腾量间的误差与最低温度的相关性最强,平均温度次之,而与相对湿度相关性最弱。

上述结果表明,在湿度缺测条件下,在长江三角洲地区采用露点温度法替代相对湿度法计算 e_a 和 ET_0 是适用的。

参考文献：

[1] 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.

[2] UTSET A, FARRE I, MARTINEZ-COB A, et al. Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions[J]. Agricultural Water Management ,2004 ,66(3) : 205-219.

[3] NANDAGIRI L, KOVOOR G 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.

[4] TEMESGEN B, ECHING S, DAVIDOFF B, et al. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ,2005 ,131(1) :73-84.

[5] 刘钰, PEREIRA L S, TEIXIRA J L. 参照蒸发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报 ,1997(6) 27-33.

[6] 杜尧东, 刘作新, 张运福. 参考作物蒸散计算方法及其评价[J]. 河南农业大学学报 ,2000 ,35(1) 57-31.

[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] 刘钰, PEREIRA L S. 气象数据缺测条件下参考蒸发量的计算方法[J]. 水利学报 ,2001(3) :11-17.

**Influence of e_a on calculation of reference
crop evapotranspiration with Penman-Monteith formula**

ZHANG Rui-mei^{1, 2}, PENG Shi-zhang^{1, 2}, XU Jun-zeng^{1, 2}, DING Jia-li^{1, 2}
(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China ;*
2. *Institute of Water-Saving Irrigation , Hohai University , Nanjing 210098 , China)*

Abstract :The actual water vapor pressure e_a is an important parameter to determine reference crop evapotranspiration ET_0 by Penman-Monteith formula. Generally , e_a is derived from relative humidity. The study was performed to investigate the applicability of the dewpoint temperature method replacing relative humidity for calculating e_a in the absence of humidity data in the Yangtze River Delta of China. With the ten-day meteorological data of Nantong City in Jiangsu Province from 2000 to 2004 , e_a was derived from relative humidity and dewpoint temperature recommended by FAO , and ET_0 was determined by Penman-Monteith formula. The analysis of the difference between the calculated results of the two methods and its relationship with the meteorological factors shows that the difference between the two calculated results is small , and the rate with the difference less than 20% is over 98% . It is also concluded that the difference of e_a between the two methods is the most highly correlative with the difference between the highest and lowest temperatures , and that the difference of ET_0 is the most highly correlative with the lowest temperature. As a result , dewpoint temperature can replace relative humidity for calculating e_a and ET_0 in the absence of humidity data.

Key words :Penman-Monteith formula ; actual water vapor pressure ; reference crop evapotranspiration ; dewpoint temperature ; relative humidity