

网络出版时间:2014-12-12 09:30 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.01.009
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20141212.0930.009.html

气象资料缺测时 Penman-Monteith 温室修正式的应用

潘永安^{1,3}, 范兴科^{1,2}

(1 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2 西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;
3 中国科学院大学, 北京 100049)

[摘要] 【目的】Penman-Monteith 公式(P-M 公式)是目前计算大田作物蒸腾蒸发量(ET_c)的主要方法,利用该方法可预测未来短期内作物水分亏缺状况,但由于温室与大田之间的环境条件存在显著差异且温室气象数据往往不全,故需要研究提高温室作物水分状况预测精确度的途径。【方法】利用温室番茄主要生育期气象环境信息和土壤水分实测数据,对基于水量平衡原理和 P-M 温室修正式计算出的 ET_c 结果进行了对比,研究分析了 P-M 温室修正式的可靠性与气象资料缺测时 P-M 温室修正式的应用方法,同时对温室气象数据缺测时运用 P-M 温室修正式计算参考作物蒸腾蒸发量(ET_0)的精度进行了分析。【结果】基于 P-M 温室修正式计算出的 ET_c 与水量平衡法计算出的 ET_c 结果较吻合,相对误差均小于 10%。当气象资料缺测时,基于 FAO 推荐的几种计算方法,运用 P-M 温室修正式计算的 ET_0 相对误差如下:由日照时数(n)估算太阳净辐射(R_n)进而求得 ET_0 的方法相对误差为 17.35%;由气温(T)估算 R_n 进而求得 ET_0 的方法相对误差为 41.69%;由最低气温(T_{\min})代替相对湿度(RH)计算实际水汽压(e_a)进而求得 ET_0 的方法相对误差为 19.09%;分别由 n 估算 R_n ,由 T_{\min} 计算 e_a 进而求得 ET_0 的方法相对误差为 36.31%; R_n 与 e_a 均由 T 估算进而求得 ET_0 的方法相对误差为 61.23%。【结论】利用 P-M 温室修正式可以较好地预测温室作物的水分状况,当修正式的参数 R_n 缺测时可以用 n 计算 R_n ;当参数 RH 缺测时,可以用 T_{\min} 代替 RH 计算 e_a 。

[关键词] Penman-Monteith 温室修正式;气象资料缺测;FAO

[中图分类号] S625

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2015)01-0117-08

Application of modified Penman-Monteith in greenhouse with limited weather data

PAN Yong-an^{1,3}, FAN Xing-ke^{1,2}

(1 Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China (IWSA), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】Penman-Monteith equation is the main method to calculate the evapotranspiration (ET_c) of field crops, which can be used to predict short-term water status in future. However, due to the differences in water and heat movement patterns between greenhouses and fields and limited weather data, it is necessary to improve the accuracy for predicting the water status of greenhouse crops. 【Method】Using meteorological and soil moisture data in the main growth period of tomato in greenhouse, the modified Penman-Monteith equation and the principle of water balance were compared for ET_c calculation, and

[收稿日期] 2013-09-22

[基金项目] 国家“863”高技术研究发展计划项目(2011AA100509)

[作者简介] 潘永安(1989-),男,陕西咸阳人,在读硕士,主要从事节水灌溉新技术研究。E-mail:xiyuelvyou@126.com

[通信作者] 范兴科(1964-),男,陕西岐山人,研究员,主要从事节水灌溉新技术和灌溉产品开发研究。
E-mail:gjzfxk@vip.sina.com

the accuracy of the modified Penman-Monteith equation to calculate evapotranspiration of reference crop (ET_0) in greenhouse with limited weather data was analyzed. 【Result】 The modified Penman-Monteith equation had high accuracy to calculate ET_0 with mean relative error (MRE) of less than 10%. Based on FAO recommended methods, the modified Penman-Monteith equation calculated ET_0 had different errors with limited weather data. The method using sunshine duration (n) to calculate net solar radiation (R_n) had MRE of 17.35%. The method using temperature (T) to calculate R_n had MRE of 41.69%. The method using lowest temperature (T_{\min}) to calculate actual water vapor pressure (e_a) had the MRE of 19.09%. The method using n and T_{\min} to calculate R_n and e_a had the MRE of 36.31%. The method using T to calculate both R_n and e_a had the MRE of 61.23%. 【Conclusion】 The modified Penman-Monteith equation can be used to predict future short-term water status of crops in greenhouse. R_n can be calculated with n and e_a can be calculated with T_{\min} when RH is missing.

Key words: the modified Penman-Monteith equation in greenhouse; limited weather data; FAO

Penman-Monteith 公式(P-M 公式)是目前计算作物蒸腾蒸发量的主要方法,由于它结合了空气动力学和水量平衡原理,具有较好的物理依据,计算精度较高^[1-3]。当 P-M 公式所需的环境参数缺测时,FAO 给出了几种相应的计算方法^[4],刘钰等^[5]利用河北雄县、望都 2 个气象站的数据对这些方法进行了检验与评价,分析了这些方法的适用性。在日光温室中,由于小气候环境与露天环境下的水热运移模式有很大的不同,王健等^[6]对 P-M 公式进行了修正,提出了适合于温室作物的 Penman-Monteith 温室修正式(P-M 温室修正式)。那么,当气象资料缺测时,FAO 推荐的计算方法是否适用于 P-M 温室修正式还有待验证。为此,本研究利用温室番茄栽培试验的观测数据对 P-M 温室修正式计算结果进行分析,以期对 P-M 公式在温室条件下的应用与推广提供参考依据。

1 温室环境因素特征与 P-M 温室修正式

1.1 温室环境因素特征

温室是一种人工控制条件下进行作物生产的小气候室,其环境条件与室外自然环境条件有很大差异,主要表现在以下几个方面。

(1)温室内温度明显高于室外温度。温室是一种可以透光的半密封空间,具有较好的保温性,通常室内温度要高于室外,尤其在室外温度较低的冬、春季节和夜间及早晨,部分温室内设增温设备,室内外温差可达 20℃^[7]。所以即使在寒冷的冬季,温室内温度也很少出现低于 0℃的情况。温室的温度可以通过覆盖草帘或通风来调节,是温室栽培中相对容易调节控制的因子。

(2)日光辐射低于室外。太阳光照是日光温室的热量来源,也是绿色植物光合作用的能量来源。温室内的光照环境由于受温室方位、结构类型、覆盖材料等多种因素的影响,使日光温室内透光率低,光照不足,光照强度略低于室外^[8];日照时数受覆盖的保温被、草帘揭盖时间的直接影响,一般比露地要短。

(3)温室湿度显著高于室外自然环境。由于温室是封闭环境,室内空气湿度主要受土壤水分蒸发和植物体内水分蒸腾的影响。高湿是温室环境的突出特点,特别是夜间随着气温的下降,温室内相对湿度逐渐增大,往往能达到饱和状态。在温室通风进行温湿度调节的时段,温室内相对湿度日变化趋势与露地基本一致。空气相对湿度在 P-M 公式中用于计算实际水汽压进而计算水汽压差。罗卫红等^[9]的研究认为,温室作物蒸腾速率日变化主要取决于太阳辐射的日变化,与水汽压差(VPD)的日变化关系不大。

(4)空气对流较弱。温室是一个闭合体,只有顶窗或侧窗可通风,一般在气温达到 30℃以上时,利用顶窗通风排湿,当气温低于 25℃时,顶窗是关闭的,室内气流量很小,空气流动性差,在温室无强制通风时,风速接近为零。对于日光温室,通常能够调节的环境气象因子只有温度和湿度,绝大部分日光温室在实际管理中,主要的观测数据也只有气温和相对湿度,缺测其他气象数据。

综上所述,由于温室与大田环境特征的显著不同,P-M 公式不宜直接应用于温室环境条件下的作物水分状况预测和预报。

1.2 P-M 温室修正式

利用 P-M 公式计算参考作物蒸腾蒸发量的方程如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)} + \frac{\gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸腾蒸发量 (mm/d), Δ 为饱和水汽压随温度变化的斜率 (kPa/°C), R_n 为地表净辐射 (MJ/(m² · d)), G 为土壤热通量 (MJ/(m² · d)), γ 为干湿表常数 (kPa/°C), T 为日平均气温 (°C), μ_2 为 2 m 高处日平均风速 (m/s), e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa)。

方程 (1) 由两部分组成, 前一部分为辐射项 (ET_{rad}), 后一部分为空气动力学项 (ET_{aero})。

如 1.1 节分析, 温室在无强制通风条件下, 风速 μ_2 接近为 0, 故公式 (1) 可简化为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \quad (2)$$

即空气动力学项 (ET_{aero}) 为零, 这显然违背了水汽扩散理论^[10-11]。为此, 王健等^[6]对公式 (1) 中与风速有关的空气动力学项进行修正, 推导出适于温室大棚的 P-M 温室修正式:

$$ET_c(\text{温室}) = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{1.713(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + 1.64\gamma} \quad (3)$$

2 试验概况与 P-M 温室修正式验证

2.1 试验概况

试验在陕西杨凌节水示范园日光温室内进行。试验区年平均气温 13.0~13.4 °C, 无霜期 221 d, 年日照时数 2 300~2 900 h。试验地土壤类型为砂壤土, 土壤容重 1.25 g/cm³, 田间持水量 23.22%。栽植作物为番茄, 品种为“金鹏十号”, 幼苗于 2013-02-28 移栽到温室大棚中, 采用宽窄行覆膜一垄双行种植, 株距 33 cm, 行距 40 cm。作物生育期划分为: 02-28-04-08 为幼苗期, 04-09-05-20 为开花坐果期, 05-21-06-28 为盛果期。全生育期灌水计划湿润层为 40 cm, 灌水方式为膜下滴灌, 灌水量通过数字水表计量, 在灌水前后用取土烘干法测算土壤水分变化情况, 用 HOBO 自动气象站进行气温、相对湿度、日照、太阳辐射等气象参数的观测。

2.2 P-M 温室修正式验证

P-M 公式是通过计算参考作物蒸腾蒸发量 (ET_0), 再与作物系数 (K_c) 相乘, 得到实际作物蒸腾蒸发量 (ET_c) 的, 即:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (4)$$

K_c 可选用 FAO 推荐的分段单值平均作物系数法计算^[12]。本试验计算出的番茄开花坐果期和盛果期作物系数分别为: $K_{c\text{mid}} = 1.09, K_{c\text{end}} = 0.72$ 。

为了验证 P-M 温室修正式计算 ET_c 的可靠性, 本文选用水量平衡法对其进行对比分析。根据水量平衡原理, 有:

$$I + P + G = ET_c + D + R - \Delta SW \quad (5)$$

式中: I 为时段内的灌水量, P 为时段内的降水量, G 为时段内地下水的补给量, ET_c 为时段内作物的蒸腾蒸发量, D 为时段内深层渗漏量, R 为时段内测定区域的地面径流量, ΔSW 为土壤储水量的变化量。本试验在温室进行, 无降水; 当地地下水深度为 4~5 m, 其补给量可忽略不计; 采用滴灌灌水方式, 每次灌水量较小 (计划湿润层为 40 cm), 基本不产生深层渗漏, 故式 (5) 可转化为:

$$ET_c = I + \Delta SW \quad (6)$$

结合式 (3) 与式 (4) 计算出番茄 04-21-05-20 (开花结果期) 和 05-21-06-20 (盛果期) 的累积蒸腾蒸发量分别为 131.29, 100.40 mm; 而采用式 (6) 计算出的番茄 04-21-05-20 与 05-21-06-20 的累积蒸腾蒸发量分别为 119.43, 108.52 mm, 结果见图 1。

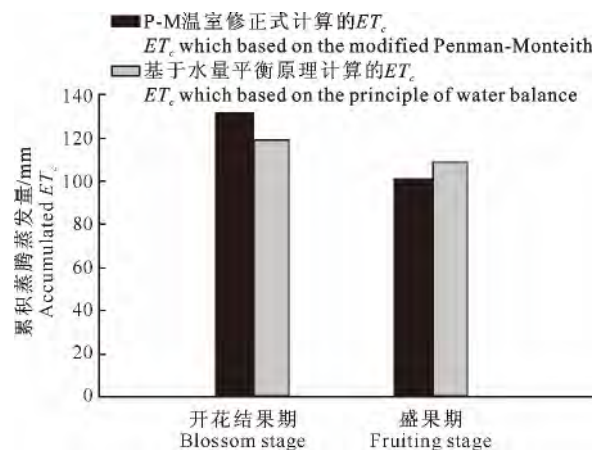


图 1 P-M 温室修正式与水量平衡法计算所得番茄不同生育期作物蒸腾蒸发量 (ET_c) 的对比

Fig. 1 Comparison of accumulated evapotranspiration (ET_c) of tomato in different growth periods between the modified Penman-Monteith equation and the principle of water balance

如图 1 所示, 可以看出 2 种方法计算结果有较好的一致性。同时计算出 2 个阶段相对误差分别为 9.9% 和 7.5%, 均小于 10%, 说明 P-M 温室修正式的计算结果与实测值较吻合, 精确度较高。这一结果与前人研究结果相吻合^[1,6,13], 可见 P-M 温室修正式用来计算温室作物需水量是可行的。

3 P-M 公式所需气象数据缺测时 FAO 推荐的计算方法

3.1 净辐射缺测

太阳净辐射(R_n)是对 ET_0 影响最大的因子^[5], 如果 R_n 缺测, 采用下面的公式进行计算:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right) \quad (7)$$

式中: α 表示日照返照率(取值 0.23), σ 为波兹曼常数, R_s 表示太阳短波辐射, $T_{\max,k}$ 、 $T_{\min,k}$ 分别表示开尔文制的最高、最低温度, e_a 为实际水汽压, R_s/R_{s0} 表示相对短波辐射。

由式(7)可知, R_n 的计算取决于太阳短波辐射(R_s), FAO 给出了 2 种计算 R_s 的方法:

1) 用日照时数(n)计算 R_s :

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (8)$$

式中: R_a 表示大气上边界太阳辐射(可通过经纬度和日期计算获取); a 、 b 为经验系数, a 取值 0.25, b 取值 0.5; n 为实际日照时数; N 为可能日照时数。

2) 利用最高、最低温度计算 R_s :

$$R_s = K_r (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a \quad (9)$$

式中: T_{\max} 是最高气温($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} 是最低气温($^{\circ}\text{C}$); K_r 是调节系数($^{\circ}\text{C}^{1/2}$), 取 0.19。

3.2 相对湿度缺测

如上文分析, 相对湿度(RH)在 P-M 公式中用于计算实际水汽压(e_a), 当 RH 缺测时, 实际水汽压可用最低气温(T_{\min})近似计算:

$$e_a = e^{\circ}(T_{\min}) = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right] \quad (10)$$

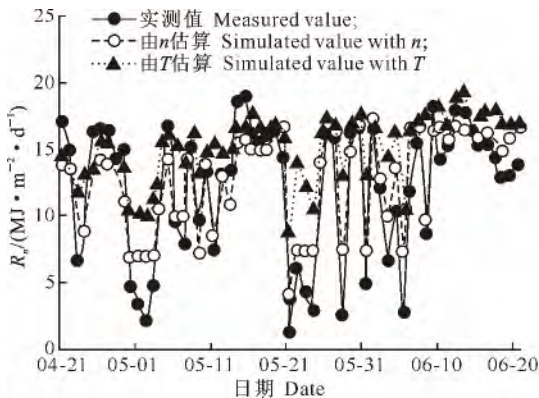


图 2 太阳净辐射(R_n)实测值与估算值的对比
Fig. 2 Comparison of measured and simulated values of net solar radiation (R_n)

式中: e° 表示饱和水汽压(kPa)。

式(10)的基本假定条件是日最低气温近似等于露点温度, 这对地表有草覆盖的站点, 大多时期内是能够满足的^[3]。

3.3 净辐射和相对湿度均缺测

1) 用 n 计算 R_s , T_{\min} 计算 e_a 。利用式(7)和式(8)计算出 R_n , 利用式(10)计算出 e_a 。

2) 分别用气温(T)计算 R_s 和 e_a 。气温对 ET_0 的影响较大, 在仅有气温数据的情况下, 可利用式(9)计算出 R_s , 利用式(10)计算出 e_a 。

4 计算结果的对比分析

4.1 R_n 、 e_a 实测值与估算值的对比分析

为了验证气象资料缺测时, FAO 推荐的几种方法在温室环境中的适用性, 以温室内设置的自动气象站在 04-21-06-20 采集的气象数据为依据, 对温室环境参数 R_n 、 e_a 的实测值与估算值进行对比分析。

分别结合式(8)和式(7)、式(9)和式(7)计算 R_n , 与气象站实测的 R_n 进行比较, 结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, 用公式计算的 R_n 和气象站实测的 R_n 整体变化趋势较为一致, 但用 T_{\max} 、 T_{\min} 估算 R_s 进而求出的 R_n 较实测的 R_n 整体偏大, 平均相对偏差达 64.68%; 而用 n 计算的 R_n 与实测的 R_n 结果较为相近, 平均相对偏差为 22.60%。对于用 2 种方法计算的 R_n 值明显大于实测值(平均相对偏差大于 50%)的数据点, 经过实际气象数据调查和分析发现, 这些相对偏差较大的数据多是 n 为 0 时(阴雨天)的数据, 因为温室的保温作用, 使得温度与日照时数和辐射量不太协调, 所以由气温数据估算的 R_n 要比实测的 R_n 大。

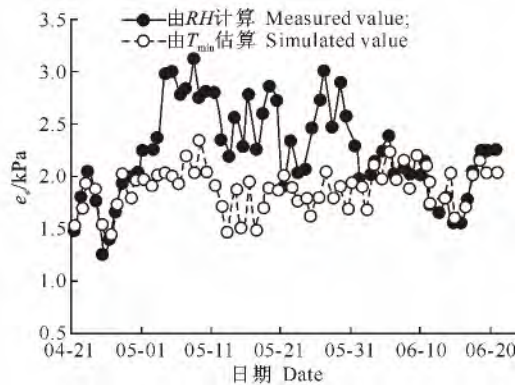


图 3 实际水汽压(e_a)实测值与估算值的对比
Fig. 3 Comparison of measured and simulated values of actual water vapor pressure (e_a)

以温室气象站实测 RH 计算出的 e_a 为标准,与用 T_{min} 计算(式(10))的 e_a 进行比较分析,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,计算值与实测值变化趋势具有一定的相似性,但整体上用 T_{min} 估算出的 e_a 较用实测 RH 计算出的 e_a 小。分析其原因是我国北方进入 5 月以后,气温升高,温室内温度也迅速升高,为了给作物生长提供一个适宜的环境,温室侧窗通常昼夜处于打开状态,由于温室外空气干燥、湿度较低,棚内湿度较大,温湿度的内外交换相对较为剧烈,温室内的最低温度会低于其湿度所对应的露点温度,所以其实际水汽压较按最低气温算出的值要高一些。

4.2 ET_0 实测值与估测值的对比分析

4.2.1 计算结果 基于对基本参数 R_n 、 e_a 的实测值与估算值的对比分析,同样选取试验区 04-21-06-20 的气象资料,进行 ET_0 计算结果的比较与分析。分别假定太阳净辐射缺测、相对湿度缺测、太阳净辐射和相对湿度均缺测 3 种情况,利用 FAO 提出的相应计算方法并结合 P-M 温室修正式计算 ET_0 ,与各参数全为实测值时运用 P-M 温室修正式求得的 ET_0 进行对比,结果如图 4 至图 8 所示。同时,利用式(11)对二者进行线性拟合,并分别计算出气象数据缺测时各种方法算出的 ET_0 与数据全为实

测值时算出的 ET_0 之间的方差(S^2 ,式(12))、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)^[14-15],结果如表 1 所示。

$$ET_{0(资料缺测)} = a \times ET_{0(资料完整)} \quad (11)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{0(资料缺测)} - ET_{0(资料完整)})^2 \quad (12)$$

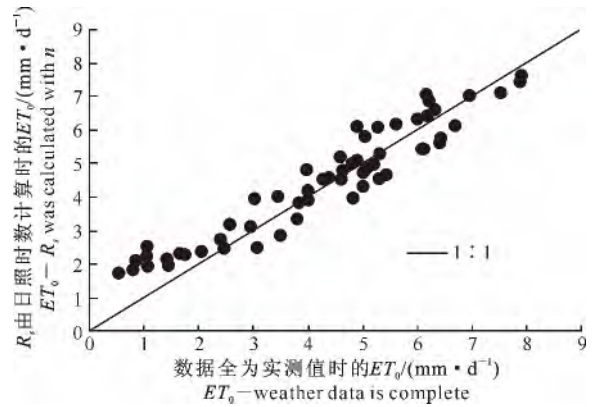


图 4 太阳净辐射(R_n)由日照时数(n)计算与数据全为实测时参考作物蒸腾蒸发量(ET_0)的对比

Fig. 4 Comparison of evapotranspiration of reference crop (ET_0) when net solar radiation (R_n) was calculated with sunshine duration (n) and when weather data was complete

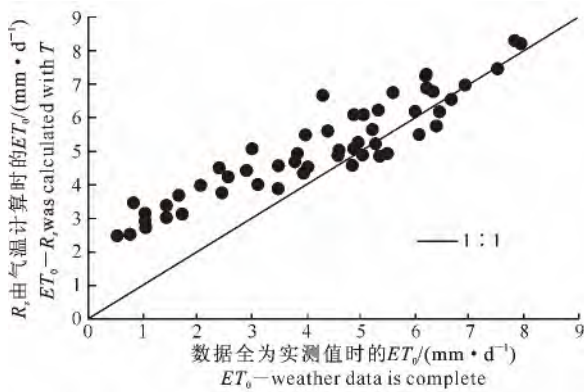


图 5 太阳净辐射(R_n)由气温(T)计算与数据全为实测时参考作物蒸腾蒸发量(ET_0)的对比

Fig. 5 Comparison of evapotranspiration of reference crop (ET_0) when net solar radiation (R_n) was calculated with temperature (T) and when weather data was complete

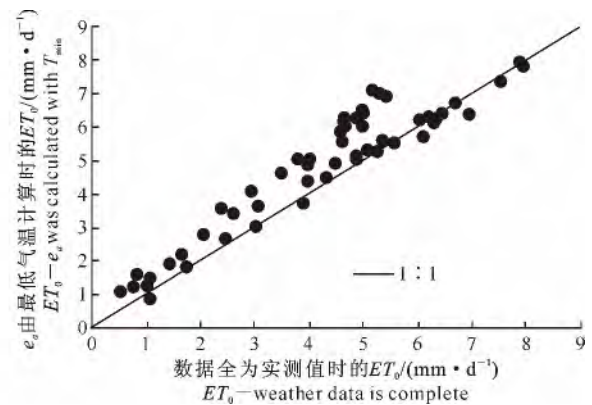


图 6 实际水汽压(e_a)由最低气温(T_{min})计算与数据全为实测时参考作物蒸腾蒸发量(ET_0)的对比

Fig. 6 Comparison of evapotranspiration of reference crop (ET_0) when actual water vapor pressure (e_a) was calculated with the lowest temperature (T_{min}) and when weather data was complete

4.2.2 结果分析与讨论 由图 4、图 5 及表 1 可以看出,当 R_n 缺测时,第 1 种方法由 n 计算出 R_n 进而求得的 ET_0 与数据全为实测时算出的 ET_0 有显著相关性,回归方程斜率为 1.001 0,相关系数为 0.864 7,且计算精度较高,平均相对误差为 17.35%;第 2 种方法采用最高、最低温度估算 R_n 进

而算出的 ET_0 较数据全为实测时算出的 ET_0 整体偏大,相关性较差,回归方程斜率为 1.097 5,相关系数 0.437 4,且精度很低,平均相对误差达 41.69%。由 4.1 节结果可知, n 为 0 时(阴雨天) R_n 实测值与估算值的误差相对较大,对比剔除 n 为 0 时的数据后 ET_0 的计算结果,发现第 1 种方法的平均相对误

差减小为 7.85%，第 2 种方法平均相对误差为 12.38%，均小于 15%，说明这 2 种方法在晴天应用

时误差都会相对减小。

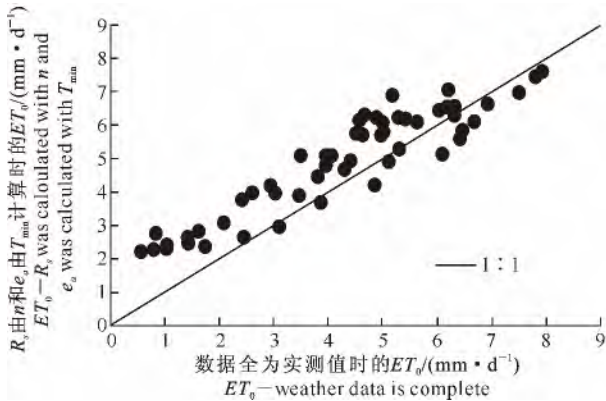


图 7 太阳净辐射(R_n)由日照时数(n)计算、实际水汽压(e_a)由最低气温(T_{min})计算与数据全为实测时参考作物蒸腾蒸发量(ET_0)的对比

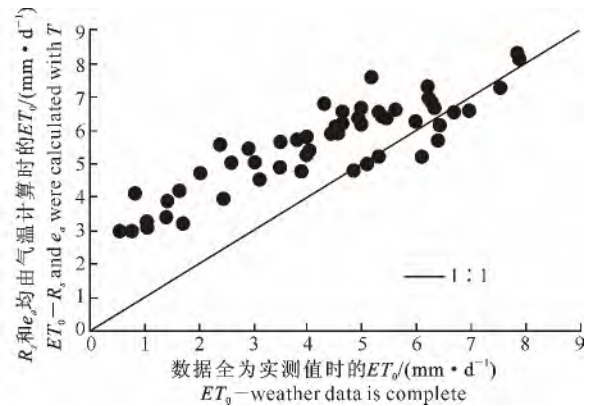


图 8 太阳净辐射(R_n)和实际水汽压(e_a)均由气温(T)计算与数据全为实测时参考作物蒸腾蒸发量(ET_0)的对比

Fig. 7 Comparison of evapotranspiration of reference crop (ET_0) when net solar radiation (R_n) was calculated with sunshine duration (n), the actual water vapor pressure(e_a) was calculated with the lowest temperature(T_{min}) and when weather data was complete

Fig. 8 Comparison of evapotranspiration of reference crop (ET_0) when both net solar radiation (R_n) and actual water vapor pressure(e_a) were calculated with temperature (T) and when weather data was complete

表 1 气象数据缺测条件下与数据全为实测值时 ET_0 的对比分析

Table 1 Comparison of ET_0 values based on limited weather data and complete weather data

数据条件 Data condition	方法 Calculating method	统计量 Statistics				
		回归方程 斜率 a	相关系数 R^2	平均绝对 误差 MAE	平均相对 误差/% MRE	方差 S^2
净辐射缺测 R_n is missing	用 n 计算 R_s R_s was calculated with n	1.001 0	0.864 7	-0.15	17.35	0.365 9
	用 T_{min} 和 T_{max} 计算 R_s R_s was calculated with T_{min} and T_{max}	1.097 5	0.437 4	-0.78	41.69	1.288 6
相对湿度缺测 RH is missing	用 T_{min} 估算 e_a e_a was calculated with T_{min}	1.086 4	0.867 7	-0.51	19.09	0.627 0
净辐射和相对 湿度均缺测 R_n and RH are missing	用 n 计算 R_s , 用 T_{min} 估算 e_a R_s was calculated with n, e_a was calculated with T_{min}	1.086 2	0.683 9	-0.64	36.31	0.935 8
	用 T 计算 R_s 和 e_a R_s and e_a were calculated with T	1.181 2	0.014 0	-1.26	61.23	2.469 4

图 6 及表 1 结果表明, RH 缺测时, 由 T_{min} 计算 e_a 进而求得的 ET_0 值与数据全为实测时算出的 ET_0 之间有很好的相关性, 回归方程斜率为 1.086 4, 相关系数为 0.867 7; 同时, 由于用 T_{min} 估算出的 e_a 较用实测 RH 算出的 e_a 小, 所以总体上前者算出的 ET_0 值较后者稍大一些。

由图 7、图 8 及表 1 可知, 当 R_n 与 RH 均缺测时, 用 n 计算 R_s 、 T_{min} 估算 e_a 的方法求得的 ET_0 与数据全为实测时算出的 ET_0 回归方程斜率为 1.086 2, 相关系数为 0.683 9, 受 e_a 估算值的影响, 计算结果整体偏大; 用 T 分别估算 R_s 与 e_a 的方法算出的 ET_0 与数据全为实测时算出的 ET_0 相关性极差(相关系数为 0.014 0), 且整体偏大(平均相对

误差达 61.23%)。根据文中分析可知, 温室的保温作用使得用 T 估算的 R_n 偏大, 使用 T 估算的 e_a 偏小, 二者的叠加作用使得误差更大。

5 结 论

结合前人研究论证与本试验验证可以看出, P-M 温室修正式适用于温室作物需水量的计算。因此, 本文以 P-M 温室修正式为基础, 验证了 FAO 推荐的气象数据缺测时 ET_0 的计算方法在温室中的适用性。结合分析结果可以看出, 温室内气温 T 和日照时数 n 是利用 P-M 温室修正式计算温室作物 ET_0 的基本要素。(1) 当 R_n 缺测时, 可以用 n 计算 R_s 进而求得 R_n , 计算误差较小, 精确度高, 且晴

天比阴雨天的应用效果更好;(2)当 RH 缺测时,可以用 T_{\min} 估算 e_a 的方法,计算结果与数据全为实测值时算出的 ET_0 结果较为一致,误差较小;(3)在 R_n 和 e_a 都缺测的情况下,分别利用 n 计算 R_n 、 T_{\min} 计算 e_a ,最终计算出的 ET_0 较实测值偏大,但二者相关性较高,可参考使用。

R_n 是影响作物蒸腾蒸发量的关键因子,温室中太阳辐射受室内结构等影响与露地环境有一定差异。本文用于验证的 R_n 是由温室内部气象站测得,测点的代表性及不同结构温室 R_n 的测定还需进一步研究确定。如果使用 n 计算 R_n ,需要考虑温室覆盖的保温被、草帘等揭盖时间的影响。同时,P-M 温室修正式是在假定温室风速为零的前提下提出的,对于温室有强制通风且风速无法忽略的情况还需进一步研究^[16]。

利用 P-M 温室修正式预测温室作物未来的水分状况,在观测温室气温与相对湿度的基础上,建议增加室内日照时数的观测或借用当地气象站的观测结果,同时剔除阴天和保温设备对采光有明显影响的日期,以提高预测的准确度。

[参考文献]

- [1] 刘浩,段爱旺,孙景生,等.基于 Penman-Monteith 方程的日光温室番茄蒸腾量估算模型[J].农业工程学报,2011,27(9):208-213.
Liu H, Duan A W, Sun J S, et al. Estimating model of transpiration for greenhouse tomato based on Penman-Monteith equation [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 208-213. (in Chinese)
- [2] 蔡甲冰,刘钰,雷廷武,等.精量灌溉决策定量指标研究现状与进展[J].水科学进展,2004,15(4):531-537.
Cai J B, Liu Y, Lei T W, et al. Review of indices for precision irrigation decision-making [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 531-537. (in Chinese)
- [3] 司建华,冯起,张小由,等.植物蒸散耗水量测定方法研究进展[J].水科学进展,2005,16(3):450-459.
Si J H, Feng Q, Zhang X Y, et al. Research progress on surveying and calculation of evapotranspiration of plants and its prospects [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 450-459. (in Chinese)
- [4] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [M]. [s. l.]: FAO Irrigation and Drainage, 1998: 56.
- [5] 刘钰, Pereira L S. 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(3):11-17.
Liu Y, Pereira L S. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(3): 11-17. (in Chinese)
- [6] 王健,蔡焕杰,李红星,等.日光温室作物蒸发蒸腾量的计算方法研究及其评价[J].灌溉排水学报,2006,25(6):11-14.
Wang J, Cai H J, Li H X, et al. Study and evaluation of the calculation methods of reference crop evapotranspiration in solar-heated greenhouse [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(6): 11-14. (in Chinese)
- [7] 郝庆炉,薛香,段爱旺.日光温室温度特点及其变化规律研究[J].灌溉排水学报,2003,22(6):50-53.
Gao Q L, Xue X, Duan A W. Temperature characteristics and its changing laws with in solar plastic greenhouse [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(6): 50-53. (in Chinese)
- [8] 郭正昊,于海业,张蕾.日光温室太阳辐射推算模型的构建[J].湖北农业科学,2012,51(7):1468-1470.
Guo Z H, Yu H Y, Zhang L. The construction of projection model of solar radiation in greenhouse [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(7): 1468-1470. (in Chinese)
- [9] 罗卫红,汪小昆,戴剑峰,等.南方现代化温室黄瓜冬季蒸腾测量与模拟研究[J].植物生态学报,2004,28(1):59-65.
Luo W H, Wang X H, Dai J F, et al. Measurement and simulation of cucumber canopy transpiration in a subtropical modern greenhouse winter climate condition [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(1): 59-65. (in Chinese)
- [10] 刘浩,孙景生,梁媛媛,等.滴灌条件下温室番茄需水量估算模型[J].应用生态学报,2011,22(5):1201-1206.
Liu H, Sun J S, Liang Y Y, et al. Estimation model for water requirement of greenhouse tomato under drip irrigation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1201-1206. (in Chinese)
- [11] 孙宇宁,董斌,罗金耀.大棚温室作物需水量计算模型研究进展[J].节水灌溉,2006(2):16-19.
Sun N N, Dong B, Luo J Y. Advance of research on calculation modeling for crop water requirement in plastic greenhouse [J]. Water Saving Irrigation, 2006(2): 16-19. (in Chinese)
- [12] 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,2009(3):50-54.
Fan Y Q, Cai H J. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009(3): 50-54. (in Chinese)
- [13] 葛建坤,罗金耀,李小平.滴灌大棚茄子需水量计算模型的定量分析比较[J].灌溉排水学报,2009,28(5):86-88.
Ge J K, Luo J Y, Li X P. Quantitative analysis of calculation modeling for crop water requirement in plastic tents [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(5): 86-88. (in Chinese)
- [14] 廖显琴,李毅.参考作物腾发量计算方法的适用性研究[J].灌溉排水学报,2009,28(6):14-17.
Liao X Q, Li Y. Adaptability research of different reference crop evapotranspiration estimated methods in Shaanxi [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 14-17. (in Chinese)
- [15] 刘贤赵,康绍忠.不同光照条件下作物蒸腾量计算的研究

[J]. 水利学报, 2001(6): 45-50.

Liu X Z, Kang S Z. Study on computation of crop transpiration under the conditions of different light densities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(6): 45-50. (in Chinese)

[16] 陈新明, 蔡焕杰, 李红星, 等. 温室大棚内作物蒸发蒸腾量计算

[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 317-321.

Chen X M, Cai H J, Li H X, et al. Calculation of crop evapotranspiration in greenhouse [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 317-321. (in Chinese)

(上接第 116 页)

[10] 孙谷畴, 曾小平, 刘晓静, 等. 适度高温胁迫对亚热带森林 3 种建群树种幼树光合作用的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27(4): 1283-1291.

Sun G C, Zeng X P, Liu X J, et al. Effects of moderate high-temperature stress on photosynthesis in saplings of the three dominant tree species of subtropical forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(4): 1283-1291. (in Chinese)

[11] 潘宝贵, 王述彬, 刘金兵, 等. 高温胁迫对不同辣椒品种苗期光合作用的影响 [J]. 江苏农业学报, 2006, 22(2): 137-140.

Pan B G, Wang S B, Liu J B, et al. Effect of heat stress on photosynthesis of pepper cultivars at seedling stage [J]. Jiangsu of Agr Sci, 2006, 22(2): 137-140. (in Chinese)

[12] 胡文海, 曹玉林, 曾建军, 等. 高温干旱对不同品种辣椒生长及呼吸作用的影响 [J]. 植物研究, 2008, 28(2): 199-204.

Hu W H, Cao Y L, Zeng J J, et al. Effects of heat and drought stresses on growth and respiration in different cultivar of pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Bulletin of Botanical Research, 2008, 28(2): 199-204. (in Chinese)

[13] 胡文海, 胡雪华, 邹桂花, 等. 高温干旱对 2 个辣椒品种 PS II 功能与光能分配的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(4): 695-699.

Hu W H, Hu X H, Zou G H, et al. Effects of heat and drought

stresses on the PS II functions and absorbed light allocation in two pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2010, 32(4): 695-699. (in Chinese)

[14] 贾志银, 巩振辉, 许红娟, 等. 高温胁迫对辣椒幼苗生长及生理性状的影响 [J]. 北方园艺, 2010(12): 5-8.

Jia Z Y, Gong Z H, Xu H J, et al. Effect of high temperature stress on morphology and physiological characteristics of pepper seedlings [J]. Northern Horticulture, 2010(12): 5-8. (in Chinese)

[15] 欧立军, 陈波, 邹学校. 干旱对辣椒光合作用及相关生理特性的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2612-2619.

Ou L J, Chen B, Zou X X. Effects of drought stress on photosynthesis and associated physiological characters of pepper [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2612-2619. (in Chinese)

[16] 宋志荣. 干旱胁迫对辣椒生理机制的影响 [J]. 西南农业学报, 2003, 16(2): 53-55.

Song Z R. Effects of drought stress on physiological mechanism of hot pepper [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2003, 16(2): 53-55. (in Chinese)