

# 两种 Penman-Monteith 公式计算草坪草参考腾发量的适用性

徐俊增<sup>1</sup>, 彭世彰<sup>1\*</sup>, 张行南<sup>1</sup>, 丁加丽<sup>2</sup>, 王卫光<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 南通市水利局, 南通 226006)

**摘要:** 为了揭示 ASCE 和 FAO56 两种 Penman-Monteith 公式在计算小时参考作物腾发量 ( $ET_0$ ) 时的差异, 开展了充分供水草坪草腾发量观测试验。基于自动气象站的小时气象数据和蒸渗仪试验结果, 在对比两公式计算结果差异基础上, 以实测的日草坪腾发量为标准评价了 2 种计算公式小时  $ET_0$  的日累积结果及以日的计算结果。结果表明: 2 种 Penman-Monteith 公式计算的小时  $ET_0$  结果存在一定差异,  $ET_0$  较高的时段差异也比较大。白天 FAO56 Penman-Monteith 公式的计算结果低于 ASCE Penman-Monteith 公式的计算结果, 夜晚则正好相反, 原因在于  $C_d$  取值的差异。与实测日  $ET_0$  结果相比 2 种公式小时时段的  $ET_0$  结果的累积值误差均比较大, ASCE 的改进并没有使 Penman-Monteith 在计算结果上取得实质性的改进, 相比之下以日为时段的 Penman-Monteith 公式 (ASCE 同 FAO56) 取得了与实测结果最为一致的效果。进一步根据实测的小时  $ET_0$  数据以及更长序列的日  $ET_0$  实测结果, 评价 FAO56 Penman-Monteith 和 ASCE Penman-Monteith 结果的地区适用性将是今后研究内容之一。

**关键词:** 作物, 蒸腾, 水分, 参考作物蒸发蒸腾量, Penman-Monteith, 草坪草

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.006

中图分类号: S271

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0032-06

徐俊增, 彭世彰, 张行南, 等. 两种 Penman-Monteith 公式计算草坪草参考腾发量的适用性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 32-37.

Xu Junzeng, Peng Shizhang, Zhang Xingnan, et al. Applicability of FAO56 and ASCE Penman-Monteith equations for reference crop evapotranspiration calculation on turf grass[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 32-37. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

参考作物的蒸发蒸腾量 (简称参考腾发量, reference crop evapotranspiration,  $ET_0$ ) 是国际通用的评价水文水资源和计算作物需水量的理论基础, 国内外关于  $ET_0$  的定义及其计算公式的研究历史已近百年, 研究成果非常丰富。1979 年联合国粮农组织 (FAO) 定义参考作物腾发量为“高度均匀一致 (8~15 cm), 生长旺盛、无病虫害, 完全覆盖地面, 土壤水分充分供应条件下的绿色矮秆作物的腾发量”, 并推荐改进的 Penman 公式为计算  $ET_0$  的基本公式<sup>[1-2]</sup>。1992 年, FAO 又将  $ET_0$  重新定义为“一种假想参照作物冠层的腾发速率, 假想作物的高度为 0.12 m, 固定的冠层阻力为 70 s/m, 反射率为 0.23, 非常类似于表面开阔、高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水的绿色草地的腾发量”, 并在 1998 年的 FAO56 文件中推荐 Penman-Monteith 公式为气象资料齐全时唯一的标准计算公式 (简称 FAO56 Penman-Monteith), 并

推荐了 Hargreaves 公式为缺乏数据情况下的替代公式<sup>[3-6]</sup>。同时很多研究将完全覆盖的苜蓿作为参考作物, 针对存在的 2 种不同的参考作物, 美国土木工程师协会环境与水资源分会 (ASCE-EWRI) 在 1999 年成立专门工作组, 统一考虑矮型参考作物 (0.12 m 高, 修剪冷型草为代表) 和高型参考作物 (0.5 m 高, 完全覆盖的苜蓿为代表), 在 FAO56 Penman-Monteith 公式基础上提出了 ASCE 标准 Penman-Monteith 公式<sup>[7-9]</sup>。同时 ASCE 还对 Penman-Monteith 公式中的冠层阻力进行了细化, 对矮型参考作物以小时为计算时段时, 冠层阻力白天取 50 s/m、夜间取 200 s/m, 以天为计算时间时段时, 冠层阻力仍取 70 s/m; 对高型参考作物以小时为计算时间时段时, 冠层阻力白天取 30 s/m、夜间取 200 s/m, 以天为计算时间时段时, 冠层阻力取 45 s/m。在计算时通过参数  $C_n$  和  $C_d$  的取值得以体现 (见表 1)。在中国, 改进的 Penman 公式和 FAO56 Penman-Monteith 公式应用最为广泛<sup>[10-18]</sup>, 并分别被列入《灌溉与排水工程设计规范》(GB50288-1999)<sup>[19]</sup>以及现行的《灌溉试验规范》(SL13-2004)<sup>[20]</sup>。

收稿时间: 2009-03-11 修订时间: 2009-04-01

基金项目: 国家 863 计划项目 (2006AA100202); 国家自然科学基金重点项目 (50839002)

作者简介: 徐俊增 (1980-), 男, 山东聊城人, 博士后, 中国农业工程学会会员 (E04000023A), 主要从事节水灌溉理论与技术研究。南京 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 210098。

Email: xjz481@hhu.edu.cn

\*通信作者: 彭世彰 (1959-), 男, 上海人, 教授, 中国农业工程学会会员 (E041200314S), 主要从事节水灌溉理论与技术研究。南京 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 210098。

Email: szpeng@hhu.edu.cn

## 1 Penman-Monteith 公式

ASCE Penman-Monteith 公式与 FAO56 Penman-Monteith 在形式上是一样的

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

式中:  $ET_0$ ——参考作物腾发量, mm/d 或 mm/h;  $R_n$ ——

净辐射, MJ/(m·d)或 MJ/(m·h);  $G$ ——土壤热通量, MJ/(m·d)或 MJ/(m·h);  $T$ ——温度, °C;  $u_2$ ——2 m 高度的平均风速, m/s;  $e_s$ ——饱和水汽压, kPa;  $e_a$ ——实际水汽压, kPa;  $\Delta$ ——饱和水汽压-温度曲线的斜率, kPa/°C;  $\gamma$ ——湿度计常数, kPa/°C;  $C_n$  (K·mm·s<sup>3</sup>/(Mg·d)或 K·mm·s<sup>3</sup>/(Mg·h)和  $C_d$ (s/m)——由参考作物类型和计算时间步长确定的常数(见表 1), 常数 0.408 的单位为 m<sup>2</sup>·mm/MJ。式中各项参数的确定可以参考文献[3]和[7]。

表 1  $C_n$  和  $C_d$  在 FAO56 Penman-Monteith 和 ASCE Penman-Monteith 中的取值

Table 1  $C_n$  and  $C_d$  values in FAO56 Penman-Monteith and ASCE Penman-Monteith equations

公式	时间尺度	矮型参考作物		高型参考作物	
		$C_n$	$C_d$	$C_n$	$C_d$
FAO56 Penman-Monteith 公式 (1998)	日	900	0.34		
	小时	37	0.34		
ASCE Penman-Monteith 公式 (2000)	日	900	0.34	1600	0.38
	小时(昼)	37	0.24	66	0.25
	小时(夜)	37	0.96	66	1.70

不难发现 ASCE Penman-Monteith 公式与 FAO56 Penman-Monteith 在形式上是一样的, 但参数取值只有在矮型参考作物的日  $ET_0$  计算时才完全一致, 而在小时步长进行  $ET_0$  计算时, 参数  $C_d$  的选择方面具有较大差异。

因此本文基于矮型参考作物(草坪草)蒸渗仪试验观测的日腾发量  $ET_0$  实测结果, 在比较上述 2 种公式的以小时为计算时段的结果差异的同时, 通过日累积求和与日  $ET_0$  实测结果比较, 评价 Penman-Monteith 公式在不同的参数取值条件下的计算结果, 以期 Penman-Monteith 公式的进一步应用与改进提供借鉴。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验地概况

试验在水文水资源与水利工程科学国家重点实验室江苏省昆山试验基地开展, 试验区地理位置为 34°63'21"N、121°05'22"E。该区为湿润地区, 属亚热带南部季风气候区, 年平均气温 15.5°C, 年降雨量 1 097.1 mm, 年蒸发量 1 365.9 mm, 日照时数 2 085.9 h, 平均无霜期 234 d。土壤为重壤土, 0~20、0~30 和 0~40 cm 土层的饱和体积含水率分别为 54.36%、49.71%和 47.81%。

### 2.2 蒸渗仪试验与观测

试验在带有地下观测廊道的有底式蒸渗仪中进行, 试验设 3 次重复, 占用 3 个蒸渗仪。蒸渗仪于 2004 年建成, 面积为 5 m<sup>2</sup> (2 m×2.5 m), 内部土层厚度 1.2 m, 在蒸渗仪地下廊道内设有地下水位恒定控制装置、自动补水装置以及排水自动测定装置(具体见文献[21])。灌水量由安装在供水管道上的水表读取。蒸渗仪内, 在 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层分别埋设 TDR 探头, 每日 8:00 利用 Trase-TDR 系统测量不同土层土壤含水率。草坪需水量观测期内, 地下水位恒定控制在地面以下 40 cm, 蒸渗仪地下排水阀门保持开启状态, 利用翻斗式自动测量

装置测定蒸渗仪土壤深层渗漏量。根据水量平衡原理计算草坪实际腾发量。

由于试验期为当地高温季节, 冷季型草由于高温病害无法保证处于最佳生长状态, 因此试验采用暖季型草坪草(狗牙根, Bermudagrass)作为试验用草, 铺设法种植, 定植日期 4 月 16 日, 选用草坪完全恢复生长以后的 6 月 27 日以后的数据开展相关研究。及时进行灌水、排水、刈割、施肥等田间管理, 以保证草坪生长旺盛, 分布均匀, 不受水分胁迫及病虫害的影响。测量时段内, 定期刈割保证草坪高度保持在 12 cm 左右。出苗后施氮肥 5~7 g/m<sup>2</sup>, 进入炎热期前施复合肥 20~30 g/m<sup>2</sup>。当 0~40 cm 土层可利用水的 30% 被消耗时进行灌水<sup>[3]</sup>, 即 40 cm 土层土壤含水率达到 31% 时, 灌水 20 mm 至田间持水率(这里田间持水率为 36%, 凋萎系数为 20%)。降雨后, 如果田间出现水层, 则通过地表排水口将水排出, 并通过自动记录翻斗计监测装置测量排水量。

### 2.3 气象因子观测

采用 ICT-AWS02 自动监测气象站(澳大利亚 ICT 公司)自动测定空气温度、相对湿度、气压、风速、风向、太阳辐射、降雨量和日照时数, 测定频次为每小时测定 1 次。由于气象站在 2007 年 7 月 18 日以前的气象监测是以 2 h 为间隔的, 因此主要应用 7 月 18 日 24 时至 10 月 15 日 24 时共计 89 d 的数据开展研究。

### 2.4 统计参数

除平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)外, 均方根误差(RMSE)、一致性系数( $d$ )和加权决定系数( $wr^2$ )被用来评价模型计算结果。计算方法如下

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

$$wr^2 = w \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (4)$$

式中:  $P_i$ 、 $O_i$ ——分别为比较中的比较值和目标值;  $\bar{O}$ 、 $\bar{P}$ ——分别对应的平均值;  $n$ ——样本数。在  $wr^2$  计算中, 权重  $w$  根据比较值和目标值之间线性回归关系的斜率  $b$  确定, 若  $b \leq 1$ ,  $w = b$ , 若  $b > 1$ ,  $w = 1/b$ <sup>[22]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 小时参考作物腾发量计算结果

图 1 为 2 种 Penman-Monteith 公式计算的小时段  $ET_0$  结果, 可见针对矮型参考作物(草坪草), FAO56 Penman-Monteith 和 ASCE Penman-Monteith 两者计算结果具有相同的变化规律, 但由于参数选择的不同, 计算

结果存在一定差异,并且在  $ET_0$  数据结果较高的时段(如图 1 中 7 月 18 日 24 时以后的 200~600 h 时段),2 者之间的差异比较大,而在  $ET_0$  数据结果较低的时段(如 7 月 18 日 24 时以后的 0~120 h 时段)两者之间的差异比较小。此外白天与黑夜之间的对比显示,白天 FAO56 Penman-Monteith 公式的计算结果低于 ASCE Penman-

Monteith 公式的计算结果,在夜晚则正好相反。原因在于  $C_d$  取值的差异,在其他参数取值或计算方法完全相同的情况下,FAO56 Penman-Monteith 公式白天具有更高的  $C_d$  值,导致其计算结果小于 ASCE Penman-Monteith 公式的计算结果,而夜晚正好相反,ASCE Penman-Monteith 公式具有更高的  $C_d$  值。

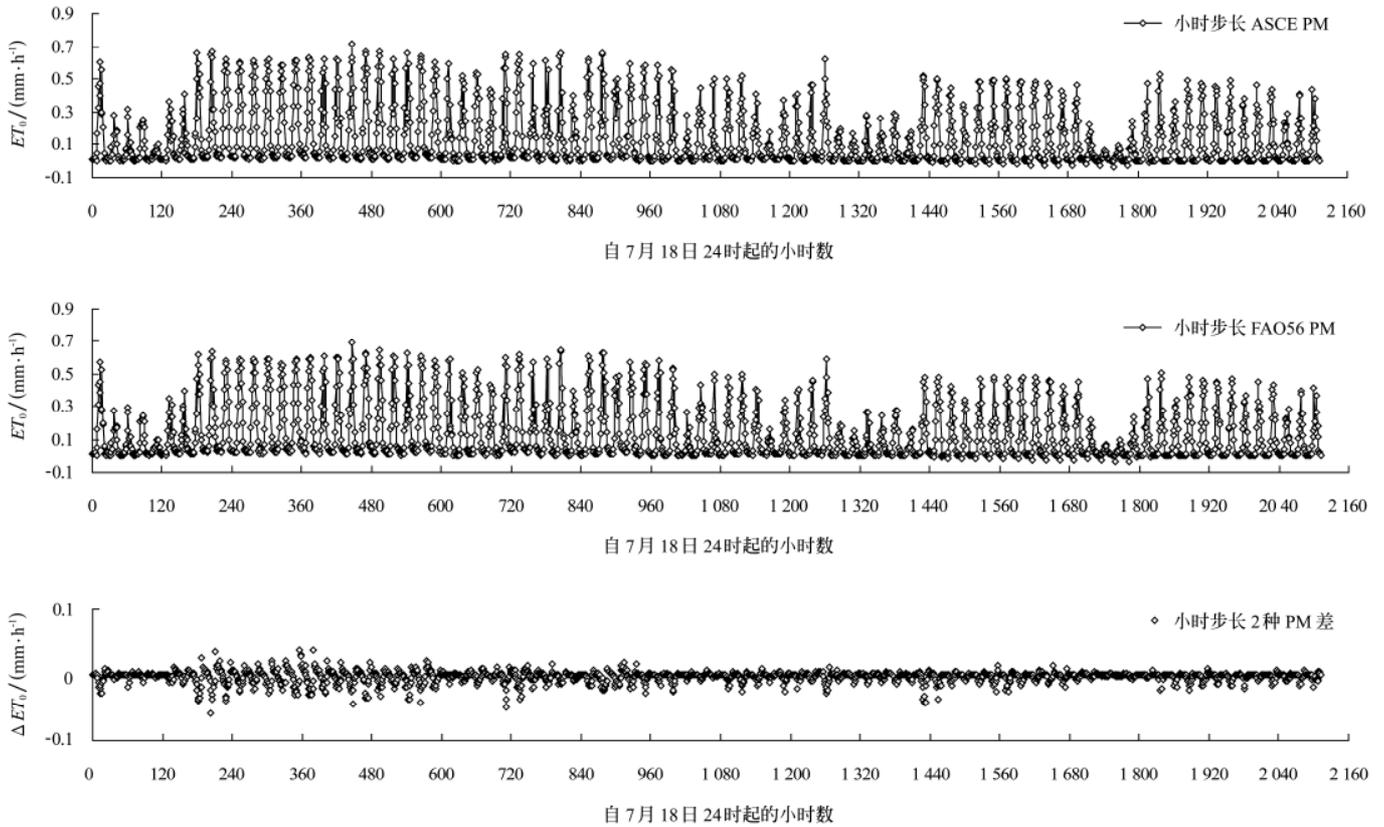


图 1 FAO56 Penman-Monteith 与 ASCE Penman-Monteith 公式计算的 小时  $ET_0$  结果对比

Fig.1 Comparison of hourly evapotranspiration by FAO56 Penman-Monteith and those by ASCE Penman-Monteith

统计分析(表 2)显示,2 种计算结果白天的绝对差比晚间的大,但由于晚间的  $ET_0$  数值较低,其相对误差大于白天的误差。白天 2 公式计算结果之间的一致性更好,一致性指标  $d$ 、加权决定系数  $wr^2$  均高于夜间,但夜间的误差水平并不高,均方根误差  $RMSE$  和平均绝对误差  $MAE$  均低于白天,原因在于统计指标  $MRE$ 、 $d$  和  $wr^2$  放大了低范围区域数据误差情况<sup>[22]</sup>。

表 2 FAO56 Penman-Monteith 与 ASCE Penman-Monteith 公式计算小时  $ET_0$  结果之间的误差

Table 2 Errors between hourly evapotranspiration by FAO56 Penman-Monteith and those by ASCE Penman-Monteith

时段	$RMSE/$ ( $mm \cdot h^{-1}$ )	$MAE/$ ( $mm \cdot h^{-1}$ )	$MRE/$ %	$d$	$b$	$wr^2$	$t$
白昼( $n=1102$ )	0.0124	0.0089	3.35	0.9994	1.0393	0.9613	19.78**
黑夜( $n=1152$ )	0.0051	0.0027	16.69	0.9990	0.8378	0.8153	33.47**
全部( $n=2254$ )	0.0093	0.0056	4.14	0.9996	1.0420	0.9588	16.42**

注: \*夜晚为净辐射低于零的时段; \*\*配对  $t$  检验显示不同时段 2 种公式计算结果差异显著,即  $|t| > t_{0.975}(n) = 1.96$ 。

从理论上讲 FAO 在小时时段  $ET_0$  计算中的  $C_n$  和  $C_d$  取值并不合理,与日值计算中的参数取值相比,只是简单的将  $C_d$  保持不变,将  $C_n$  值取为日值计算中的 1/24,出现这一问题的原因在于其假设白天、夜晚具有完全相同的冠层阻力 70 s/m。ASCE Penman-Monteith 公式则假设白天与夜晚的冠层阻力分别为 50 s/m 和 200 s/m,相应的对  $C_d$  取值做了细化,但  $C_n$  值仍然采用了日值计算中取值的 1/24。从冠层阻力以及与之相对应的  $C_d$  取值来看更趋于合理,但两种公式的  $C_n$  取值方法有待改进。进一步根据实测的小时  $ET_0$  结果进行验证 2 种参数取值策略将是今后的研究内容之一。

### 3.2 日参考作物腾发量的计算结果

在小时时段的  $ET_0$  计算中,参数选择具有较大差异,但由于缺乏每小时的  $ET_0$  观测实测结果,故采用日 24 小时累积结果对上述 2 种以小时为步长的计算结果进行分析。图 2b 和 2c 分别为 FAO56 Penman-Monteith 和 ASCE Penman-Monteith 2 种公式小时  $ET_0$  的日累积值与蒸渗仪实测日  $ET_0$  结果的对比。与实测的  $ET_0$  相比,无论 FAO56 Penman-Monteith,还是 ASCE Penman-Monteith,其小时

$ET_0$  的累积值与实测值之间均具有较大误差，ASCE 的改进并没有使 Penman-Monteith 在小时计算结果上取得实质性的改进，统计分析（表 3）同样证实了这一结论。更好的利用该自动监测蒸渗仪系统，观测草坪小时时段的腾发量，以此为据评价 FAO56 Penman-Monteith 和 ASCE

Penman-Monteith 结果，将更能说明问题。与 2 种小时时段的  $ET_0$  结果日累积值相比，以日为时段的 Penman-Monteith 公式（FAO56 同 ASCE）取得了与实测结果最为一致的效果（图 2a 和表 3）。

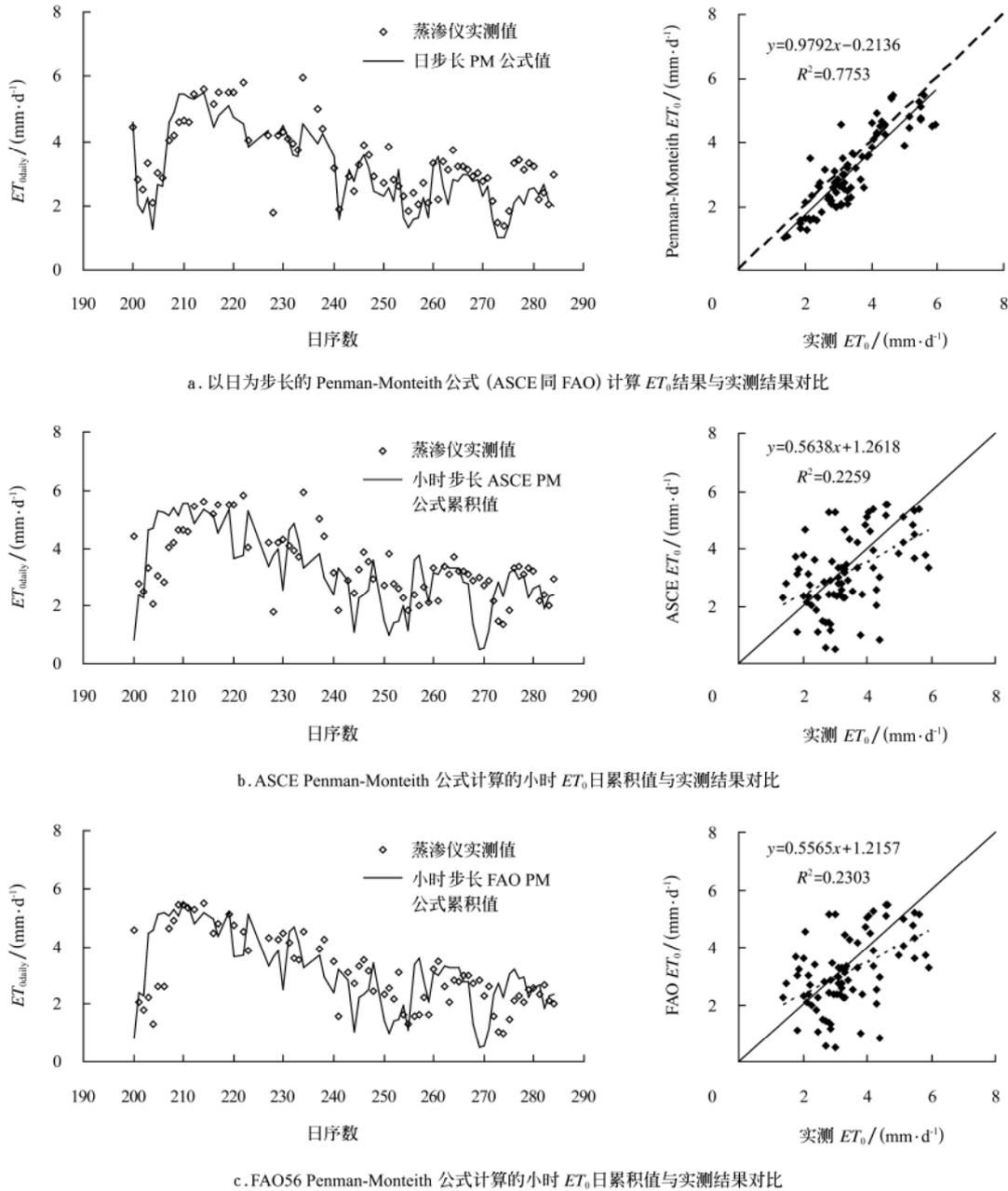


图 2 Penman-Monteith 公式计算值与蒸渗仪实测  $ET_0$  结果对比 ( $n=77$ )

Fig.2 Comparison of daily calculated  $ET_0$  by Penman-Monteith and observed  $ET_0$  by lysimeter

表 3 Penman-Monteith 公式计算结果与蒸渗仪实测日  $ET_0$  结果之间的误差

Table 3 Errors between daily  $ET_0$  by Penman-Monteith and lysimeter

公 式	RMSE/(mm · h <sup>-1</sup> )	MAE/(mm · h <sup>-1</sup> )	MRE/%	合格率*/%	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>wr</i> <sup>2</sup>	<i>t</i>
Penman-Monteith 日结果	0.6971	0.5563	18.45	38.96 (63.64)	0.9062	0.9792	0.8519	1.74
FAO56 小时累积	1.2744	0.9902	33.13	22.08 (45.46)	0.6715	0.5565	0.2611	4.24**
ASCE 小时累积	1.2840	1.0169	33.65	22.08 (42.86)	0.6723	0.5638	0.2588	2.28**

注：\* 合格率定义为相对误差小于 10%（括号外）或 20%（括号内）；\*\* 配对 *t* 检验显示差异均显著，即  $|t| > t_{0.975}(n)=1.99$ 。

## 4 结论与讨论

针对 ASCE 和 FAO56 2 种 Penman-Monteith 公式在计算小时参考作物腾发量时的差异, 基于自动气象站观测的每小时气象数据, 对比了 2 公式计算结果的差异及其与参数选择的关系。以矮型参考作物草坪为例, 采用充分供水的蒸渗仪试验, 测定了日参考作物腾发量, 以此为据评价了 2 种小时时段  $ET_0$  计算方法的日累积计算结果、以及 Penman-Monteith 公式以日为计算时段的计算结果。结果表明:

1) 2 种 Penman-Monteith 公式计算的小小时时段  $ET_0$  计算结果存在一定差异,  $ET_0$  数据结果较高的时段差异也比较大。白天 FAO56 Penman-Monteith 公式的计算结果低于 ASCE Penman-Monteith 公式的计算结果, 在夜晚则正好相反, 产生这种现象的原因在于  $C_d$  值的差异。统计分析结果显示白天的绝对误差比晚间的大, 但由于晚间的  $ET_0$  数值较低, 其相对误差大于白天的误差。从理论上讲 ASCE Penman-Monteith 公式  $C_d$  取值更为合理, 但 2 种公式在小时时段计算时对  $C_n$  取值方法还有待考证。

2) 将 FAO56 和 ASCE 2 种 Penman-Monteith 公式小时计算结果的日累积值、Penman-Monteith 公式日计算结果与蒸渗仪实测日  $ET_0$  结果的对比。结果显示 ASCE 的改进并没有使 Penman-Monteith 在小时计算结果上取得实质性的改进, 与 2 种小时  $ET_0$  结果日累积值相比, 以日为时段的 Penman-Monteith (ASCE 同 FAO56) 公式取得了与实测结果最为一致的效果。

在更多气候类型区, 更好的利用蒸渗仪试验, 获取草坪小时的腾发量以及更长时间序列的日参考作物腾发量资料, 以此为据评价 FAO56 Penman-Monteith 和 ASCE Penman-Monteith 结果将是今后研究内容之一。

### [参 考 文 献]

- [1] Doorenbos J, Pruitt W O. Crop water requirements[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper No.24, 1975.
- [2] 陈玉民, 郭国双. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 50—128.
- [3] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.
- [4] Hossein D, Tahei Y, Velu R. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments[J]. Agricultural Water Management, 2004, 64(2): 91—106.
- [5] Trajković S. Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid Conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2007, 133(1): 38—42.
- [6] 刘钰, Preira L S, Teixeira J L. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997, 28(6): 27—33.  
Liu Yu, Preira L S, Teixeira J L. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(6): 27—33. (in Chinese with English abstract)
- [7] ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation[R]. Task committee on standardization of reference evapotranspiration. New York, USA: Technical Committee Report, 2005.
- [8] Itenfisu D, Elliott R L, Allen R G, et al. Comparison of reference evapotranspiration calculations as a part of the ASCE standardization effort[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2003, 129 (6): 440—448.
- [9] 苏春宏, 陈亚新, 徐冰.  $ET_0$  计算公式的最新进展与普适性评估[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 129—136.  
Su Chunhong, Chen Yaxin, Xu Bing. Recent development and universality evaluation of  $ET_0$  calculation formulas[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 129—136. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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, 2001, 35(1): 57—61.  
Du Yaodong, Liu Zuoxin, Zhang Yunfu. Evaluation of two reference crop evapotranspiration calculation methods[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2001, 35(1): 57—61. (in Chinese with English abstract)
- [11] 苏春宏, 陈亚新, 王亚东, 等.  $ET_0$  计算模型及其主要输入因子的影响分析评估[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 14—19.  
Su Chunhong, Chen Yaxin, Wang Yadong, et al.  $ET_0$  calculates the influence of models and its major inputted factor to analysis evaluation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 25(1): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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.  
Peng Shizhang, Xu Junzeng. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 23(6): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [13] 霍再林, 史海滨, 陈亚新, 等. 内蒙古地区  $ET_0$  时空变化与相关分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 60—63.  
Huo Zailin, Shi Haibin, Chen Yaxin, et al. Spatio-temporal variation and dependence analysis of  $ET_0$  in north arid and cold region[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 60—63. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 12—18.  
Liu Xiaoying, Li Yuzhong, Wang Qingsuo. Evaluation on several temprature-based methods for estimating reference crop evapotranspiration[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 12—18. (in Chinese with English abstract)
- [15] 樊军, 邵明安, 王全九. 黄土区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究[J]. 农业工程学报. 2008, 24(3): 98—102.  
Fan Jun, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Comparison of many equations for calculating reference evapotranspiration in the loess plateau of China[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 98—102. (in Chinese with English abstract)

- [16] 赵旭, 李毅, 刘俊民. 新疆旱区草地参考作物腾发量随机模拟及其应用[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1267—1272.  
Zhao Xu, Li Yi, Liu Junmin. Application of stochastic model to simulation of reference crop evapotranspiration in grassland of arid region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1267—1272. (in Chinese with English abstract)
- [17] 胡顺军, 潘渝, 康绍忠, 等. Penman-Monteith 与 Penman 修正式计算塔里木盆地参考作物潜在腾发量比较[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 31—37.  
Hu Shunjun, Pan Yu, Kang Shaozhong, et al. Comparison of the reference crop evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith and Penman methods in tarim river basin[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 31—37. (in Chinese with English abstract)
- [18] 史晓楠, 王全九, 王新, 等. 参考作物腾发量计算方法在新疆地区的适用性研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 19—23.  
Shi Xiaonan, Wang Quanjiu, Wang Xin. Adaptability of different reference evapotranspiration estimation methods in Xinjiang region[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 19—23. (in Chinese with English abstract)
- [19] 中华人民共和国国家标准 GB50288-99. 灌溉与排水工程设计规范[S].
- [20] 中华人民共和国水利行业标准 SL13-2004, 灌溉试验规范[S].
- [21] 郁进元, 何岩. 蒸渗仪自动恒定地下水位装置的研制[J]. 中国农村水利水电, 2006, (12): 148—149.  
Yu Jinyuan, He Yan. Study on the automatic constant groundwater level control equipment in lysimeter[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006, (12): 148—149.
- [22] Krause P, Boyle D P, Bäse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment[J]. Advances in Geosciences, 2005, 5: 89—97.

## Applicability of FAO56 and ASCE Penman-Monteith equations for reference crop evapotranspiration calculation on turf grass

Xu Junzeng<sup>1</sup>, Peng Shizhang<sup>1\*</sup>, Zhang Xingnan<sup>1</sup>, Ding Jiali<sup>2</sup>, Wang Weiguang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Bureau of Water Conservancy, Nantong 226006, China)

**Abstract:** In order to reveal the difference between hourly reference crop evapotranspiration( $ET_0$ ) calculated by FAO56 Penman-Monteith equation and that by ASCE Penman-Monteith, as well as the 24-hour accumulated daily  $ET_0$ , well watered lysimeter experiment were carried out on turf grass. Hourly  $ET_0$  and 24-hour accumulated daily  $ET_0$  were calculated based on hourly meteorological data and evaluated by using daily observed grass evapotranspiration derived from well watered lysimeter experiment. There was a certain difference between  $ET_0$  calculated by FAO56 Penman-Monteith equation and that by ASCE Penman-Monteith equation, and the difference was more significant when the  $ET_0$  values were relative higher. Hourly  $ET_0$  were tested to be lower for FAO56 Penman-Monteith equation than for ASCE Penman-Monteith equation in daytime, but just reversed at night. That was ascribed to the difference in  $C_d$  values. It was a pity to say that the equation mended by ASCE could not result in improvement in hourly  $ET_0$  calculation, when the 24-hour accumulated daily  $ET_0$  were compared with observed daily grass evapotranspiration. Daily  $ET_0$  calculated by Penman-Monteith equation based on meteorological data at daily time step were test to be the most consistent with that by lysimeter observed. Further evaluation of either FAO56 Penman-Monteith equation or ASCE Penman-Monteith equation was urgent in China, based on hourly or long series daily observed grass evapotranspiration.

**Key words:** crops, evapotranspiration, water, reference crop evapotranspiration, Penman-Monteith, turf grass