

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.01.37

# 小时与日尺度 PM 公式的参照作物腾发量及其水稻单作物系数值差异

王可纯<sup>1</sup>, 蔡少杰<sup>1</sup>, 卫琦<sup>1,2</sup>, 吕玉平<sup>1</sup>, 廖林仙<sup>1</sup>, 徐俊增<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 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)

**摘要:** 以昆山试验站 2012–2013 年自动气象站观测的小时气象资料为依据, 分别采用 ASCE PM 公式和 FAO56 PM 公式计算小时  $ET_0$ , 在对比两种小时  $ET_0$  计算结果基础上, 通过逐小时累积求和得到日  $ET_0$  值(分别记作  $ET_{0-dhA}$  和  $ET_{0-dhF}$ ), 进而与日尺度参照作物腾发量  $ET_0$  (记作  $ET_{0-d}$ ) 进行对比, 在明确  $ET_{0-d}$ ,  $ET_{0-dhA}$  和  $ET_{0-dhF}$  差异的基础上, 分析了基于不同  $ET_0$  确定的水稻单作物系数差异(分别记为  $K_{c-d}$ 、 $K_{c-dhA}$  与  $K_{c-dhF}$ )。结果表明: 在水稻不同生育阶段内, 小时  $ET_0$  值大致呈抛物线型日变化, 在中午时  $ET_0$  达到最大, 午夜则最低; 2 种 PM 公式计算得到的小时  $ET_0$  值存在微小差异, 差异范围在  $-0.02 \sim 0.5$  mm/h 内, 白天 ASCE PM 公式计算值偏大, 夜间则无明显规律。在日尺度上,  $ET_{0-d}$ ,  $ET_{0-dhA}$  和  $ET_{0-dhF}$  三者之间具有良好的线性关系, 大小关系表现为:  $ET_{0-dhA} > ET_{0-d} > ET_{0-dhF}$ 。总体上, 由实测日腾发量  $ET_a$  求得的节水灌溉水稻单作物系数大于按照 FAO 推荐方法确定的作物系数值, 且采用不同日  $ET_0$  计算结果得到的水稻  $K_c$  值之间的大小关系为:  $K_{c-dhA} < K_{c-d} < K_{c-dhF}$ , 但其差异较小, 差异程度在 5% 以内。

**关键词:** ASCE PM 公式; FAO56 PM 公式; 不同时间尺度; 参考作物腾发量; 作物系数; 水稻

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0247-07

## Difference in reference crop evapotranspiration calculated by PM equation and the corresponding single crop coefficient of rice between hourly scale and daily scale

WANG Kechun<sup>1</sup>, CAI Shaojie<sup>1</sup>, WEI Qi<sup>1,2</sup>, LÜ Yuping<sup>1</sup>, LIAO Linxian<sup>1</sup>, XU Junzeng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China,

Hohai University, Nanjing 210098, China; 2 State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and

Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the hourly meteorological data collected by an automatic meteorological station in Kunshan Experimental Station during 2012–2013, hourly  $ET_0$  were calculated by ASCE PM and FAO 56 PM formulas equations separately to show the difference in hourly  $ET_0$  calculated by two different equations. Then the hourly  $ET_0$  were summed up to obtain the daily  $ET_0$  (termed as  $ET_{0-dhA}$  and  $ET_{0-dhF}$ ) and compared to the daily  $ET_0$  calculated by PM equation at daily scale ( $ET_{0-d}$ ). Differences among  $ET_{0-d}$ ,  $ET_{0-dhA}$  and  $ET_{0-dhF}$  were discussed, as well as the difference among the single crop coefficient of rice based on daily  $ET_0$  determined by different procedures. The results showed that hourly  $ET_0$  varied in parabolic shape, with the maximum observed at noon and minimum at midnight. Hourly  $ET_0$  were slightly different between two methods, with the difference fell in range of  $-0.02 \sim 0.5$  mm/h. Hourly  $ET_0$  by ASCE PM were found slightly higher than by FAO56 PM in daytime. Daily  $ET_0$  were highly correlated to each other, and ranked in sequence of  $ET_{0-dhA} > ET_{0-d} > ET_{0-dhF}$ . Local calibrated single crop coefficient  $K_c$  of rice were higher than the value determined following the procedure by FAO, and ranked in sequence

收稿日期: 2018-06-05; 修回日期: 2018-07-27

基金项目: 江苏水利科技项目(2015089)

作者简介: 王可纯(1993-), 女, 陕西延安人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

通讯作者: 卫琦(1986-), 男, 山西运城人, 博士后, 主要从事节水灌溉理论及其生态环境效应研究。

of  $K_{c-dhA} < K_{c-d} < K_{c-dhF}$ , with the difference among them less than 5%.

**Key words:** ASCE penman - monteith formula; FAO56 penman - monteith formula; different temporal scales; reference crop evapotranspiration; crop coefficients; rice

## 1 研究背景

作物腾发量(crop evapotranspiration,  $ET$ )是制定作物灌溉制度与开展水资源配置的主要依据<sup>[1-4]</sup>。作物腾发量的准确计算可在一定程度上节约灌溉用水量<sup>[5-6]</sup>,尤其是在农业用水量较大、作物生长对灌溉依赖程度较高的干旱和半干旱地区<sup>[7-10]</sup>。因此为了更好地管理作物灌溉用水量以及提高作物水分利用效率,必须准确确定作物腾发量( $ET$ )。

参考作物腾发量(reference crop evapotranspiration,  $ET_0$ )是计算作物 $ET$ 的关键参数,基于Penman - Monteith公式联合国粮农组织(FAO)和美国土木工程师协会(ASCE)给出了两种计算 $ET_0$ 的标准:FAO定义的参考作物冠层阻力为70 s/m,反射率为0.23,并推荐改进的PM公式计算 $ET_0$ <sup>[11-12]</sup>;ASCE定义的矮型参考作物<sup>[13-15]</sup>(0.12m高的修剪冷型草)冠层阻力 $r_s$ 按白昼与黑夜进行了分别赋值,白天 $r_s$ 值为50 s/m,晚上 $r_s$ 值为200 s/m;而在以日为计算时段时, $r_s$ 取70 s/m。此外,作物系数(crop coefficient,  $K_c$ )也是估算 $ET$ 的关键因子<sup>[16-18]</sup>,其与作物的种类及生长阶段有关。不同作物上的研究表明,对 $K_c$ 的区域性率定是准确计算作物 $ET$ 的关键<sup>[19]</sup>,随着精准灌溉的发展,小时尺度的作物腾发量估算越来越重要。以往对于日尺度作物腾发量的研究表明,两种PM公式的计算结果关系密切,且ASCE PM公式的计算结果更为准确<sup>[20-22]</sup>。而关于FAO56 PM和ASCE PM两种公式在不同计算尺度下对日 $ET_0$ 计算结果的比较以及由于不同 $ET_0$ 计算对作物系数 $K_c$ 取值的影响等方面的研究还较少。

因此,基于上述研究不足,本文拟以昆山2012-2013年常规小时气象资料为基础,以PM公式计算结果为对照,研究FAO56-PM和ASCE-PM两种计算模型在不同时间尺度(小时、日)的 $ET_0$ 差异,分析不同日 $ET_0$ 计算策略对作物 $K_c$ 值的影响,其研究结果对于华东地区节水农业的灌溉制度制定具有重要的指导意义<sup>[23]</sup>。

## 2 材料与方 法

### 2.1 试验区概况

试验区位于河海大学国家重点实验室昆山试验

研究基地(34°63'21"N,121°05'22"E)内,该试验区属于典型的亚热带季风气候区,多年平均气温15.5℃,多年平均蒸发量1365.9 mm,多年平均降雨量1097.1 mm,多年平均日照时数2085.9 h,多年平均无霜期234 d。当地种植习惯为稻麦轮作,其中,水稻种植时间为6-10月份,小麦种植时间为11-次年5月,本试验主要在水稻生育期内进行。土壤属潜育型黄泥土,土壤耕层质地为重壤土,容重为1.30 g/cm<sup>3</sup>,pH值为7.4。

### 2.2 气象因子观测

2012-2013年常规气象资料由自动气象站进行观测,主要包括空气温度(含最高温度、最低温度和日平均温度)、气压、太阳辐射、降雨量、相对湿度(含最高湿度、最低湿度和日平均湿度)、风速和风向等指标,测定时间间隔为0.5 h。

### 2.3 实际腾发量 $ET_a$

实际腾发量 $ET_a$ 根据水量平衡原理计算而来,水量平衡公式如下:

$$h_1 + P + m - WC - d = h_2 \quad (1)$$

式中: $h_1$ 为时段初田面水层深度; $h_2$ 为时段末田面水层深度; $P$ 为时段内降雨量; $d$ 为时段内排水量; $m$ 为时段内灌水量; $WC$ 为田间耗水量。以上单位均以mm计。实际腾发量 $ET_a$ 为田间耗水量 $WC$ 与田间渗漏量之差。水层深度通过竖尺在固定观测点观测并记录,灌溉水量直接由安装在灌溉管道上的水表读出,渗漏量则由翻斗式自动测量装置(精度为0.05 mm)测定。

### 2.4 $ET_0$ 的标准化计算

$ET_0$ 的标准化计算采用PM公式,PM公式在1998和2005年分别被FAO-56和ASCE-EWRI推荐使用,其具体计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (2)$$

式中: $ET_0$ 为参考作物蒸腾蒸发量,mm/d或mm/h; $G$ 为土壤热通量,MJ/(mm·d)或MJ/(mm·h); $R_n$ 为输入冠层的净辐射,MJ/(m·d)或MJ/(m·h); $e_s$ 、 $e_a$ 分别为饱和水气压与实际水气压,kPa; $\Delta$ 为饱和水气压与气温关系曲线的斜率,kPa/℃; $T$ 为距

地面 2 m 高处日平均气温, °C;  $u_2$  为距地面 2 m 高处风速, m/s;  $\gamma$  为湿度计常数, kPa/°C;  $C_n$  ( $K \cdot mm \cdot s^3 / (Mg \cdot d)$ ) 或 ( $K \cdot mm \cdot s^3 / (Mg \cdot h)$ ) 和  $C_d$  (s/m) 为由参考作物类型和计算时间步长确定的常数 (见表 1), 0.408 为计算常数, ( $m^2 \cdot mm$ )/MJ。公式(2)中各参数的确定可参考文献[2]和[7]。

小时尺度的参考作物腾发量记为  $ET_{0-h}$ , 由 ASCE 和 FAO56 PM 公式计算的小时  $ET_0$  分别记为  $ET_{0-hA}$  和  $ET_{0-hF}$ , 由 ASCE 和 FAO56 PM 公式计算的  $ET_{0-h}$  累积得到的日参考作物腾发量分别记为  $ET_{0-dhA}$  和  $ET_{0-dhF}$ , 由 PM 公式计算日尺度的参考作物腾发量记为  $ET_{0-d}$ 。

表 1  $C_n$  和  $C_d$  在 FAO-56 PM 和 ASCE PM 中的取值

公式	时间尺度	矮型参考作物	
		$C_n$	$C_d$
FAO-56 PM 公式	日	900	0.34
	小时	37	0.34
	日	900	0.34
ASCE PM 公式	小时(昼)	37	0.24
	小时(夜)	37	0.96

### 2.5 作物系数 $K_c$ 的确定

节水灌溉条件下, 一般需要考虑土壤水分胁迫系数  $K_s$ , 可根据推荐的计算公式得到, 公式如下<sup>[24]</sup>:

$$K_{si} = \begin{cases} 1, & \theta_i \geq 100 \\ \ln(1 + \theta_i) / \ln(101), & 100 > \theta_i \geq \theta_c \\ \varepsilon \cdot e^{(\theta_i - \theta_c) / \theta_c}, & \theta_i < \theta_c \end{cases} \quad (3)$$

作物系数用下式求得:

$$K_c = \frac{ET_a}{K_s \cdot ET_0} \quad (4)$$

式中:  $K_c$  为特定作物生长阶段和作物管理条件下的当地的作物系数;  $ET_a$  为实际作物腾发量, mm/d 或 mm/h;  $ET_0$  为参照作物腾发量, mm/d 或 mm/h;  $K_s$  为水分胁迫系数, 由  $ET_{0-d}$ 、 $ET_{0-dhA}$  与  $ET_{0-dhF}$  求得的水稻单作物系数分别记为  $K_{c-d}$ 、 $K_{c-dhA}$  与  $K_{c-dhF}$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 小时尺度参考作物腾发量 $ET_{0-h}$ 的结果分析

图 1 为 2012 和 2013 年不同 PM 公式计算的小时尺度的参考作物腾发量 ( $ET_{0-h}$ ) 的结果。由图 1 可以看出, 两种 PM 公式计算得到的  $ET_{0-h}$  变化规律较为相似, 但由于计算参数取值的不同, 导致其在数值上有差异。总体上, 由 ASCE PM 公式计算的

$ET_{0-h}$  值范围为  $-0.05 \sim 0.92$  mm/h, 由 FAO56 PM 公式计算的  $ET_{0-h}$  值范围为  $-0.05 \sim 0.89$  mm/h。且当  $ET_{0-h}$  值越大时, 二者之间的差异也越大, 但总体差异维持在  $-0.02 \sim 0.5$  mm/h 范围内。其中在白天, 由于  $C_d$  取值的不同, 导致 ASCE PM  $ET_{0-h}$  值大于 FAO56 PM  $ET_{0-h}$  值, 而在夜间, 由于  $C_d$  取值以及能量项和空气动力学项的差异导致两种计算公式  $ET_{0-h}$  值大小关系并没有一致的规律。此外, 若 2 m 高处风速  $u_2$  接近或为 0, 不同的  $C_d$  的取值将不影响计算结果, 两种计算标准求得的  $ET_{0-h}$  值基本相同。

进一步分析 ASCE PM 公式和 FAO56 PM 公式在不同生育期的  $ET_{0-h}$  日变化趋势 (图 2), 可以发现, 在不同生育期内,  $ET_{0-h}$  变化均呈抛物状分布, 且  $ET_{0-h}$  值在中午时刻 (12:00 左右) 达到最大, 而夜间则维持在较低水平, 这一特征与太阳净辐射的分布较为相似, 说明太阳净辐射对  $ET_{0-h}$  影响较大。两种计算公式下  $ET_{0-h}$  值在同一年内差异较小, 但在不同年际间有所差异。

### 3.2 日尺度参考作物腾发量 $ET_{0-d}$ 的结果分析

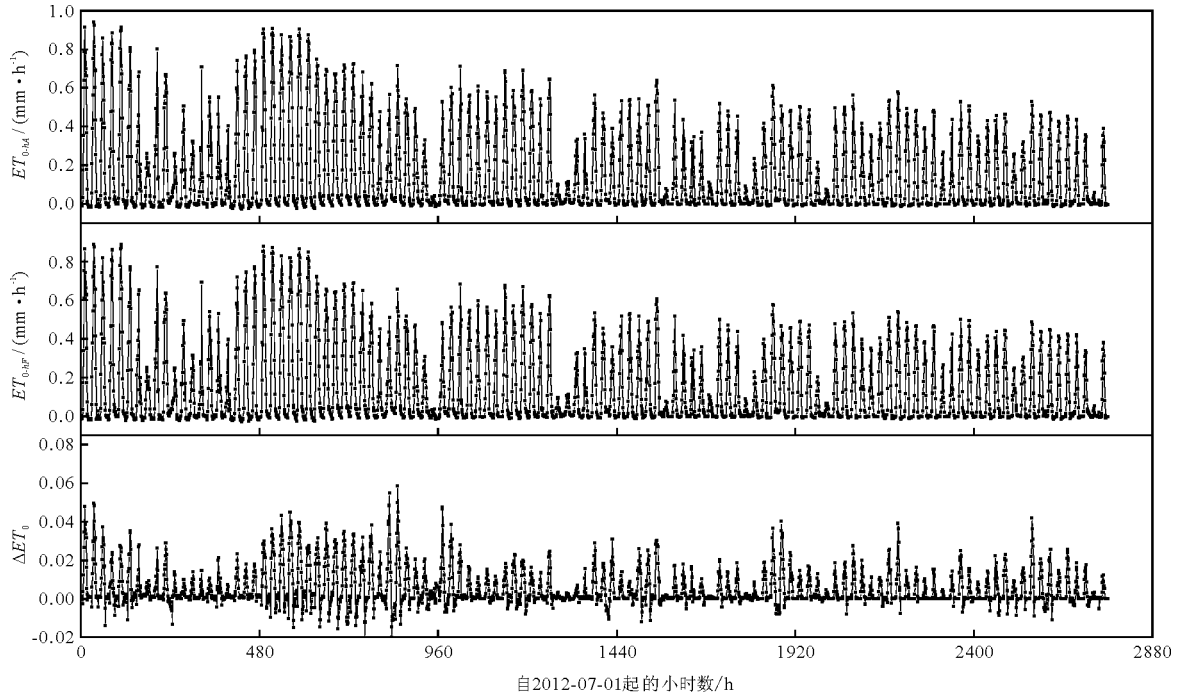
日参考作物腾发量由两种 PM 公式计算得到, 计算值与小时累积值对比见图 3。根据图 3 可以看出, 整体上,  $ET_{0-dhA}$ 、 $ET_{0-dhF}$  与  $ET_{0-d}$  之间具有良好的线性关系, 其相关系数  $R^2$  达 0.97 以上, 且其大小关系表现为  $ET_{0-dhA} > ET_{0-d} > ET_{0-dhF}$ , 其中 2012 年的  $ET_{0-dhA}$ 、 $ET_{0-dhF}$  与  $ET_{0-d}$  之间的误差分别为 1.69%、1.81%, 而 2013 年的误差则略有所减小 (1.19% 和 1.63%)。进一步比较不同计算策略下日参考作物腾发量在不同生长时期的日  $ET_0$  均值 (表 2), 并结合作物不同生长时期内的气象因子变化, 可以发现, 2013 年全生育期内的平均温度 (27.24°C) 和平均净辐射 (126.67 W/m<sup>2</sup>) 分别较 2012 年的值提高了 7.6% 和 5.5%, 对比 2012 和 2013 年不同生长时期的日  $ET_0$  值, 可发现除生长后期外, 2013 年日  $ET_0$  均大于 2012 年, 由此推测出造成年际间日  $ET_0$  值发生变化的原因可能是由太阳净辐射  $R_n$  和温度  $T$  在年际间的变化引起的。

### 3.3 不同时间尺度计算 $ET_0$ 对确定水稻单作物系数的差异

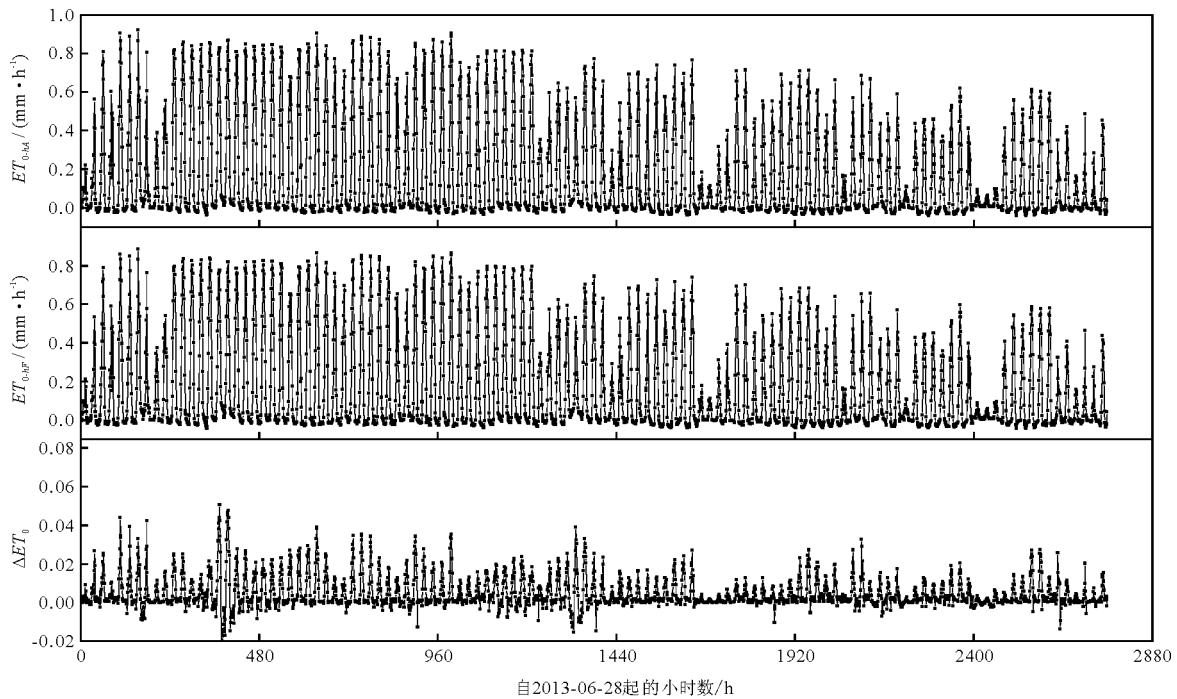
通过分析不同计算策略下日  $ET_0$  对作物系数的影响 (图 4), 可以看出, 作物系数  $K_c$  值与日  $ET_0$  之间具有良好的线性关系, 其相关系数  $R^2$  达 0.90 以上, 且大小关系表现为  $K_{c-dhF} > K_{c-d} > K_{c-dhA}$ , 其中 2012 年  $K_{c-dhA}$ 、 $K_{c-dhF}$  与  $K_{c-d}$  之间的误差为 1.13%、4.61%, 2013 年误差为 2.37%、0.52%, 整体误差较小 (0 ~

5%)。进一步分析作物不同生长时期  $K_c$  的均值(表3)可以发现,总体上,  $K_c$  在生长初期较小,而随着作物的生育期的进行,其  $K_c$  值逐渐增大,并在生长中期达到最大,此后又随作物的枯萎而逐渐减小。此外,通过进一步分析由实测日腾发量  $ET_a$  求得的  $K_c$  值和FAO推荐值之间的关系,可以发现,由水稻实测日腾

发量  $ET_a$  求得的  $K_{cini}$ 、 $K_{cmid}$  和  $K_{cend}$  值2012年分别为1.20、1.60和0.76,2013年分别为1.14、1.63和0.96,均略大于由FAO推荐的单作物系数修正法计算得到的  $K_{cini}$ 、 $K_{cmid}$  和  $K_{cend}$  的值(1.05、1.12、0.85)。由此可以看出,单作物系数  $K_c$  值的区域性率定对于作物腾发量  $ET_a$  的准确计算至关重要。



(a) 两种PM公式计算的小时尺度参考作物腾发量(2012年)



(b) 两种PM公式计算的小时尺度参考作物腾发量(2013年)

图1 ASCE PM公式与FAO56 PM公式计算的小时作物腾发量  $ET_0$  之间的对比

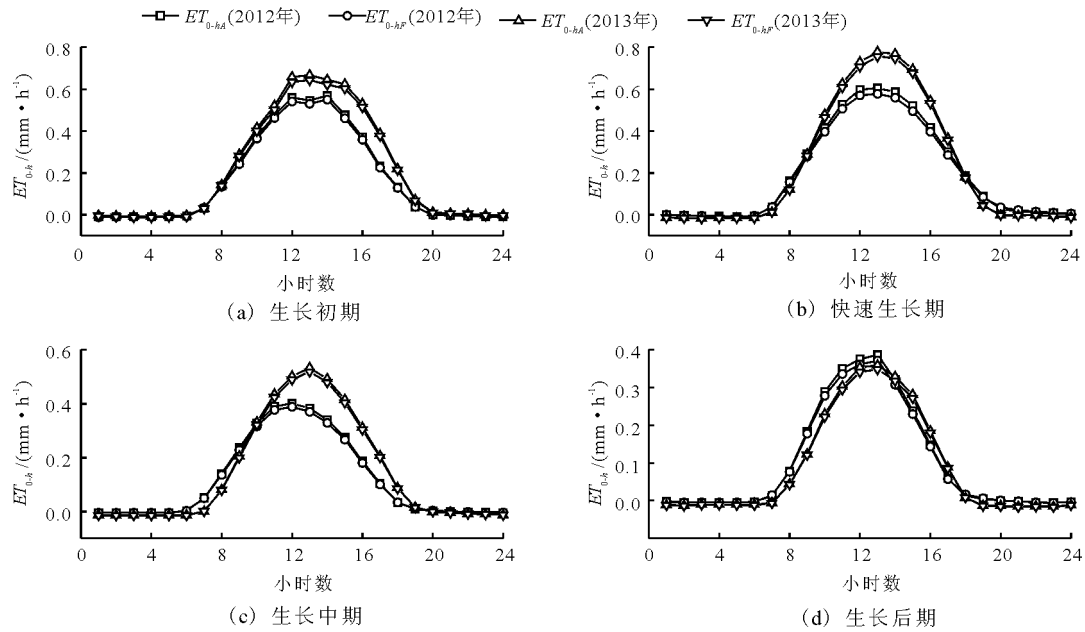


图 2 小时  $ET_0$  日间变化趋势

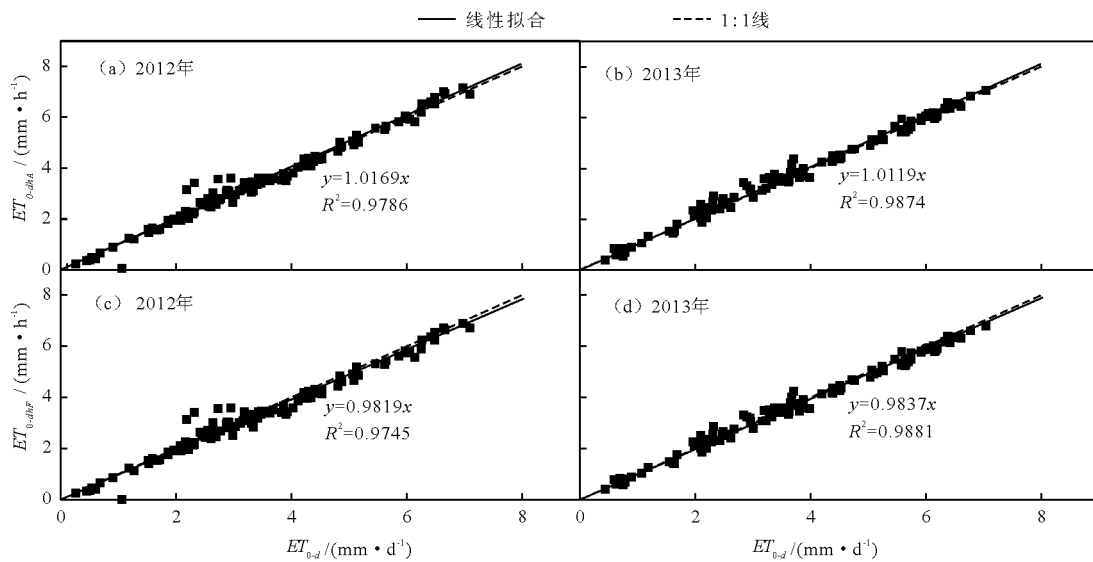


图 3 两种 PM 公式计算的  $ET_{0-d}$  值与小时累积值对比

表 2 不同生长期及全生育期日腾发量  $ET_0$  均值

年份	统计参数	mm/d				
		生长初期	快速生长期	生长中期	生长后期	全生育期
2012	$ET_{0-d}$	4.13	4.82	2.89	2.39	3.43
	$ET_{0-dhA}$	4.10	4.78	2.85	2.66	3.45
	$ET_{0-dhF}$	3.97	4.58	2.75	2.61	3.35
2013	$ET_{0-d}$	5.17	5.51	3.39	1.97	3.89
	$ET_{0-dhA}$	5.17	5.51	3.49	2.14	3.99
	$ET_{0-dhF}$	5.03	5.36	3.39	2.06	3.87

表 3 水稻单作物系数不同生长期的均值及差异分析

年份	统计因素	mm/d				
		生长初期	快速生长期	生长中期	生长后期	全生育期
2012	$K_{c-d}$	1.02	1.20	1.40	1.08	1.24
	$K_{c-dhA}$	1.02	1.19	1.45	0.99	1.25
	$K_{c-dhF}$	1.05	1.24	1.49	1.02	1.29
2013	$K_{c-d}$	1.00	1.24	1.54	1.17	1.30
	$K_{c-dhA}$	0.94	1.17	1.41	1.01	1.20
	$K_{c-dhF}$	0.97	1.20	1.45	1.04	1.23

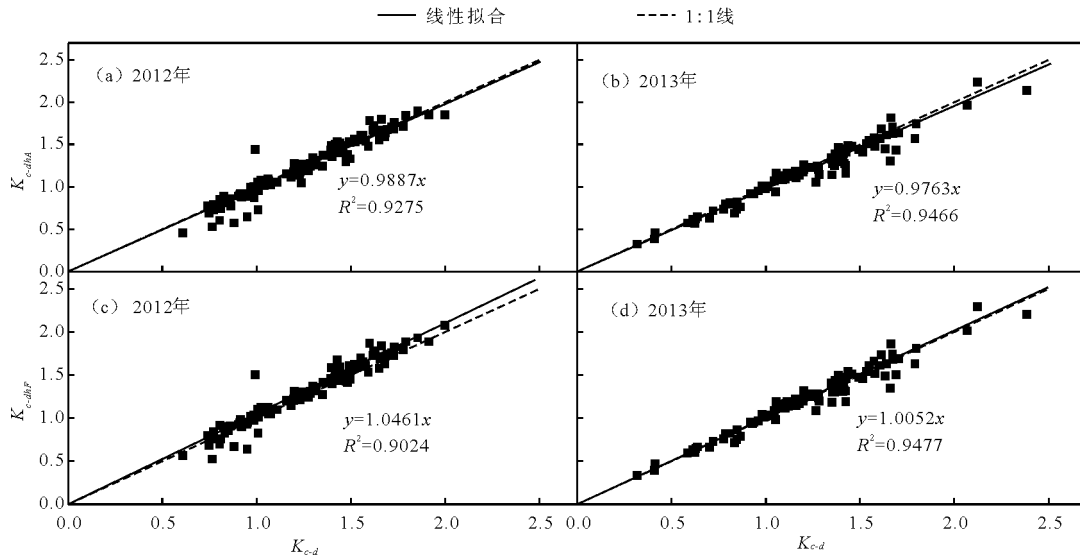


图4 两种PM公式计算的 $K_{c-d}$ 值与小时累积值对比

## 4 结论

以昆山试验基地2012–2013年自动气象站的小时气象资料为依据,研究了FAO56 PM和ASCE PM公式在小时尺度和日尺度的 $ET_0$ 变化特征,揭示了由小时尺度 $ET_0$ 值累积得到的日 $ET_0$ 值和由日尺度计算得到的日 $ET_0$ 值之间的差异,评价了不同计算策略对作物系数( $K_c$ )的影响。得出的主要结论如下:

(1)在小时尺度上,由ASCE PM公式和FAO56 PM公式计算得到的 $ET_{0-h}$ 值变化规律较为一致,但由于 $C_d$ 取值的不同,导致其在数值上略有差异,且整体上白天的ASCE PM  $ET_{0-h}$ 值大于FAO56 PM  $ET_{0-h}$ 值,而夜间两种公式计算的 $ET_{0-h}$ 大小之间没有一致性规律。

(2)在日尺度上,不同计算策略下的日 $ET_0$ 计算结果之间表现出较好的线形关系,其大小关系总体表现为 $ET_{0-dhA} > ET_{0-d} > ET_{0-dhF}$ 。

(3)用不同日 $ET_0$ 计算策略下得到的节水灌溉稻田的 $K_c$ 值,其大小关系表现为: $K_{c-dhA} < K_{c-d} < K_{c-dhF}$ ,但差异较小,差异范围在0~5%之间。而在不同生育期内, $K_c$ 值随作物生育期的进行呈现先增大后减小趋势,并在生长中期达到最大值。

### 参考文献:

[1] PEREIRA A R, PRUITT W O. Adaptation of the Thomthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration [J]. Agricultural Water Management, 2004,64:251–257.  
[2] 张倩,蔡焕杰,魏新光,等. 基于主成分分析的参考作物

腾量预测研究[J]. 节水灌溉,2010(12):64–66.

- [3] 张波,谷晓平,古书鸿,等. 近55年贵州省潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(3):20–26.  
[4] 甄自强,黄金柏,王斌,等. 黄土高原北部淤地坝区域土壤水分模拟及水分有效性——以六道沟流域为例[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):226–232+236.  
[5] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.  
[6] SNYDER R L, PEDRAS C, MONTAZAR A, et al. Advances in ET-based landscape irrigation management [J]. Agricultural Water Management, 2015,147:187–197.  
[7] RANA G, KATERJI N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration crop coefficients in the field under Mediterranean climate: a review. 2000,13(2–3):125–153.  
[8] BERENGENA J, GAVILÁN P. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2005, 131(2):147–163.  
[9] DE BRUIN H A R, HARTOGSIS O K, ALLEN R G, et al. Regional advection perturbations in an irrigated desert (RAPID) experiment [J]. Theoretical & Applied Climatology, 2005,80(2–4):143–152.  
[10] 徐先英,孙保平,丁国栋,等. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2008,28(3):895–905.  
[11] 徐俊增,彭世彰,丁加丽,等. 基于蒸渗仪实测数据的日参考作物蒸发腾量计算方法评价[J]. 水利学报, 2010,41(12):1497–1505.

- [12] 孙庆宇,佟玲,张宝忠,等. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在海河流域的适用性[J]. 农业工程学报,2010,26(11):68-72.
- [13] ASCE - EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation [R]. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. New York, USA: Technical Committee Report,2005.
- [14] ITENFISU D, ELLIOT R L, ALLEN R G, et al. Comparison of reference evapotranspiration calculations as a part of the Drainage Engineering, ASCE,2003,129(6):440-448.
- [15] 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.
- [16] 卢晓鹏,段顺琼,马显莹,等. 单双作物系数法计算玉米需水量的对比研究[J]. 节水灌溉,2012(11):18-21.
- [17] 吴慧蓉,崔远来,高明利. 作物系数影响因素分析[J]. 节水灌溉,2016(8):149-152+156.
- [18] ALLEN R G, PEREIRA L S, HOWELL T A, et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy[J]. Agricultural Water Management,2011,98(6):899-920.
- [19] 金菊良,侯志强,蒋尚明,等. 基于单作物系数和遗传算法的受旱胁迫下大豆蒸发蒸腾量估算[J]. 黑龙江大学学报工程学报,2017,8(1):1-10+12.
- [20] 强小嫚,蔡焕杰,孙景生,等. 陕西关中地区  $ET_0$  计算公式的适用性评价[J]. 农业工程学报,2012,28(20):121-127.
- [21] 苏春宏,陈亚新,张富仓,等.  $ET_0$  计算公式在我国半干旱区的实验率定研究[J]. 人民长江,2009,40(21):91-95.
- [22] 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.
- [23] PEREIRA L S, ALLEN R G, SMITH M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future, Agricultural Water Management,2015,147:4-20.
- [24] 茆智,李远华,李会昌. 逐日作物需水量预测数学模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1995,28(3):253-259.

(上接第 246 页)

- [9] EVERAERT G, PAUWELS I S, BOETS P, et al. Model - based evaluation of ecological bank design and management in the scope of the European Water Framework Directive [J]. Ecological Engineering, 2013, 53:144-152.
- [10] CHAKRABORTY S, MISHRA S K, PANDEY R P, et al. Long - term changes of irrigation water requirement in the context of climatic variability[J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 19(3):257-266.
- [11] CURTIS S, GAMBLE D W, POPKE J. Sensitivity of crop water need to 2071 - 95 projected temperature and precipitation changes in Jamaica[J]. Earth Interactions, 2014, 18(12):1-17.
- [12] 新疆农业大学. 新疆平原区大气降水、灌溉水、土壤水与地下水水量转化关系实验研究[M]. 石河子:新疆科技卫生出版社,2002.
- [13] 徐小波,周和平,王忠,等. 干旱灌区有效降雨量利用率研究[J]. 节水灌溉,2010(12):44-46+50.
- [14] 周金龙. 新疆地下水研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010.
- [15] 周金龙,董新光,陈文娟,等. 应用彭曼 - 蒙特斯公式计算天山北坡平原区水面蒸发量[J]. 新疆农业大学学报,2002,25(4):35-38.
- [16] 廖轶群. 基于 GIS 的新疆地区植被生态需水量研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [17] 水利部国际合作司,水利部农村合作司,中国灌溉技术开发公司,水利部农田灌溉研究所编译. 美国国家灌溉工程手册[M]. 北京,中国水利水电出版社,1998.
- [18] 雒天峰,李元红,王治军,等. 民勤红崖山灌区渠系水面蒸发量计算方法研究[J]. 人民黄河,2013,35(8):81-83+98.