

辐射参数计算方法对参考作物蒸发
蒸腾量计算值的影响

张 莉^{1 2} 彭世彰¹ 罗玉峰¹ 丁加丽¹ 徐俊增¹

(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.河海大学农业工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 采用 FAO-56PM 公式和其他计算公式计算净辐射 R_n 和参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 ,对不同方法所得 R_n 计算值进行了比较.结果表明 ,不同辐射参数计算值对 R_n 计算值影响不同 ,大气边缘辐射计算值对 R_n 影响很大 ,Irmak 方法和 Allen 方法所得 R_n 与 FAO-56PM 公式结果较一致.进一步以不同方法所得 R_n 代入 FAO-56PM 公式计算 ET_0 ,Irmak 方法和 Allen 方法所得 ET_0 与 FAO-56PM 公式计算值较一致.敏感性分析表明 , R_n 波动 10% , ET_0 波动在 7% 左右 , R_n 对 ET_0 的影响很大.在中亚热带低丘岗地区估算 ET_0 时 ,可考虑 Irmak 方法和 Allen 方法来估算 R_n .
关键词 参考作物蒸发蒸腾量 ;FAO-56PM 公式 ;净辐射 ;辐射参数
中图分类号 S161.4 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2008)03-0306-05

参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 作为作物蒸发蒸腾量计算的关键因子 ,对实时灌溉预报和农田水分管理有重要意义.由于 Penman-Monteith(PM)公式的适用性比较好 ,联合国粮农组织(FAO)于 1994 年对 ET_0 进行了重新定义 ,推荐采用 FAO-56 Penman-Monteith(FAO-56PM)公式进行 ET_0 的计算^[1].计算 ET_0 所需参数较多 ,许多研究者针对不同参数对 ET_0 的影响进行了研究^[2-5] ,结果均表明净辐射 R_n 对 ET_0 计算值影响很大^[2-4]. Saxton^[6]的研究结果显示 R_n 每波动一个单位会使 ET_0 改变 0.5 ~ 0.9 个单位 ,Meyer 等^[7]采用在气象数据的基础上增加随机和系统误差的方法来分析误差对采用 PM 公式计算 ET_0 的影响 ,结果表明相对湿度误差和太阳辐射产生的误差对 ET_0 计算值影响最大^[8].由于 R_n 观测要求较高 ,许多地区没有 R_n 实测值 ,因此 R_n 计算成为计算 ET_0 的关键.虽然 FAO-56PM 公式提出了 R_n 的标准计算方法 ,但所需参数多 ,计算较繁.国外有许多辐射参数的计算方法 ,需要的参数各异 ,繁简程度也不同 ,如何评价这些计算方法得到的 R_n 计算结果对 ET_0 的影响具有重要的意义.目前 ,我国涉及该方面的研究很少 ,为研究不同辐射参数计算方法对 ET_0 计算值的影响 ,本文以 FAO-56PM 公式计算所得 R_n 及 ET_0 为标准 ,与采用其他辐射参数计算方法所得 R_n 及 ET_0 进行比较 ,分析不同辐射参数计算方法对 R_n 及 ET_0 计算值所产生的影响 ,以寻求较实用的辐射参数计算方法.

1 辐射参数计算方法及数据材料

1.1 辐射参数计算方法

由于辐射参数的计算方法较多 ,本文采用了前人计算辐射参数较常用的几种方法计算各辐射参数 ,并进一步计算 R_n ,具体方法见表 1.表中主要的参数有 : R_n ——净辐射 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_s ——地面接收到的日短波辐射 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_a ——大气边缘辐射 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_{so} ——晴空短波辐射 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_{ns} , R_{nl} ——净短波、净长波辐射 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; α ——冠层反射系数 ; n ——实际日照时数 ,h ; N ——最大可能日照时数 ,h ; ω_s ——日照时数角 ,rad ; φ ——地理纬度 ,rad ; δ ——日倾角 ,rad ; G_{sc} ——日光常数 ,取 $0.082 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$; σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数 ,取 $4.903 \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; Z ——计算地点海拔高程 ,m ,其他参数可参见原文献.

收稿日期 2007-06-01
基金项目 :“十一 五”国家科技支撑计划(2006BAD11B09-3) ;河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2006411211)
作者简介 张莉(1983—) ,女 ,江西吉安人 ,硕士研究生 ,主要从事节水灌溉理论与技术研究.

表 1 不同辐射参数计算方法

Table 1 Computational methods for different radiation parameters

计算方法	参 数	辐射参数计算公式
FAO-56PM ^[1]	R_n, R_s, R_a, R_{so}	$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d(\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s),$ $R_n = R_{ns} - R_{nl}, R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a, R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a$
方法 1 ^[9]	R_n, R_s	$R_n = -0.09 T_{\max} + 0.203 T_{\min} - (0.101 RH_{mean}) s + 0.687 R_s + 3.97,$ $R_s = K_T R_a (T_D)^{0.5}, T_D = T_{\max} - T_{\min}, K_T = 0.2 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.5}$
方法 2 ^[10]	R_s	$R_s = k_R R_a (T_{\max} - T_{\min})^{0.5}, k_R = 0.16$
方法 3 ^[11]	R_a	$R_a = \frac{24}{\pi} I_{sc} d(\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s),$ $\delta = \sin(-23.45^\circ) \cos \frac{360(10.5 + J)}{365.25}$
方法 4 ^[12]	R_a	$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d(\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s),$ $\delta = 0.4093 \sin \frac{2\pi(284 J)}{365}$
方法 5 ^[13]	R_a	$R_a = M_1 + C_3 \cos\left(\frac{2\pi J}{365} + C_4\right) + C_5 \cos\left(\frac{4\pi J}{365} + C_6\right)$
方法 6 ^[14]	R_{so}	$R_{so} = R_a \exp\left(\frac{-0.0018\rho}{K_t \sin \phi}\right),$ $\sin \phi = \sin\left[0.85 + 0.3 \varphi \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39\right) - 0.42 \varphi^2\right]$
方法 7 ^[14]	R_{so}	$R_{so} = (K_B + K_D) R_a, K_D = \begin{cases} 0.35 - 0.33 K_B & K_B \geq 0.15 \\ 0.18 + 0.82 K_B & K_B < 0.15 \end{cases}$ $K_B = 0.98 \exp\left[\frac{-0.00146\rho}{K_t \sin \phi} - 0.091\left(\frac{W}{\sin \phi}\right)^{0.25}\right]$
方法 8 ^[2]	R_{so}	$R_{so} = A \exp - \left(\frac{J - C}{B}\right)^2, A = 31.25 + 0.001113 Z,$ $B = 270 - 3.008 L, C = 172$
方法 9 ^[2]	R_{so}	$R_{so} = A' + B' \cos\left(\frac{2\pi J}{365} - C'\right), A' = 31.54 - 0.2734 + 0.0007813 Z,$ $B' = 0.2986 + 0.2678 L + 0.0004102 Z, C' = 2.92$

注：方法 6 和方法 7 均由 Allen^[14]提出，方法 6 适用范围较广，方法 7 是方法 6 的改进；方法 8 和方法 9 均由 Heermann 等^[2]提出，方法 8 采用指数函数计算，而方法 9 采用余弦函数计算。

1.2 气象资料

采用江西省鹰潭市余江县 2003 年气象资料，地理位置为北纬 28°15′，东经 116°55′，光热资源条件优越，年均气温 17.2~18.1℃，大于或等于 10℃积温 5627.6℃，无霜期 262.1 d，年均日照时数 1852.4 h，日照时数百分率 42%，太阳辐射 452.94 kJ/cm²，年均降水量 1752.1 mm，水资源总量较丰富，该地区降雨时空分布不均，季节性干旱严重，是典型的中亚热带低丘岗地区。

1.3 参数统计

为了分析和比较采用不同辐射参数计算方法计算所得 R_n 和 ET_0 ，采用日相对误差平均值和均方误差 2 个参数来表征计算结果之间的差别，具体计算公式如下：

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{C_{s,i} - C_{t,i}}{C_{s,i}} \right|}{N}$$

(1)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{s,i} - C_{t,i})^2}{N - 1}}$$

(2)

式中： MRE ——日相对误差平均值，%； $RMSE$ ——均方误差； $C_{s,i}$ ——FAO56-PM 公式计算所得 R_n 或 ET_0 值；

$C_{t,i}$ ——其他方法计算所得 R_n 或 ET_0 值. 本文采用 SPSS12.0 软件处理数据.

2 结果与分析

2.1 辐射参数计算方法对 R_n 计算值的影响

从表 2 可见,方法 5 和方法 7 辐射参数计算值与 FAO-56PM 公式辐射参数计算结果较一致, MRE 值分别为 6.5% 和 14.9%,均小于 20%, $RMSE$ 分别为 $2.24 MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 和 $4.59 MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,均小于 $5 MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$. 其 R_n 计算值与 FAO-56PM 公式 R_n 计算值也较一致, MRE 平均值分别为 6.7% 和 5.6%, $RMSE$ 分别为 $0.59 MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 和 $0.50 MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$. 其他计算方法辐射参数和 R_n 计算值与 FAO-56PM 公式相差较大. 以 FAO-56PM 公式为基础,分析 R_n 对不同辐射参数变化的敏感性. 由表 3 中的趋势线拟合方程可以看出,各辐射参数计算值对 R_n 计算值的影响不同. R_a 的计算值对 R_n 计算值的影响最大,且 R_a 计算所引起的误差会使 R_n 计算值误差呈增大的趋势. R_a 每波动 10% 会使 R_n 波动 11.87% 左右,其他辐射参数所产生的影响均小于 R_a . R_s 每波动 10% 会使 R_n 波动 6.4% 左右; R_{so} 对 R_n 的影响为非线性的.

表 2 不同计算方法与 FAO-56PM 公式 R_n 计算值比较及统计分析

Table 2 Comparison and statistical analysis of R_n calculated with different radiation formulas and FAO-56PM equation											
辐射参数	计算方法	参数值/($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)			$MRE/\%$	$RMSE/$ ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	R_n ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)			$MRE/\%$	$RMSE/$ ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
		平均	最小值	最大值			平均	最小值	最大值		
R_n	FAO-56PM						7.31	2.6	16.7		
	方法 1				126.4	9.03	9.75	- 1.1	19.3	50.2	3.76
R_s	FAO-56PM	11.62	2.1	26.3			7.31	2.6	16.7		
	方法 1	19.30	6.5	32.4	126.4	9.03	9.75	- 1.1	19.3	50.2	3.76
	方法 2	15.61	5.2	26.0	84.4	5.81	9.07	3.4	15.4	40.9	2.83
R_a	FAO-56PM	31.98	20.8	41.0			7.31	2.6	16.7		
	方法 3	25.00	- 9.0	43.9	53.7	20.89	5.44	- 6.8	18.3	65.2	6.45
	方法 4	32.16	19.6	43.6	30.9	11.28	7.25	2.4	17.0	32.8	3.01
	方法 5	32.51	21.1	41.0	6.5	2.24	7.48	2.7	16.8	6.7	0.59
R_{so}	FAO-56PM	24.01	15.6	30.8			7.31	2.6	16.7		
	方法 6	13.28	5.7	19.0	46.0	10.81	4.09	- 6.2	13.6	54.5	4.07
	方法 7	27.95	16.4	38.4	14.9	4.59	7.73	2.6	17.5	5.6	0.50
	方法 8	45.54	31.3	92.9	116.8	29.54	8.86	3.3	17.0	29.4	2.35
	方法 9	31.44	31.0	31.9	38.3	9.03	8.26	3.0	17.0	18.0	4.24

表 3 R_n 和 ET_0 对辐射参数 R_n, R_a, R_s, R_{so} 的敏感性分析拟合方程

Table 3 Fitting equations for the relationships of the radiation parameters R_n, R_a, R_s, R_{so} with R_n and ET_0		
辐射参数	R_n 拟合方程 (X : 辐射参数; Y : R_n)	ET_0 拟合方程 (X : 辐射参数; Y : ET_0)
R_n	$Y = X, R^2 = 1$	$Y = 0.7015X - 3 \times 10^{-15}, R^2 = 1$
R_a	$Y = 1.1872X + 2 \times 10^{-15}, R^2 = 1$	$Y = 0.825X - 3 \times 10^{-17}, R^2 = 1$
R_s	$Y = 0.64X + 10^{-17}, R^2 = 1$	$Y = 0.46X + 4 \times 10^{-15}, R^2 = 1$
R_{so}	$Y = -2.2762X^2 + 1.677X + 0.1799, R^2 = 0.9138$	$Y = -1.1684X^2 + 0.8606X + 0.0923, R^2 = 0.9138$

总之,方法 5 和方法 7 计算值与 FAO-56PM 公式计算值趋于一致. 敏感性分析表明,不同辐射参数对 R_n 计算值的影响有所不同, R_a 对 R_n 计算值的影响最大.

2.2 辐射参数计算方法对 ET_0 计算值的影响

将采用不同辐射参数计算方法的 ET_0 计算值与 FAO-56PM 公式的 ET_0 计算值进行比较分析,结果见表 4. 方法 5 和方法 7 MRE 分别为 4.5% 和 3.9%, $RMSE$ 分别为 $0.46 mm/d$ 和 $0.94 mm/d$. 其他方法计算所得 ET_0 与 FAO-56PM 公式均有差异. 以 FAO-56PM 公式计算所得 ET_0 为 x ,其他方法所得 ET_0 为 y 进行直线拟合,以 $y = ax + b$ 表示,分析二者相互关系. 结果表明,不同方法计算所得 ET_0 与 FAO-56PM 公式计算所得 ET_0 均表现出较好的线性关系(表 4). 以 FAO-56PM 公式为基础,对不同辐射参数对 ET_0 的影响进行敏感性分析,结果

见表 3。由表 3 的敏感性分析拟合方程可以看出， R_n 每波动 10% ET_0 波动 7% 左右，与 Saxtorf^[6]的研究结果一致。不同辐射参数对 ET_0 计算值的影响如下： R_a 的影响最大， R_a 每波动 10% 会使 ET_0 波动 8.25% 左右； R_s 每波动 10% 会使 ET_0 波动 4.6% 左右； R_{so} 对 ET_0 的影响为非线性的。

表 4 不同计算方法与 FAO-56PM 公式 ET_0 计算值比较

Table 4 Comparison and analysis of ET_0 calculated with different methods and FAO-56PM equation											
辐射参数	计算方法	参数值/(mm·d ⁻¹)			MRE/%	RMSE/ (mm·d ⁻¹)	拟合参数		F	标准差	R ²
		平均	最小值	最大值			a	b			
R_n	FAO-56PM	2.62	0.19	7.00							
	方法 1	3.22	-0.20	7.82	35.4	0.98	1.06	0.44	2 246.02	0.72	0.86
R_s	方法 1	3.22	-0.20	7.82	35.4	0.98	1.06	0.44	2 246.02	0.72	0.86
	方法 2	3.02	0.44	6.49	28.0	0.86	0.88	0.73	2 805.38	0.53	0.94
R_a	方法 3	2.08	-1.09	7.39	44.4	1.22	0.65	0.38	202.67	1.46	0.36
	方法 4	2.53	0.37	7.07	22.4	0.88	0.77	0.51	1 602.50	0.62	0.82
	方法 5	2.29	-0.07	6.17	4.5	0.46	1.01	0.02	59 649.33	0.13	0.99
	方法 6	1.91	-0.70	6.13	35.6	0.96	0.94	-0.54	4 016.94	0.47	0.96
R_{so}	方法 7	2.72	0.20	7.23	3.9	0.94	1.04	0.00	756 461.11	0.04	1.00
	方法 8	2.93	0.32	7.10	18.8	0.44	0.96	0.42	8 619.95	0.33	0.98
	方法 9	2.81	0.27	7.08	11.5	0.73	0.98	0.25	24 267.88	0.20	0.99

总之，不同方法计算所得 ET_0 与 FAO-56PM 公式计算值均有较好的线性关系，方法 5 和方法 7 计算值与 FAO-56PM 公式计算值趋于一致。

3 结 论

a. 采用不同辐射参数计算方法 R_n 计算值不同，方法 5 计算 R_a 、方法 7 计算 R_{so} 所得值与 FAO-56PM 公式计算值一致。 R_a 计算值对 R_n 的影响最大， R_a 每波动 10% 会使 R_n 改变 11.87%。 R_n 计算值对 ET_0 计算值也有很大影响， R_n 每波动 10% 会使 ET_0 改变 7%。

b. 采用不同辐射参数计算方法 ET_0 计算值也有不同。采用方法 5 和方法 7 所得 ET_0 计算值与 FAO-56PM 公式计算值一致。因数据来源于中亚热带低丘岗地区，因此在中亚热带低丘岗地区，可在计算 ET_0 时采用方法 5 和方法 7 估算 R_n 。

参考文献：

[1] ALLEN R G ,PEREIRA L S ,RAES D ,et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements FAO irrigation and drainage ,Paper No.56[R]. Rome : Food and Agriculture Organization of United Nations ,1998 :52-77 ,84-86.

[2] HEERMANN D F ,HARRINGTON G J ,STAHL K M. Empirical estimation of daily clear sky solar radiation[J]. Clim Appl Meteorol , 1985 ,24(3) :206-214.

[3] YODER R E ,ODHIAMBO L O ,WRIGHT W C. Effects of vapor-pressure deficit and net-irradiance calculation methods on accuracy of standardized Penman-Monteith equation in a Humid Climat[J]. Irrig Drain Eng ,2005 ,131(3) :228-237.

[4] 丁加丽 ,彭世彰 ,徐俊增 ,等 .基于温度资料的参考作物蒸发蒸腾量计算方法[J].河海大学学报 :自然科学版 ,2007 ,35(6) : 633-637.

[5] 张瑞美 ,彭世彰 .不同 e_a 计算方法对 Penman-Monteith 公式的影响[J].河海大学学报 :自然科学版 ,2006 ,34(6) :660-663.

[6] SAXTON K E. Sensitivity of Penman estimates of evapotranspiration equation[J]. Agric Forest Meteorol ,1975 ,15(3) :343-353.

[7] MEYER S J ,HUBBARD K G ,WILHITE D A. Estimating potential evapotranspiration : the efforts of random and systematic errors[J]. Agric Forest Meteorol ,1989 ,46(4) :285-296.

[8] NANDAGIRL L ,KOVOOR G M. Sensitivity of the food and agriculture organization Penman-Monteith evapotranspiration estimates to alternative procedures for estimation of parameters[J]. Irrig Drain Eng ,2005 ,131(3) :238-248.

[9] KOTSPOULOS S ,BABAJIMOPOULOS C. Analytical estimation of modified Penman equation parameters[J]. Irrig Drain Eng ,1997 ,123 (4) :253-256.

[10] HARGREAVES G L ,HARGREAVES G H ,RILEY J P. Agricultural benefits for Senegal River Basin[J]. Irrig Drain Eng ,ASEC ,1985 , 111 :113-124.

[11] KREIDER J F. Medium and high temperature solar process[M]. New York :Academic , 1979.

[12] ALLEN R G , JENSEN M E , WRIGHT J L , et al. Operational estimates of reference evapotranspiration[J]. Agron J , 1989 , 81 : 650-662.

[13] IRMAK S. Predicting daily net radiation using minimum climatological data[J]. Irrig Drain Eng , 2003 , 29(4) : 256-269.

[14] ALLEN R G. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation[J]. Irrig and Drain Engng Div , ASCE , 1996 , 122(2) : 97-106.

Influence of calculation methods for radiation parameters
on the calculated reference crop evapotranspiration

ZHANG Li^{1, 2} , PENG Shi-Zhang¹ , LUO Yu-feng¹ , DING Jia-Li¹ , XU Jun-Zeng¹

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

Abstract : Net radiation , R_n , and reference crop evapotranspiration , ET_0 , were calculated using FAO-56PM equation and other formulas , and the results from each method were compared . The results show that different radiation parameters have different influences on R_n , and the calculated extraterrestrial radiation has a very significant influence on R_n . The R_n values calculated from the Irmak Method and the Allen Method and the corresponding ET_0 are almost identical to the results from FAO-56PM equation . This indicates that the Irmak Method and the Allen Method can be used to calculate ET_0 in hillock areas in the middle subtropical zone . Sensitivity analyses show that one unit variation in R_n will produce 0.7 unit variation in ET_0 .

Key words : reference crop evapotranspiration ; FAO-56PM equation ; net radiation ; radiation parameters

·简讯·

第 2 届岩土工程减灾与修复国际会议将在南京召开

防灾和修复越来越成为岩土工程师和地质工程师主要关心的问题之一 . 继 2005 年 12 月在新加坡成功召开首届岩土工程减灾与修复国际会议后 , 国际土力学和岩土工程协会 TC39 和 TC4 技术委员会、多国岩土工程减灾与修复联合工作组织、河海大学将于 2008 年 5 月 30 日至 6 月 2 日在南京联合举办第 2 届岩土工程减灾与修复国际会议(GEDMAR08) . 此次会议将再次为工程人员、学者、施工材料和设备制造商、销售商 , 以及政府官员提供一个展现和交流关于岩土工程防灾和修复主题最新发展的良好机会 .

本次大会旨在通过科研和发展促进岩土工程防灾和修复能力 , 会议主题包括 (a) 近来和过去自然灾害的实录 (涉及地震、海啸和滑坡等) (b) 天然和海岸灾害的机理 (涉及土动力学、液化、地质和环境影响、地震模型分析、地表和水下滑坡及地震等) (c) 防灾和修复技术 (地基处理、防震和防其他自然灾害设计、海岸防护等) (d) 风险分析和地质灾害预测 (风险评价、后果评价和可靠性分析等) .

与本次大会同时举行的还有第 1 届大坝长效和渗流特性国际会议 . 有关本次大会的详情可关注大会网址 : <http://www.geohohai.com/gedmar08> .

(本刊编辑部供稿)