

甘肃中东部半干旱区参考作物蒸散量 多种计算方法的比较研究

黄彩霞¹,赵德明²,王保福²

(1.甘肃农业大学水利水电工程学院,甘肃 兰州 730070;2.甘肃省工程咨询中心,甘肃 兰州 730030)

摘 要:为明确甘肃中东部丘陵沟壑地区参考作物蒸散量(ET_0)在气象资料短缺条件下的计算方法,依据6个气象站的长系列资料,以FAO Penman-Monteith方法为标准,对7种 ET_0 计算方法进行评价。结果表明:Hargreaves与FAO Penman-Monteith吻合最好,其次为Jensen-Haise,各地区年均标准偏差(RMSE)分别为120.0 mm、446.1 mm。Penman、FAO-17 Penman、FAO-24 Radiation、Priestley-Taylor计算结果偏高,各地区年均RMSE在312.1~1383.4 mm间,以FAO-24 Radiation差异最大。8种方程计算的年内月均 ET_0 趋势基本呈单峰曲线,峰值出现在7月份。Hargreaves、Jensen-Haise两种方程3-9月差异大于1-2月和10-12月份;Penman、FAO-17 Penman、FAO-24 Radiation、Priestley-Taylor、Makkink 5种方程7月份差异最大,地区间表现不一。不同的方程与FAO Penman-Monteith方程均存在显著的线性相关关系($0.994^{**} \leq R \leq 0.8743^{**}$),回归系数 t 检测均达到显著水平,以FAO Penman-Monteith方程为基础对各方程进行矫正是可行的。

关键词:参考作物蒸散量;Penman-Monteith方法; ET_0 的计算方法;计算结果;评价;半干旱区

中图分类号:S152.7⁺4 **文献标志码:**A

A comparative study on calculation methods of reference crop evapotranspiration in the semi-arid region of Central Eastern Gansu

HUANG Cai-xia¹, ZHAO De-ming², WANG Bao-fu²

(1. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Engineering Consulting Center, Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: In order to obtain simplified method to calculate evapotranspiration (ET_0) of reference crop when meteorological data in hilly and gully regions of central east Gansu Province is lacking. Based on long series data from 6 meteorological stations, seven methods for ET_0 calculation were evaluated using the FAO Penman-Monteith as the reference method. The results showed that the best match with FAO Penman-Monteith was Hargreaves, followed by Jensen-Haise with average annual standard deviations(RMSE) of 120.0 mm and 446.1 mm, respectively. The calculated results by using Penman, FAO-17 Penman, FAO-24 Radiation, and Priestley-Taylor were higher than that of other two methods above, and the average annual RMSE was in the range of 312.1~1383.4 mm, but the results from FAO-24 Radiation differentiated the most from that of FAO Penman-Monteith. The average monthly ET_0 data of all eight models showed bell shaped curves with a peak in the month of July. The difference of Hargreaves and Jensen-Haise models from the reference method in Mar. to Sept. were greater than that in Jan. to Feb. and in Oct. to Dec. Penman, FAO-17 Penman, FAO-24 Radiation, Priestley-Taylor, and Makkink had the greatest difference appeared in July and they were various among regions. There were significant linear correlations between the data from all the models and that from the FAO Penman-Monteith model with the regression coefficients in the range of $0.994^{**} \sim 0.8743^{**}$. Therefore, it is feasible to correct the other equations using FAO Penman-Monteith model.

Keyword: reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith method; ET_0 calculation method; calculation result; evaluate; semi-arid area

参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)是区域水资源合理利用和评价、生态系统建模、作物需水量估算的关键因子,对灌溉系统设计、水资源管理具有重要意义^[1]。为准确计算不同气候环境下的参考作物蒸散量,国内外进行了大量的研究并提出了基于温度、风速、辐射及综合气象因子计算的多种计算方程^[2],其中,FAO Penman-Monteith 方程得到较广泛的认可,通常作为参照与其它方法进行比较,但由于该方程要求较多的气象参数,限制了其在气象资料短缺区的使用。研究表明,一些基于温度或辐射的简单公式在较多地区表现出了广泛的适宜性,同时,不同计算方法间存在显著的线性关系^[3],因此,可根据当地具体的气象条件对 ET_0 进行严格的修正^[4-6]。樊军等^[7]对黄土区 ET_0 多种计算方法对比表明,Priestley-Taylor 计算方法与 Penman-Monteith 方法结果接近,FAO-Rad, FAO-BC, Hargreaves 与 Makkink 4 种方法与 Penman-Monteith 方法存在明显的结果和地域差异。李玉霖等^[8]对 FAO Penman-Monteith、Priestley-Taylor、Makkink、Penman 和 FAO-24 Blaney-Griddle 公式等 5 种方法进行比较,Penman 公式和 FAO-24 Blaney-Griddle 公式得到的参考作物蒸散量与 FAO Penman-Monteith 方程结果相近,Priestley-Taylor 公式和 Makkink 公式的计算结果偏差较大,还有研究表明 Hargreaves 与 FAO 56-PM 吻合最好^[7-8]。

甘肃中东部地区主要分布在黄河干流以东、西秦岭以北地区,占全省面积的 1/4 左右,属典型的大陆性季风气候,是典型的干旱与半干旱区。该区降水时空分布不均,水土流失严重,干旱频繁发生,特别是随着气候变化和社会经济的发展,干旱的严重程度和影响程度将有可能进一步加剧^[9]。由于农业生产在这一区域的社会生产中占重要地位,为缓解该区域水资源不足瓶颈制约,已开展了多种雨水资源高效利用技术和项目建设^[10],目前有关集蓄灌溉的利用效率持续提高、管理制度和规划的完善等成为人们广泛关注的问题^[11]。因此,评价和确定当地参考作物蒸发蒸腾量及计算方法对进一步建立健全高效的灌溉制度,优化水资源管理,构建高效节水农业具有积极作用。本文利用典型气象站点长系列逐日气象资料,以 FAO Penman-Monteith 计算方法为参照标准,计算验证多种公式在该区域的适用性。

1 方法与材料

1.1 参考作物腾发量的计算

(1)FAO Penman-Monteith (FPM) 公式^[12]。是 FAO 推荐计算 ET_0 的标准方法,根据参考作物蒸散量的新定义:植物高度为 0.12 m,冠层阻抗为 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,反射率 0.23,类似于地表开阔,高度一致,生长旺盛完全覆盖地表而不缺水的草地蒸发与蒸腾量,属综合法范畴。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中, ET_0 为参考作物蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), R_n 为地表净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), e_s 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa), T 为 2 m 高度处日平均气温($^{\circ}\text{C}$), U_2 为 2 m 高处日风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), γ 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$), Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。以下与此公式符号相同者意义也相同。

(2)Penman (PM) 公式^[13],属综合法范畴。

$$ET_0 = \frac{\Delta R_n + \gamma \times 0.16(1 + 0.41V) + (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma}$$

式中, V 为 10 m 高处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

(3)FAO - 17 Penman (17PM) 公式^[14],属综合法范畴。

$$ET_0 = \frac{\frac{P_o}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} R_n + 0.26(e_s - e_a)(1 + 0.54U_2)}{\frac{P_o}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} + 1}$$

式中, P_o , P 分别为海平面气压与站点地面气压(hPa)。

(4)FAO - 24 Radiation (24PM) 公式^[15]。该方法源于 Makkink 方程,主要根据太阳辐射资料来估算参考蒸散量,属于辐射法范畴。

$$ET_0 = a + b \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right)$$

式中, $a = -0.3$; $b = 1.066 - 0.013RH_{\text{mean}} + 0.045u_d - 0.0002RH_{\text{mean}}u_d - 0.0000315RH_{\text{mean}}^2 - 0.011u_d^2$, u_d 为白昼平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); RH_{mean} 为平均相对湿度(%), R_s 为太阳辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

(5)Priestley - Taylor (PT) 公式^[16]。是 Penman 方程的一种简化形式,属辐射法范畴。

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta/\gamma}{1 + \Delta/\gamma} (R_n - G)$$

式中, α 为常数,取值 1.26。

(6)Hargreaves (HA) 公式^[17]。该方法提出的仅用最高、最低气温计算 ET_0 的简单方法,是典型的温度方法。

$$ET_0 = 0.0023(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}R_a$$

(7)Jensen - Haise (JH) 公式^[18]。属辐射法范畴。

$$ET_0 = \frac{C_r(T - T_x)R_s}{\lambda}$$

式中, C_r 为温度系数, λ 为蒸发潜热 ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), R_s 为净短波辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T 为平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), T_x 为在温度轴上的截距 ($^{\circ}\text{C}$)。

(8)Makkink (MA) 公式^[19]。属辐射法范畴。

$$ET_0 = C_r \frac{\Delta}{\lambda(\Delta + \gamma)}R_s$$

式中, C_r 为修正系数, 取 0.61; Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

1.2 观测点选择及气象数据来源

本文所选范围介于 $104^{\circ}32' \sim 108^{\circ}42'E$ 和 $34^{\circ}05' \sim 37^{\circ}09'N$ 之间,包括庆阳、平凉、定西、天水 4 个地区,观测点按照“十”分布,共选取 6 个气象站点,气象资料来自于中国气象局,其中临洮县 ($103^{\circ}51'E, 35^{\circ}21'N$, 海拔 1 894 m)、秦州区 ($104^{\circ}45'E, 34^{\circ}35'N$, 海拔 1 142 m) 为 1951 - 2013 年 63 a 逐日气象资料;通渭县 ($105^{\circ}14'E, 35^{\circ}13'N$, 1 768 m), 静宁县 ($105^{\circ}43'E, 35^{\circ}31'N$, 海拔 1 660 m)、灵台县 ($107^{\circ}37'E, 35^{\circ}04'N$, 海拔 960 m) 和秦安县 ($105^{\circ}40'E, 34^{\circ}52'N$, 1 054 m) 为 1960 - 2013 年 54 a 逐日气象资料,包括平均气温、最高气温、最低气温,水汽压、风速、日照时数、气压等。

1.3 数据分析方法

本文利用 Excel 和 dps 统计软件。使用误差分析和线性回归比较计算结果。主要统计变量有平均偏差 (MBE)、标准偏差 (RMBE),用公式表示为:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n}$$

$$RMBE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}$$

式中, y_i 为计算值, x_i 为利用 PM 公式计算的 ET_0 。

2 结果与分析

2.1 各方程年 ET_0 值计算结果比较及评价

图 1 是采用不同方程计算的多年 ET_0 均值,不同方程计算的各地区 ET_0 趋势基本一致,但同一地区不同方程间存在明显差异。与 FAO Pennman - Monteith 比较可以看出 (图 2, 图 3), Hargreaves 与 FAO Pennman - Monteith ET_0 最接近,各地区平均 MBE 为 - 109.2 mm、RMBE 为 120.0 mm,说明 Hargreaves 计算的 ET_0 总体偏小,这与刘晓英等^[20]对华北地区 ET_0 计算结果一致。Jensen - Haise 的计算结果仅次于 Hargreaves,各地区平均 MBE 为 - 433.2 mm、RMBE 为 446.1 mm。其它 5 种方程中 Pennman、FAO - 17 Penman、FAO - 24 Radiation、Priestley - Taylor 计算结果偏高,各地区平均 MBE 在 3 069.9 ~ 1 359.9 mm 之间、RMBE 在 3 122.1 ~ 1 383.4 mm 间,以 FAO - 24 Radiation 相差最大,各地区 ET_0 是 FAO Pennman - Monteith 方程的 2.84 ~ 2.59 倍; Priestley - Taylor、FAO - 17 Penman、Pennman 也分别达到 1.86 ~ 1.68 倍, 1.46 ~ 1.24 倍、1.28 ~ 1.14 倍。Makkink 计算结果偏低,差异较大, MBE 为 - 941.0 mm、RMBE 为 956.3 mm。采用 t 双侧检验表明,各区域不同方程与 FAO Pennman - Monteith 方法计算的 ET_0 , 回归系数 t 在 298.56 ~ 6.85 之间,在 0.01 置信水平上具有显著差异 ($t_{0.01} = 2.68$),因此,在西北干旱区采用其它方程计算 ET_0

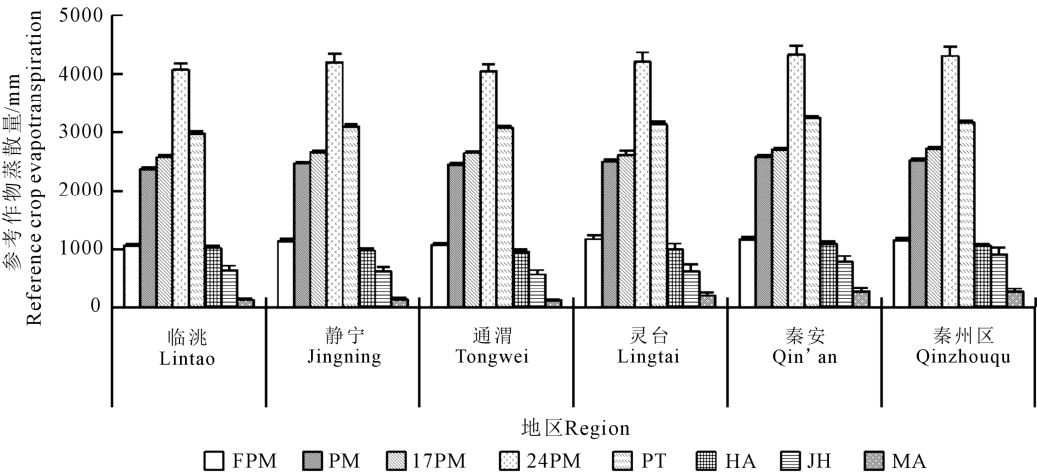


图 1 不同方程计算的各地区参考作物蒸散量年均值
Fig.1 The average annual ET_0 calculated for various districts using different methods

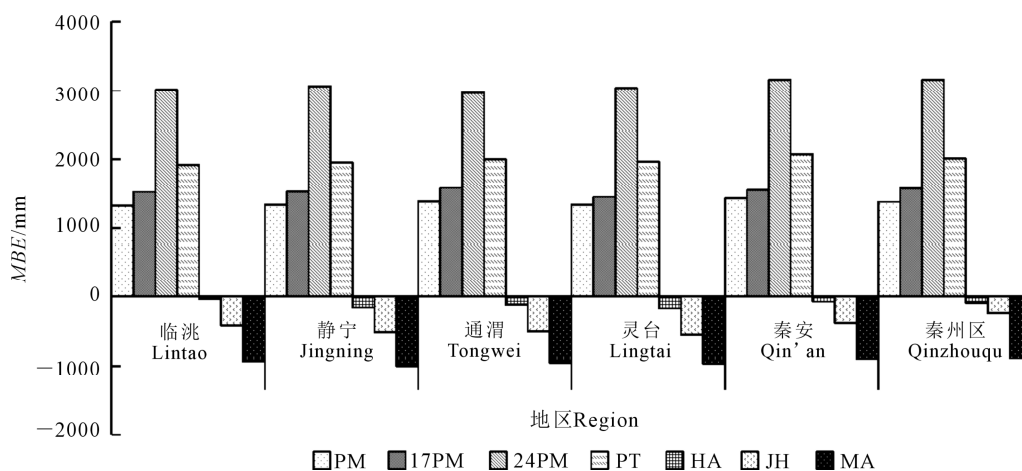


图 2 不同方程与 FAO Penman - Monteith 计算的 ET_0 间的平均偏差

Fig.2 The MBE of calculated ET_0 values using FAO Penman - Monteith method and other methods

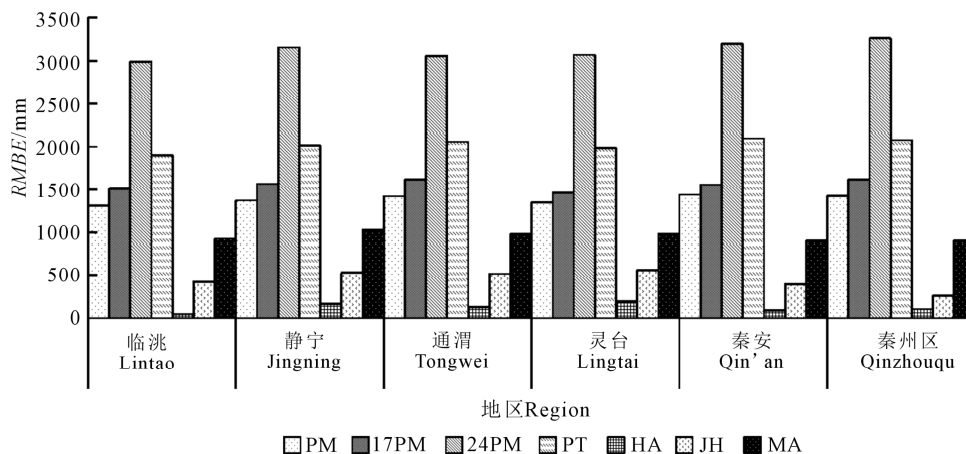


图 3 不同方程与 FAO Penman - Monteith 计算的 ET_0 间的标准偏差

Fig.3 The RMBE between FAO Penman - Monteith method and other methods for calculating ET_0

年值尚需矫正后方可使用。

以 FAO Penman - Monteith 方法为自变量,其它方程为因变量进行线性回归表明(表 1)。不同的方程与 FAO Penman - Monteith 方程均存在显著的线性相关关系($0.994^{**} \leq R \leq 0.8743^{**}$)。各方程中,Hargreaves 方程回归系数(b)在 0.897 1 ~ 0.988 4 间,与 FAO Penman - Monteith 拟合性高,回归系数 t 检测达到显著水平;Penman、FAO - 17 Penman、FAO - 24 Radiation、Priestley - Taylor 4 种方程回归系数(b)远大于 1, Jensen - Haise 和 Makkink 方程回归系数(b)均小于 1,说明不同地区不同方程对 ET_0 的计算同样存在高估或低估的问题。各方程回归系数 t 检测均达到显著水平,说明与 FAO Penman - Monteith 方程 ET_0 存在显著的线性关系,对各方程采用回归方程进行矫正可行的。

2.2 各方程月均 ET_0 值计算结果比较

图 4 可以看出,6 个气象站 8 种方程计算的月

均 ET_0 趋势基本一致,年内 ET_0 呈单峰曲线,峰值出现在 7 月份。与 FAO Penman-Monteith 计算的月 ET_0 值相比,Hargreaves 方程计算结果最相近,曲线几乎重合,各地区间年内月均 ET_0 RMBE 为 12.05 mm,地区差异以临洮最小,年内月均 ET_0 RMBE 为 6.69 mm,灵台最大,RMBE 为 18.48 mm,其它地区差异相近,RMBE 为 14.33~10.59 mm。各地区月份间差异 3-9 月(各地区平均 RMBE 为 14.02~19.55 mm)高于 1-2 月(各地区平均 RMBE 为 9.87~6.6 mm)和 10-12 月(各地区平均 RMBE 为 6.38~5.53 mm)。

Jensen-Haise 的计算结果与 Penman - Monteith 也较接近,各地区间年内月均 ET_0 RMBE 为 38.99 mm,地区差异以秦州区最小,年内月均 ET_0 RMBE 为 27.89 mm,灵台最大,RMBE 为 48.62 mm。各地区月份间最大差异出现在 4 月份,平均 RMBE 为 53.53 mm,最小值出现在 12 月份,平均 RMBE 为 22.59 mm。

表 1 FAO Penman-Monteith 与其它方程间的回归系数

Table 1 Regression coefficients between FAO Penman-Monteith method and other methods for calculating ET_0

地区 Region	系数 Coefficient	PM	17PM	24PM	PT	HA	JH	MA
临洮 Lintao	a	-0.7166	-0.5725	1.7593	-0.9388	-0.076	-0.88	-0.1722
	b	2.4874	2.6254	3.2366	3.1288	0.9884	0.9077	0.1769
	R	0.9989 **	0.9994 **	0.996 **	0.9989 **	0.998 **	0.9839 **	0.8982 **
	t	4.8763	5.1457	7.3965	4.9615	3.472	12.2958	6.2553
静宁 Jingning	a	-0.9862	-0.8426	1.2693	-1.2749	-0.2248	-1.0798	-0.2376
	b	2.4897	2.6114	3.292	3.1313	0.9326	0.8946	0.1958
	R	0.9985 **	0.9989 **	0.996 **	0.9985 **	0.9971 **	0.9828 **	0.8954 **
	t	5.6337	5.89	4.7212	4.1556	5.6164	4.0228	5.1939
通渭 Tongwei	a	-0.4922	-0.3339	1.447	-0.6482	-0.0607	-0.8474	-0.1726
	b	2.4517	2.5817	3.2654	3.0834	0.9122	0.8298	0.1713
	R	0.9993 **	0.9994 **	0.9965 **	0.9993 **	0.9977 **	0.9787 **	0.9044 **
	t	4.9776	5.2301	6.8516	5.034	5.7364	10.7712	6.0305
灵台 Lingtai	a	-1.2234	-1.152	1.2615	-1.5783	-0.2265	-1.1074	-0.4178
	b	2.5199	2.5949	3.203	3.1701	0.924	0.8772	0.2994
	R	0.9975 **	0.9975 **	0.9972 **	0.9974 **	0.9982 **	0.9837 **	0.8743 **
	t	4.5731	4.7325	7.1826	4.727	9.0602	14.4893	7.1304
秦安 Qinan	a	-0.2948	-0.1917	2.1788	-0.4071	0.1215	-1.0008	-0.4803
	b	2.3125	2.3828	3.0332	2.9067	0.8971	0.9878	0.3818
	R	0.9992 **	0.9994 **	0.9958 **	0.9991 **	0.9972 **	0.9808 **	0.8646 **
	t	5.1993	5.3544	7.4254	5.2214	2.9544	9.2921	6.5658
秦州区 Qinzhouqu	a	-0.6842	-0.523	1.9699	-0.899	-0.0091	-1.2058	-0.4932
	b	2.4102	2.5299	3.1196	3.0298	0.9217	1.1729	0.3852
	R	0.9987 **	0.9991 **	0.9961 **	0.9986 **	0.9976 **	0.984 **	0.8749 **
	t	4.9606	5.2347	7.5625	5.0433	4.7224	4.5193	6.9805

注: * 表示显著相关, ** 表示极显著相关。
Note: * indicate significant correlation, ** indicate highly significant correlation.

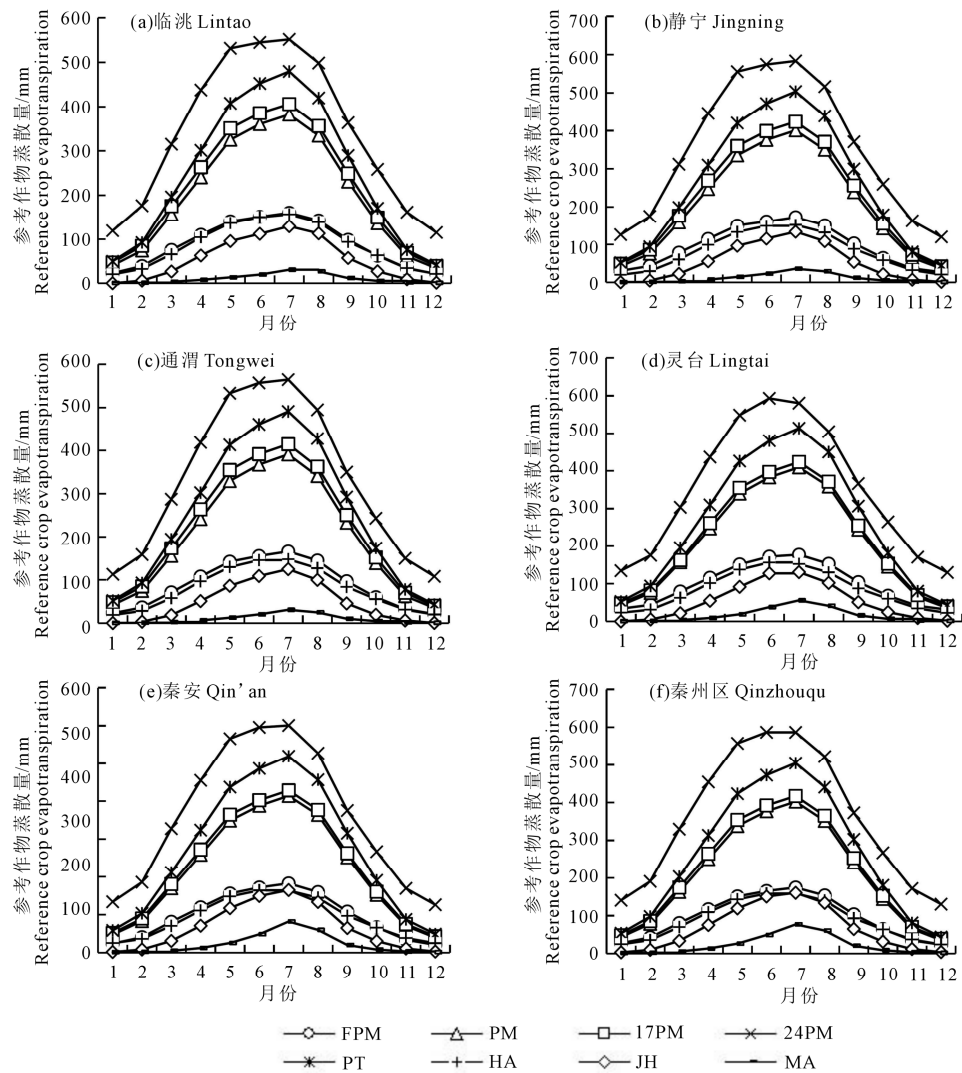


图 4 不同方程计算的各地区参考作物蒸散量月均值

Fig.4 The average month of ET_0 calculating in different districts using different methods

Pennman、FAO-17 Penman、FAO-24 Radiation、Priestley-Taylor、Makkink 5 种方程的计算结果都与 FAO Penman-Monteith 相差较大且差异程度随着 ET_0 的增大而增大, 5 种方程 RMBE 呈单峰曲线, 峰值出现在 6-7 月份, 其中, Pennman、FAO-17 Penman、FAO-24 Radiation、Priestley-Taylor 4 种方程计算结果偏高, 以 FAO-24 Radiation 差异最明显, 各地区间年内月均 ET_0 RMBE 为 257.42 mm, 其次为 Priestley-Taylor, RMBE 为 166.56 mm, FAO-17 Penman RMBE 为 128.48 mm, Pennman RMBE 为 114.19 mm; Makkink 计算结果总体偏小, 明显低估了 ET_0 , 各地区间年内月均 ET_0 RMBE 为 79.19 mm。

3 结论与讨论

1) 以 FAO Penman-Monteith 方法为参照标准, 对其它方法进行验证表明: 在甘肃中东部地区 Hargreaves 公式计算的 ET_0 值较 FAO Penman-Monteith 方法更接近, 其次为 Jensen-Haise 公式。说明在缺少辐射和风速资料的地区, Hargreaves 和 Jensen-Haise 公式可以获得较好的计算结果, 这与赵璐等^[21]对川中丘陵地区研究结果一致, 胡庆芳等^[22]研究也表明, 校正后的 Hargreaves 公式, 对于西北地区大部分站点在年内各月均具有较强的适用性。Pennman、FAO-17 Penman、FAO-24 Radiation、Priestley-Taylor 计算结果差异较大, 计算结果偏高, Makkink 总体也偏低, 这与樊军等^[7]研究结果一致, 但与李玉霖等^[8]、毛飞等^[13]研究结果不一, 导致不同方程计算偏差的原因是各种方程各自选用了不同的辐射项和动力项计算公式。

2) 不同方程与 FAO Penman-Monteith 方程均存在显著的线性相关关系 ($R \geq 0.8743^{**}$), 在实际应用中, 可以根据气候条件的差异适当调整回归系数, 以便准确地估算参考作物腾发量^[2,7,23]。

3) 不同方程年内 ET_0 呈单峰曲线, 峰值出现在 7 月份, 方程间的差异随 ET_0 值的增大而增大。其中, Hargreaves 方程各地区月份间差异 3-9 月 (各地区平均 RMBE 为 14.02~19.55 mm) 高于 1-2 月 (各地区平均 RMBE 为 9.87~6.6 mm) 和 10-12 月, 地区间差异随月份不同而不同, 这可能与风速和降雨的影响有关^[6,24], 胡庆芳认为, Hargreaves 公式无法有效描述 ET_0 中的空气动力学项是计算误差产生的主要原因^[22]。Jensen-Haise 方程各地区月份间最大差异出现在 4 月份, 平均 RMBE 为 53.53 mm, 最小值出现在 12 月份, 平均 RMBE 为 22.59 mm。左德鹏等对不同气候区基于辐射潜在蒸散量比较表

明, Jensen-Haise 方程计算误差与气象站点的湿度有关, 通常随着湿度的增大误差增大, 冬季误差小夏天误差大^[25]。Pennman、FAO-17 Penman、FAO-24 Radiation、Priestley-Taylor、Makkink 5 种方程的计算结果都与 FAO Penman-Monteith 相差较大且随着 ET_0 的增大而增大, 主要是因为气象因子对辐射项和空气动力项的不同影响造成, 有关太阳辐射数据国内尚存在时间短、地区少、数据质量不高等问题, 因此, 在选用公式时, 还需要根据资料状况做进一步对比分析工作。

参考文献:

- [1] 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发量计算方法评价[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1497-1505.
- [2] Helge Bormann. Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations[J]. Climatic Change, 2011, 104: 729-753.
- [3] Lu J, Sun G, McNulty S G, et al. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States [J]. J Am Water Resour As, 2005, 41(3): 621-633.
- [4] Smith M. The application of climatic data for planning production and management of sustainable rainfed and irrigated crop[J]. Agricultural Water Management, 2000, 103(1-2): 99-108.
- [5] 李玲玲, 黄高宝. 绿洲灌区参考作物蒸散量的测算[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 142-148.
- [6] 刘钰, Pereira 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, (6): 27-33.
- [7] 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.
- [8] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 372-376.
- [9] 钱正安, 吴统文, 宋敏红, 等. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 28-38.
- [10] 高雅玉, 田晋华, 宋佳奇. 黄土高原半干旱区雨洪资源高效管理利用技术模式研究[J]. 中国水土保持, 2015, (12): 64-67.
- [11] 高雅玉, 田晋华. 黄土高原半干旱区雨洪资源集蓄利用技术研究进展[J]. 中国科技成果, 2015, (16): 37-41.
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56: Crop Evapotranspiration [R]. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations, 1998: 293.
- [13] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. 应用气象学报, 2000, (S1): 128-135.
- [14] Gong Y S. Comparison of the reference evapotranspiration estimated by the Penman Monteith and FAO-17 Penman methods [J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1995, 21(1): 112-124.
- [15] Chiew F H S, Kamaladasa N N, Malano I H M. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia [J]. Agricultural Water Management, 1995, 28: 9-21.

- [16] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using largescale parameters [J]. Monthly Weather Review, 1972, 100: 81-92.
- [17] Hargreaves G H. Estimation of potential and crop evaporation[J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17: 701-704.
- [18] Jensen M E, Haise H R. Estimating evapotranspiration from solar radiation [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1963, 89: 15-41.
- [19] Makkink G F. Testing the Penman formula by means of Lysimeters[J]. Journal of Institute of Water Engineering, 1957, 11(3): 277-288.
- [20] 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.
- [21] 赵璐, 梁川, 崔宁博, 等. 不同 ET_0 计算方法在川中丘陵地区的比较及改进[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 92-97.
- [22] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 160-167.
- [23] 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. 农业工程学报, 2012, 28(20): 121-126.
- [24] 王新华, 郭关华, 徐中民. 分别利用 Hargreaves 和 PM 公式计算西北干旱 ET_0 的比较[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 21-25.
- [25] 左德鹏, 徐宗学, 程磊, 等. 基于辐射的潜在蒸散量估算方法实用性分析[J]. 干旱区地理, 2011, 34(4): 565-574.

(上接第 25 页)

- [3] 刘兴舟, 李猛, 张建, 等. 皖北地区主栽玉米品种密度对产量及其构成因子的影响[J]. 中国农学通报, 2014, (18): 145-150.
- [4] 段敏. 陕西关中地区小麦玉米养分资源管理及其高产探索研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [5] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 等. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(8): 51-61.
- [6] 佚名. 农业部关于“镰刀弯”地区玉米结构调整的指导意见[J]. 中华人民共和国农业部公报, 2015, (11): 111.
- [7] 白彩云, 李少昆, 张厚宝, 等. 郑单 958 在东北春玉米区生态适应性研究[J]. 作物学报, 2010, 36(2): 296-302.
- [8] 戴明宏, 赵久然, 杨国航, 等. 不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1585-1595.
- [9] Duveck D N. The Contribution of Breeding to Yield Advances in maize (*Zea mays*, L.) [J]. Advances in Agronomy, 2005, 86(05): 83-145.
- [10] 王楷, 王克如, 王永宏, 等. 密度对玉米产量 ($>15\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 及其产量构成因子的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3437-3445.
- [11] 李淑华, 许明学, 张亚辉, 等. 2012 年美国玉米高产竞赛简介[J]. 玉米科学, 2013, (3): 154-156.
- [12] 赵久然, 王荣焕. 中国玉米生产发展历程、存在问题及对策[J]. 中国农业科技导报, 2013, (3): 1-6.
- [13] 李锦. 秸秆还田及其基础上氮肥减量对土壤碳氮含量及作物产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [14] 王力坚. 陕西省地下水资源分析与评价[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
- [15] 赵松岭, 李凤民, 张大勇, 等. 作物生产是一个种群过程[J]. 生态学报, 1997, 17(1): 102-106.
- [16] 赵明, 李建国, 张宾, 等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1566-1573.
- [17] 陈国平, 王荣焕, 赵久然. 玉米高产田的产量结构模式及关键因素分析[J]. 玉米科学, 2009, 17(4): 89-93.
- [18] 薛珠政, 卢和顶, 林建新, 等. 种植密度对玉米单株和群体效应的影响[J]. 玉米科学, 1999, (2): 52-54.
- [19] Echarte L, Luque S, Andrade F H, et al. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993[J]. Field Crops Research, 2000, 68(1): 1-8.
- [20] Bavec F. Effect of maize plant double row spacing on nutrient uptake, leaf area index and yield [J]. Rostlinna Vyroba-UZPI (Czech Republic), 2001, 47(3): 135-140.
- [21] Venkatesan Sundaresan. Control of seed size in plants [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, (50): 17887-17888.
- [22] 李少昆, 王崇桃. 作物株型和冠层结构信息获取与表述的方法(综述)[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 1997, (3): 81-87.
- [23] Tollenaar M. Genetic improvement in grain yield of commercial maize hybrids grown in Ontario from 1959 to 1988 [J]. Crop Sci, 1989, 29: 1365-1371.
- [24] 佟屏亚, 程延年. 玉米密度与产量因素关系的研究[J]. 农业新技术, 1995, (1): 23-25.
- [25] 刘伟, 张吉旺, 吕鹏, 等. 种植密度对高产夏玉米登海 661 产量及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1301-1307.
- [26] 张颖. 不同产量类型春玉米养分吸收特点及其分配规律的研究[J]. 玉米科学, 1997, 5(3): 70-72.
- [27] 杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 等. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 315-323.
- [28] 刘化涛, 黄学芳, 黄明镜, 等. 不同品种与种植密度对旱地玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 山西农业科学, 2010, 38(9): 32-34.
- [29] 李栋浩, 姜雪连, 佟玲. 种植密度对制种玉米根冠生长及耗水量的影响[J]. 排灌机械工程学, 2014, 32(12): 1091-1097.
- [30] 陈光荣, 高世铭, 张国宏, 等. 种植方式与密度对旱作大豆产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 39-41.
- [31] 周婷婷, 李军, 司政邦. 种植密度与品种类型对渭北旱地春玉米产量和光能利用的影响[J]. 西北农林科技大学学报自然科学版, 2015, 43(11): 54-62.
- [32] 邵立威, 王艳哲, 苗文芳, 等. 品种与密度对华北平原夏玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(3): 182-188.