

王晓晨, 朱忠礼, 季辰, 等. 2016. 几种蒸散计算方法在怀来地区的适用性研究. 气象, 42(11):1395-1401.

几种蒸散计算方法在怀来地区的适用性研究^{*}

王晓晨¹ 朱忠礼¹ 季 辰¹ 施生锦²

1 北京师范大学遥感科学国家重点实验室/地理学与遥感科学学院, 北京 100875

2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094

提 要: 作物蒸散量即为植株蒸腾与裸间蒸发之和, 准确地测定作物实际蒸散量, 对研究农作物节水种植技术、加强水资源管理和制定合理的灌溉计划具有十分重要的意义。文章应用 2013 年生长季(5—10 月)自动称重式蒸渗仪实测河北怀来地区夏玉米的蒸散量, 从月、日两个时间尺度评价 Penman-Monteith(FAO P-M)、Hargreaves、Priestley-Taylor 三种基于参考作物蒸散量计算实际蒸散的方法在怀来地区的适用性, 结果表明: (1) 三种方法计算的夏玉米月、日实际蒸散相对于蒸渗仪实测结果均存在一定偏差, FAO P-M 方法与 Hargreaves 方法表现较好, 准确度相差不大, Priestley-Taylor 方法准确性最差; (2) 影响实际蒸散计算结果的主要气象因子为太阳净辐射和温度, Hargreaves 方法计算结果在怀来地区可信度较高; (3) Hargreaves 方法所需参数较少, 在计算量方面占有很大的优势, 在怀来地区适用性最好。

关键词: 实际蒸散, 蒸渗仪, 时间尺度, 适用性评价

中图分类号: P426

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.11.012

Applicability of Evapotranspiration Estimation Methods in the Huailai Region of Hebei Province

WANG Xiaochen¹ ZHU Zhongli¹ JI Chen¹ SHI Shengjin²

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094

Abstract: The evapotranspiration of the cropland is the sum of plant transpiration and soil evaporation. Assessment of actual evapotranspiration of crops is very important for the water saving technology, water resource management and reasonable irrigation plan. In this paper, the actual evapotranspiration of summer corn measured by automatic weighing lysimeter during the growing season (April to September) in 2013 is used to evaluate the applicability of Penman-Monteith (FAO P-M), Hargreaves, and Priestley-Taylor methods in the Huailai Region of Hebei Province. Correlation coefficients, the root mean square error (RMSE), consistency index (d) and other indicators are applied, in monthly and daily time scales, to compare the accuracy of the three methods. The results show that: (1) compared with lysimeter measured results, summer maize monthly actual evapotranspiration calculated by the three methods have some deviations; FAO P-M method and Hargreaves method show good performance and accuracy; the accuracy of P-T method is the worst. (2) The main meteorological factors that affect the actual evapotranspiration calculation results are the net radiation of the sun and temperature. (3) The Hargreaves method needs fewer parameters and has a great advantage in computing, and it is credible in assessing actual evapotranspiration in Huailai.

Key words: actual evapotranspiration, lysimeter, time scale, suitability evaluation

^{*} 国家自然科学基金重点项目(41531174)资助

2015 年 11 月 4 日收稿; 2016 年 5 月 26 日收修定稿

第一作者: 王晓晨, 主要从事多尺度蒸散发的研究. Email: 18810790533@163.com

通信作者: 朱忠礼, 主要从事多尺度土壤水分观测与遥感估算研究. Email: zhuzl@bnu.edu.cn

引言

蒸散 (Evapotranspiration, ET) 是指土壤蒸发 (Evaporation, E) 和植物蒸腾 (Transpiration, T) 的总和, 其大小与下垫面条件、各种气象因子以及植物的生理特性有密切关系。在农业生产中, 蒸散直接反映了作物的需水情况, 获得准确的实际蒸散量对于指导农业生产中的水分利用, 制定合理的灌溉制度, 监测农田旱情, 研究农田作物生育期的水分消耗规律, 提高水分利用效率具有十分重要的意义 (汪明霞等, 2006)。

实际蒸散量的获取主要有两种方式, 一种是理论估算, 一种是直接观测。目前实际蒸散的估算方法, 通常是通过订正参考作物蒸散的间接计算, 即先计算参考作物蒸散, 然后根据实际土壤水分状况和作物生长状况, 乘以土壤水分胁迫系数和作物系数进行订正。直接观测方法包括大孔径闪烁仪 (LAS)、涡动相关仪 (EC) 和大型称重式蒸渗仪 (Lysimeter) 等, 其中, 基于水量平衡原理的称重式蒸渗仪法是测定蒸散最为传统, 也是最为精确的方法之一 (汪秀敏等, 2011; 葛帆等, 2004)。

蒸散理论估算的方法主要包括 Penman、FAO Penman-Monteith (FAO P-M)、Priestley-Taylor (P-T)、1955 Mc FAO、Blaney-Criddle (B-C)、Hargreaves (Har)、Thornthwaite 等。FAO Penman-Monteith 法综合考虑了影响蒸散的各种因素, 是目前国际上公认的参考蒸散计算的标准方法, 在我国的蒸散计算中也得到了广泛的应用 (曾丽红等 2011; 段春锋等, 2011), 但是 FAO Penman-Monteith 公式计算需要大量的气象数据, 数据观测资料缺乏地区难以使用, 实际应用中也因为数据过多不够方便灵活, 因此受到很大的限制。

为研究蒸散计算方法在不同地区的适用性, 当前有很多蒸散公式比较的研究 (曹金峰等, 2015; Schneider et al, 2007; 张晓琳等, 2012; 杜尧东等, 2001; 毛飞等, 2000; 刘倪等, 2009; 刘安花等, 2010; 邵小路等, 2013), 但基本上都是采用 FAO Penman-Monteith 法的计算结果作为评价其他方法的标准, 如秦鹏程等 (2014) 以 FAO Penman-Monteith 模型计算的参考蒸散结果为标准, 比较了 Priestley-Taylor、Hargreaves 及 Thornthwaite 三种模型在湖北省的适用性, 表明在湖北省气象资料匮乏或不便应

用的情况下, 作物模拟模型及气候变化等研究中宜采用 Priestley-Taylor 估算模型, 日常干旱监测及水资源规划中宜采用 Hargreaves 模型, 干湿气候区划等工作中可采用 Thornthwaite 模型; 秦年秀等 (2010) 比较了以气温为基础的 Thornthwaite 和 Blaney-Criddle 公式、以辐射为基础的 Makkind 和 Priestley-Taylor 公式在贵州地区的适用性, 结果表明, 与 Penman-Monteith 公式计算结果相比, 以辐射为基础的蒸散公式在该地区的适用性较好, 以气温为基础的蒸散公式用于气候变化情景下潜在蒸散量预测, 结果偏大; Zhao 等 (2009) 研究了土壤水量平衡法、波文比法、Priestley-Taylor 方法、Penman 方法、Penman-Monteith 方法与 Hargreaves 方法在黑河流域的适用性, 结果表明, Penman-Monteith 方法计算较为准确, Priestley-Taylor 方法和 Hargreaves 方法与 Penman-Monteith 方法结果较为接近可以作为替代方法。

FAO Penman-Monteith 方法的计算结果受到气象数据观测资料的限制, 计算结果也并不是完全准确, 采用 FAO Penman-Monteith 方法的计算结果作为评价其他方法的标准具有一定的误差。蒸渗仪是测定蒸散最为精确的方法之一, 在目前基于蒸渗仪实测结果对蒸散计算方法进行比较的研究很少, 袁小环等 (2014) 应用蒸渗仪实测方法评价 FAO Penman-Monteith、Hargreaves、Priestley-Taylor、Penman-van Bavel 模型在北京地区潜在蒸散 (ET_0) 计算中的准确性, 结果表明, Penman-van Bavel 模型准确性最高, 其次为 Penman-Monteith 模型; 徐俊增等 (2010) 在蒸渗仪实测的基础上评价了 11 种 ET_0 计算方法在我国东部湿润地区的适用性, 结果表明, FAO Penman-Monteith 方法与实测值最为接近, 综合法中的 1948 Penman 法、辐射法中的 Priestley-Taylor 法和 FAO24 Radiation 法、温度法中的 Turc 法也能取得较好的结果, 而 Hargreaves 法、FAO24 C Penman 法、Mc Cloud 法计算结果较差。但这些研究都是对参考蒸散估算的比较, 关于实际蒸散法估算的研究很少。

因此本文以河北省怀来地区为例, 基于蒸渗仪实测数据, 评价 FAO Penman-Monteith (FAO P-M)、Hargreaves (Har)、Priestley-Taylor (P-T) 方法在计算实际蒸散中的适用性, 分别从月、日尺度上分析三种方法的准确性, 并探讨实际蒸散的主要影响因素。对于准确地估算作物实际蒸散量, 加强水资

源管理、制定合理的灌溉计划具有十分重要的意义。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域与数据

1.1.1 研究区概况

研究区位于河北省怀来县中国科学院怀来遥感综合试验站(40°20'N、115°47'E),地处延庆盆地,两侧山地西南—东北走向,试验站位于盆地西南段,西距官厅水库约 2 km。研究区属温带、半干旱大陆性季风气候,年平均气温约 10.1℃,夏季最高气温 39℃,冬季最低气温可达-20℃以下;降水主要集中在夏季,年平均降水总量约 370 mm,年平均风速 3.4 m·s⁻¹。土壤以沙质褐土为主,主要种植单季夏玉米,品种为郑单 958,每年 5 月初播种,10 月初收获(杨光超等,2015;郑秋红等,2006)。

1.1.2 数据观测

北京师范大学与德国干利希研究所合作于 2011 年,在研究区安装了两台表面积为 1 m²,深度 1.5 m 的蒸渗仪,蒸散测量精度为 0.1 mm。两台蒸渗仪共用一个维护井,维护井内安装了两个渗漏桶,用于蒸渗仪的渗漏量测量,测量精度为 0.01 mm。此外,两台蒸渗仪内均安装有土壤水势、土壤温度、土壤湿度、土壤热通量传感器。在生长季一台蒸渗仪种植玉米,另一台蒸渗仪表面保持裸土。为了保证在试验期间蒸渗仪内玉米和周围农田玉米生长条件一致,蒸渗仪内玉米的品种、播种时间、行距和株距同周围农田一致,并且定期对蒸渗仪内土地进行除草,尽量保证蒸渗仪内玉米生长同周围农田一致(杨光超等,2015)。

蒸渗仪的计算是以水量平衡公式为基础(刘波等,2010):

$$ET = P + I - R - \Delta D - \Delta S \quad (1)$$

式中, ET 为蒸散,本研究所用蒸渗仪 1 kg 质量变化对应为 1 mm 的土壤水分变化; P 为降水量,包括降雨和露水; I 为灌溉量; R 为地表径流量; ΔD 为渗漏量; ΔS 为蒸渗仪土柱质量的变化。由于在研究区农田内,降雨不足以产生地表径流,所以径流可忽略。

自蒸渗仪架设以来,运行情况良好,本文蒸渗仪数据来自种植玉米的蒸渗仪 2013 年生长季获得的数据。

蒸渗仪北侧 2.8 m 处架设了 10 m 气象塔,其上安装有自动气象站,其可获取蒸渗仪观测期间的

气象数据包括净辐射 R_n 、土壤热通量 G 、空气温度 T_a 、相对湿度 RH 、风速 W_s 、土壤水分 θ (杨光超等,2015),可用来计算实际蒸散。

1.2 实际蒸散计算方法

本文采用单作物系数法来计算实际蒸散,作物的实际蒸散通过参考蒸散量 ET_0 乘以作物系数 K_c 再乘以土壤水分胁迫系数 K_s 来计算(Allen et al, 1998):

$$ET_a = K_c K_s ET_0 \quad (2)$$

式中, ET_a 为实际蒸散量; ET_0 为参考蒸散量; K_c 为作物系数,是表土干燥而根区土壤平均含水率满足作物蒸腾时 ET_a/ET_0 的比值; K_s 为土壤水分胁迫系数,反映根区土壤含水率不足时对作物蒸腾的影响。

土壤胁迫系数 K_s 由下式计算:

$$K_s = \theta_{(0 \sim 40 \text{ cm})} / \theta_f \quad (3)$$

式中, $\theta_{(0 \sim 40 \text{ cm})}$ 为 0~40 cm 土壤含水量, θ_f 为田间持水量;当供水充足(土壤含水量大于田间持水量)时, $K_s=1$ 。

在计算夏玉米 K_c 值时,将生育期分为生长初期、快速生长期、生长中期和生长后期阶段四个不同生长阶段。FAO 推荐夏玉米标准作物系数为: $K_{c_{ini}}=0.3$; $K_{c_{mid}}=1.2$; $K_{c_{end}}=0.6$ 。

通过 FAO 推荐方法进行订正后: $K_{c_{ini}}=0.3$; $K_{c_{mid}}=1.08$; $K_{c_{end}}=0.595$ 。作物系数曲线如图 1。

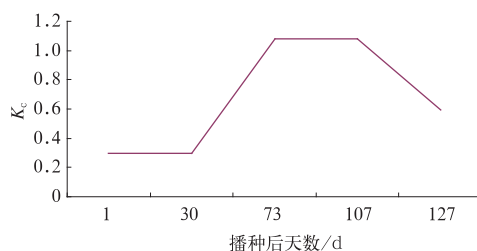


图 1 作物系数随播种后天数变化关系图

Fig. 1 The relationship between K_c and sowing days

1.2.1 参考蒸散的计算方法

(1)FAO Penman-Monteith 方法(以日为时间步长)(Allen et al, 1998)

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (4)$$

式中, ET_0 为参照腾发速率(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为作物表面上的净辐射(单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量(单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为 2 m 高处日平均气温(单位: $^{\circ}\text{C}$); u_2 为 2 m 高处的风速(单

位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和蒸气压(单位: kPa); e_a 为实际蒸气压(单位: kPa); Δ 为水汽压曲线斜率(单位: $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿计常数(单位: $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

公式(4)中相关变量计算如表 1。

表 1 FAO Penman-Monteith 方法相关变量计算公式及参数

Table 1 Calculation formulas and parameters of the relevant variables of FAO P-M method

变量计算公式	参数
$p = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$	式中: p 为大气压(单位: kPa); Z 为海拔高度(单位: m); γ 为干湿计常数; λ 为汽化潜热(单位: $2.45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); c_p 为常压下的比热(单位: $1.013 \times 10^{-3} \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); ϵ 为水蒸汽分子量与干燥空气分子量的比, 其值为 0.662; $e_0(T)$ 为空气温度 T 时的水汽压(单位: kPa); T 为大气温度(单位: $^{\circ}\text{C}$); e_s 为饱和蒸气压; e_a 为实际蒸气压; T_{\max} 为日最高温度; T_{\min} 为日最低温度; T_{mean} 为日平均温度; $e_0(T_{\min})$ 为日最低温度时的饱和水汽压(单位: kPa); $e_0(T_{\max})$ 为日最高温度时的饱和水汽压(单位: kPa); RH_{\max} 为最大相对湿度(单位: $\%$); RH_{\min} 为最小相对湿度(单位: $\%$); Δ 为气温 T_{mean} 下的饱和水汽压曲线斜率。
$\gamma = \frac{c_p p}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} p$	
$e_0(T) = 0.618 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right]$	
$e_s = \frac{e_0(T_{\max}) + e_0(T_{\min})}{2}$	
$e_a = \frac{e_0(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e_0(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2}$	
$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}} + 237.3} \right) \right]}{(T_{\text{mean}} + 237.3)^2}$	

(2) Priestley-Taylor 公式

1972 年, Priestley 和 Taylor 在 Penman 公式基础上, 假定无平流和水分条件不受限制的情况下建立了著名的 Priestley-Taylor 方程(Priestley et al, 1972), 算式如下:

$$ET_{0(P-T)} = \alpha \frac{\Delta}{\lambda(\gamma + \Delta)} (R_n - G) \quad (5)$$

式中, $ET_{0(P-T)}$ 为日蒸散量(单位: mm); α 为常数 1.26; λ 为水的汽化潜热(单位: $2.45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); 其余参数同 FAO Penman-Monteith 方法。

(3) Hargreaves 公式

FAO Penman-Monteith 和 Priestley-Taylor 方程计算蒸散时均利用能量运动原理, 需要大量的、长时间序列的各种气象参数观测资料, 而 Hargreaves 模型(Hargreaves et al, 1985)只需空气温度和外太空辐射, 因参数容易获取和计算简单而得到广泛应用。

$$ET_{0(\text{Har})} = 0.0023(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} (T_{\text{mean}} + 17.8) R_a \quad (6)$$

式中, $ET_{0(\text{Har})}$ 为参考作物蒸散速率(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); T_{\max} 为日最高气温(单位: $^{\circ}\text{C}$); T_{\min} 为日最低气温(单位: $^{\circ}\text{C}$); T_{mean} 为日平均气温(单位: $^{\circ}\text{C}$); R_a 为外太空辐射(或天文辐射)(单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

1.2.2 统计参数

相对偏差(MSE)、均方根误差(RMSE)和一致性系数(d)被用来评价各计算方法计算结果与实测结果之间的误差以及一致性情况, 计算方法如下

(徐俊增等, 2010):

$$MSE = \frac{P_i - Q_i}{Q_i} \quad (7)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{Q}| + |Q_i - \bar{Q}|)^2} \quad (9)$$

式中: N 为观察次数; P_i 为模型计算 ET_0 数值; Q_i 为蒸渗仪实测蒸散数值, \bar{Q} 为 Q_i 对应的平均值。

通常计算结果的误差(MSE、RMSE)越小, d 越大, ET_a 计算方法表现越好。本文以 RMSE 为主要依据, 在 RMSE 比较接近情况下, 通过一致性参数进行综合比较。

2 结果与分析

对比蒸渗仪实测数据, 通过相关性分析及主要影响因素从月、日时间尺度上来评价 Penman-Monteith(FAO P-M)、Hargreaves(Har)、Priestley-Taylor(P-T)三种方法在怀来地区的适用性。

2.1 三种方法在怀来地区的适用性评价

2.1.1 月适用性评价

三种方法计算得到的日实际蒸散, 经过进一步累计后得到 2013 年生长季各月的月实际蒸散, 绘制

柱状图如图 2,从图中可以看出,三种方法计算的实际蒸散与蒸渗仪实测的蒸散变化趋势基本一致。5 月 FAO P-M 方法计算结果要略高于实测值,其他两种方法低于实测值;6、9、10 月,三种方法计算的实际蒸散均低于蒸渗仪实测值;7、8 月,Har 方法结果要高于蒸渗仪实测结果,其他两种方法仍低于蒸渗仪实测。将三种方法计算的月实际蒸散同蒸渗仪实测数据进行相关性分析及主要影响因素分析,对三种方法的月实际蒸散适用性进行评价。

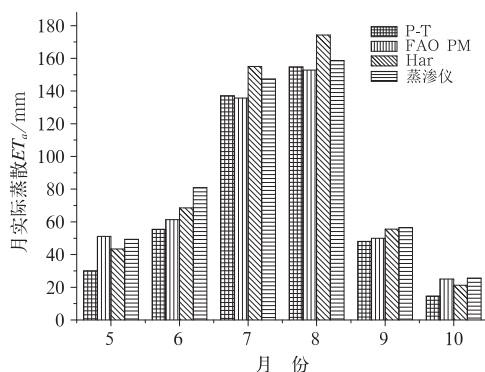


图 2 不同方法计算的月实际蒸散结果

Fig. 2 Monthly ET_a by different methods

以蒸渗仪实测值为标准,对各方法计算的实际蒸散进行准确度分析。从表 2 中可以看出,三种方法计算的实际蒸散与蒸渗仪实测值均有一定的偏

差,且整体要低于蒸渗仪实测值。其中,Har 方法计算的实际蒸散偏差最小,P-T 方法相对偏差最大。对各方法计算结果与蒸渗仪实测数据进行线性回归,回归结果见表 3,从均值来看,三种方法计算的月实际蒸散量均值均低于蒸渗仪实测均值,蒸渗仪实测的月实际蒸散均值为 86.3 mm,Har 方法计算均值为 86.3 mm,与之基本相同;从线性回归曲线斜率可以看出,P-T 和 FAO P-M 方法的曲线斜率均小于 1,说明这两种方法计算的实际蒸散整体趋势要小于蒸渗仪实测值,而 Har 方法的曲线斜率略大于 1,说明 Har 方法计算的实际蒸散整体趋势要略大于蒸渗仪实测值;三种方法线性回归方程的决定系数 R^2 均在 0.956~0.990,说明三种方法与蒸渗仪实测数值之间均为较好的线性关系,其中 P-M 方法计算的实际蒸散量与蒸渗仪实测值之间的线性相关性最好, R^2 为 0.981,Har 方法的决定系数 R^2 相差不大为 0.978,而 P-T 方法最小为 0.956;三种方法的均方根误差差别较大,P-T 最大,为 14.907,FAO P-M 次之,为 9.941,Har 方法最小为 9.200;FAO P-M 方法和 Har 方法的一致性指数差别很小,但均高于 P-T 方法。综上,在月实际蒸散的计算过程中,从相关系数来看,FAO P-M 方法的表现要略好,从 RMSE、MSE 和 d 来看均是 Har 方法表现最好,但 P-T 方法始终误差最大。

表 2 不同方法计算月实际蒸散相对于蒸渗仪实测结果的相对偏差

Table 2 RMSE of monthly ET_a between calculated and measured values

月份	5	6	7	8	9	10	MSE
P-T	-0.393	-0.314	-0.070	-0.025	-0.149	-0.429	-0.230
P-M	0.036	-0.241	-0.078	-0.037	-0.115	-0.020	-0.076
Har	-0.121	-0.152	0.052	0.098	-0.017	-0.168	-0.051

表 3 各方法计算月蒸散线性回归参数比较

Table 3 Comparison of linear regression parameters for different methods for monthly ET_a

计算方法	线性回归	RMSE	d	均值
P-T	$y=0.9011x, R^2=0.956$	14.907	0.979	73.3
P-M	$y=0.9247x, R^2=0.981$	9.941	0.990	79.4
Har	$y=1.036x, R^2=0.978$	9.200	0.991	86.3

注: X 代表蒸渗仪实测月实际蒸散, y 代表各方法计算的月实际蒸散。

Note: X represents monthly actual evapotranspiration of the lysimeter; y represents monthly actual evapotranspiration calculated by the three methods, respectively.

2.1.2 日适用性评价

以蒸渗仪实测的夏玉米实际日蒸散量为依据,比较三种不同计算方法的实际蒸散量计算结果,如图 3 所示。从图可以看出,三种计算方法的得到的日实际蒸散与蒸渗仪实测结果具有很好的线性关

系,相关系数均达到 0.85 以上,其中 FAO P-M 方法与蒸渗仪实测结果结果的相关性最好,数据点在线性趋势线周围的分布最为紧凑,Har 方法次之,而 P-T 方法与蒸渗仪实测结果相关性稍差,数据点在线性趋势线周围的分布较为分散。从线性回归曲线

的斜率来看,Har 方法与蒸渗仪实测结果最接近,其次是 FAO P-M 方法,P-T 方法偏差最大。与实测结果相比,三种计算方法均出现了不同程度的低估。在蒸发能力较低的阶段,计算结果与实测结果较为吻合,而在高蒸发能力阶段,计算结果偏差较大。

就均方根误差而言,FAO P-M 方法最小为 0.806,其次为 Har 方法 0.837,P-T 方法均方根误差最大,达到 0.933;从一致性指数、平均相对偏差和均值来看,Har 方法表现最好,其次是 FAO P-M 方法。Har 方法一致性指数最高为 0.967,FAO P-M 方法次之,为 0.964;P-T 方法一致性指数最小为 0.955。Har 方法的平均相对偏差最小,为 0.068,FAO P-M 方法次之,为 0.107,P-T 方法平均相对偏差最大为-0.127。蒸渗仪实测日实际蒸散平均值为 2.793,与之最为接近的是 Har 方法计算的 2.819,其次为 FAO P-M 方法,P-T 方法相差最大(表 4)。

综上所述,在计算怀来地区夏玉米日实际蒸散时,FAO P-M 方法、Har 方法表现较好,准确度相差不大,从相关系数和均方根误差来看,FAO P-M 方法在计算夏玉米日实际蒸散中表现更好一点,而从一致性指数、平均相对偏差来看 Har 方法更为接近。不管从哪个角度 P-T 方法准确性都较差。

表 4 三种方法计算日实际蒸散的均方根误差与一致性指数

Table 4 Analysis of accuracy of different methods for monthly ET_a				
线性回归	R^2	RMSE	d	MSE
P-T	0.865	0.933	0.955	-0.123
FAO P-M	0.882	0.806	0.964	0.107
Har	0.876	0.837	0.967	0.068

2.2 影响怀来地区实际蒸散的主要气象因子

太阳辐射、温度、空气湿度、风是影响植物蒸腾与水分蒸发的主要因素(曾丽红等,2010;李林等,2000)。为了分析各气象因子对怀来地区蒸散的影响,分别对蒸渗仪实测的月、日实际蒸散与主要气象因子进行相关性分析,结果如表 5,从表中可以看出,二项式拟合比线性拟合的决定系数有所提高,蒸渗仪实测的月、日实际蒸散量与净辐射的相关性最好,说明净辐射是蒸散的直接驱动力,是影响实际蒸散的主要因子;与温度的相关性较好,说明温度也是影响怀来地区蒸散的主要因子之一;月、日实际蒸散与空气湿度的相关性都较弱,日、月实际蒸散与风速的相关性较差,在线性拟合下甚至表现为负相关

关系。其原因主要是由于蒸散的主导控制因素为水分和能量,湿度和风速为一般因素;在怀来地区玉米生长季大风天气常常伴随着降雨,降雨天气蒸散值往往较小,从而削弱了风对蒸散的影响,导致风速与蒸散相关性较差,甚至出现负相关的情况。综合以上分析,说明怀来地区影响实际蒸散的主要气象因子为净辐射和温度。对怀来地区实际蒸散量与净辐射和平均温度进行多元线性拟合(表 6),决定系数分别为 0.821(月)、0.702(日),说明怀来地区蒸散量与辐射和温度之间具有很好的相关性。

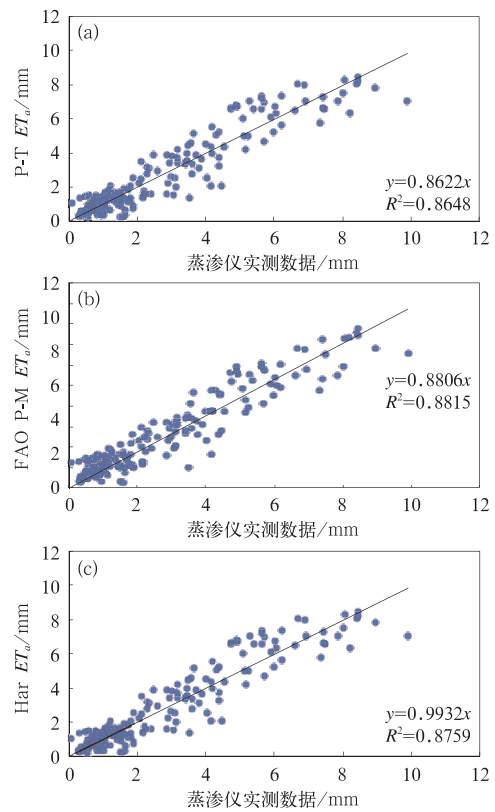


图 3 三种方法计算日 ET_a 结果与蒸渗仪实测结果的对比

Fig. 3 Daily ET_a comparison between calculated and measured values

目前估算蒸散方法用的最多的是 FAO P-M 方法,综合考虑了各项因子对蒸散的影响,结果较为合理,是目前普遍认为最准确的估算方法。Har 方法的准确性只与温度和辐射有关,因此,蒸散与辐射、温度的相关性越高,Har 方法计算结果的可信度越高,在怀来地区,蒸散主要受辐射和温度的影响,与其他因子相关性不大,说明 Har 方法计算的怀来地区蒸散量具有很高的可信度,从而也说明本文适用性比较结果是值得相信的,即在计算怀来地区夏玉

米日实际蒸散时,FAO P-M 方法、Har 方法的准确 度相差不大。

表 5 月、日实际蒸散与气象因子相关性比较

Table 5 Comparison of correlation between monthly, daily ET_0 and meteorological factors

			温度/℃			相对湿度(RH)/%	净辐射/MJ·m ⁻² ·d ⁻¹	平均风速/m·s ⁻¹
			平均	最高	最低			
相关性 分析	月	线性拟合	0.546	0.264	0.385	0.318	0.611	-0.541
		二项式拟合	0.699	0.446	0.546	0.433	0.787	0.340
	日	线性拟合	0.333	0.300	0.287	-0.023	0.618	-0.323
		二项式拟合	0.425	0.480	0.287	0.016	0.662	0.006

表 6 月、日实际蒸散与净辐射、温度的多元回归分析

Table 6 The multiple regression analysis of monthly and daily ET_0 and net radiation and temperature

	线性回归方程	决定系数 R^2
月	$y = -0.976x_1 + 1.845x_2$	0.821
日	$y = 0.25x_1 + 0.662x_2$	0.702

注: x_1 代表平均温度, x_2 代表平均净辐射。

Note: x_1 represents the average temperature, and x_2 represents the average net radiation.

3 结 论

综合月、日时间尺度上夏玉米实际蒸散的评价结果,在计算夏玉米实际蒸散中准确性最高的是 FAO P-M 方法和 Har 方法, P-T 方法准确性最差。在月尺度上,从相对偏差、均方根误差以及一致性指数来看, Har 方法均优于 FAO P-M,但相关性系数方面 FAO P-M 方法表现稍好;在日尺度上,从相对偏差和一致性指数上看 Har 方法表现较好,而 FAO P-M 方法在相关系数、均方根误差上优于 Har 方法。但考虑到 Har 方法所需参数较少,计算简便,准确性与 FAO P-M 方法相差不大,在计算量方面占有很大的优势,因此,在计算怀来地区夏玉米月、日实际蒸散时 Har 方法有更好的适用性。

参考文献

- 曹金峰,李玉中,刘晓英,等. 2015. 四种参考作物蒸散量综合法的比较. 中国农业气象, 36(4): 428-436.
- 杜尧东,刘作新,张运福. 2001. 参考作物蒸散计算方法及其评价. 河南农业大学学报, 35(1): 57-61.
- 段春峰,缪启龙,曹雯. 2011. 西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素. 农业工程学报, 27(8): 77-83.
- 葛帆,王钊. 2004. 蒸渗仪及其应用现状. 节水灌溉, (2): 30-32.
- 李林,张国胜,汪青春,时兴合. 2000. 黄河上游流域蒸散量及其影响因素研究. 气象, 26(2): 6-10.
- 刘安花,李英年,薛晓娟,等. 2010. 高寒草甸蒸散量及作物系数的研究. 中国农业气象, 31(01): 59-64.
- 刘波,姜彤,翟建青,等. 2010. 新型蒸渗仪及其对陆面实际蒸散发过

- 程的观测研究. 气象, 36(3): 112-116.
- 刘倪,夏伟,吴晓蔚,等. 2009. 几种参考作物蒸散量计算方法的比较. 河北科技大学学报, 30(1): 17-24.
- 毛飞,张光智,徐祥德. 2000. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较. 应用气象学报(11): 128-136.
- 秦年秀,陈喜,薛显武,等. 2010. 潜在蒸散发量计算公式在贵州省适用性分析. 水科学进展, 21(3): 357-363.
- 秦鹏程,刘敏,刘志雄,等. 2014. 湖北省潜在蒸散估算模型对比. 干旱气象, 32(3): 334-339.
- 邵小路,姚凤梅,张佳华,等. 2013. 基于蒸散干旱指数的华北地区干旱研究. 气象, 39(9): 1154-1162.
- 汪明霞,陈晓飞,王铁梁,等. 2006. 腾发量的测定和计算方法研究综述. 中国农村水利水电, (12): 9-12.
- 汪秀敏,申双和,韩晓梅,等. 2011. 大型称重式蒸渗仪测定的冬小麦农田的蒸散规律研究. 气象与环境科学, 34(4): 14-18.
- 徐俊增,彭世彰,丁加丽,等. 2010. 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. 水利学报, 41(12): 1497-1505.
- 杨光超,朱忠礼,谭磊,等. 2015. 怀来地区蒸、渗仪测定玉米田蒸散发分析. 高原气象, 34(4): 1095-1106.
- 袁小环,杨学军,陈超,等. 2014. 基于蒸渗仪实测的参考作物蒸散发模型北京地区适用性评价. 农业工程学报, 30(13): 104-110.
- 曾丽红,宋开山,张柏,等. 2010. 松嫩平原参考作物蒸散量变化及其影响因素分析. 农业系统科学与综合研究, 26(1): 41-48.
- 张晓琳,熊立华,林琳,等. 2012. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用. 干旱区地理, 35(2): 229-237.
- 郑秋红,张宏,贾海坤,等. 2006. 怀来盆地弃耕地自然恢复过程中土壤养分动态. 生态与农村环境学报, 22(1): 24-28.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, et al. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.
- Hargreaves GH, Samani ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl Engin Agri, (1): 96-99.
- Schneider K, Ketzner B, L. Breuer, et al. 2007. Evaluation of evapotranspiration methods for model validation in a semi-arid watershed in northern China. Adv Geosci, 11: 37-42.
- Priestley C H B, Taylor R J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon Wea Rev, 100(2): 81-92.
- Zhao Wenzhi, Liu Bing, Zhang Zhihui. 2009. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. Agri Water Manag, 97(2): 215-223.