

基于称重法对影响蒸发蒸腾量的 主要气象因子研究分析

苏彦尹^{1,3}, 范兴科^{1,2}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:通过模拟实验采用称重法测定了不同时间尺度下的蒸发皿水面蒸发量与充分灌水条件下植物蒸腾耗水量,同时监测对应时段影响蒸发蒸腾量变化的气象因子。通过 Pearson 相关分析法与偏相关检验对蒸发蒸腾量与气象因子间的相关性进行了分析,同时在此基础上,对相关性较高(在 $\alpha=0.01$ 水平上极显著相关且通过偏相关筛选)的几个主要气象因子与水面蒸发量、植物潜在蒸发蒸腾量变化过程间的相关关系进行了多元非线性拟合,构建了简单的潜在蒸发蒸腾量计算方程,并进行了检验。结果显示:(1)影响水面蒸发与植物蒸腾的主要气象因子一致:温度、太阳净辐射与相对湿度;(2)太阳净辐射与温度、湿度的变化有较高的相关性($r=0.718, r=-0.639$);(3)利用温度和湿度两项指标可以较好地模拟蒸发量与蒸腾量的变化过程($R^2=0.743$),对于缺乏太阳净辐射资料的小灌区(点),可以利用温、湿度和作物参数构建近似的作物蒸发耗水模型,基于实时的气象资料计算对应时段作物的蒸腾蒸发耗水量,以便快速获得作物的耗水量与需水量,实时掌握农田水分亏缺状况,进行及时补灌。

关键词:蒸散发;时间尺度;气象因子;温、湿度;非线性拟合

中图分类号:S152.7⁺3;S161.4⁺2 **文献标志码:**A

Study of main meteorological factors affecting evapotranspiration based on gravimetric method

SU Yanyin^{1,3}, FAN Xingke^{1,2}

(1. Institution of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institution of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to construct a simple calculation model for transpiration and evaporation of farmland, obtain the water consumption and the water demand of crops quickly, and to obtain the status of water deficit in a timely manner, this study used a gravimetric method to measure the evaporation of water from an evaporation pan at different time scales, and measure the transpiration water consumption of plants under the condition of sufficient irrigation, while the meteorological factors that affect transpiration in the corresponding period were monitored. The correlation between evapotranspiration and meteorological factors was analyzed by Pearson correlation analysis method and partial correlation test. The correlations of volume change and several major meteorological factors with high correlation with surface water evaporation and potential plant evapotranspiration were analyzed with multivariate non-linear fitting. Thus, a simple calculation equation of potential evapotranspiration was constructed and tested. The results showed that (1) the main meteorological factors that affect water surface evaporation and plant transpiration were temperature, net solar radiation, and relative humidity; (2) net solar radiation had a high correlation with changes in temperature and humidity ($r=0.718, r=-0.639$); (3) the evaporation and transpiration were well

收稿日期:2019-12-17

修回日期:2020-03-28

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0501703);“十二五”农村领域国家科技计划课题(2015BAD22B05);国家重点研发计划课题(2017YFD080052)

作者简介:苏彦尹(1994-),女,陕西咸阳人,硕士,研究方向为旱地农业水资源高效利用。E-mail:suyanyin17@mails.ucas.ac.cn

通信作者:范兴科(1964-),男,研究员,主要从事节水灌溉新技术和灌溉产品开发研究。E-mail:gjfxk@vip.sina.com

simulated by using temperature and humidity ($R^2=0.743$). For small irrigation areas (points) that lacked solar net radiation data, an approximate crop evaporation water consumption model was constructed using temperature, humidity, and crop parameters. Based on real-time temperature and humidity data, it is possible to calculate the crop's evapotranspiration water consumption for the corresponding period to quickly obtain the crop's water consumption and their water demand, so this could help to obtain the real-time farmland water deficit status and provide timely supplemental irrigation.

Keywords: evapotranspiration; time scale; meteorological factor; temperature and humidity; nonlinear fitting

随着全球气候变化及人类活动的加剧,水资源短缺已成为制约农业与生态环境发展的重要因素之一。西北干旱半干旱地区气候干燥,缺水严重;华北平原春季用水紧张;南方地区河流径流量小,人口多、水污染严重无法满足灌溉需求。因此快速准确地估算植物蒸散量(ET_c)并预测其生长需水量、优化区域灌溉制度、估算作物产量、预报土壤水分动态对水资源合理开发以及实现区域水资源可持续发展具有非常重要的理论和实际意义^[1-3]。

蒸散发过程是土壤-植物-大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)系统中的重要环节,其中蒸腾耗水量是衡量植被水分利用效率的重要指标^[4],也是生态系统能量和水量平衡的重要分量^[5]。潜在蒸腾耗水量(reference evapotranspiration, ET_0)是间接估计作物蒸散发的关键参数,要确定最终的作物蒸腾耗水量(crop evapotranspiration, ET_c),其中最为重要的就是 ET_0 的计算。

确定 ET_0 的值有计算法和实测法^[6-7]两大类,二者各有利弊,Penman-Monteith (P-M) 方程是计算法中最为常用的方法之一,其自变量均为气象因子,奠定了气象因子在 ET_0 计算中不可撼动的重要地位。目前关于影响蒸散发的气象因子研究中,刘国水、蔡甲冰等^[8-9]发现不同时间和空间尺度的蒸散量与净辐射的相关关系均较好,但与空气湿度、温度和风速的相关关系随尺度变化而变化。亦有学者结合比尔定律应用 Penman-Monteith (P-M) 公式^[10-11]和 Priestley-Taylor (P-T) 公式^[12]、Shuttleworth-Wallace (SW) 多层冠层理论模型^[13]实现了蒸腾估算,但上述模型方法都不可避免地优先考虑太阳辐射对蒸散发的影响,同时也考虑了温、湿度的影响,这样很容易导致对蒸散发重复计算,有信息冗余现象。且实际观测中发现净辐射的准确观测较难获取且准确度难以保证,在大尺度观测上限制了这些方法的估算精度。此外,并不是所有站点都具有太阳辐射的观测条件,FAO-56 中根据日序数对太阳辐射的估算在阴天时误差较大,此类问题的存在极大限制了这些方法的使用范围。其

三,无论是 P-M 模型或是 Hargreaves 方程,其计算通常采用日时间尺度的平均气象值,结果不能很好地体现单日内实时农田蒸发蒸腾量的变化过程。特别是昼夜耗水量差异较大时,无法及时获知农田作物的水分亏缺状况。因此,本研究旨在找到不同时间尺度下影响蒸发皿水面蒸发的气象因子,在此基础上进一步探索影响植物蒸腾的因子是否与蒸发皿水面蒸发一致,同时分析各气象因子对蒸腾量变化的影响大小,从众多影响因子中筛选对其作用最为主要且易于获取的气象因子,基于实测蒸发蒸腾量探索构建结构形式简单、计算精度较高的潜在蒸发蒸腾量计算方法,为实时快捷地确定蒸散发状况提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

蒸腾蒸发量观测试验地位于陕西省咸阳市杨陵区西北农林科技大学旱区农业研究院(108°05'E, 34°24'N, 海拔 506 m),试验站所在地区位于关中平原旱作区,属于暖温带季风气候区。采用精度高电子秤称重法测定蒸发皿(20 cm 口径)水面蒸发量和盆栽绿萝的蒸腾蒸发量,同时获取温、湿度数据。为了避免降水对蒸腾蒸发量测定的影响,蒸发实验布设在遮雨棚(棚高 3 m)下进行。

1.2 监测指标与方法

蒸散发过程由水分蒸发与植物蒸腾共同组成,是水分传输和能量转化的动态过程^[14],为了探究各气象因子在这两个过程中的作用大小是否相同,本文分为蒸发皿水面蒸发与绿萝蒸腾两部分进行研究,进而探究影响植物蒸腾的气象因子是否与蒸发一致,蒸发过程采用称重法测定蒸发皿水面蒸发量,植物蒸腾过程采用覆盖度高的盆栽绿萝蒸腾,称重法获取其蒸腾量。由于水汽压亏缺(VPD)与温、湿度有较好的相关性,为避免信息冗余,在气象因子的选择上暂不考虑 VPD 的影响。

(1)水面蒸发量的测定:将 3 个相同规格的蒸发皿(3 个重复)分别置于 3 台电子称上,如图 1 所

示。电子秤传感器数据采集间隔设定为 1 h,在靠近蒸发皿且与水面持平处设置温度和湿度传感器(型号:SHT30,量程 $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,分辨率 0.1°C ,西安森森电子科技),实时采集 3 个水面附近的温度和湿度数据,温度和湿度传感器数据间隔确定为 5 min,自动读取,上传数据为 1 h、12 组数据的平均值。其他气象数据以布设的小气象站观测值为依据,气象站观测项目为:太阳净辐射(型号:TBB-1 太阳净辐射表,测量波段:280~50 000 nm,灵敏度:3~14 $\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,日灵敏度/夜灵敏度为 $8.014\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}/2.567\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,测量范围: $-2\ 000\sim +2\ 000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,锦州阳光气象科技);气压(塞通科技多合一传感器);风速(PHWS-12V-A1 风速传感器,量程 $0\sim 45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),采集间隔为 1 h,电子秤连续两次读取的重量值之差即为在该气象条件下 1 h 内的水面蒸发量,最后取三个蒸发皿的蒸发量平均值。水面蒸发观测时间 2018 年 6 月至 2019 年 2 月。

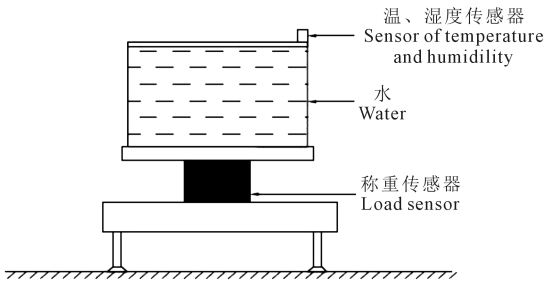


图 1 称重法实测蒸发量示意图

Fig.1 Schematic diagram of measured evaporation by weighting method

(2)植物蒸腾量测定:将植被覆盖度较高的盆栽绿萝置于电子秤(量程 5 kg,精度 1/1 000 g,西安森森电子科技)上进行称重,3 次重复,进行定期补水。在充足供水条件下,测其冠层的温、湿度(传感器型号:SHT30,量程 $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,分辨率 0.1),绿萝蒸腾的观测时间为 2019 年 3 月 13 日至 2019 年 5 月 7 日。

(3)气象指标以及监测方法:水面温度($T_a,^{\circ}\text{C}$)、相对湿度($RH,\%$),温、湿度传感器数据与电子秤重量数据同频率一并输出,试验点附近布设小型气象站,监测步长设置为 1 h。2 m 风速($WS,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、气压(P,kPa)、太阳净辐射($R_n,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),观测时间:2018 年 7 月起持续观测。

绘图软件: AUTO CAD, SPSS, ORIGIN.

1.3 分析计算方法及评价指标

本文通过复相关分析月时间尺度下日蒸散发变化量与多个气象因子之间的相关关系,运用偏相

关计算分析日时间尺度下小时蒸散发变化量与各气象因子之间的关系,通过相关系数的大小确定各因子对蒸散发量变化影响的作用大小;对蒸发量蒸腾量与温、湿度建立非线性拟合方程并进行检验。

如果相关系数在 $\alpha=0.01$ 水平上显著,则各因子间存在显著的相关关系^[15-16];同时分析各气象因子之间的相关关系,进行偏相关分析,分别将各因子作为控制变量进行,以找到对植物蒸腾蒸发量影响的主要气象因子与植物生理生态指标因子。

(1)采用 Pearson 相关分析法(Pearson correlation coefficient),样本相关系数 r 为总体相关系数 ρ 的最大似然估计量,作为相关性的评价指标, $-1\leq r\leq 1$ 绝对值越大,表明两个变量之间的相关程度越强;若 $0<r\leq 1$,表明两个变量之间存在正相关;若 $-1\leq r<0$ 表明两个变量之间存在负相关; $r=0$ 表明两个变量之间无线性相关。采用双尾检验。

(2)本文采用一阶偏相关:控制变量 X_3 的线性影响下分析两自变量 X_1 和 X_2 之间的相关, X_1 和 X_2 之间的一阶偏相关关系如下:

$$r_{123} = \frac{r_{12} - r_{13} \times r_{23}}{\sqrt{1 - r_{13}^2} \sqrt{1 - r_{23}^2}}$$

(1)

(3)拟合优度检验:度量拟合优度的统计量(R^2)。 R^2 的值越接近 1 说明回归直线对实测值的拟合程度越好;反之, R^2 的值越小,说明回归直线对实际测量值的拟合程度越差。

$$R^2 = \frac{\sum (y_{\text{预测}} - y_{\text{平均}})^2}{\sum (y_{\text{实测}} - y_{\text{平均}})^2}$$

(2)

2 结果与分析

2.1 蒸发皿水面蒸发(ET_{pan})对气象因子的响应

2.1.1 日蒸发量(ET_{pan})对气象因子的响应 日蒸发量与气象因素的波动规律存在一定的相关性。基于 Penman-Monteith 方程对每日蒸发皿蒸发量与各气象因子之间的关系进行分析,获取气温($T_a,^{\circ}\text{C}$)、相对湿度($RH,\%$)、风速($U,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、气压(P,kPa)和太阳净辐射($R_n,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)5 项气象因子。对 2018 年 6 月 14 日至 2019 年 2 月 20 日 9 个月每日气象数据与每日实测水面蒸发量(ET_{pan}),相关性分析如图 2 所示。

图 2 中,促进水面蒸发、与蒸发量变化成正相关关系的气象因子以红色表示,对水面蒸发有抑制作用的气象因子以蓝色圆表示,圆圈的大小代表该因子对水面蒸发量变化的影响剧烈程度,气象因子温度、湿度、净辐射、风速和气压对蒸发量变化产生的

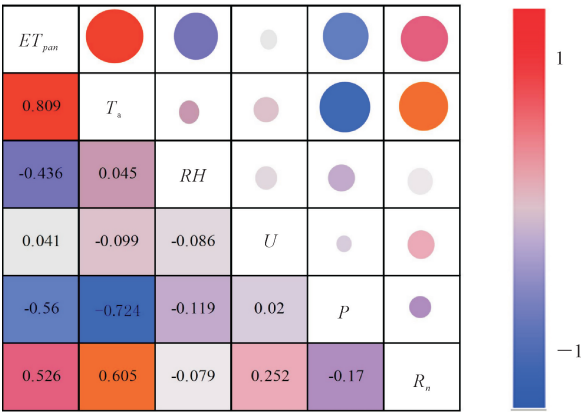
影响作用大小不同,其中影响作用较大的有温度、湿度、净辐射与气压 4 项,相关系数大小依次为 0.809、-0.436、0.526 和 -0.56,均在 $\alpha=0.01$ 水平上与 ET_{pan} 极显著相关,观测 5 项气象因子对 ET_{pan} 影响作用大小依次为: $T_a>P>R_n>RH>U$ 。温度和净辐射以及风速与 ET_{pan} 呈正相关关系,相对湿度和气压与 ET_{pan} 呈现负相关,随着温度的升高、湿度的下降以及净辐射量的增大、风速的加大,潜在蒸散发呈现出升高的趋势,此次研究发现,在日尺度上蒸发量与风速相关性很弱,分析原因可能是由于风速计算是通过一天内数值平均得到,其瞬时变化对水面蒸发的影响被淡化。

除此之外发现,各个气象因子之间存在不同程度的相关,温度与太阳净辐射之间存在极显著的正相关关系($r=0.605$);其次温度与气压之间存在极显著的负相关关系($r=-0.724$)。

2.1.2 小时水面蒸发量(ET_{pan})对气象因子的响应

根据 2018 年夏季测定结果,日小时蒸发皿蒸发量与 5 项气象因子的相关关系如表 1 所示。由表 1 可知,小时蒸发量的变化与温度、湿度、净辐射、风速关

系较为密切,各因子与水面蒸发量 ET_{pan} 的相关系数大小依次为: $T_a(r=0.843)>R_n(r=0.808)>RH(r=-0.780)>U(r=0.538)>P(r=-0.113)$ 。



注: ET_{pan} :日水面蒸发($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); T_a :气温($^{\circ}\text{C}$); RH :相对湿度(%); U :风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); P :气压(kPa); R_n :太阳净辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。
Note: ET_{pan} :Daily water evaporation ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); T_a :Temperature ($^{\circ}\text{C}$); RH :Relative humidity (%); U :Wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); P :Atmospheric pressure (kPa); R_n :Net solar radiation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

图 2 日蒸发量与各气象因子相关性

Fig.2 Correlation between monthly scale evaporation and various meteorological factors

表 1 日时间尺度各气象因子与蒸发量变化的相关系数

Table 1 Correlation between daily scale evaporation and various meteorological factors

相关关系 Variable correlation	蒸发量 Evaporation /($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)	温度 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	湿度 Humid/%	净辐射 Net radiation /($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	气压 Pressure/kPa	风速 Wind speed /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
蒸发量 Evaporation	1					
温度 Temperature	0.843 **	1				
湿度 Humid	-0.780 **	-0.755 **	1			
净辐射 Net radiation	0.808 **	0.831 **	-0.639 **	1		
气压 Pressure	-0.113	-0.389 **	-0.155 *	-0.107	1	
风速 Wind speed	0.538 **	0.467 **	-0.556 **	0.498 **	0.085	1

注: * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著; ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。
Note: * indicates significant correlation at level 0.05 (two-tailed); ** indicates significant correlation at level 0.01 (two-tailed).

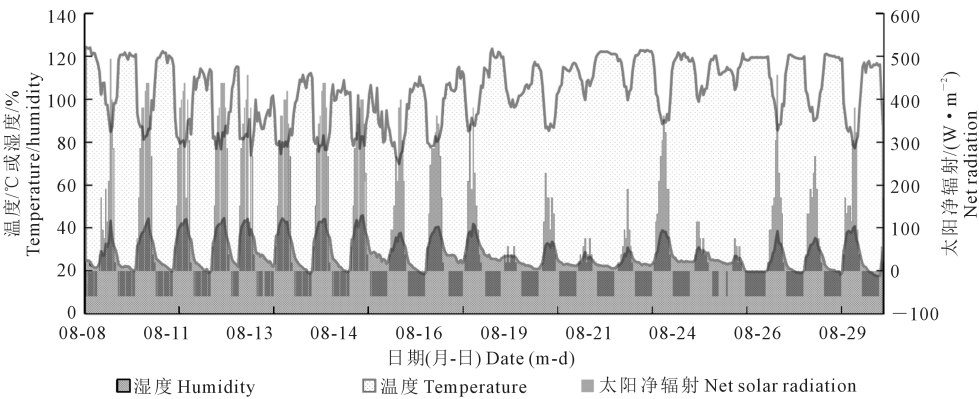


图 3 水面蒸发温度、湿度与同期太阳净辐射关系

Fig.3 Relationship between temperature and humidity and net solar radiation

太阳净辐射与温度、湿度三者对水面蒸发的影响在 $\alpha=0.01$ 水平上显著, 净辐射与温度和湿度之间相关系数分别为 0.831、-0.639, 说明净辐射与温度间相互依存关系的密切程度有 83.1%, 与湿度间有 63.9% 的密切程度。温度、湿度、太阳净辐射关系密切(见图 3), 三者变化趋势一致, 太阳净辐射与温度呈现正相关关系, 随着净辐射的增大, 温度同时上升, 二者同时达到波峰、波谷(最大、最小值)。太阳净辐射与相对湿度呈现出显著负相关关系, 随着净辐射的增大湿度下降, 当净辐射到达峰值时湿度到达波谷值。

当数据文件为多变量时, 直接对两个变量进行相关分析往往不能真实地反映二者之间的相关关系, 需要用到偏相关分析从中剔除其他变量的线性影响, 在控制其他变量的线性影响下分析两变量之间的相关关系。分别选择温度、湿度、太阳净辐射与风速作为控制变量, 依次进行剔除, 观察分别在剔除其中一个因子后, 其他三者对蒸发量的影响大

小变化, 温度、湿度、净辐射、风速 4 项气象因子与小时蒸发量影响的偏相关分析结果如图 4 所示(各气象因子与蒸发量的相关系数取绝对值)。首先将温度(T_a)作为控制变量剔除其影响作用后, 湿度、净辐射、风速 3 项与水面蒸发量之间相关性显著下降, 下降幅度分别为 41.92%、51.49%、34.57%, 相关性平均下降率为 42.66%; 将湿度(RH)作为控制变量后, 温度、净辐射、风速与水面蒸发量之间相关性显著下降, 下降幅度分别为 18.51%、13.11%、53.9%, 平均下降率为 28.51%; 将太阳净辐射(R_n)作为控制变量剔除其影响作用后, 温度、湿度与蒸发量的相关性分别下降 34.04%、21.54%, 风速与蒸发量的相关性则上升 12.83%, 平均下降率为 14.25%; 将风速(U)作为控制变量剔除其影响后, 其他 3 项气象因子与水面蒸发量的相关性平均下降 8.63%。由此得出, R_n 、 U 与 ET_{pan} 的相关性在很大程度上受 T_a 和 RH 影响, R_n 与 U 对 ET_{pan} 产生的影响作用很大程度上可由 T_a 与 RH 替代。

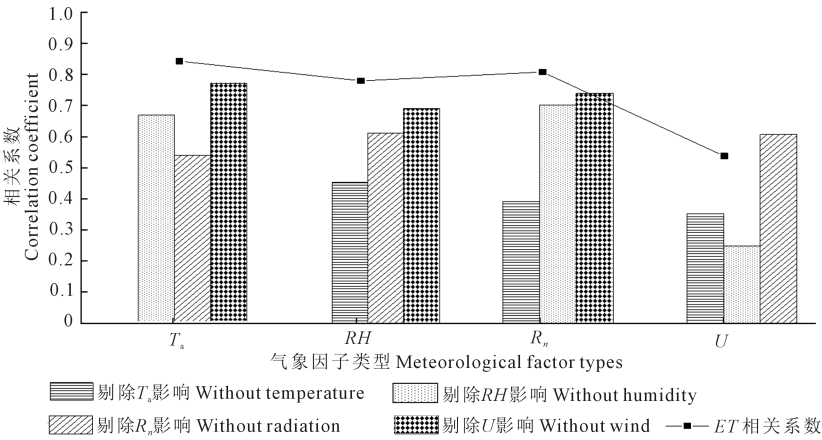


图 4 偏相关分析下气象因子与蒸发量相关系数变化

Fig.4 Correlation coefficient between meteorological factors and evaporation under partial correlation analysis

2.2 植物蒸腾量(ET_c)对气象因子的响应

由 2019 年 6 月 6 日—2019 年 6 月 30 日绿萝小时蒸腾量 ET_c 与 5 项气象因子关系图看出(图 5a, 纵坐标取相关系数绝对值, 只考虑各因子相关性大小, 忽略正负作用), ET_c 与气象因子之间的相关性 > 净辐射($r=0.806$) > 湿度($r=0.769$) > 风速($r=0.482$) > 气压($r=0.357$), 其中对绿萝蒸腾量变化存在显著影响($\alpha=0.01$)的因子为温度、湿度与太阳净辐射。6 月 20 日有较强降雨过程, 空气中水分长期处于饱和状态, 各因子与蒸腾量之间的关系均远远小于其余几日。绿萝蒸腾过程中, 太阳净辐射、温度、湿度三者关系密切, 趋势一致(图 5b)。

2.3 蒸发量、蒸腾量与温度、湿度关系拟合

2.3.1 温度、湿度二者对水面蒸发量的预测 通过以上分析认为, 温度与湿度是影响蒸发皿水面蒸发与绿萝蒸腾耗水的最主要因子, 室外蒸发皿蒸发量对温、湿度的响应情况如图 6 所示, 其二者的影响显著, 蒸发量的变化与温度同步。随着温度的升高, 蒸发量呈上升趋势; 湿度与蒸发量呈负相关关系, 随着空气中湿度的升高水面蒸发量降低。蒸发量的最大值出现在白天气温最高的午后, 最小值出现在气温最低的凌晨时刻, 同时发现, 尽管夜间蒸发量较小, 但其值并不为零。基于蒸发皿一个补水周期(2018 年 6 月 24 日 16:00—2018 年 7 月 6 日 16:00)内的小时实测蒸发量, 构建了蒸发量与温、湿度之

间的回归方程(图7a),并通过另一补水周期2018年8月3日10:00—2018年8月12日10:00)的电子秤小时水面蒸发数据与温、湿度数据对其拟合效果进行了验证(图7b),显示温、湿度可以较好地拟合预测蒸发皿水面蒸发($R^2=0.893$),但发现8月的拟合蒸发量值的峰值存在低于实际蒸发量的现象,推测试验场地处于半干旱季风区,8月风速的影响较大,由于拟合方程仅参考温、湿度,忽略风速影响导致。

2.3.2 温度、湿度二者对植物蒸腾量的预测 对2019年6月充分灌水条件下的小时绿萝蒸腾耗水

量与对应气温、湿度,建立估算经验模型,模型计算结果与电子秤实测结果的对比见图8,在6月14日与6月30日存在模拟值高于实测值现象,通过对比其他气象因子的变化,两日该时刻均有降雨,认为是忽略了气压的变化而导致预测值偏高,除此之外拟合效果良好($R^2=0.724$)。分析表明,综合2.3.1中温度与湿度与水面蒸发的拟合效果,显示表明只利用简单易得的气象资料(气温与相对湿度)可较好地拟合预测蒸发蒸腾量。

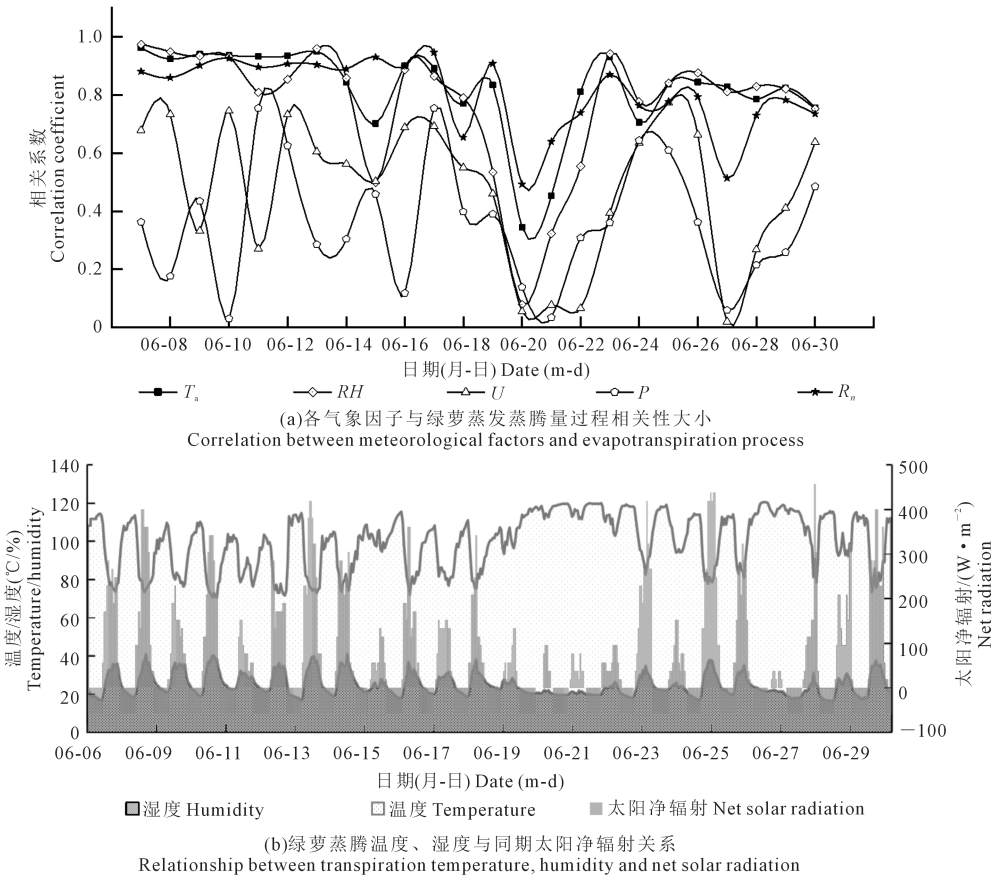


图5 绿萝蒸发蒸腾量变化过程与气象因子间的关系

Fig.5 Relationship between changes in evapotranspiration and meteorological factors

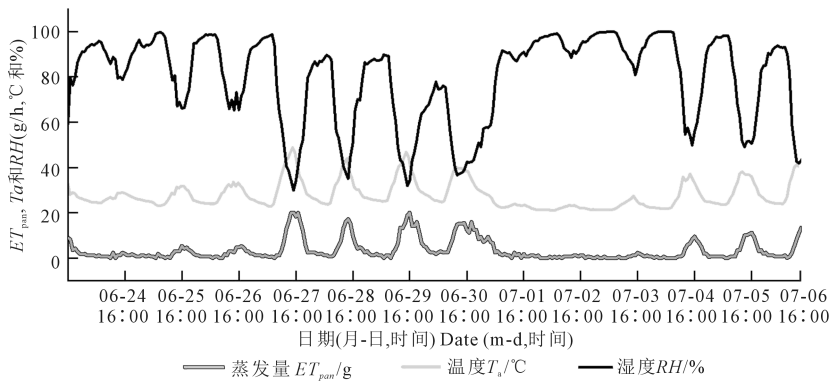


图6 蒸发量对温、湿度的响应

Fig.6 Response of transpiration to its temperature and humidity

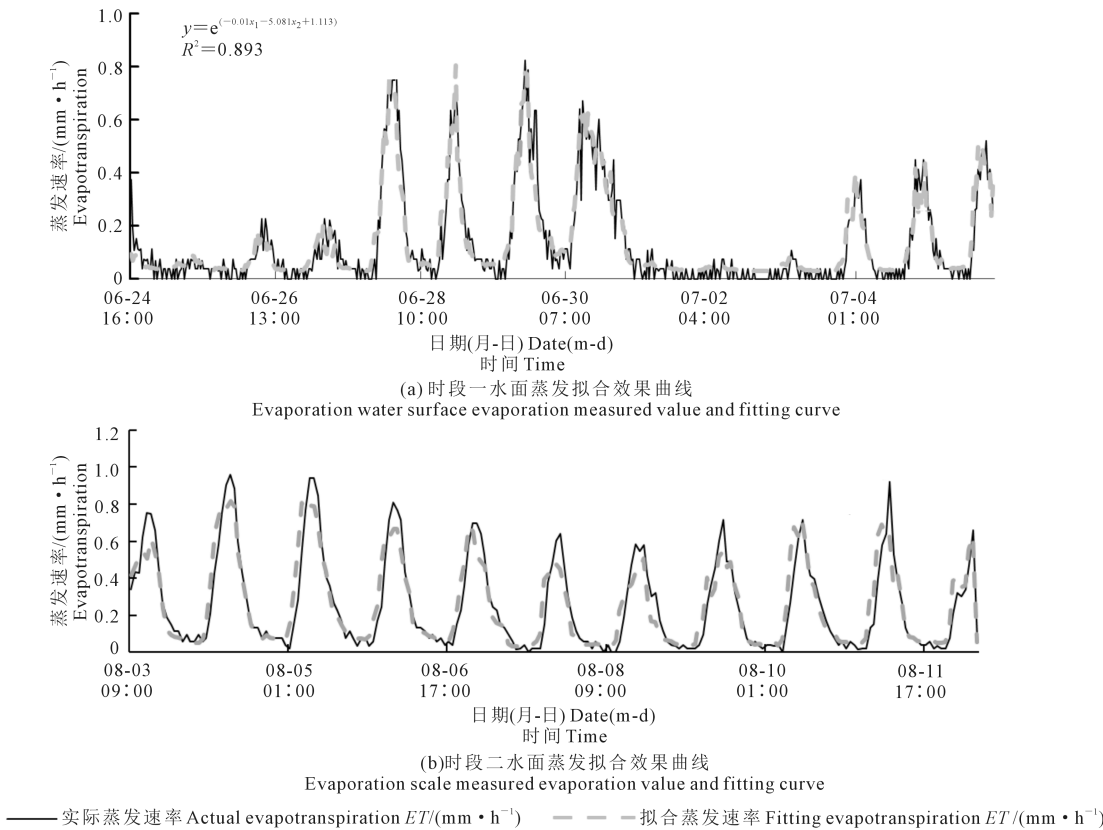


图 7 温、湿度对小时水面蒸发拟合效果图

Fig.7 Effect of temperature and humidity on the evaporation of hourly water surface

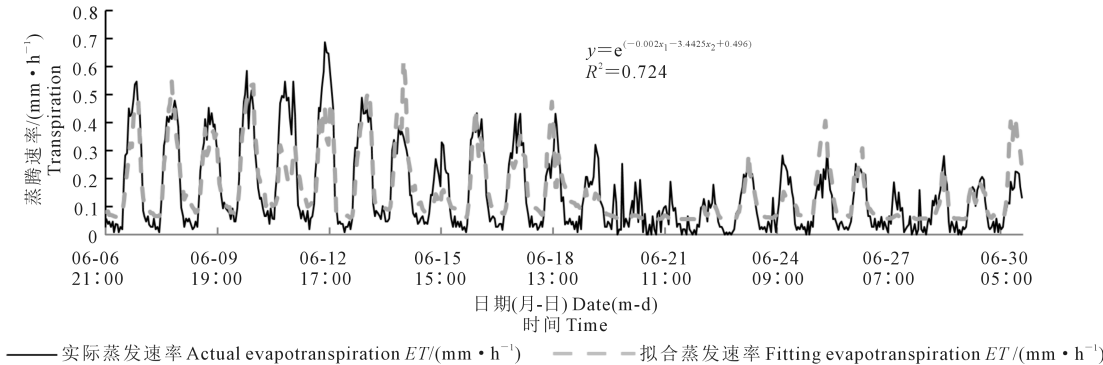


图 8 温、湿度对绿萝蒸腾耗水拟合效果图

Fig.8 Effect of temperature and humidity on transpiration water consumption

3 讨 论

气象因子对蒸散发的影响并不是单独作用^[16], 表现为各个因子共同作用影响蒸发蒸腾量的变化。有研究表明,在日时间尺度内太阳辐射的升高会导致温度的升高^[18],但在实际应用中,太阳辐射或太阳净辐射量的获取难度远远高于温度。通过本文的探索与验证,温、湿度在一定程度上可以替代太阳辐射对蒸腾蒸发的影响,利用温度、湿度两个因

子可以较好地表示水面蒸发与绿萝蒸腾量的变化,较大程度上简化了水面蒸发与植物蒸腾计算时所需的气象因子,会给实际农业生产中蒸腾蒸发量预测带来极大便利;辐射对蒸散发的影响之所以可以被温度和湿度所替代,从能量交换的角度考虑,太阳辐射是引起地面、水面和大气等温度升高的主要能量来源,温度是影响作物生长状态基本的气象因素,温度的升高和降低直接反映了太阳净辐射的大小,温度的变化正是能量增减的体现,水的蒸发和

凝结也是大气能量交换的体现,太阳辐射会同时引起空气和水体的升温,空气温度的高低决定空气接纳水汽能力的高低,水面温度的高低决定了水面处分子逃逸出水面的能力,温度越高,水分子获得的动能越大,蒸发越大。

同时,由于气压的时空变异产生空气对流而形成风,风也是影响蒸散发的主要气象因子之一,所以在月尺度上风速对 ET_{pan} 、 ET_c 的影响均不显著,一是因为试验场位于关中盆地风速较小且风速对其产生的是瞬时影响(体现在风速对小时蒸发量影响显著),另一方面,认为空气对流的加大会导致温度、湿度的变化:2.1.1 中由于时间尺度跨度大,既包含了月尺度日蒸发量的影响因素又考虑到了不同季节对蒸发量产生影响的气象因素,故所包含的气象因子多数(主要体现在气压对蒸发量的显著影响上)在较长的时间尺度,例如9个月的长时间实测水面蒸发量的变化受气压的影响较大,发现如果将时间尺度放短,在小时尺度上气压的影响不再显著,则通过影响温、湿度变化对蒸散发量变化产生影响。并且在不同时间、不同季节情况下,主要影响的气象因子种类也会改变^[19],故本研究做了不同时间尺度下各因子对蒸发蒸腾量影响作用的研究,得到同样结果(风速是影响小时蒸发量的因子但对日蒸发量的影响不显著),在更长时间尺度,包含不同季节变化情况下,温、湿度可以较好体现出各气象因子的综合作用。

本文在气象因子的选择上不使用饱和水汽压差有以下两个原因:(1)由于 VPD 的计算是由温、湿度估算得到的: $VPD = 0.611 \times e^{\left[\left(17.27 \times T_a \right) / \left(T_a + 237.3 \right) \times \left(1 - RH / 100 \right) \right]}$,若同时考虑这三者,会由于重复考虑温、湿度而存在信息冗余情况。已有研究表明 VPD 是影响油松林蒸腾的主要因子^[20],但仅能表明温、湿度综合作用对蒸腾蒸发影响较大,不能得到温度、湿度二者分别对蒸腾蒸发的作用大小与作用规律。(2)Cemusak L A 等^[21]发现灰杨蒸腾速率随 VPD 线性增加^[21],本文简化计算蒸发蒸腾所需的气象因子,旨在建立用温、湿度预测蒸发蒸腾量的简便模型,将温、湿度分开研究有利于进一步观测温度、湿度两项与水面蒸发与蒸腾之间的函数关系,以确认其间呈线性或非线性关系。

在充分灌水条件下确定影响植物耗水主要气象因子,对简化植物蒸腾耗水量预测模型十分重要。

除此之外,Wang 等^[22]发现随着生长季的变化,植物蒸腾量与各影响因素间的关系会发生改变,随着作物种类、气候、灌溉方式以及其它农田管理条件不同而发生变化^[23],已有研究表明植被蒸腾耗水是导致土壤水分亏缺从而形成土壤干层的主因^[24]。在本研究基础上与土壤蒸发量(K_e)与基础作物系数(简称作物系数, K_c)结合可以计算得到实际蒸腾蒸发量(ET_c),进一步探讨 SPAC 系统之间水分动态和量化关系,最终达到计算实时蒸腾耗水量,以此来有效解决下垫面湿度变化与蒸发问题^[25],以期达到科学合理地配置有限水资源,制定高效实时的灌溉计划与作物灌溉量的目的。

在误差允许范围内,同时考虑到气象因子与植物作物的生理生态因子对蒸散发量的影响,用影响最主要并且易获取参数进行作物蒸腾蒸发量的计算,将为今后植物蒸散发耗水量的研究以及实际灌溉带来极大的便利。文中所拟合初步蒸散模型对气温与湿度要求是明确的,且也是初步进行探索,目前,关于不考虑太阳辐射、植物蒸散发量与温度、湿度的研究尚未完善,为得到更为完善的蒸散发模型,还需参考其他地区研究成果确定温、湿度范围,再进一步搜索求得各参数最优解。

考虑到不同地区不同季节温度与湿度的影响可能存有差异,本文研究仍存在不足:文中水面蒸发和绿萝蒸腾模型中各参数是基于陕西杨凌旱地研究院试验场数据所得,其他地区需先率定参数或将各参数与已有研究对比后再应用。

4 结 论

通过对蒸发皿水面蒸发量与盆栽绿萝蒸发蒸腾量的监测以及对气象因子的获取分析,研究发现:

(1)影响蒸发皿水面蒸发量的3个主要气象因子为温度(T_a)、平均相对湿度(RH)与太阳净辐射(R_n)。在日尺度下,各气象因子与日水面蒸发量的相关关系由小到大依次为: $T_a (r = 0.809) > P (r = -0.56) > R_n (r = 0.526) > RH (r = -0.44) > U (r = 0.041)$;在小时尺度下,各气象因子与水面蒸发皿小时蒸发量的相关性大小依次为: $T_a (r = 0.843) > R_n (r = 0.808) > RH (r = -0.780) > U (r = 0.538) > P (r = -0.113)$,温度、湿度与太阳净辐射三者对蒸发量的影响显著且稳定,气压影响不稳定,且主要体现在夏季与冬季的差异上,故不认为其是影响蒸腾蒸发

量的主要因子。

(2)影响绿萝蒸发蒸腾量的主要气象因子为:气温(T_a)、平均相对湿度(RH)、太阳净辐射(R_n), $T_a(r=0.819)>R_n(r=0.806)>$ 湿度($r=0.769$)在 $\alpha=0.01$ 水平上极显著。

由此可见,在试验条件下影响植物蒸发蒸腾量的主要气象因子为温度、太阳净辐射、湿度,与蒸发皿水面蒸发具有一致性。

3)净辐射与气温和湿度间存在显著的相关关系($r=0.718, r=-0.639$),基于温度和湿度与蒸发蒸腾量之间的相关关系建立的水面蒸发量和绿萝蒸发蒸腾量回归方程,能够较好地反映蒸发蒸腾量变化过程($R^2=0.893$ (水面蒸发), $R^2=0.724$ (绿萝蒸腾))。

参 考 文 献:

- [1] Shimelis G S, Srinivasan R, Melesse A M, et al. SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(3):357-367.
- [2] Martin J, Markus R, Philippe C, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. Nature, 2010, 467(7318):951-954.
- [3] Li J, Zhu T, Mao X M, et al. Modeling crop water consumption and water productivity in the middle reaches of Heihe River Basin [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123:242-255.
- [4] Kelliher F M, Köstner B M M, Hollinger D Y, et al. Evaporation, xylem sap flow, and tree transpiration in a New Zealand broad-leaved forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 62(1-2):53-73.
- [5] Grainer A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2000, 100(4):291-308.
- [6] 周剑,程国栋,李新,等.应用遥感技术反演流域尺度的蒸散发[J].水利学报,2009,40(6):679-687.
- [7] 岳广阳,赵哈林,张铜会,等.小叶锦鸡儿灌丛群落蒸腾耗水量估算方法[J].植物生态学报,2009,33(3):508-515.
- [8] 刘国水,刘钰,蔡甲冰,等.农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系[J].水利学报,2011,42(3):284-289.
- [9] 蔡甲冰,张宝忠,魏征,等.河套灌区玉米和向日葵 ET 的 S-I 估算模型关键参数分析[J].农业工程学报,2019,35(8):140-148.
- [10] Rhys W, Belinda M, Melanie Z, et al. Comparing the Penman - Monteith equation and a modified Jarvis-Stewart model with an artificial neural network to estimate stand-scale transpiration and canopy conductance [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2009, 373(1-2):256-266.
- [11] Morille B, Migeon C, Bournet P E. Is the Penman-Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a new guinea impatiens crop [J]. Scientia Horticulture, 2013, 152(152):80-91.
- [12] Antonio R P, Steve R G, Nilson A V N. Sap flow, leaf area, net radiation and the Priestley - Taylor formula for irrigated orchards and isolated trees [J]. Agricultural Water Management, 2007, 92(1-2):48-52.
- [13] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469):839-855.
- [14] 康绍忠,刘晓明,熊运章.土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M].北京:水利电力出版社,1994.10-15.
- [15] Parth G, Manta P. Bioinformatics: An Application in Information Science[M].Charotar: Springer, 2018.
- [16] Jin R, Zhang B, Liu X Q, et al. Study of biological performance of Chinese materia medica with either a cold or hot property based on the three-element mathematical analysis model [J]. Journal of Chinese Integrative Medicine, 2011, 9(7):715.
- [17] 李辉东,关德新,袁凤辉,等.BP 神经网络模拟杨树林冠蒸腾[J].生态学报,2015,35(12):4137-4145.
- [18] 张静,王力.黄土塬区苹果园蒸散与环境因素的关系[J].林业科学,2018,54(3):29-38.
- [19] 钟巧,焦黎,李稚,等.博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J].干旱区地理,2019,42(1):105-114.
- [20] Suleiman A A, Tojo Soler C M, Hoogenboom G. Evaluation of FAO-56 crop coefficient procedures for deficit irrigation management of cotton in a humid climate[J]. Agricultural Water Management,2007, 91(1-3):33-42.
- [21] Cernusak L A, Goldsmith G R, Arend M. et al. Effect of vapor pressure deficit on gas exchange in wild-type and abscisic acid-insensitive plant[J]. Plant Physiology,2019,181(4):1573-1586.
- [22] Wang Y L, Liu G B, Kume T, et al. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semi-arid region of Loess Plateau, China[J]. Journal of Forest Research, 2010,15(4):241-251.
- [23] 刘恋,张敬晓,靳姗姗,等.限定枣树生长下的枣林耗水特征[J].干旱地区农业研究,2019,37(4):10-14.
- [24] 徐力刚,许加星,董磊,等.土壤-植物-大气界面中水分迁移过程及模拟研究进展[J].干旱地区农业研究,2013,31(01):242-248.