

# 参考作物蒸发蒸腾量对关中地区主要气象因素 变化量的敏感性分析

李天军,曹红霞

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

**[摘要]** 【目的】分析关中地区参考作物蒸发蒸腾量( $ET_{ref}$ )对气象因素变化量(气象变量)的敏感性,以及敏感系数法在单气象因素变化和多气象因素变化下估算  $ET_{ref}$  的能力(预测能力)。【方法】依据关中地区 31 个气象站 41 年的气象观测资料,利用敏感系数法计算并分析关中不同地区多年日平均和月平均  $ET_{ref}$  对气象变量的敏感性;探讨不同时期对关中地区参考作物蒸发蒸腾量最具影响的气象因素;同时利用实际的数据检验多气象因素同时变化时联合公式估算  $ET_{ref}$  的精确度。【结果】关中地区  $ET_{ref}$  对气象变量的敏感性随时间和地区变化。总的来说,相对湿度为关中地区  $ET_{ref}$  最敏感的气象因素;其次是太阳短波辐射和平均气温,其敏感性相近,在 5~8 月份对  $ET_{ref}$  影响最强,在 12 到次年 2 月份最弱;风速总的来说是对  $ET_{ref}$  影响最弱的因素。【结论】敏感系数在单个或多个气象因素变化情况下均有较强的预测能力。

**[关键词]** 参考作物蒸发蒸腾量;气象因素;敏感性分析;关中地区

**[中图分类号]** S274.1

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2009)07-0068-07

## Research of the sensitivity of the reference crop evapotranspiration to main meteorological factors in the Guanzhong region

LI Tian-jun, CAO Hong-xia

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100 China)

**Abstract:** 【Objective】 The research analysed the sensitivity of the reference evapotranspiration ( $ET_{ref}$ ) to climatic variables in Guanzhong region, and the power of sensitivity coefficients method reckoning the  $ET_{ref}$  response to a perturbation of one or more climatics (predictive power). 【Method】 Using the sensitivity coefficient method, based on the meteorological data of more than 31 weather stations about 41 years, the sensitivity of the average monthly and yearly  $ET_{ref}$  to climatic variables in different areas in Guanzhong region was studied in order to find the sensitivity coefficients which impacted  $ET_{ref}$  mainly in different periods and to test the accuracy of the co-formula used in the Guanzhong region by the actual data as well. 【Result】 The sensitivity of  $ET_{ref}$  to climatic variables in the Guanzhong region varied from region and time. All in all, relative humidity was the most sensitive factor in Guanzhong region, followed by net shortwave radiation and air temperature, which had similar sensitivities and most impact to  $ET_{ref}$  from May to Aug. and least impact from Dec. to Feb. . Generally speaking, windspeed had the least impact. 【Conclusion】 Sensitivity coefficients have a high predictive power under the perturbation of one or more climatic changes.

**Key words:** reference crop evapotranspiration; meteorological factor; sensitivity analysis; Guanzhong re-

\* [收稿日期] 2008-08-12

[基金项目] 国家自然科学基金和水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(50279042);西北农林科技大学科技支撑计划项目(2007BAD88810)

[作者简介] 李天军(1982-),男,河南信阳人,在读硕士,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:shiqulang@163.com

[通信作者] 曹红霞(1971-),女,新疆昌吉州人,副教授,硕士生导师,主要从事农业水土环境、节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:chx662002@yahoo.com.cn

gion

参考作物蒸发蒸腾量( $ET_{ref}$ )的敏感性分析是指,在指定时期内测定其中一个或几个气象因素发生变化时,气象变量对  $ET_{ref}$  变化影响程度的一种分析方法。敏感性分析在研究气象变量与  $ET_{ref}$  的关系,以及检验气象数据的可靠性和估算  $ET_{ref}$  的精度方面有重要的意义,对精确分析气候变化对区域参考作物蒸发蒸腾量的影响有重大帮助。区域参考作物蒸发蒸腾量对于气象变量的敏感性研究,可为农作物蒸发蒸腾量的精确估算,以及在假定气候条件下农作物耗水量的预测提供参考。

国外学者很早就开始研究区域参考作物蒸发蒸腾量对气象变量的敏感性问题<sup>[1-9]</sup>,国内学者近几年也开始此方面的研究<sup>[10-11]</sup>。目前,该类研究多采用敏感曲线法<sup>[3,7,9]</sup>,即通过绘制曲线研究气象因素的相对变化量与  $ET_{ref}$  的相对变化量之间的关系。该方法简单、精确,但在需要分析数据较多、时间段较长、面积较大的情况下就显得非常繁琐。近年来,又出现了另一种称为敏感系数的研究方法<sup>[4]</sup>,该方法采用数学公式定义无量纲的敏感系数,使用方便、精度高,且能满足大时空跨度分析的要求。但根据不同的计算蒸发蒸腾量模型会产生很多不同的敏感系数方法,同一个气象变量的敏感系数在不同模型下计算结果也各异<sup>[1-2,6,8-9]</sup>,且不同模型计算的敏感系数随着时间和地点的变化而不同,导致很难比较各敏感系数方法。目前,计算  $ET_{ref}$  应用最多的是 FAO-56 推荐采用的 Penman-Monteith (P-M) 公式<sup>[12]</sup>,作为一种普遍适用且精度高的计算  $ET_{ref}$  的方法<sup>[13-16]</sup>,P-M 公式的主要缺点是对数据需求量很

大。一般来说,如果数据充足,建议采用基于 P-M 模型的敏感系数法。目前,有关陕西关中地区  $ET_{ref}$  对气象变量敏感性的研究很少。为此,本研究采用基于 P-M 模型的敏感系数法,分析了关中地区  $ET_{ref}$  对各气象变量的敏感性,并检验了该法在关中地区应用的精确性,以期为关中各地区气象变量提供可靠的敏感系数。

## 1 关中地区概况

关中地区位于陕西省中部,总面积 5.55 万  $km^2$ ,包括西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南 5 个省辖地级市,共 54 个县(市、区),是陕西省耕作最为发达的地区。关中地区以陕西秦岭北麓渭河冲积平原为主,平均海拔约 500 m,地势由西向东倾斜,以渭河为中心两侧地形向渭河倾斜。年平均气温 11~13  $^{\circ}C$ ,1 月平均气温 -3~1  $^{\circ}C$ ,7 月平均气温 23~27  $^{\circ}C$ ;年平均日照时数 1 500~2 200 h;降水量分布受山地地形影响比较显著,年平均降水量 500~700 mm。为半湿润区,具有暖温带气候特色。

## 2 气象站及气象资料

气象资料主要采用宝鸡、铜川、西安 3 个气象站 41 年的日气象资料和其他 31 个气象站(图 1)41 年的月气象数据。所提取的资料主要有:平均气温、2 m 高平均风速、平均水汽压、最高温度、最低温度、日照时数、平均空气相对湿度以及经纬度和高程等。由于没有实测资料,文中用到的太阳辐射是通过 P-M 公式用日照时数换算得到的太阳短波辐射。

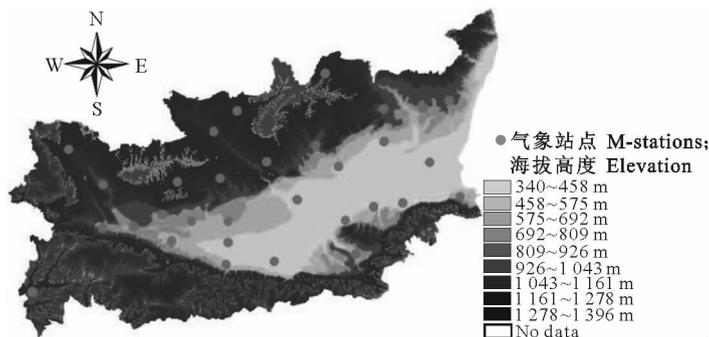


图 1 关中地区 31 个气象站点及海拔空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of the 31 meteorological stations and elevation in the Guanzhong region

宝鸡、铜川、西安分别位于关中的西、东和中部,平均海拔分别为 612,917 和 396 m。由图 2 可以看

出,3 个气象站多年平均相对湿度(HD)有 2 个“峰”和 1 个“峡谷”,3 地区 HD 均以 10 月份最大,西安、

宝鸡以 6 月份最低,铜川以 1 月份最低,变化幅度较大;多年平均风速(WD)为 0.5~3.0 m/s,整体变化幅度较小,最大值出现在 4 月份,且铜川的 WD 普遍高于宝鸡和西安;多年平均气温(TA)和多年平均太阳短波辐射(RS)随季节变化呈抛物线形状,其中 1~6 月份呈上升趋势,7~12 月份呈下降趋势。RS

峰顶有一凹区,最高值分别出现在 6 和 7 月份;TA 有凹区但不明显,12 和 1 月份除铜川外其他地区基本都在零度以上。从图像整体上看,3 站多年日平均气象因素的变化曲线走势基本一致。另外,铜川的 HD 和 WD 与其他站相比差值较高,这可能是由于其海拔高所致。

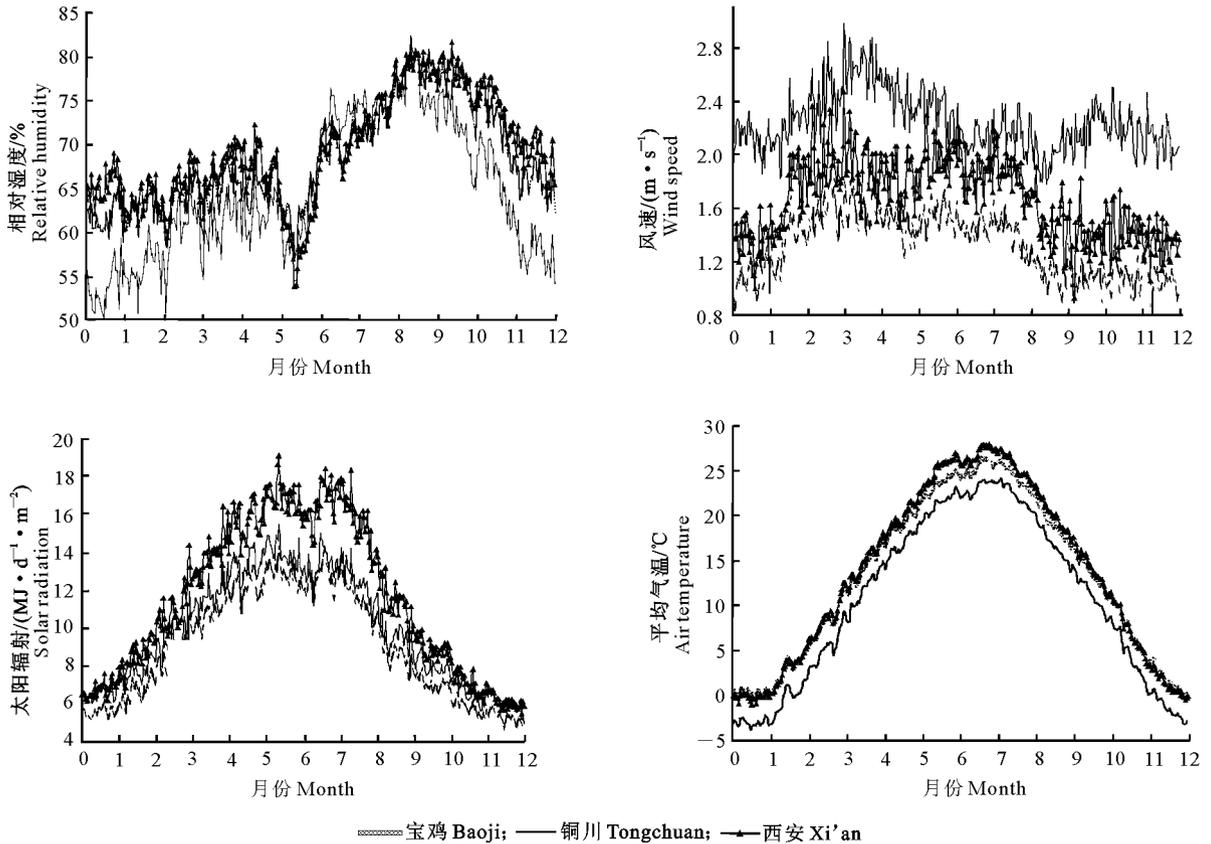


图 2 关中地区宝鸡、铜川、西安 3 站多年日平均气象因素的变化趋势

Fig. 2 Average daily variation of meteorological factors in Baoji, Tongchuan, Xi'an stations in the Guanzhong region

### 3 研究方法

#### 3.1 敏感性研究方法

目前,研究敏感性的方法主要有敏感曲线法和敏感系数法 2 种。敏感曲线法是由曲线斜率及线性程度显示敏感性强弱(以下称敏感性)的方法;敏感系数法是在 1974 年由 McCuen 等<sup>[1,4,6]</sup>提出的一种用数学定义的敏感性分析方法,该方法用气象变量的敏感系数反映其敏感性。公式(1)为基于 P-M 公式推求的无量纲相对敏感系数(以下简称敏感系数)公式:

$$S_{vi} = \lim_{\Delta vi \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta ET_{ref} / ET_{ref}}{\Delta vi / vi} \right) = \frac{\partial ET_{ref}}{\partial vi} \cdot \frac{vi}{ET_{ref}} \quad (1)$$

式中: $S_{vi}$ 是第  $i$  个气象变量的敏感系数,是该气象变量对  $ET_{ref}$  的偏导数; $vi$ 是第  $i$  个变量; $\Delta ET_{ref}$ 和  $\Delta vi$

分别是  $ET_{ref}$  和  $vi$  的微分; $\partial ET_{ref}$ 和  $\partial vi$ 分别是  $ET_{ref}$ 和  $vi$  的偏微分。

由于不同的气象因素有不同的变化范围及单位,为了便于比较敏感性,敏感系数法采用求偏导数把研究对象转换为无量纲形式。通常一个正/负的敏感系数表示当气象变量增加时  $ET_{ref}$  会随之增加/减少。敏感系数的大小反映了敏感曲线在原点的斜率,敏感曲线在图表上的线性程度决定了敏感系数的预测能力<sup>[5]</sup>。一般来说,如果敏感曲线在 origin 范围内表现为线性,则敏感系数有足够的精确度来代表该点附近范围内敏感曲线的斜率。敏感系数绝对值越大,则气象变量对  $ET_{ref}$  的影响也越大。例如,当一个气象变量的敏感系数为 0.3 时,表明单气象因素变化时(其他变量不变),该气象因素相对变化

量增加 10% 会使  $ET_{ref}$  相对变化量增加 30%。

相对于敏感曲线法,敏感系数法中的敏感系数可用确定的公式计算,在数值上直接反映某气象变量的敏感性强弱,不需要做太多图表,同时敏感系数法也便于采用多个气象变量的敏感系数,计算分析多种气象因素同时变化条件下  $ET_{ref}$  的变化量,在图表中能表示连续时间段气象变量的敏感系数,并可借用 ArcGIS 等工具直观地显示一定时间和范围内各气象变量的敏感性。

### 3.2 转换曲线和敏感系数的预测能力

敏感系数曲线也叫转换曲线,如果敏感系数曲线用  $y=f(x)$  表示,则转换曲线用  $y=f(x)/x$  表示,其原点用该处敏感系数表示<sup>[5]</sup>,曲线上点的  $y$  值用转换因子表示。转换因子直接反映敏感曲线上各个点的斜率,其倾斜程度可反映敏感曲线的线性程度。转换曲线越平说明敏感系数预测能力越大,即用敏感系数代替转换因子更加精确,计算的  $ET_{ref}$  误差更接近实际  $ET_{ref}$ 。敏感系数的预测能力随着转化曲线倾斜程度的增加而降低。转换因子乘以气象

因素相对变化量可以得到  $ET_{ref}$  相对变化量。

## 4 结果与分析

### 4.1 宝鸡、西安、铜川日平均气象变量敏感系数的变化趋势

从图 3 可以看出,宝鸡、西安、铜川 3 个气象站的单个气象因素敏感系数随时间而变化。与图 2 比较,除风速外其他气象因素敏感系数的变化趋势与其自身的变化趋势均很相似。相对湿度敏感系数 ( $S_{HD}$ ) 除夏季略低外,其他时间均较高。 $S_{HD}$  最大值出现在 10 和 11 月份,总的来说,相对湿度对减少  $ET_{ref}$  的影响非常显著。风速敏感系数 ( $S_{WD}$ ) 的变化趋势是从 12 月份向 9 月份逐渐减少(在 6 月份有 1 个震荡),9 月份到 12 月份逐渐增加,年平均变化幅度总体较小。平均风速较高的铜川气象站的  $S_{WD}$  在冬季明显高于其他 2 个气象站。太阳短波辐射敏感系数 ( $S_{RS}$ ) 与平均气温敏感系数 ( $S_{TA}$ ) 的变化趋势相近,均表现为类似抛物线的形状,其值在冬季最小,夏季达到最大。

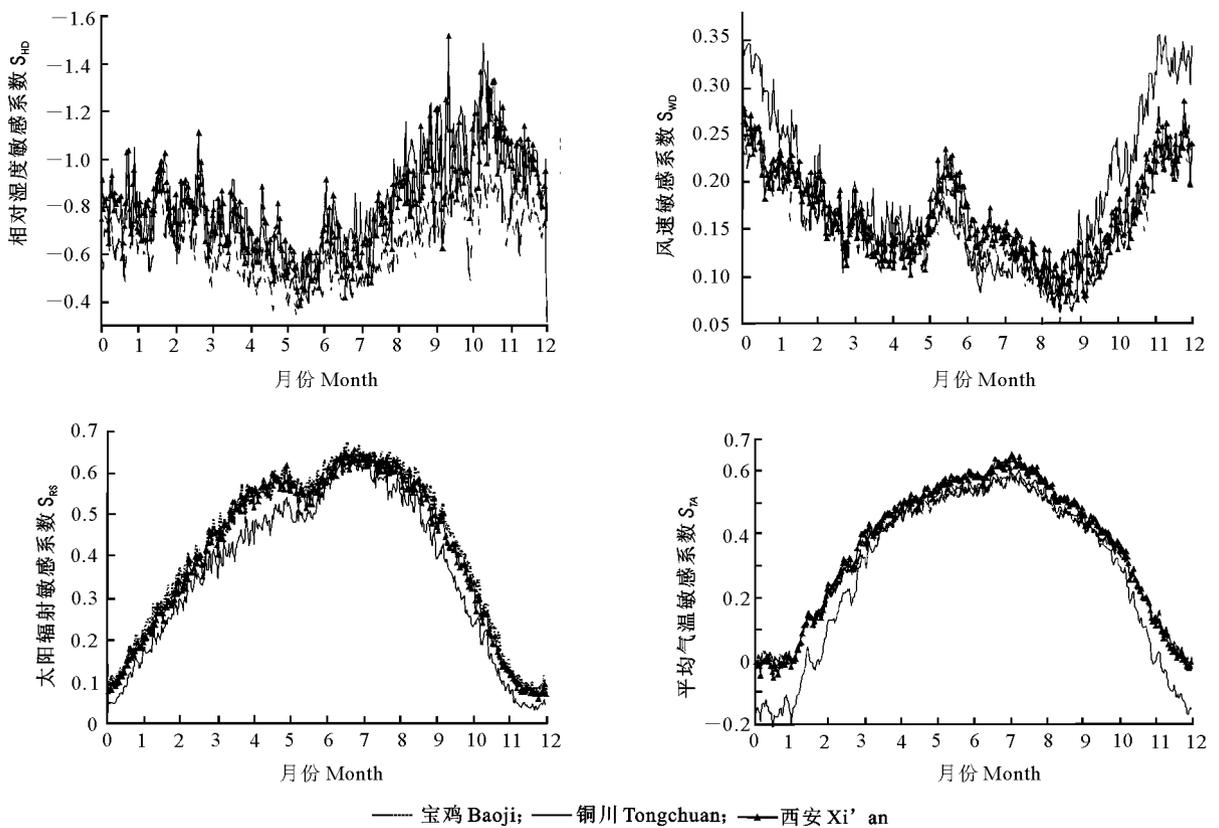


图 3 宝鸡、铜川和西安多年日平均气象因素敏感系数的变化趋势

Fig. 3 Mean daily sensitivity coefficients for wind speed, relative humidity, shortwave radiation and air temperature

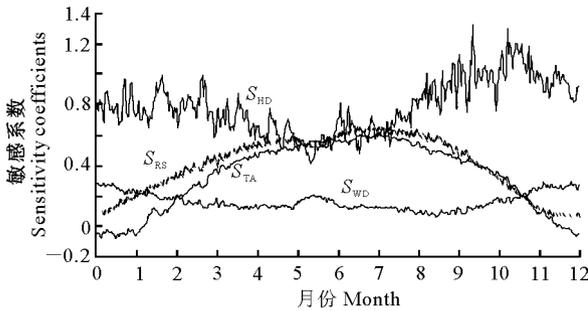


图 4 宝鸡、铜川、西安各主要气象变量多年日平均敏感系数的平均值  
(为了便于比较,图中的  $S_{HD}$  为原始  $S_{HD} \times (-1)$ )

Fig. 4 Average value of mean daily sensitivity coefficients for major climatic variables in Baoji, Tongchuan, Xi'an stations ( $S_{HD}$  is multiplied by  $-1$  to facilitate visual comparison)

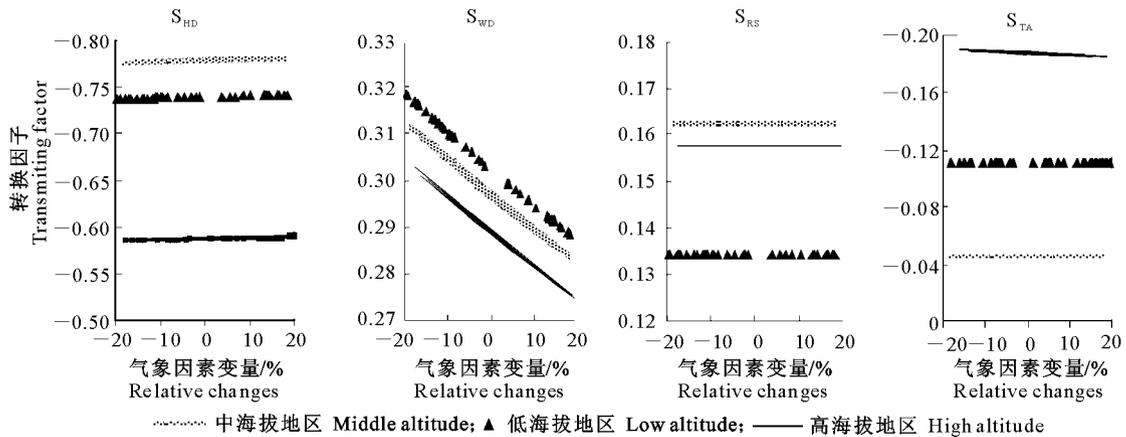


图 5 关中不同海拔地区 1 月份 4 个气象变量敏感系数的转换曲线

Fig. 5 Transmitting curves in January for each meteorological factor in the area of the Guanzhong region with different altitudes

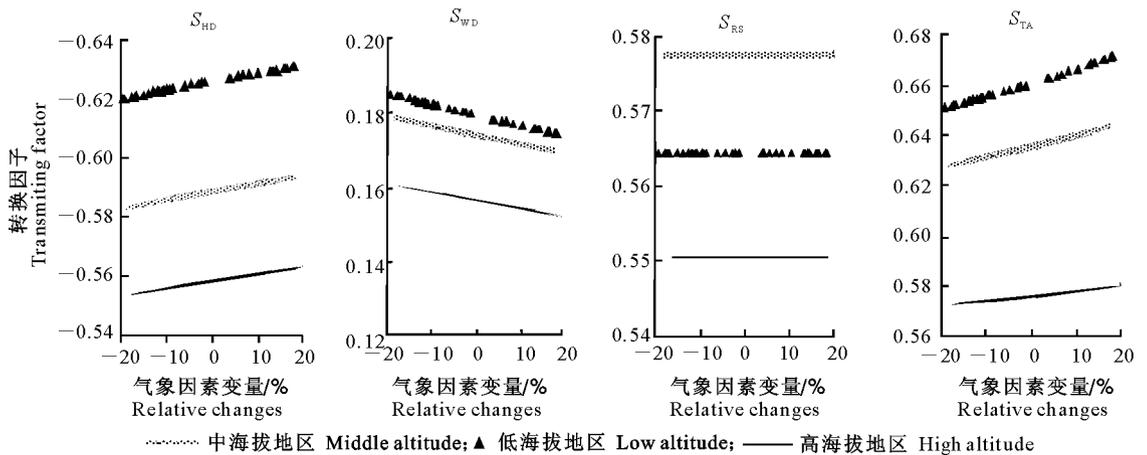


图 6 关中不同海拔地区 7 月份 4 个气象变量敏感系数的转换曲线

Fig. 6 Transmitting curves of July for each meteorological factor in the area of the Guanzhong region with different altitudes

采用关中 31 个气象站的月气象资料,并按海拔将气象站分为 3 部分,分别代表关中海拔高、低、中部地区。从图 5 和 6 可以看出:1 月份除  $S_{WD}$  转换曲线外其他转换曲线大都表现平缓,7 月份除  $S_{RS}$  转换

从图 4 可以看出,12 和 1 月份对 3 个气象站日平均  $ET_{ref}$  影响最大的气象因素是相对湿度,其次是风速,然后是太阳短波辐射和平均气温。在 1~2 月份影响顺序依次为  $S_{HD} > S_{RS} > S_{WD} > S_{TA}$ 。5~8 月份  $S_{HD}$ 、 $S_{RS}$  和  $S_{TA}$  相差不大,而  $ET_{ref}$  所占全年  $E_{Tref}$  的比例很大,所以影响这 3 个气象站  $ET_{ref}$  的关键气象因素除相对湿度外,也包括太阳短波辐射和平均气温。而总的来说,风速的影响最小。以上分析与其他一些相关研究<sup>[5,13]</sup>的结果相似。

#### 4.2 关中不同海拔地区单个气象变量敏感系数的转换曲线及其预测能力

图 5 和图 6 分别为关中高、低、中海拔地区单个气象变量敏感系数的转换曲线。

曲线外其他转换曲线均表现相对不平缓,尤其是中、低部的  $S_{TA}$ ,说明关中地区 1 月份  $S_{WD}$  和 7 月份的中、低部地区的  $S_{TA}$  对  $ET_{ref}$  的预测能力相对较差;从数值上看,转换因子 1 月份最大的是  $S_{HD}$  和  $S_{WD}$ , $S_{TA}$

最小,7月份最大的是  $S_{TA}$ ,其次是  $S_{RS}$ 、 $S_{HD}$ 、 $S_{WD}$  最小。各转换因子之间随地区不同大小各异,但总体上在相同月份与宝鸡、西安、铜川 3 个气象站对应的日平均气象变量敏感系数相近。

#### 4.3 多个气象因素同时变化时敏感系数的预测能力

$ET_{ref}$  对于气象变量的敏感性研究常常局限在单个气象变量上,而在实际应用中不可能只有 1 个气象因素的变化,因此有必要对多个气象因素同时变化下的情况进行研究。本文引进了含多个气象变量的公式(称为联合公式),并使用关中地区实际的日气象资料检测其对关中地区  $ET_{ref}$  的预测能力。该公式采用各气象变量敏感系数乘以气象因素相对变化量计算得到  $ET_{ref}$  的相对变化量<sup>[5]</sup>,表达方式如下:

$$\left(\frac{\Delta ET_{ref}}{ET_{ref}}\right) \cong \left(\frac{\Delta TA}{TA}\right) \cdot S_{TA} + \left(\frac{\Delta WD}{WD}\right) \cdot S_{WD} + \left(\frac{\Delta HD}{HD}\right) \cdot S_{HD} + \left(\frac{\Delta RS}{RS}\right) \cdot S_{RS} \quad (2)$$

式中:左边  $\Delta ET_{ref} / ET_{ref}$  表示  $ET_{ref}$  相对变化量,右边括号内  $\Delta vi / vi$  表示各个对应气象变量的相对变

化量, $S_{vi}$  表示对应气象变量的敏感系数。

检验联合公式准确性的方法是:(1)用宝鸡、铜川、西安 3 个气象站某年日平均气象数据作为原始数据,其他年份日气象资料为变化后的数据,分别计算每日 4 个气象因素相对于原始数据的相对变化量;(2)计算相对于原始数据的  $ET_{ref}$  的实际相对变化量;(3)用公式(2)计算  $ET_{ref}$  的估算相对变化量;(4)以  $ET_{ref}$  的实际相对变化量为自变量,估算的  $ET_{ref}$  相对变化量为因变量作图,得出其相关性,并比较它们的差异;(5)分别计算出实际  $ET_{ref}$  的绝对变化量和估算  $ET_{ref}$  的绝对变化量,然后用相同的方法作图,得出二者相关性。

本文采用宝鸡、铜川、西安 3 个气象站随机抽取的共 18 个年份的日气象资料计算(由于篇幅限制,只随机抽取 2 张(图 7)),结果都显示实际  $ET_{ref}$  近似等于估算  $ET_{ref}$ 。该结果与 Gong 等<sup>[6]</sup>的研究结果相似,说明关中地区敏感系数在多气象因素同时变化下的预测能力较强,用联合公式估算  $ET_{ref}$  能达到较高的准确度。

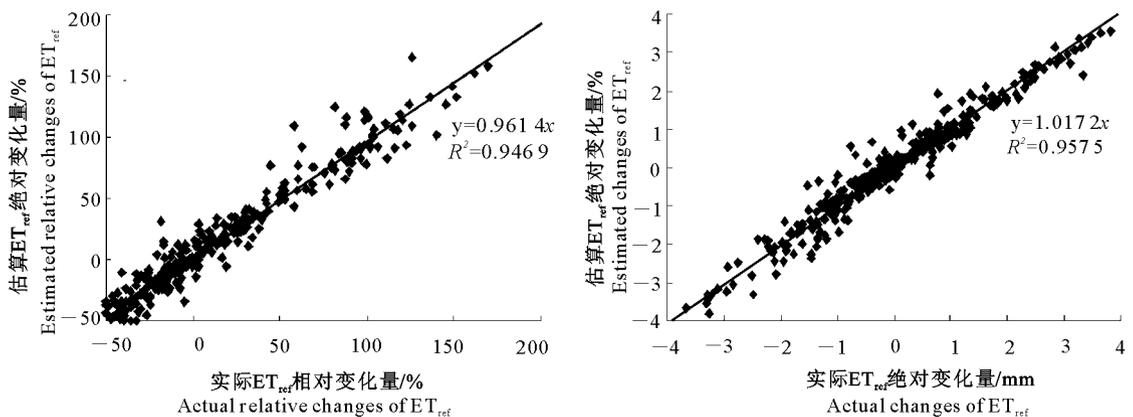


图 7 多气象因素同时变化时实际与估算  $ET_{ref}$  的相对与绝对变化量的比较(西安 2004~2005 年日气象资料)

Fig. 7 Actual vs. estimated relative and absolute perturbation of  $ET_{ref}$  under simultaneous co-perturbation of variables(Xi'an 2004—2005 daily data)

## 5 结 论

总体上,关中各地区参考作物蒸发蒸腾量对平均气温、风速、太阳短波辐射和相对空气湿度 4 个主要气象变量的敏感性,随着时间的变化而出现较为规律的变化。各气象变量对  $ET_{ref}$  的影响程度及其敏感系数的预测能力各异。在同样的相对变化量下,从日平均上来看,相对湿度是对关中地区  $ET_{ref}$  最有影响的气象因素,其次是太阳短波辐射和平均

气温,最弱为风速;从月平均上来说,相对湿度仍然是最有影响的气象因素,还有 5~8 月份的太阳短波辐射和平均气温,风速只在 12 和 1 月份对  $ET_{ref}$  的影响稍微超过太阳短波辐射和平均气温。各气象变量敏感系数及其预测能力随时间和地区不同而变化,总的来说,预测能力表现最强的是  $S_{RS}$ 、 $S_{HD}$ 、 $S_{TA}$  和  $S_{WD}$  相对较弱。研究还表明,采用敏感系数方法在单个或多个气象因素变化时估算  $ET_{ref}$  误差较小。

在实际应用中,气象变量的敏感系数与气象因

素的相对变化量结合起来,就可以分析在一定范围内气象因素对  $ET_{ref}$  的实际影响。该方法可以为参考作物蒸发蒸腾量对未来气候变化的响应研究提供帮助。

### [参考文献]

- [1] Beven K. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates [J]. *Journal of Hydrology*, 1979, 44:169-190.
- [2] Coleman G, DeCoursey D G. Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models [J]. *Water Resource Research*, 1976, 12(5):873-879.
- [3] Goyal R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India) [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69:1-11.
- [4] Hupet F, Vanclooster M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 243:192-204.
- [5] Gong L B, Xu C Y, Sven H, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329:620-629.
- [6] McCuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation [J]. *Water Resource Bulletin*, 1974, 10(3):486-498.
- [7] McKenney M S, Rosenberg N J. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 64:81-110.
- [8] Saxton K E. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation [J]. *Agricultural and Meteorology*, 1975, 15:343-353.
- [9] Singh V P, Xu C Y. Sensitivity of mass transfer-based evaporation equations to errors in daily and monthly input data [J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11:1465-1473.
- [10] 曹红霞, 栗晓玲, 康绍忠, 等. 陕西关中地区参考作物蒸发蒸腾量变化及原因 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11):8-16.  
Cao H X, Su X L, Kang S Z, et al. Changes of reference crop evapotranspiration and causes in Guanzhong Region of Shaanxi Province [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11):8-16. (in Chinese)
- [11] 佟玲, 康绍忠, 栗晓玲. 石羊河流域气候变化对参考作物蒸发蒸腾量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2):15-18.  
Tong L, Kang S Z, Su X L. Impacts of climate change on reference crop evapotranspiration in Shiyang River basin [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(2):15-18. (in Chinese)
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement* [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [13] 张瑞美, 彭世彰. 参考作物蒸发蒸腾量的气象因子响应模型 [J]. *节水灌溉*, 2007(2):1-3.  
Zhang R M, Peng S Z. Response model of reference evapotranspiration to meteorologic factors [J]. *Water Saving Irrigation*, 2007(2):1-3. (in Chinese)
- [14] 刘钰, Pereira L S. 气象数据缺测条件下参照蒸发量的计算方法 [J]. *水利学报*, 2001, 11(3):11-17.  
Liu Y, Pereira L S. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 11(3):11-17. (in Chinese)
- [15] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较 [J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(6):5-9.  
Peng S Z, Xu J Z. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(6):5-9. (in Chinese)
- [16] 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, 11(S1):129-137.  
Mao F, Zhang G Z, Xu X D. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of the their result [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2006, 11(S1):129-137. (in Chinese)