

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0101

安彬, 肖薇薇. 陕西省潜在蒸散发的敏感性及其变化成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 90-97, 113. AN B, XIAO W. Sensitivity of potential evapotranspiration in Shaanxi Province and attribution of its variation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 90-97, 113. (in Chinese)

陕西省潜在蒸散发的敏感性及其变化成因分析

安彬^{1,2}, 肖薇薇^{1,2}

(1. 安康学院 旅游与资源环境学院, 陕西 安康 725000;

2. 安康市汉江水资源保护与利用工程技术研究中心, 陕西 安康 725000)

摘要: 潜在蒸散发(ET_0)是准确估计作物需水量和合理制定农田管理制度的重要参考依据,分析其对气象要素的敏感性对评估区域陆地水资源利用效率具有重要意义。根据陕西省1955-2015年的20个气象站的逐日实测气象数据,利用Penmar Monteith方程计算逐日 ET_0 ,应用敏感性公式计算 ET_0 对最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速、日照时数等5个关键气象要素的敏感系数,探究敏感系数的时空分布规律及变化趋势;并结合气象要素的多年变化定量分析的变化 ET_0 成因。结果表明:(1) ET_0 对气象要素的敏感系数年内变化幅度依次为:相对湿度>日照时数>最低气温>风速>最高气温。(2)陕西省年均 ET_0 对气象要素的敏感程度均在“中”等级以上,相对湿度最为敏感;年际敏感系数显著增减变化趋势南北差异大,且空间分布特征表现不一。(3) ET_0 与关键气象要素之间呈现的复杂非线性关系,使各气象站 ET_0 变化的主导气象要素也不尽相同,存在明显空间差异。

关键词: 潜在蒸散发; Penmar Monteith(PM)方程; 气候变化; 敏感系数; 陕西省

中图分类号: P426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0090-08

Sensitivity of potential evapotranspiration in Shaanxi Province and attribution of its variation

AN Bin^{1,2}, XIAO Weiw ei^{1,2}

(1. School of Tourism & Environment, Ankang University, Ankang 725000, China; 2. Engineering Technology Research Center for Water Resource Protection and Utilization of Hanjiang River, Ankang 725000, China)

Abstract: Potential evapotranspiration(ET_0) is an important reference for the accurate estimation of crops' water demand and for the reasonable formulation of a farmland management system. Analysis of the sensitivity of ET_0 to meteorological factors is of great significance for assessing the utilization efficiency of land water resources in a region. Based on the daily weather data from 20 meteorological stations in Shaanxi Province from 1955 to 2015, we used the FAO-56 Penmar Monteith equation to calculate daily ET_0 . Then we used the sensitivity formula to calculate the sensitivity coefficients of ET_0 to the main meteorological factors, such as the daily maximum temperature (S_{TH}), daily minimum temperature (S_{TL}), relative humidity (S_{RH}), wind speed (S_{AW}), and sunshine duration (S_{SD}). We explored the temporal and spatial distribution features and variation trends of the sensitivity coefficients and quantitatively analyzed the contributing factors to ET_0 variation in view of the multi year variation of the meteorological factors. Results showed that the meteorological factors sorted by the annual variation amplitude of the sensitivity coefficient of ET_0 to these factors were $S_{RH} > S_{SD} > S_{TL} > S_{AW} > S_{TH}$. The sensitivity of annual average ET_0 in Shaanxi Province to the meteorological factors all reached the middle or above level. It was the most sensitive to S_{RH} . The interannual variation trends of sensitivity coefficients showed a big difference between the north and south, and they also showed different spatial distribution characteristics. The complicated nonlinear relationship between ET_0 and the key meteorological factors

收稿日期: 2018-02-01 修回日期: 2018-04-01 网络出版时间: 2018-04-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180411.1634.003.html>

基金项目: 陕西省教育厅自然科学专项研究计划项目(16JK1017); 陕西省科技厅项目(2017NY-202); 安康学院高层次人才科研专项(2015AYQDZR04)

Funds: Natural Science Foundation of Shaanxi Education Department (16JK1017); Project of Shaanxi Department of Science and Technology (2017NY-202); Special Research Fund for High Level Talents of Ankang University (2015AYQDZR04)

作者简介: 安彬(1988-),男,江西九江人,讲师,主要从事区域环境与GIS应用方面的研究。E-mail: anbinwt@126.com

正的标准 Penmar Monteith (P M) 方程计算逐日潜在蒸散发 ET_0 ^[19], 并且得到了广泛地应用。其计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散发 (mm/d); Δ 为饱和水汽压曲线斜率 (kPa/°C); R_n 是作物表面的净辐射量 (MJ/m²) (公式略); G 是土壤热通量 (MJ/(m²·d)) (公式略); γ 为湿度计常数 (kPa/°C); t 为平均气温 (°C); U_2 为 2 m 高的风速 (m/s); e_a 是饱和水汽压 (kPa); e_d 是实测水汽压 (kPa)。

1.2.2 敏感分析

潜在蒸散发对气候要素的敏感分析是一种通过设置不同气候变化情景, 假定其他气候要素不变, 分析单个气候因子的变化对 P M 模型的作用, 进而量化 ET_0 变率对气候因子变率响应程度的方法^[9, 20]。

本文利用尹云鹤等^[2]提出的无量纲相对敏感系数, 以表征 ET_0 对气候因素变化的敏感性, 且便于不同量纲的气候要素变量进行排序、评价。其计算方法如下:

$$S_x = \frac{\Delta ET_0}{\Delta X} \frac{|X|}{ET_0} \quad (2)$$

式中: S_x 为 ET_0 对气候要素的敏感系数, 为无量纲; ΔX 为气候要素的变化; ΔET_0 为 ΔX 导致的 ET_0 变化。 S_x 取正值表明 ET_0 与气候要素变量 X 变化一致, 负值则变化相反; 敏感系数越大, 变量对 ET_0 的影响越大, 如敏感系数等于 0.2, 代表某一气候要素变量减少 (增加) 10%, 在其他气候要素变量保持不变的情况下, ET_0 将减少 (增加) 2%。本文以最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速、日照时数等 5 个气候要素变量分别变化 $\pm 10\%$, 依次计算 S_{TH} 、 S_{TL} 、 S_{RH} 、 S_{AW} 和 S_{SD} 。同时参照文献 [21] 对敏感系数等级划分, 见表 1。

表 1 敏感系数等级
Tab. 1 The grades of sensitivity coefficients

敏感系数	$0.00 \leq S_x < 0.05$	$0.05 \leq S_x < 0.20$	$0.20 \leq S_x < 1.00$	$ S_x \geq 1$
敏感程度	忽略	中	高	非常高

1.2.3 气候要素对 ET_0 的贡献率

根据粟晓玲等^[22]、尹云鹤等^[2]提出的气候要素对 ET_0 的贡献率计算方法, 将敏感系数与气候要素的多年相对变化相乘, 由此得到气候要素引起 ET_0 的变化程度, 其表达式为:

$$C_x = S_x \cdot R_{cx}, R_{cx} = \frac{n \cdot T_x}{X} \times 100\% \quad (3)$$

式中: C_x 为气候要素 X 对 ET_0 变化的贡献率; R_{cx} 表示 X 的多年相对变化率; n 为研究时段年数; T_x 、 X 为相应时段内 X 的线性倾向率、平均值; C_x 绝对值越大, 说明由该气象要素的相对变化对 ET_0 变化的贡献度更高, 即此气象要素是引起 ET_0 变化的主导因子。

采用最小二乘法 (Ordinary Least Squation, OLS) 计算气象要素及 ET_0 敏感系数的变化趋势^[23], 并借助 F 检验对其变化趋势的显著性进行判断。

2 结果与分析

2.1 陕西省气候要素及 ET_0 年内变化特征

以 1955–2015 年逐日最高气温、最低气温、相对湿度、风速、日照、 ET_0 数值计算 61 年陕西省 5 个气象要素及 ET_0 年内平均值曲线 (图 2), 受到太阳高度角的周年变化和地形等地理环境条件的共同影

响下, 不同气象要素及 ET_0 的年内变化趋势不一、空间格局差异明显。

由图 2(a)、2(b) 可看出陕西省三大区域的最高温度、最低温度年内变化曲线均呈现出单峰型, 表现为陕南 > 关中 > 陕北的空间格局; 最高气温的峰值出现在 7 月, 谷值在 1 月; 最低气温的峰值出现在 8 月, 谷值也在 1 月; 最高气温南北差异较小, 而最低气温差异较大。相对湿度年内分布呈现出余弦曲线状变化, 最大值出现在秋季的 8 月、9 月, 春季 4 月为最小值; 空间分布格局表现为陕南 > 关中 > 陕北、南北春季差异最大、秋季差异最小 (图 2(c))。风速的年内分布呈正弦曲线式变化, 春季 3 月、4 月均为最大值, 陕南和关中 9 月、陕北 1 月为最小值; 空间分布格局表现出陕北 > 关中 > 陕南 (图 2(d))。日照时数的年内分布波动明显, 陕北呈单峰型、陕南和关中呈双峰型变化, 春夏季高于秋冬季; 空间表现出南北差异较小, 陕北 > 关中 > 陕南的分布格局 (图 2(e))。 ET_0 的年内分布与日照时数相似, 呈现出陕北单峰型变化、峰值出现在 6 月, 陕南和关中双峰型变化、峰值出现在 6 月、8 月。

基于最小二乘法, 计算最高气温等 5 个气象要素及 ET_0 年际变化线性趋势 (表 2)。总体上看, 研究区 3 个区域最高气温和最低气温变化趋势均一致, 其他要素变化趋势不一。过去 61 年, 陕南、陕北

最高气温分别以 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 和 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 速率显著增强,关中地区增温不显著。最低气温方面,陕北以 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 速率增温幅度最大,关中以 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 速率增温幅度最小,陕南居中,且都通过 $\alpha=0.01$ 置信水平检验,极其显著。相对湿度方面,陕南以 $0.47\%/ (10\text{a})$ 的幅度显著增加,陕北则以 $0.81\%/ (10\text{a})$ 的幅度显著减少。陕南地区的风速以 $0.03\text{ }(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})/(10\text{a})$ 呈显著下降趋势,关中、陕北分别以 $0.02\text{ }(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})/(10\text{a})$ 下降、 0.01

$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})/(10\text{a})$ 上升,但都不显著。关中地区日照时数呈极其显著减少,陕南极显著减少,而陕北不显著增加。从 ET_0 变化幅度来看,陕北> 关中> 陕南,分别为 $11.35\text{ mm}/(10\text{a})$ 速率极显著增加、 $6.25\text{ mm}/(10\text{a})$ 和 $5.92\text{ mm}/(10\text{a})$ 速率下降。由于研究时间尺度的不同,导致与韦振锋等^[10] 研究得出的1981-2010年 ET_0 呈现出陕南秦巴山呈明显增加趋势,关中变化趋势不明显,陕北呈明显减小趋势的空间变化结论略有不同。

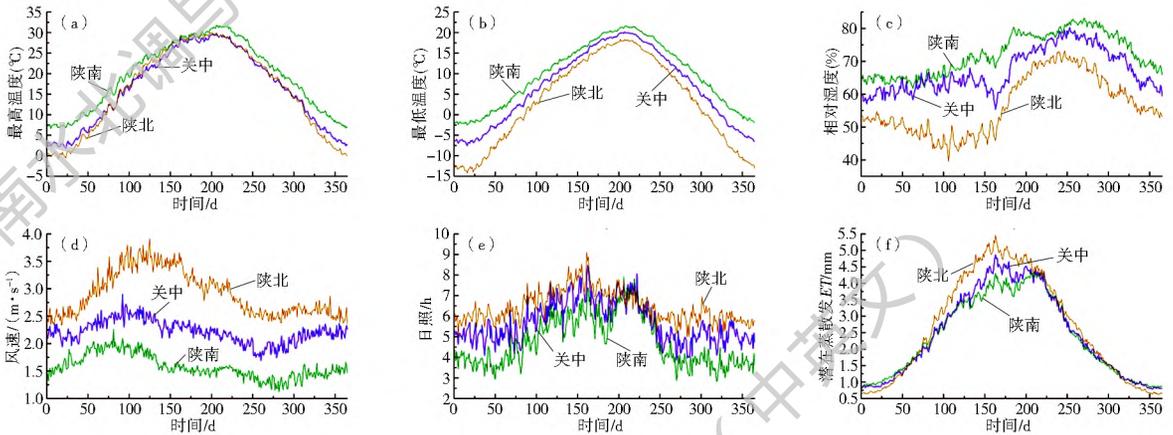


图2 陕西省不同区域的气象要素及 ET_0 年内逐日变化

Fig. 2 Mean daily variations of the meteorological factors and ET_0 in different regions of Shaanxi Province

表2 陕西省不同区域的气象要素及 ET_0 年际变化线性趋势

Tab. 2 Linear trend of interannual variation of meteorological factors and ET_0 in different regions of Shaanxi Province

地区	最高气温($^{\circ}\text{C}$)	最低气温($^{\circ}\text{C}$)	相对湿度($\%$)	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	日照时数/h	ET_0/mm
陕南	0.23^{***}	0.16^{***}	0.47^{***}	-0.03^{**}	-32.8^{**}	-5.92^*
关中	0.06	0.11^{***}	-0.21	-0.02	-42.77^{***}	-6.25
陕北	0.18^{***}	0.22^{***}	-0.81^{***}	0.01	4.37	11.35^{***}

注: *, **, *** 分别为通过置信水平 $\alpha=0.1, 0.05, 0.01$ 变化趋势检验。

2.2 ET_0 对气候要素的敏感性分析

2.2.1 敏感系数的年内变化

图3为陕西省最高气温、最低气温、相对湿度、风速、日照5个气象要素的敏感系数年内变化情况。可以看出, ET_0 对最高温度、最低温度、相对湿度的敏感系数均为负数, 分别变化在 $-0.43\sim -0.05$ 、 $-0.48\sim -0.04$ 、 $-0.98\sim -0.17$ 之间, 表明 ET_0 随着这三个气象因素的增大而减少; S_{RH} (绝对值) 敏感程度最高发生在9月, 最低发生在1月, 呈抛物线型曲线变化; 陕南、关中 S_{TL} (绝对值) 敏感程度最高发生在3月, 而陕北发生在1月, 最低均发生在8月; S_{RH} (绝对值) 敏感程度最高出现在5月, 最小值出现在11月, 呈正弦曲线式变化。 ET_0 关于风速的敏感系数为正, 即 ET_0 随着风速的增大而增大, 9月份的 S_{AW} 达到最小, 12月份为最大, 呈余弦曲线式变化在 $0.02\sim 0.42$ 之间。就日照时数的敏感系

数而言, 由于受到南北狭长的轮廓影响, 致使陕南和关中全年、陕北春夏秋冬的 S_{SD} 为正, 陕北在冬季为负; 最大值均出现在7月, 最小值均出现在1月, 呈单峰型在 $-0.09\sim 0.39$ 之间变化。从三大区域 ET_0 对5个气象要素的年内敏感系数变化幅度来看, 在 S_{TL} 和 S_{AW} 方面, 陕北> 陕南> 关中; 在 S_{RH} 和 S_{RH} 方面, 关中> 陕北> 陕南; 而在 S_{SD} 方面, 关中> 陕南> 陕北。

2.2.2 敏感系数的年际变化趋势

根据敏感系数的绝对值能够判断气象要素对 ET_0 的敏感程度, 结合表2中敏感程度的划分, 陕南 ET_0 对5个气象要素的敏感程度依次为相对湿度(高)> 最高气温(高)> 最低气温(高)> 日照时数(中)> 风速(中) (图4(a)), 关中依次为相对湿度(高)> 最低气温(高)> 最高气温(高)> 日照时数(中)> 风速(中) (图4(b)), 陕北依次为相对湿度(高)> 最低气温

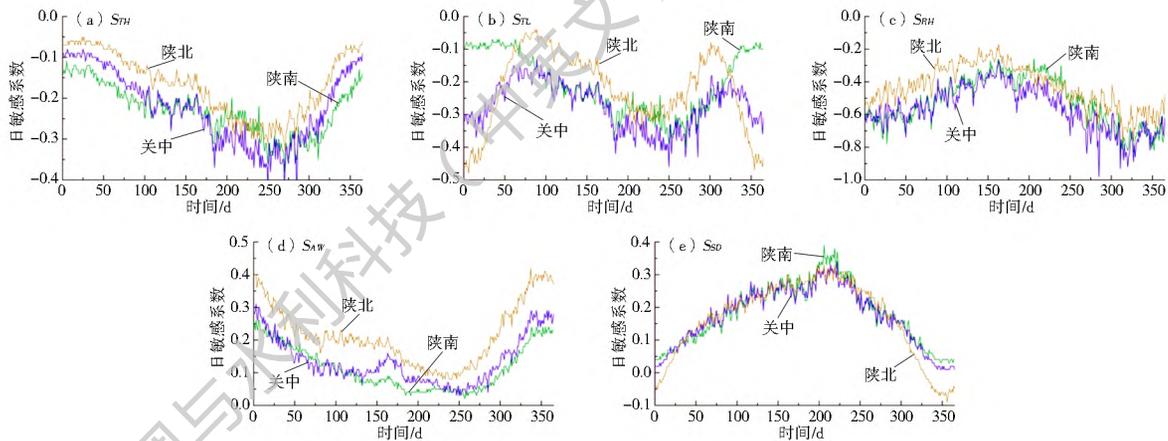


图 3 陕西省不同区域 5 个气象要素敏感系数年内逐日变化

Fig. 3 Mean daily variation of sensitivity coefficients to five meteorological factors in different regions of Shaanxi Province

(高) > 风速(高) > 日照时数(中) = 最高气温(中) (图 4(c))。总体来看, 陕西省三大区域的 ET_0 对 5 个气象因素的敏感程度均为“中”及以上等级。其中, 对相对湿度最为敏感, 均达到了“高”等级(图 4), 这与陕西

关中泾惠渠^[22]、甘肃^[4]、黄土地区^[11]等研究区的最为敏感气象因素相同; 除此之外, 最低温度的敏感系数也均达到了“高”等级。近 61 年来, 三大区域中相对湿度敏感系数变化幅度最大, 其余变化较为平缓。

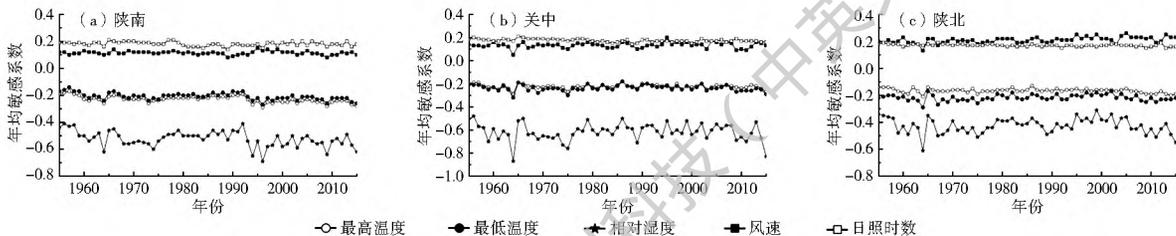


图 4 1955-2015 年陕西省不同区域 5 个气象要素敏感系数年变化特征

Fig. 4 Interannual variation of sensitivity coefficients to five meteorological factors in different regions of Shaanxi Province during 1995-2015

为了进一步考察敏感系数时间序列变化的显著性, 运用 M-K 趋势检验法、95% 置信水平对各站点的敏感系数进行检验, 其变化趋势见图 5。 S_{TH} 在 14 个站点有减小趋势, 占 70%, 其中 10 个站点的减小趋势显著, 主要分布在陕南、关中地区; 2 个站点增加趋势显著, 4 个站点有增加趋势, 主要分布在陕西西部地区。 S_{TL} 在 11 个站点有减小趋势, 占 55%, 其中有 8 个站点的减小趋势显著, 主要分布在陕南地区; 9 个站点有增加趋势, 其中有 5 个站点的增加趋势显著, 主要分布在陕北和关中地区。 S_{RH} 在 11 个站点有减小趋势, 占 55%, 其中有 9 个站点

的减小趋势显著, 同 S_{TH} 相似, 也主要分布在陕南、关中地区; 6 个站点的增加趋势通过了检验。 S_{AW} 只有 9 个站点的变化趋势通过了检验, 其中 7 个站点增加趋势显著, 分布在关中和陕北地区, 2 个站点减少趋势显著; 另外具有未通过检验的增加趋势或减少趋势的站点分别为 4 个、7 个。 S_{SD} 在 14 个站点有减小趋势, 占 70%, 其中有 9 个站点的教师趋势显著, 主要分布在陕北东北部、关中中西部。总体上陕南地区各站点的敏感系数绝大部分呈显著减少趋势, 关中地区各站点大部分呈显著减少趋势, 而陕北地区大部分则呈显著增加趋势。

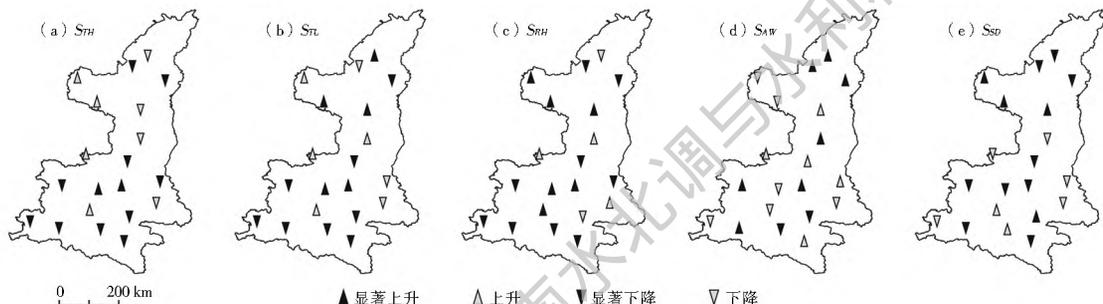


图 5 ET_0 对 5 个气象要素敏感系数的时间变化趋势

Fig. 5 The temporal variation trend of sensitivity coefficients of ET_0 to five meteorological factors in Shaanxi Province

2.2.3 敏感系数的空间分布

基于 ArcGIS10.2, 采用样条函数插值法得到气象要素的敏感系数的空间分布(图6)。从最高气温敏感系数的空间分布(图6(a))看出, 陕西省东南部敏感系数绝对值最高, 往西或往北方向敏感程度逐渐降低, 到陕北黄土高原地区敏感程度达到最低。图6(b)为最低气温敏感系数的空间分布, 具有较强的空间差异性, 具体表现: 秦岭以南地区自东南、西南向北递减, 形成镇安、宝鸡极低值中心; 关中地区由东向西递减, 黄土高原地区形成自东北向西南递减, 形成吴起极低值中心。 ET_0 对相对湿度的敏感系数介于-0.957~-0.308之间变化(图6(c)), 黄土高原以南地区分的分布特征与对最低气温的敏感系数类似, 形成华山极高值中心; 黄土高原地区变化

差异较小, 变化介于-0.521~-0.308之间, 形成吴起、横山极低值中心。 ET_0 对风速的敏感系数表现为自南向北逐渐递增(图6(d))。同 ET_0 对其他4个气象要素敏感系数相比较, 可以发现为 ET_0 对日照时数敏感系数的绝对值、空间分布差异均最小(图6(e)), 大体上表现为自西向东北、南部逐渐递增。太阳日照时数主要影响区域辐射量, 辐射再间接影响蒸散发, 使得日照时数与蒸散发关系较小; 加之前文在计算日照时数的敏感系数时, 已假定其他气象要素恒定, 从而导致 ET_0 对日照时数的敏感系数绝对值最小^[4]。

总体上看, 研究期内陕西省 ET_0 对各气象要素的敏感系数空间分布特征表现不一, 这可能与各地区的经纬度、植被类型及下垫面综合情况有关^[24]。

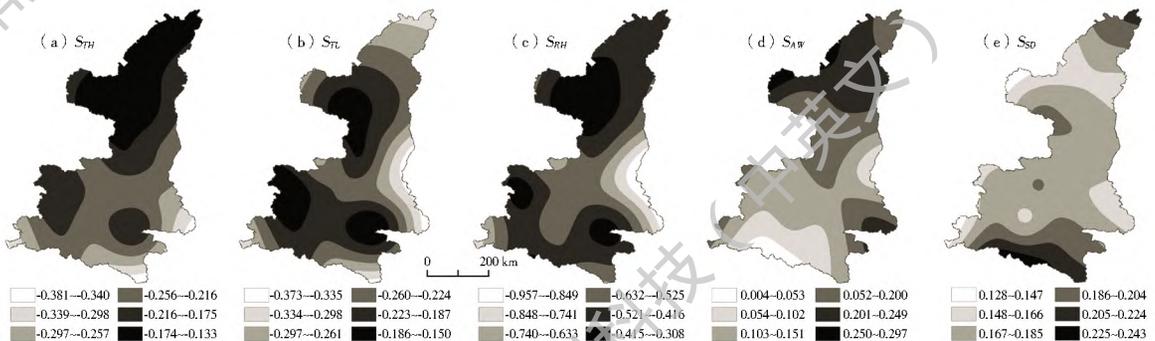


图6 ET_0 对5个气象要素敏感系数的空间分布

Fig. 6 The spatial distribution of sensitivity coefficients of ET_0 to five meteorological factors in Shaanxi Province

2.3 ET_0 的变化成因分析

为了深入探究陕西省 ET_0 的气候变化的响应, 综合考虑陕西省不同区域的气候特征及气象站点的空间分布格局, 选取了陕南汉中站、安康站, 关中宝

鸡站、西安站, 陕北吴起站、榆林站作为典型代表站, 分析 ET_0 的变化成因。根据公式(3)计算汉中、西安等代表站的5个气象要素相对变化率以及气象要素对 ET_0 的贡献率(见表3)。

表3 典型代表站点的气象要素的相对变化及其对 ET_0 的贡献率

Tab.3 The relative changes of meteorological factors at typical stations and their contribution to ET_0

站点	最高气温		最低气温		相对湿度		风速		日照时数		估计总贡献率
	R_c	C	R_c	C	R_c	C	R_c	C	R_c	C	
汉中站	4.43	-0.96	16.44	-3.15	-0.95	0.44	16.61	0.91	-30.14	-6.01 ^a	-8.76
安康站	1.85	-0.42	7.29	-1.47 ^a	2.45	-1.09	14.61	1.46	-6.97	1.41	-2.93
宝鸡站	8.89	-1.59	25.37	-4.03 ^a	-9.01	3.61	24.40	2.96	-15.96	-2.89	-1.94
西安站	6.33	-1.55	29.97	-7.11	-10.96	6.38	-69.80	-10.20	-48.42	-8.36	-20.84
吴起站	4.45	-0.62	73.27	-13.22 ^a	-5.82	1.93	-39.39	-6.51	8.80	1.62	-16.80
榆林站	6.95	-1.13	113.70	-28.00 ^a	-10.48	4.45	3.60	0.82	-13.51	-2.30	-26.16

注: a 代表站点潜在蒸散发变化的主导气象要素。

由表3中可知, 安康站、宝鸡站、吴起站和榆林站的最低气温的变化对 ET_0 的贡献率最大, 即最低气温是这4个站点 ET_0 的主导气象要素, 且这4个站点都是由于最低气温的升高而导致了 ET_0 相应的减少。尽管陕南、关中和陕北年 ET_0 对相对湿度

敏感程度(S_{RH})均达到了“高”等级, 但由于其变化幅度较小, 使得没有一个气象站点的主导气象要素是相对湿度。陕南地区日照时数的敏感系数仅仅高于风速, 但是在汉中站日照时数的降低幅度达到30.14%, 这也使得日照时数成为汉中站 ET_0 的主

导气象要素。尽管关中地区风速的敏感程度最低,但是西安站的风速降幅高达69.80%,为该站点的主导气象因素,贡献率达到了-10.20%,与刘宪锋等^[25]对武功站潜在蒸散变化的主导因素为风速的研究结论一致。在最低气温方面,榆林站增加幅度高达113.70%,也是6站点中所有气象要素增加幅度最大值,同时由于榆林站其他气象要素所引起的 ET_0 增加幅度有限,从而使得近61年来榆林站为6站点 ET_0 变化幅度的站点,降低了26.16%。总体上看,各气象站点的主导气象要素存在明显的空间差异,可能与 ET_0 同温度、风速、相对湿度和日照时数之间呈复杂的非线性关系密切相关^[2]。

3 结论与讨论

3.1 结论

根据陕西省20个气象站点的逐日实测气象数据,计算各站点逐日潜在蒸散发,运用敏感分析法计算 ET_0 对不同气候要素的敏感系数,并探究敏感系数的时空分布和变化趋势。得出主要结论如下。

(1) 受太阳高度角等地理环境条件的影响,5个气象要素及 ET_0 的年内逐日变化曲线类型不同。最高气温、最低气温及 ET_0 呈单峰型变化,相对湿度呈正弦曲线变化,风速呈余弦函数曲线变化,日照时数陕北呈单峰型、陕南和关中呈双峰型变化。

(2) ET_0 对气象要素的敏感系数年内变化幅度及变化曲线不一。 S_{TH} 、 S_{TL} 和 S_{RH} 为正, S_{AW} 和 S_{SD} 为负,且变化幅度 $|S_{RH}| > |S_{SD}| > |S_{TL}| > |S_{AW}| > |S_{TH}|$ 。 S_{TH} 和 S_{AW} 年内呈抛物线型变化, S_{TL} 和 S_{RH} 呈正弦函数曲线变化, S_{SD} 则呈单峰型变化。

(3) ET_0 对5个气象要素的敏感程度均达到“中”及以上等级,年际敏感系数显著增减变化趋势南北差异大,且空间分布特征表现不一。其中, ET_0 对相对湿度最为敏感;各站点的敏感系数中,陕南绝大部分、关中大部分呈显著减少趋势,陕北大部分呈显著增加趋势。 S_{TH} 、 S_{TL} 和 S_{RH} 在关中东部、陕南东南部形成高值中心,在镇安、宝鸡、吴起站点形成低值中心; S_{AW} 和 S_{SD} 则表现出较强的纬向地带性特征, S_{AW} 由南向北递增, S_{SD} 由南向北递减。

(4) 典型代表站中,最低气温是安康站、宝鸡站、吴起站和榆林站 ET_0 变化的主导气象要素,而汉中站和西安站的主导气象要素分别是日照时数和风速。

3.2 讨论

在陕西省气候暖干化趋势下^[17,26],科学核算作

物需水量,对深入研究区陆地水资源的利用效率具有重要意义。在缺少实际的作物需水量情况下,计算潜在蒸散发显得尤为重要^[27]。受气候要素综合影响,陕西省年均 ET_0 呈上升趋势,与韦振锋等^[10]认为1981-2010年、范建忠等^[28]认为2000-2013年内陕西省潜在蒸散量呈上升趋势的结论一致,表明研究期内陕西省并不存在“蒸发悖论”现象。另外, ET_0 对气候要素的敏感分析定量测算气候变化对 ET_0 的影响,能够揭示 ET_0 变化的内在动因,有助于认识区域气候变化背景下的水循环特征^[29]。陕西省年均 ET_0 对最高气温等5个气象要素的敏感程度均在“中”等级以上,年际敏感系数显著增减变化趋势南北差异大,且空间分布特征表现不一;其中相对湿度作为最敏感的气象因素,对 ET_0 变化影响显著,与中国^[2]、黄土地区^[11]等区域的最高敏感气象因素相同。但是, ET_0 对气候要素的敏感分析并不能完全确定各气候要素变化对 ET_0 变化的实际贡献率^[29]。由于相对湿度的相对变化有限,并不是 ET_0 变化的主导气象要素;而各气象站点 ET_0 变化的主导气象要素也不尽相同,存在明显空间差异。此外,本文仅基于有限的气象站点分析了 ET_0 对气象要素的敏感性时空规律,结合蒸发皿蒸发资料的对比分析还待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 刘昌明,孙睿.水循环的生态学方面:土壤植被大气系统水分能量平衡研究进展[J].水科学进展,1999,10(3):251-259. (LIU C M, SUN R. Ecological aspects of water cycle: advances in soil vegetation atmosphere of energy and water fluxes[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 251-259. (in Chinese) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.1999.03.006.
- [2] 尹云鹤,吴绍洪,戴尔阜.1971-2008年我国潜在蒸散时空演变的归因[J].科学通报,2010,61(22):2226-2234. (YIN Y H, WU S H, DAI E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971-2008[J]. Chinese Sci Bull, 2010, 61(22): 2226-2234. (in Chinese) DOI: 10.1007/s11434-010-3289-y.
- [3] 谢虹.青藏高原蒸散发及其对气候变化的响应(1970-2010)[D].兰州:兰州大学,2012. (XIE H. The evapotranspiration and its response to climate change in Tibet Plateau (1970-2010) [D]. Lan Zhou: Lanzhou University, 2012. (in Chinese))
- [4] 李耀军,魏霞,苏辉东.近30年甘肃省潜在蒸散发时空变化特征及演变归因的定量分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(1):219-225. (LI Y J, WEI X, SU H D. Quantitative analysis of causes for temporal and spatial variation characteristics and evolution of potential evapotranspiration in Gansu Province during recent 30 years[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(1): 219-225. (in Chinese) DOI: 10.

- 11705/j.issn.1672-643X.2015.01.043.
- [5] YANG Tao, ZHANG Qiang, WANG Weiguang, et al. Review of advances in hydrologic science in China in the last decades: impact study of climate change and human activities[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(11): 1380-1384. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000582.
- [6] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588. (LIU C M, ZHANG D. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 579-588. (in Chinese) DOI: 10.11821/xb201105001.
- [7] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 102-109. (YANG L S, LI C B, WANG S B, et al. Sensitive analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in Taohé River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 102-109. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.11.013.
- [8] 赵娜, 王治国, 张复明, 等. 海河流域潜在蒸散发估算方法及其时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 11-16+65. (ZHAO N, WANG Z G, ZHANG F M, et al. Model evaluation and spatial temporal variations of potential evapotranspiration in Haihe Catchment [J]. South to North Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 11-16+65. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddq.2017.06.002.
- [9] 谢平, 龙怀玉, 张杨珠, 等. 云南省四季潜在蒸散量时空演变的主导气象因子分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 184-193. (XIE P, LONG H Y, ZHANG Y Z, et al. Dominant meteorological factors of spatiotemporal variations of seasonal potential evapotranspiration in Yunnan Province during the period from 1981 to 2011[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 184-193. (in Chinese) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.02.032.
- [10] 韦振锋, 陈思源, 黄毅. 1981-2010年陕西潜在蒸散量时空特征及其对气候因子的响应[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 1033-1041. (WEI Z F, CHEN S Y, HUANG Y. Spatial and temporal characteristics of potential evaporation and climatic factors on the impact in Shaanxi Province in 1981~2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8): 1033-1041. (in Chinese) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.08.1033.
- [11] 王升, 王全九. 近50年黄土地区气候与潜在蒸散量变化及其影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 270-278. (WANG S, WANG Q J. Analysis of variation of climate and potential evapotranspiration and its influencing factors in the Loess area in last 50 years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 270-278. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7601.2012.01.045.
- [12] 张彩霞, 花婷, 郎丽丽. 河西地区潜在蒸散发量变化及其敏感性分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 357-362. (ZHANG C X, HUANG T, LANG L L. Analysis of potential evapotranspiration and its sensitivity in Hexi region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 357-362. (in Chinese) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.04.046.
- [13] CHAHINE T M. The hydrological cycle and its influence on climate [J]. Nature, 1992, 359(6394): 373-380. DOI: 10.1038/359373a0.
- [14] SAXTON K E. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation [J]. Agricultural and Meteorology, 1975, 15(3): 343-353. DOI: 10.1016/0002-1571(75)90031-X.
- [15] 韩松俊, 胡和平, 杨大文, 等. 塔里木河流域山区和绿洲潜在蒸散发的不同变化及影响因素[J]. 中国科学(E辑: 技术科学), 2009, 39(8): 1375-1383. (HAN S J, HU H P, YANG D W, et al. Differences in changes of potential evaporation in the mountainous and oasis regions of the Tarim Basin, northwest China [J]. Science China: Series E Technological Sciences, 2009, 39(8): 1375-1383. (in Chinese) DOI: 10.1007/s11431-009-0123-3.
- [16] 高蓓. 基于GIS的陕西省气候要素时空分布特征研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014. (GAO B. Spatial temporal distribution of climatic factors in Shaanxi province based on GIS [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2014. (in Chinese))
- [17] 安彬, 孙虎, 刘宇峰, 等. 陕西省气候及其生产潜力时空变化特征[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 103-108. (AN B, SUN H, LIU Y F. The spatial and temporal features of climate and its potential productivity in Shaanxi province [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2014, 42(3): 103-108. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-4291.2014.03.021.
- [18] 彭锐, 黄河清, 郑林. 鄱阳湖区1959至2005年降水过程的持续性特征与减灾对策[J]. 资源科学, 2009, 31(5): 737-742. (PENG R, HUANG H Q, ZHENG L. The persistence of precipitation series at different time scales in Poyang Lake Region and effective measures to reduce socioeconomic loss [J]. Resources Science, 2009, 31(5): 737-742. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2009.05.003.
- [19] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [R]. Rome: FAO, 1998.
- [20] BEVEN K. A sensitivity analysis of the Penman Monteith actual evapotranspiration estimates [J]. Journal of Hydrology, 1979, 44(3): 169-190. DOI: 10.1016/0022-1694(79)90130-6.
- [21] LENHART T, ECKHARDT K, FOHRER N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9): 645-654. DOI: 10.1016/S1474-7065(02)00049-9.
- [22] 栗晓玲, 宋悦, 牛纪苹, 等. 泾惠渠灌区潜在蒸散发量的敏感性及其变化成因[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 115-123. (SU X L, SONG Y, NIU J P, et al. Sensitivity and attribution of potential evapotranspiration in Jinghuiqi Irrigation District [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(1): 115-123. (in Chinese) DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.01.010.
- [23] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 等. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 653-661. (YIN H, LI Z G, WANG Y L, et al. Assessment of desertification using time series analysis of hyper temporal vegetation indicator in Inner Mongolia [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 653-661. (in Chinese) DOI: 10.11821/xb201105008.

(下转第113页)

- and groundwater using HYDRUS 1D[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227(6): 1-22. DOI: 10.1007/s11270-016-2875-2.
- [78] BAJJALI W, AL-HADIDI K, ISMAIL M M. Water quality and geochemistry evaluation of groundwater upstream and downstream of the Khirbet Al-Samra wastewater treatment plant/Jordan[J]. *Applied Water Science*, 2017, 7(1): 53-69. DOI: 10.1007/s00382-004-0411-3.
- [79] 吴文勇, 刘洪禄, 陈鸿汉, 等. 再生水灌区调蓄工程对地下水盐分的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 22-25. (WU W Y, LIU H L, CHEN H H, et al. Effect of regulation and storage engineering on groundwater salinity in reclaimed water irrigation district[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 22-25. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.004.
- [80] 王祥林. 再生水对土壤理化性质影响的研究[J]. *山东林业科技*, 2009, 39(4): 1-4. (WANG X L. Study on the effect of reclaimed water on soil physical and chemical properties[J]. *Shandong Forest Science and Technology*, 2009, 39(4): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-2724.2009.04.001.
- [81] KIZILOGLU F M, TURAN M, SAHIN U, et al. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea*, L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea*, L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6): 716-724. DOI: 10.1016/j.agwat.2008.01.008.
- [82] 王巧环, 陈卫平, 王效科, 等. 城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 4127-4132. (WANG Q H, CHEN W P, WANG X K, et al. Impacts of reclaimed water irrigation of urban lawn on groundwater quality[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4127-4132. (in Chinese))
- [83] CANDELA L, FABREGAT S, JOSA A, et al. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: application in a golf course (Girona, Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 374(1): 26-35. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.12.028.
- [84] AIELLO R, CIRELLI G L, CONSOLI S. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy)[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93(1): 65-72. DOI: 10.1016/j.agwat.2007.06.008.
- [85] BIRKS R, COLBOURNE J, HILLS S, et al. Microbiological water quality in a large irrigation, water recycling facility[J]. *Water Science & Technology*, 2004, 50(2): 165-176.
- [86] LEVANTESI C, LA MANTIA R, MASCIOPINTO C, et al. Quantification of pathogenic microorganisms and microbial indicators in three wastewater reclamation and managed aquifer recharge facilities in Europe[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(21): 4923-4930. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.042.

(上接第 97 页)

- [24] 赵彩霞, 梅旭荣, 居辉, 等. 黄淮海平原各农业亚区潜在蒸散量变化及其对气候要素的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(5): 570-577. (ZHAO C X, MEI X R, JU H, et al. Variation in potential evapotranspiration and its sensitivity coefficients to climatic factors in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(5): 570-577. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2015.05.006.
- [25] 刘宪锋, 潘耀忠, 张锦水, 等. 1960-2011年西北五省潜在蒸散的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2564-2570. (LIU X F, PAN Y Z, ZHANG J S, et al. Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in five provinces of North west China in 1960-2011[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2564-2570. (in Chinese))
- [26] 易浪, 任志远, 崔宇, 等. 陕西省 1961年-2011年气温和降水变化趋势及突变分析[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 48(4): 592-600. (YI L, REN Z Y, CUI Y, et al. Analysis on the change trends and catastrophe of temperature and precipitation in Shanxi Province from 1961 to 2011[J]. *Journal of Center China Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 48(4): 592-600. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1190.2014.04.028.
- [27] 刘园, 王颖, 杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 5589-5599. (LIU Y, WANG Y, YANG X G. Trends in reference crop evapotranspiration and possible climate factors in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 5589-5599. (in Chinese))
- [28] 范建忠, 李登科, 高茂盛. 基于 MOD16 的陕西省蒸散量时空分布特征[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1536-1543. (FAN J Z, LI D K, GAO M S. Spatiotemporal variations of evapotranspiration in Shaanxi province using MOD16 products[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1536-1543. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.09.008.
- [29] 刘小燕, 郑红星, 刘昌明, 等. 海河流域潜在蒸散的气候敏感性分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(9): 1470-1476. (LIU X M, ZHENG H X, LIU C M, et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River Basin[J]. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1470-1476. (in Chinese)) DOI: doi: 10.3321/j.issn:1007-7588.2009.09.003.