

DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 05. 011

汉江上游流域潜在蒸散量敏感性分析

安 彬^{1,2,3,4}, 肖薇薇^{1,2,3,4}

(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; 3. 秦巴国土资源利用与环境保护协同创新中心, 陕西 安康 725000; 4. 陕南生态经济研究中心, 陕西 安康 725000)

摘要:为研究全球变暖背景下汉江上游流域潜在蒸散量的变化特征,根据汉江上游流域 1960—2015 年汉中、石泉和安康 3 个气象站的逐日实测气象数据,采用彭曼-蒙蒂斯方程计算逐日潜在蒸散量 ET_0 。应用敏感性公式计算 ET_0 对 5 个主要气象因子的敏感系数,并结合气象因子的多年相对变化分析 ET_0 变化成因。结果表明:受太阳周年运动及地形等地理要素的共同影响,汉江上游不同气象因子及 ET_0 的年内分布不一;汉江上游 ET_0 对相对湿度最为敏感,各气象因子年敏感系数多呈显著下降趋势,敏感程度均达到“中”以上等级; ET_0 同气象因子表现出复杂非线性关系,日照是汉江中站 ET_0 变化的主导气象因子,石泉和安康站 ET_0 变化的主导气象因子是相对湿度。

关键词:潜在蒸散量;敏感性分析;彭曼-蒙蒂斯方程;汉江上游

中图分类号:P426.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933 (2019)05 - 0059 - 07

Sensitivity analysis of potential evapotranspiration in upper Hanjiang River Basin // AN Bin^{1,2,3,4}, XIAO Weiwei^{1,2,3,4} (1. College of Tourism and Environment Resources, Ankang University, Ankang 725000, China; 2. Engineering Technology Research Center for Water Resource Protection and Utilization of Hanjiang River, Ankang 725000, China; 3. Collaborative Innovation Center of Qinba Land and Resources Utilization and Environment Protection, Ankang 725000, China; 4. Shaannan Eco-economy Research Center, Ankang 725000, China)

Abstract: In order to study the variation characteristics of potential evapotranspiration in the upper Hanjiang River Basin under the background of global warming, based on the daily observed meteorological data of Hanzhong, Shiquan and Ankang meteorological stations in the upper reaches of the Hanjiang River from 1960 to 2015, the daily potential evapotranspiration (ET_0) was calculated by Penman-Monteith equation, and the sensitivity formula was used to calculate the sensitivity coefficient of ET_0 to five main meteorological factors. And the causes of ET_0 variation were analyzed in combination with the relative changes of meteorological factors over the years. The results show that the distribution of meteorological factors and ET_0 in the upper Hanjiang River Basin within the year is different due to the combined influence of geographical factors such as solar annual movement and topography. ET_0 in the upper Hanjiang River Basin is most sensitive to relative humidity. The annual sensitivity coefficients of meteorological factors show a significant downward trend, and the sensitivity reaches the "middle" level or above. The relationship between ET_0 and meteorological factors is complex and non-linear. Sunshine is the dominant meteorological factor of ET_0 variation at Hanzhong Station. Relative humidity is the dominant meteorological factor of ET_0 variation at Shiquan and Ankang Station.

Key words: potential evapotranspiration; sensitivity analysis; Penman-Monteith equation; upper Hanjiang River Basin

潜在蒸散量 ET_0 作为区域实际蒸散量的理论上限,是地表水循环和热量平衡的重要组成部分,对评价区域农业水资源利用、气候干湿度等具有重要意义^[1-3]。由于实际的蒸散量获取较为困难,往往采用

模型法进行近似计算。目前,应用最为广泛的是联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐的彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith, P-M)方程,也是学界公认的高

基金项目:陕西省科技厅项目(2017NY-202);陕西省教育厅自然科学专项研究计划(16JK1017)

作者简介:安彬(1988—),男,讲师,硕士,主要从事区域环境与 GIS 应用研究。E-mail: anbinwt@126.com

通信作者:肖薇薇,副教授,博士。E-mail:15054154@qq.com

精度模型计算法^[4]。基于此,诸多学者针对行政区划^[5-7]、流域^[8-10]、地理分区^[11-12]等不同空间尺度的 ET_0 时序变化特征进行了大量研究,研究均表明 ET_0 的变化具有复杂性、高度异质性^[13]。此外,结合敏感性分析、偏相关分析等方法,国内外学者开展了 ET_0 的变化成因研究^[14-15]。发源于秦岭南麓的汉江是长江最长支流,是南水北调中线工程的重要水源地,尤其是位于汉江上游的陕南地区,也是我国重要的生物多样性保护生态区。在全球气候变化的背景下,汉江上游流域呈现年降水减少、年均气温上升的趋势^[16-17]。为了解汉江上游 ET_0 变化趋势和原因,利用汉江上游典型气象站逐日气象数据,采用彭曼-蒙蒂斯方程计算逐日 ET_0 ,运用敏感分析法计算 ET_0 对不同气象因子的敏感系数,探讨敏感系数与 ET_0 的关系及 ET_0 发生变化的原因,以期合理调配南水北调中线工程水资源提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源

选择汉江上游流域的汉中、石泉和安康3个气象站,从中国气象科学数据共享服务平台 <http://data.cma.cn/> 获取各站点1960—2015年逐日平均风速、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度和日照时数资料,各站点的位置、海拔等信息见表1。依据3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季、12月—次年2月为冬季的标准进行季节划分。

1.2 研究方法

1.2.1 ET_0 的计算

采用FAO推荐的彭曼-蒙蒂斯方程计算逐日 ET_0 ,此公式基于能量平衡和空气动力学原理,在不同的环境和气候背景下具有较强的广泛适用性,可避免根据气候条件进行参数校正^[4],公式为

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

式中: Δ 为饱和水汽压曲线斜率, kPa/°C; R_n 为作物表面的净辐射量, MJ/m²; G 为土壤热通量, MJ/(m²·d); γ 为湿度计常数, kPa/°C; t 为平均气温, °C; U_2 为2 m高处的风速, m/s; e_a 为饱和水汽压, kPa; e_d 为

实测水汽压, kPa。

1.2.2 敏感性分析

研究 ET_0 对气象因子的敏感分析是通过设置不同气候变化情景,假定其他气象因子不变,分析单个气象因子变化引起 ET_0 的变化,进而量化 ET_0 变率对气象因子变率响应程度的方法^[4,9,18]。利用Mccuen^[19]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象因子变量进行排序、评价,其计算公式为

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

式中: S_X 为 ET_0 对气候要素 X 的敏感系数; ΔX 为气候要素的变化; ΔET_0 为 ΔX 导致的 ET_0 变化。

研究最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速、日照时数5个气象因子变量分别变化 $\pm 10\%$ 的情况下,依次计算 ET_0 对各气象因子的敏感系数。 S_X 为正值表明 ET_0 与气象因子 X 变化一致,负值则变化相反。 $|S_X|$ 越大表明气象因子变量对 ET_0 的影响越大,如 $S_X = -0.1$,代表气象因子 X 减少(增加)10%,在其他气象因子不变的情况下, ET_0 将增加(减少)1%。同时参照Lenhart等^[20]将敏感系数分为4个等级,记为 S_d :当 $|S_X| < 0.05$ 时, S_d 为忽略等级;当 $0.05 \leq |S_X| < 0.20$ 时, S_d 为中等;当 $0.20 \leq |S_X| < 1.00$ 时, S_d 为高;当 $|S_X| \geq 1$ 时, S_d 为非常高。

1.2.3 气象因子对 ET_0 的贡献率

根据尹云鹤等^[21]提出的气象因子对 ET_0 的贡献率计算方法,将敏感系数与气象因子的多年相对变化相乘,由此得到气象因子引起气候要素的变化程度,计算公式为

$$C_X = S_X R_X$$

$$\text{其中} \quad R_X = \frac{nT_X}{\bar{X}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: C_X 为气候要素 X 对 ET_0 变化的贡献率, C_X 绝对值越大,说明由该气象因子的相对变化对 ET_0 变化的贡献度越高,即此气象因子是引起 ET_0 变化的主导因子; R_X 为 X 的多年相对变化率; n 为研究时长度; T_X 、 \bar{X} 分别为相应时段内 X 的线性倾向率、平均值。

ET_0 变化趋势采用线性回归模型法进行计算、检验^[22],以上计算、统计工作均在SPSS 22中完成,图件采用OriginPro 8.5绘制。

表1 汉江上游流域典型气象站点位置及气象因子年均值

气象站	经度	纬度	海拔/m	平均气温/°C	日照时数/h	相对湿度/%	风速/(m·s ⁻¹)	ET_0 /mm
汉 中	107°02'E	33°04'N	509.5	14.56	1590.61	78.95	1.07	826.23
石 泉	108°16'E	33°03'N	484.9	14.63	1692.89	75.57	1.36	861.76
安 康	109°02'E	32°43'N	290.8	15.74	1723.37	73.58	1.28	909.82

2 结果分析

2.1 ET_0 及气象因子的变化特征

图1为1960—2015年3个气象站(汉中、石泉和安康)5个气象因子(最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度、风速)及 ET_0 的均值年内逐日变化。由图1可见,汉江上游不同气象因子及 ET_0 的年内变化趋势不一致,这是受太阳周年运动及地形等地理要素的共同影响。从图1(a)(b)可以看出,3站点的最高气温和最低气温年内变化呈单峰型,其峰值均出现在7月下旬至8月上旬,谷值则出现在1月。日照时数年内波动变化明显,呈双峰型分布,秋冬季日照处于较小幅度变化的低谷区,最大峰值出现在夏季7—8月,次峰值在春末夏初(图1(c)),两

次峰值之间的谷值与汉江上游此时正处于梅雨季节有关。从相对湿度的年内逐日变化(图1(d))可看出,3站均呈余弦函数形状,最大值出现在9月、最小值出现在冬末春初;汉中站相对湿度最小值大于安康、石泉站。风速年内变化呈现不显著的正弦函数形状,3月为最大值,9月为最小值(图1(e))。 ET_0 年内逐日变化与日照时数相似,呈现双峰型、最大峰值出现在8月,次峰值出现在6月,最小值则出现在12月(图1(f))。

图2为1960—2015年3个气象站 ET_0 的逐年变化,表2为1960—2015年3个气象站气象因子变化率。由图2可见,汉江上游多年平均 ET_0 为826.23~909.82 mm,其空间上自东向西递减。各站点 ET_0 的年际变化均呈下降趋势,其中石泉年 ET_0 呈显著减

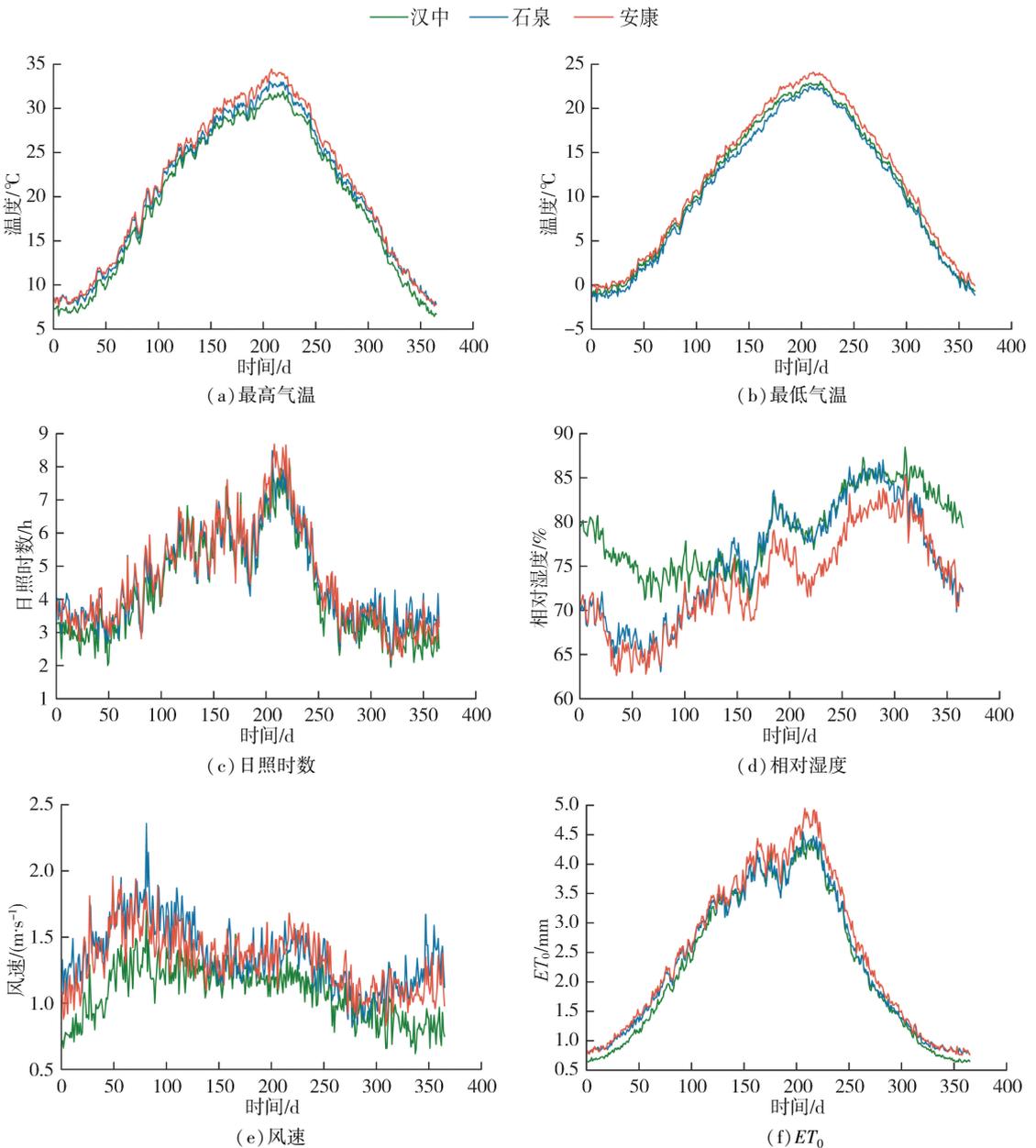


图1 1960—2015年3个气象站5个气象因子及 ET_0 的均值年内逐日变化

2.2 ET_0 对气象因子的敏感性

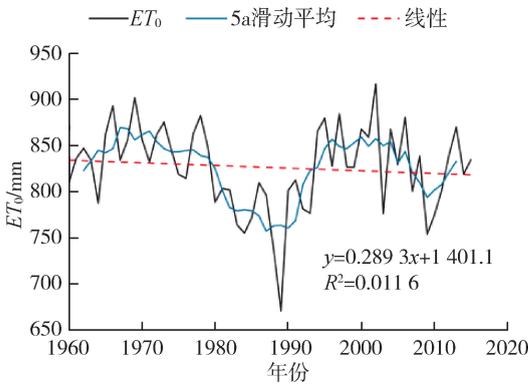
2.2.1 敏感系数的年际变化

表3为 ET_0 对气象因子敏感系数多年均值及敏感程度。从表3可以看出, ET_0 对相对湿度的敏感程度最高,对风速的敏感程度最低,各站敏感程度排序基本一致。 ET_0 对最高气温、最低气温、相对湿度的年均敏感系数均为负值,表明 ET_0 随着这3个气象因子的增加而下降。对最低气温敏感程度除汉中为“中”外,其他均达到了“高”。 ET_0 对日照时数和风速的年均敏感系数均为正值,对日照时数敏感程度除安康达到“高”外,其他均为“中”。

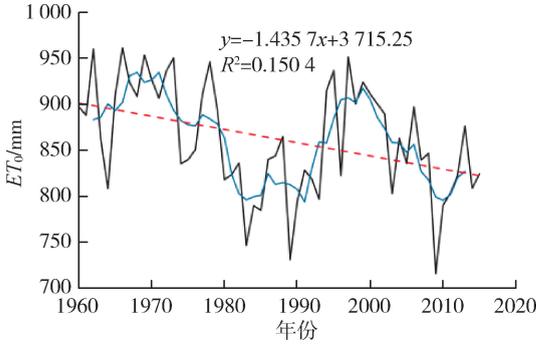
图3为 ET_0 对3个气象站5个气象因子敏感系数的年际变化。由图3可见,3个气象站的 ET_0 对5个气象因子的敏感程度均为“中”以上等级,敏感程度从小到大依次为风速、日照时数、最低气温、最高气温、相对湿度。 ET_0 对各气象因子敏感系数的年际变化趋势不同,可能与各站点的植被类型、海拔和下垫面综合情况有关。汉江上游 ET_0 对相对湿度最为敏感,这与长江流域^[23]、澜沧江流域^[24]、关中渭惠渠^[14]、甘肃^[25]、黄土地区^[26]等区域最为敏感的气象因子相同。

2.2.2 敏感系数的年内变化

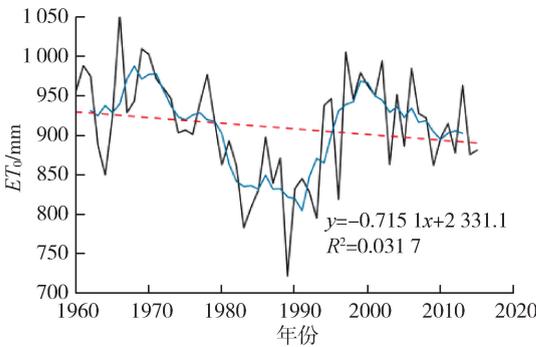
图4为 ET_0 对3个气象站5个气象因子敏感系数的年内变化。由图4可见,除风速外的3站各气象因子敏感系数年内分布相近。最高气温、最低气温和相对湿度的敏感系数均为负值,变化分别介于 $-0.419 \sim -0.112$ 、 $-0.449 \sim -0.048$ 、 $-0.924 \sim -0.157$,表明 ET_0 随着这3个气象因素的增大而减少。日照和风速敏感系数则为正值,为 $0.034 \sim 0.428$ 和 $0.000 \sim 0.242$ 。最高气温、最低气温和风速的年内敏感系数均呈开口向上抛物线分布,其中最高气温和最低气温敏感系数峰值发生在9月、谷值发生在1月,而风速敏感系数峰值发生在1月、谷值发生在9月。 ET_0 对日照时数敏感系数9月份达到最大,12月份为最小,呈单峰型变化。就相对湿度敏感系数而言,其变化幅度大,最大值出现在8月、最小值均出现在12月,年内呈双峰型分布。



(a) 汉中



(b) 石泉



(c) 安康

图2 1960—2015年3个气象站 ET_0 逐年变化

小趋势,达到 -1.436 mm/a ,汉中和安康年 ET_0 呈不显著减小趋势,变化率分别为 -0.289 mm/a 、 -0.715 mm/a 。各站年代际 ET_0 均值呈波动变化,1960s的 ET_0 最大,1980s的 ET_0 最小,1990s后有所增加,至2000年后又开始下降。由表2可见,3站点的最高气温和最低气温均呈显著上升趋势,汉中市平均气温亦呈显著上升趋势;日照时数方面,汉中和石泉站呈显著下降趋势,安康站呈不显著下降趋势;相对湿度除汉中市呈显著下降趋势外,石泉和安康站均为显著上升趋势;石泉站风速表现为显著下降趋势。

表2 1960—2015年3个气象站气象因子年变化水平

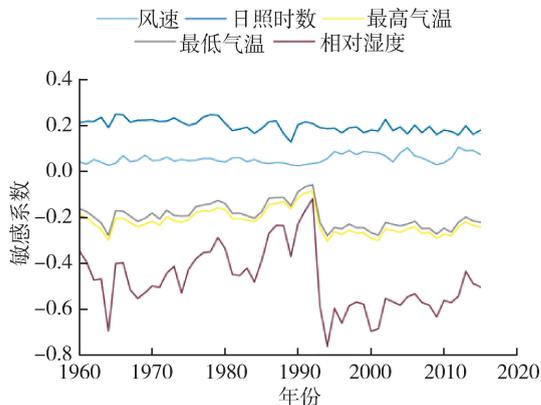
气象站	最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	日照时数/h	相对湿度/%	风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	ET_0/mm
汉 中	0.016 8**	0.029 7**	0.024 0**	-8.808 3**	-0.037 0*	0.002 2	-0.289
石 泉	0.015 6*	0.008 0**	0.006 1	-4.239 2*	0.098 3**	-0.004 1*	-1.436**
安 康	0.013 1*	0.012 0**	0.007 3	-2.025 3	0.049 4*	-0.002 0	-0.715

注: *、**表示线性趋势分别通过0.05、0.01置信水平检验。

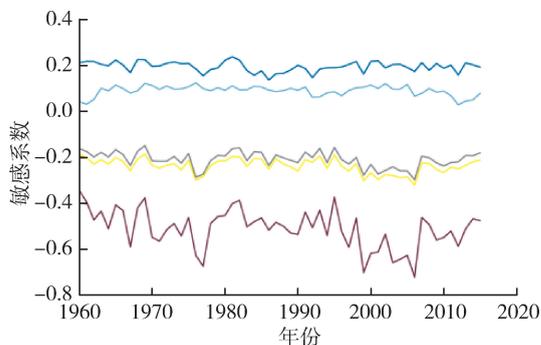
表 3 ET_0 对气象因子敏感系数多年均值及敏感程度

气象站	最高气温		最低气温		日照时数		相对湿度		风速	
	敏感系数	敏感程度	敏感系数	敏感程度	敏感系数	敏感程度	敏感系数	敏感程度	敏感系数	敏感程度
汉中	-0.216 ^B	高	-0.192 ^B	中	0.199 ^B	中	-0.462 ^B	高	0.055 ^A	中
石泉	-0.240 ^B	高	-0.213 ^B	高	0.193 ^b	中	-0.520 ^B	高	0.091 ^B	中
安康	-0.225 ^B	高	-0.201 ^B	高	0.202 ^b	高	-0.444 ^B	高	0.100 ^a	中

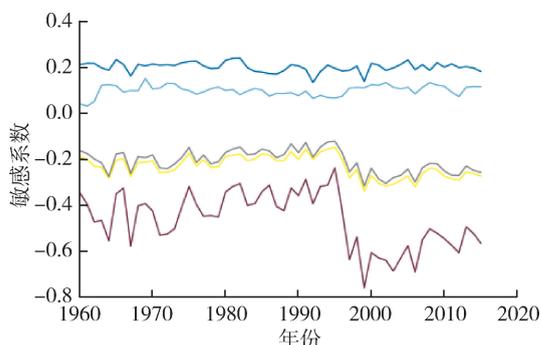
注: A、B、a、b 依次表示敏感系数的变化趋势呈显著上升、显著下降、上升、下降。



(a) 汉中



(b) 石泉

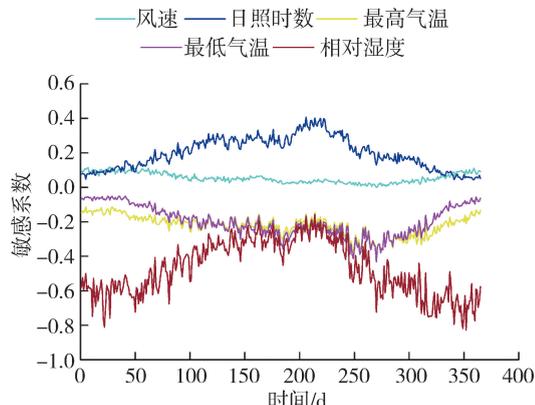


(c) 安康

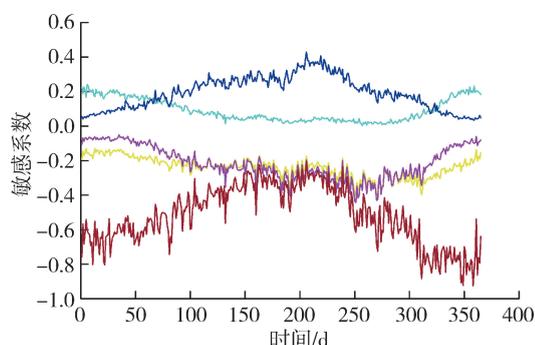
图 3 ET_0 对 3 个气象站 5 个气象因子敏感系数的年际变化

2.3 气象因子对 ET_0 的贡献率

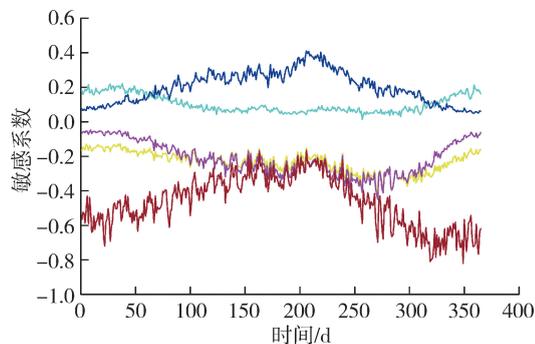
为了定量探究汉江上游 ET_0 对气候变化的响应,计算汉中、石泉、安康站 5 个气象因子的多年相对变化及其对 ET_0 的贡献率(表 4),进而确定引起各站 ET_0 变化的成因。由表 4 可知,1960—2015 年最高气温、最低气温相对变化率均为正值,因其敏感系数为负值,导致两个气象因子对 ET_0 的贡献率小于 0。日照时数相对变化率呈负值,相对湿度、风速相对变化率各站正负表现不一,这是因为 ET_0 与温度、湿度、风速、日照等气象因子以及地形、植被、实



(a) 汉中



(b) 石泉



(c) 安康

图 4 ET_0 对 3 个气象站 5 个气象因子敏感系数的年内变化
际蒸散发之间呈现复杂的非线性关系^[21,27-28]。汉中日照时数相对变化率最大,高达 -31.461%,石泉和安康风速相对变化率最大,分别为 -16.845%和 -8.330%。从各项气象因子对 ET_0 的贡献率来看,汉中站日照时数贡献率最大,达到 -6.219%,即日照时数是引起该站 ET_0 变化的主导气象因子,这与其日照时数的相对变化率较大有关。相对湿度是石泉和安康 ET_0 变化的主导气象因子,其贡献率分别为 -3.783%和 -1.752%。

表4 3个气象站气象因子的多年相对变化及其对 ET_0 的贡献率

%

气象站	最高气温		最低气温		相对湿度		风速		日照时数	
	相对变化	贡献率	相对变化	贡献率	相对变化	贡献率	相对变化	贡献率	相对变化	贡献率
汉中	4.854	-1.073	14.912	-2.934	-2.622	1.239	11.545	0.633	-31.461	-6.219 ^a
石泉	4.289	-1.031	4.225	-0.900	7.280	-3.783 ^a	-16.845	-1.532	-14.119	-2.722
安康	3.487	-0.813	5.661	-1.194	3.766	-1.752 ^a	-8.330	-0.858	-6.651	-1.329

注:a表示 ET_0 变化的主导气象因子。

3 结论

a. 1960—2015年汉江上游流域多年平均 ET_0 为826.23~909.82mm,呈下降趋势,空间上自东向西递减。最高气温和最低气温年内变化呈单峰型、 ET_0 和日照时数呈双峰型、相对湿度呈余弦函数形、风速呈正弦函数形分布。

b. 1960—2015年汉江上游流域 ET_0 对气象因子的敏感系数多数呈显著下降趋势,敏感程度均达到“中”以上等级。其中, ET_0 对相对湿度最为敏感。最高气温、最低气温和风速的年内敏感系数均呈抛物线分布,日照时数和相对湿度则分别为单峰型、双峰型分布。

c. 日照时数是汉中站 ET_0 变化的主导气象因子,石泉和安康站主导气象因子是相对湿度。

参考文献:

[1] 赵姘,李志,刘文兆,等. 泾河流域潜在蒸散量的时空变异[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5600-5608. (ZHAO Cha, LI Zhi, LIU Wenzhao, et al. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration during current and future period in the Jinghe watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 19(34): 5600-5608. (in Chinese))

[2] HUANG S C, KRYSANOVA V, ZHAI J Q, et al. Impact of intensive irrigation activities on river discharge under agricultural scenarios in the semi-arid Aksu River Basin, Northwest China [J]. Water Resources Management, 2015, 29(3): 1-15.

[3] CHEN Yaning, LI Zhi, LI Weihong, et al. Change of potential evapotranspiration and its implications to water cycle; water resources research in Northwest China [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2014: 267-287.

[4] RICHARD G A, LUIS S P, DIRK R, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [R]. Rome: FAO, 1998.

[5] VALENTIN S G, JAY H L, PAVEL Y G, et al. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: a reassessment [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(13): 2665-2668.

[6] 曹永强,高璐,郭明. 辽宁省不同土地利用类型的蒸散发特征[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 14-19.

(CAO Yongqiang, GAO Lu, GUO Ming. Characteristics of evapotranspiration for different types of land use in Liaoning Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2): 14-19. (in Chinese))

[7] 黄会平,曹明明,宋进喜,等. 1957—2012年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 315-326. (HUANG Huiping, CAO Mingming, SONG Jinxi, et al. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in China from 1957 to 2012 [J]. Journal of National Resources, 2015, 30(2): 315-326. (in Chinese))

[8] 陈晓菲,任立良,江善虎,等. 赣江上游流域蒸散发量影响因素的遥感分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 33-37. (CHEN Xiaofei, REN Liliang, JIANG Shanhu, et al. RS-based analysis of factors influencing evapotranspiration in upstream region of Ganjiang Basin [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 33-37. (in Chinese))

[9] 蔡辉艺,余钟波,杨传国,等. 淮河流域参考蒸散发量变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 76-82. (CAI Huiyi, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Analysis of variation of reference evapotranspiration in Huaihei Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 76-82. (in Chinese))

[10] 童瑞,杨肖丽,任立良,等. 黄河流域1961—2012年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 16-21. (TONG Rui, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Yellow River Basin during 1961—2012 and analysis of its influence factors [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 16-21. (in Chinese))

[11] 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 Xianfeng, PAN Yaozhong, ZHANG Jingshui, et al. Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in five provinces of Northwest China in 1960—2011 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2564-2570. (in Chinese))

[12] 王富强,赵乃立,袁建平,等. 基于信息熵原理的东北地区参考作物蒸散量时空特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(4): 6-12. (WANG Fuqiang, ZHAO Naili, YUAN Jianping, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in Northeast China based on information entropy theory [J]. Advances

- in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (4): 6-12. (in Chinese))
- [13] LIU Changming, ZHANG Dan. 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.
- [14] 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 Xiaoling, SONG Yue, NIU Jiping, et al. Sensitivity and attribution of potential evapotranspiration in Jinghuiqu Irrigation District [J]. Journal of National Resources, 2015, 30 (1): 115-123. (in Chinese))
- [15] 郭金路, 谷健, 扬筑筑. 辽西地区潜在蒸散发敏感性分析及变化成因研究 [J]. 灌溉排水学报, 2018, 37 (1): 121-128. (GUO Jinlu, GU Jian, YANG Zhuzhu. Sensitivity and attribution of potential evapotranspiration in Western Liaoning [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37 (1): 121-128. (in Chinese))
- [16] 殷淑燕, 黄春长. 汉江上游近 50a 来降水变化与暴雨洪水发生规律 [J]. 水土保持通报, 2012, 32 (1): 19-25. (YIN Shuyan, HUANG Chunchang. Precipitation change and occurrence of rainstorms and floods in upper reaches of Hanjiang River during last 50 years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32 (1): 19-25. (in Chinese))
- [17] 任利利, 殷淑燕. 陕南汉江上游气温变化及其对农业生产的影响 [J]. 中国农业气象, 2013, 34 (3): 272-277. (REN Lili, YIN Shuyan. Temperature changes and its impacts on agriculture in the upper reaches of Hanjiang River in Southern Shaanxi [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34 (3): 272-277. (in Chinese))
- [18] 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 Ping, LONG Huaiyu, ZHANG Yangzhu, 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))
- [19] MCCUEN R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1974, 10 (3): 486-497.
- [20] LENHART T, ECKHARDT K, FOHRER N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2002, 27 (9): 645-654.
- [21] 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, 55 (22): 2226-2234. (YIN Yunhe, WU Shaohong, DAI Erfu. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971—2008 [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (22): 2226-2234. (in Chinese))
- [22] 徐建华. 计量地理学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 121-123.
- [23] GONG Lebing, XU Chongyu, CHEN Deliang, 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.
- [24] 李斌, 李丽娟, 覃馥楚, 等. 澜沧江流域潜在蒸散发敏感性分析 [J]. 资源科学, 2011, 33 (7): 1256-1263. (LI Bin, LI Lijuan, QIN Yuchu, et al. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration in the Lancang River Basin [J]. Resources Science, 2011, 33 (7): 1256-1263. (in Chinese))
- [25] 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 Yaojun, WEI Xia, SU Huidong. 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))
- [26] 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 Sheng, WANG Quanjiu. 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))
- [27] 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 Changming, ZHANG Dan. 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))
- [28] 朱非林, 王卫光, 孙一萌, 等. 汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2013, 41 (4): 300-306. (ZHU Feilin, WANG Weiguang, SUN Yimeng, et al. Spatial and temporal variations of actual evapotranspiration and their causes in Hanjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41 (4): 300-306. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-09-16 编辑: 王芳)

