

四川省参考作物蒸散量时空变化特征及敏感性分析

宋延杰, 吴远浩, 杨开怀, 王子豪

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2022年10月15日; 录用日期: 2022年11月18日; 发布日期: 2022年11月28日

摘要

研究四川省参考作物蒸散量(ET_0)时空变化特征, 有助于深刻认识四川地区农业水资源需求, 为科学制定灌溉措施和提高农业水资源利用效率提供理论依据。本文基于1980~2010四川35个气象站逐日观测资料, 采用Penman-Monteith公式模型计算 ET_0 , 并分析了其时空变化特征, 结果表明: 1) 近30年来四川省 ET_0 整体呈增加趋势, 但不同站点之间差异较大; ET_0 在空间分布上表现为从西向东逐渐增加的趋势, 东部达州地区 ET_0 最大, 历年均超过1000 mm。2) Mann-Kendall突变检测表明年参考作物蒸散量在2000年发生了显著的突变型增大, Morlet小波分析显示参考作物蒸散量存在15~20年的显著周期变化。3) 敏感性分析结果显示 ET_0 对相对湿度的敏感程度(呈负值)最高, 可见相对湿度是该地区 ET_0 变化的主要影响因素。

关键词

参考作物蒸散量, Penman-Monteith公式, 影响因素, 四川省

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Reference Crop Evapotranspiration and Its Sensitivity Analysis in Sichuan Province

Yanjie Song, Yuanhao Wu, Kaihuai Yang, Zihao Wang

College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 15th, 2022; accepted: Nov. 18th, 2022; published: Nov. 28th, 2022

Abstract

The study of the temporal and spatial variation characteristics of the reference crop evapotranspiration (ET_0) is conducive to a profound understanding of the demand for agricultural water resources, and provides a theoretical basis for the scientific formulation of irrigation measures and the improvement of agricultural water resource utilization efficiency in Sichuan Province. Based on the daily observations of 35 meteorological stations in Sichuan Province from 1980 to 2010, ET_0 is calculated by Penman-Monteith model, and its spatial-temporal change characteristics are analyzed. The results show that: 1) The overall trend of ET_0 in Sichuan has shown an upward trend in the past 30 years. However, there are large differences of ET_0 among regions. In terms of spatial distribution, ET_0 increases from west to east and reach the maximum in the Dazhou region, which is more than 1000 mm over the years. 2) Mann-Kendall mutation detection shows that the annual ET_0 has increased significantly in 2000, and Morlet wavelet analysis shows that ET_0 has a significant periodic change from 15 to 20 years. 3) The sensitivity analysis results show that ET_0 has the highest sensitivity to relative humidity (negative value), which shows that relative humidity is the main influencing factor of variation of ET_0 in Sichuan Province.

Keywords

Reference Crop Evapotranspiration, Penman-Monteith Equation, Influencing Factors, Sichuan Province

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次评估报告,近 50a 年来全球平均温度升高了 0.72°C 。这会导致暴雨、洪涝、干旱等高温引发的极端天气状况发生频率明显增加,对区域水文循环和农业生产产生明显影响[1]。蒸散量作为水汽及能量交换之间的纽带,也直接反映了农作物生长发育情况,因此对于蒸散量的研究一直受到农业气象学家的广泛关注。为了定量评估气象条件对农作物生长发育的影响,学者们提出了参考作物蒸散量这个概念。联合国粮农组织(FAO)将参考作物蒸散量(ET_0)定义为:“假设作物高度为 0.12 m,冠层阻力和反照率分别为 70 m/s 和 0.23 的参考冠层的蒸散,相当于生长旺盛、长势一致、完全覆盖地面且水分供应充足的开阔绿色草地的蒸散” [2],是在水分供应不受限制的情况下,某种下垫面所能达到的最高蒸散量,是实际蒸散量的理论上限值。

ET_0 受气象要素影响显著,因此在当前全球气候变化的大背景下,一些学者重新把研究目光聚焦于 ET_0 及其影响因素的分析与探讨。Dinpashoh [3]和 Sharifi [4]研究均表明伊朗高原地区 ET_0 呈明显的降低趋势,且在各类气象要素中平均风速对 ET_0 变化的贡献是最大的。Liang [5]对东北洮儿河流域的研究表明 ET_0 与日照时数、气温以及风速均呈正相关关系,而与相对湿度为负相关关系,且相对湿度是 ET_0 最敏感的气象要素。现有研究显示我国大部分地区 ET_0 显现出下降趋势,但受地理位置条件的影响,不同地区气候变化对 ET_0 的影响也存在一定差异[6]。

四川省是我国重要的粮食生产基地,近年来四川省气候发生了显著变化,势必会改变 ET_0 大小,进而影响到农作物生长发育及其产量。目前国内一些学者对四川省 ET_0 的变化趋势以及影响因子做了一些

研究。陈超[7]和赵璐[8]分析了四川地区 ET_0 变化趋势及其影响因素, 均发现四川地区 ET_0 总体呈现下降趋势, 且日照时数和风速是导致此变化的主要原因; 刘悦[9]研究了西南部地区四季 ET_0 变化特征, 结果表明春季、秋季和冬季 ET_0 呈升高趋势, 而夏季 ET_0 却呈降低趋势, 出现此现象的主要原因是相对湿度下降、最高温度升高、最低温度和平均温度上升、日照时数变少。 ET_0 变化直接受气象因子控制, 那么各个因子对 ET_0 的影响程度如何, 或者说 ET_0 对气象因子的敏感性程度目前尚不清楚。因此本研究通过分析近 30 年四川省参考作物蒸散量 ET_0 的时空变化规律以及对各主要气象因子的敏感性, 旨在为四川省农作物需水量变化、农业水资源的科学利用与高效管理等研究提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 资料选取

本研究所用气象数据主要来自于国家气象中心, 包括 1980~2010 年四川地区 35 个地方气象站点(图 1) 的逐日数据, 主要气象要素有地面最高气温(T_{max})、地面最低气温(T_{min})、地面平均温度(T_{mean})、日照时数(h)、相对湿度(R_{mean})和距地面 2 米高度处风(U_2), 其中绵阳、雅安、遂宁三个站点数据序列相对完整, 且位于四川盆地腹地, 呈三角之势, 一定程度能代表四川主要粮食产区, 故选此作为本次研究的重点(图 1)。本文所用数字高程模型均源自中国遥感数据网(<http://rs.ceode.ac.cn/>)。

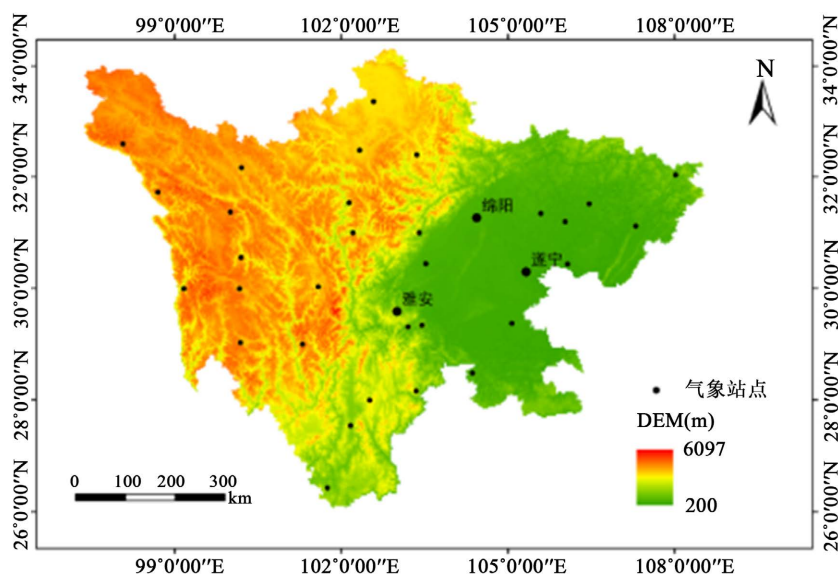


Figure 1. Distribution of meteorological stations in Sichuan

图 1. 四川地区气象站点分布情况

2.2. 研究方法

2.2.1. Penman-Monteith 公式

目前 Penman-Monteith 公式以辐射项和空气动力学项为基本原理, 综合考虑了各种气象条件, 因此公式计算精度较高, 被联合国粮农组织 FAO 推荐为计算参考作物蒸散量 ET_0 的标准方法[2], 该公式表达式为:

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

公式中： ET_0 为参考作物蒸散量($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)， Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)， G 为土壤热通量($\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$)， γ 为干湿表常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)， R_n 为地表净辐射($\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$)， T 为地面高度 2 m 高处平均温度($^\circ\text{C}$)， U_2 为距地面 2 m 高度处日均风速(m/s)， e_s 为饱和水汽压(kPa)， e_a 为实际水汽压(kPa)。在日尺度上，土壤热通量 G 与净辐射 R_n 相比非常小，因此在计算过程中可以忽略不计(取 $G = 0$)。地表净辐射直接计算比较复杂，但是对于某一特定区域而言，它是太阳辐射 R_s 的函数，可通过 R_s 来估算[10]。

2.2.2. 敏感性分析

ET_0 的敏感性分析是从定量角度分析一个或几个相关气象因子发生变化时，对 ET_0 变化影响的定量参数。通过假定其他参数不变，分析单个参数的变化对模型的作用。确定模型的敏感系数是常用的敏感性分析。本文所利用的是由 Mccuen [11]在 1974 年所提出的无量纲相对敏感系数，用来表征 ET_0 对不同气象要素因子变化的敏感度，且此方法方便不同量纲气象要素因子之间进行排序和比较，无量纲相对敏感系数的计算公式为：

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

式中 S_x 表示为参考作物蒸散量 ET_0 对所研究的气候要素 X 的敏感度系数， ΔET_0 表示为由 Δx 变化所导致 ET_0 的变化； Δx 所代表的是所研究的气候要素变化量。

本研究中将气温、风速、相对湿度和日照时数均改变 10%，然后分别 S_x ，如果 S_x 大于零，则可以表示参考作物蒸散量与该气象因子 X 之间的变化趋势同步，反之若 S_x 小于零，则可以视为参考作物蒸散量与该气象因子的变化趋势相背。在对数据进行敏感性分析时，得出的 S_x 绝对值越大则可说明该气象因子的变化对参考作物蒸散量变化的影响关联强度越高。例如若 $S_x = 0.1$ ，其表示含义可理解为当所探究气象因子 X 的数值增加相对应的 10%，在此条件下，其余气象条件稳定参考作物蒸散量将增大 1%。在此期间可以参照 Lenhart [12]等的结论，可将敏感度系数大致判定为四个不同的级别，并将其记作为 S ，具体级别如表 1 所示。

Table 1. Table of sensitivity levels

表 1. 敏感性级别表

敏感度系数 S	敏感性级别
$0.00 < S < 0.05$	敏感性很小
$0.05 \leq S < 0.20$	中度敏感
$0.20 \leq S < 1.00$	高度敏感
$ S \geq 1.00$	极度敏感

2.2.3. 周期分析和突变分析

小波分析是应用广泛的时频分析工具，能分析出时间序列周期变化的局部特性，能更清楚的看出各周期随时间的变化情况[13]。本文采用 Morlet 小波研究 ET_0 序列的特征尺度和周期性，由小波变化方程计算得到小波系数。小波系数实部等值线图可用来反映研究对象不同时间尺度的周期变化及其在时间上的分布，以此来判断不同时间尺度上的未来变化趋势。

Mann-Kendall 检验是世界气象组织推荐并广泛使用的非参数突变检验方法[14]。Mann-Kendall 检验不需要样本遵从一定的分布，不受少数异常值的干扰，非常适用于分析实际中的非正态分布，其检测范围宽、定量化程度高，计算简便，而且在进行突变分析时还可以明确突变开始的时间，指出突变区域。本文采用 Mann-Kendall 检验对 ET_0 序列进行突变分析。

3. 研究结果

3.1. ET_0 年际变化特征

1980~2010 年年参考作物蒸散量的变化趋势如图 2 所示。就全省来看 ET_0 呈显著增加趋势，年平均增加量达到了 2.56 mm，30 年约增加了 76.8 mm。该结论和张青雯[15]对西南地区 ET_0 变化趋势的研究结论相反，主要原因可能是由于研究区域不同所造成的。本文仅研究了四川省 ET_0 变化趋势，其属于中亚热带湿润气候区，又兼有海洋性气候特征，显然与西南其他地区气候存在明显差异。实际上，四川省不同站点 ET_0 的年际变化也存在一定差异。例如本文对绵阳、遂宁和雅安 3 个典型站点 ET_0 的年际变化进行了分析，发现绵阳地区的 ET_0 呈极显著增加趋势，其年平均增加量达到了 8.126 mm，决定系数 R^2 为 0.5462，而遂宁和雅安地区尽管也呈增加趋势，但是没有达到显著性水平，决定系数 $R^2 < 0.1$ 。

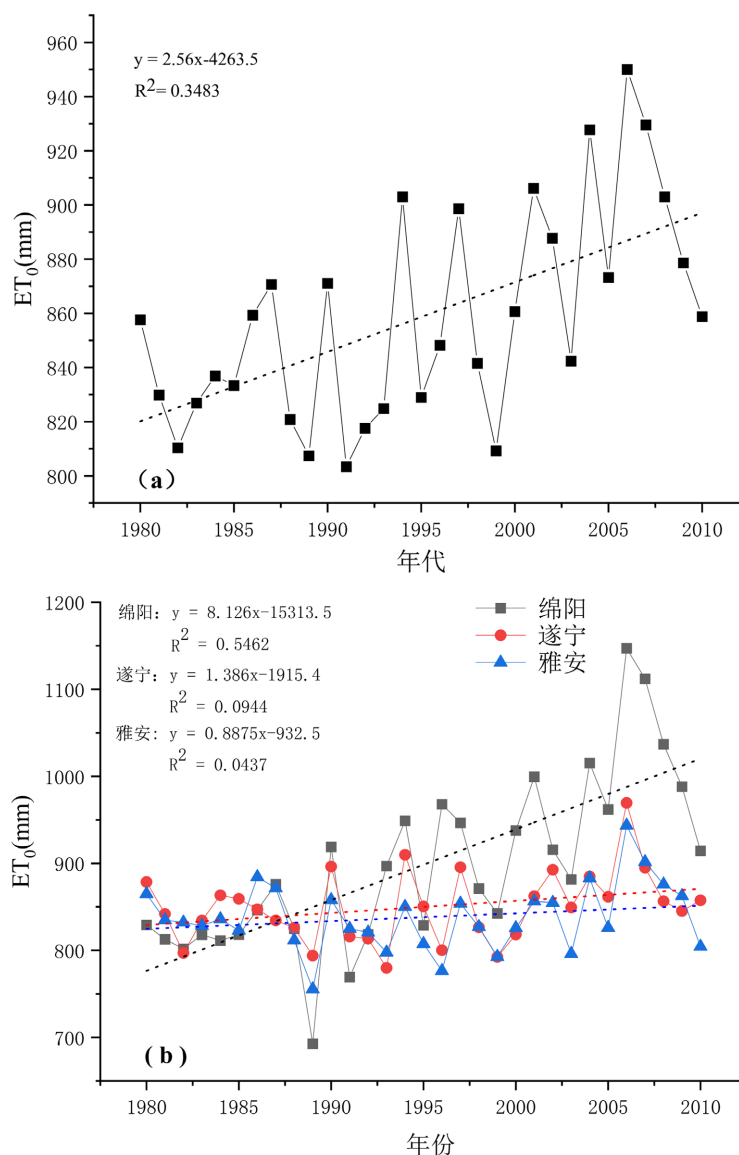


Figure 2. Interannual variation characteristics of reference crop evapotranspiration in the Sichuan Province: (a) In the whole province; (b) At typical meteorological station

图 2. 四川省年参考作物蒸散量年际变化特征：(a) 全省；(b) 典型气象站点

3.2. ET_0 时空分布特征

四川省参考作物蒸散量 ET_0 空间分布特征如图 3 所示。就整体而言，四川省自西向东 ET_0 呈逐渐升高趋势，且东部达州地区为 ET_0 的最大值区域，其历年来均在 1000 mm 以上；在攀枝花西北地区的 ET_0 始终最小值区域，低于 400 mm。就具体年际变化来看，2000~2005 年 ET_0 在全省范围内表现为增加趋势(图 3(a)~(f))，之后呈现为小幅下降趋势。总体来说参考作物蒸散量在盆地内地区较高，而川西地区相对较低。

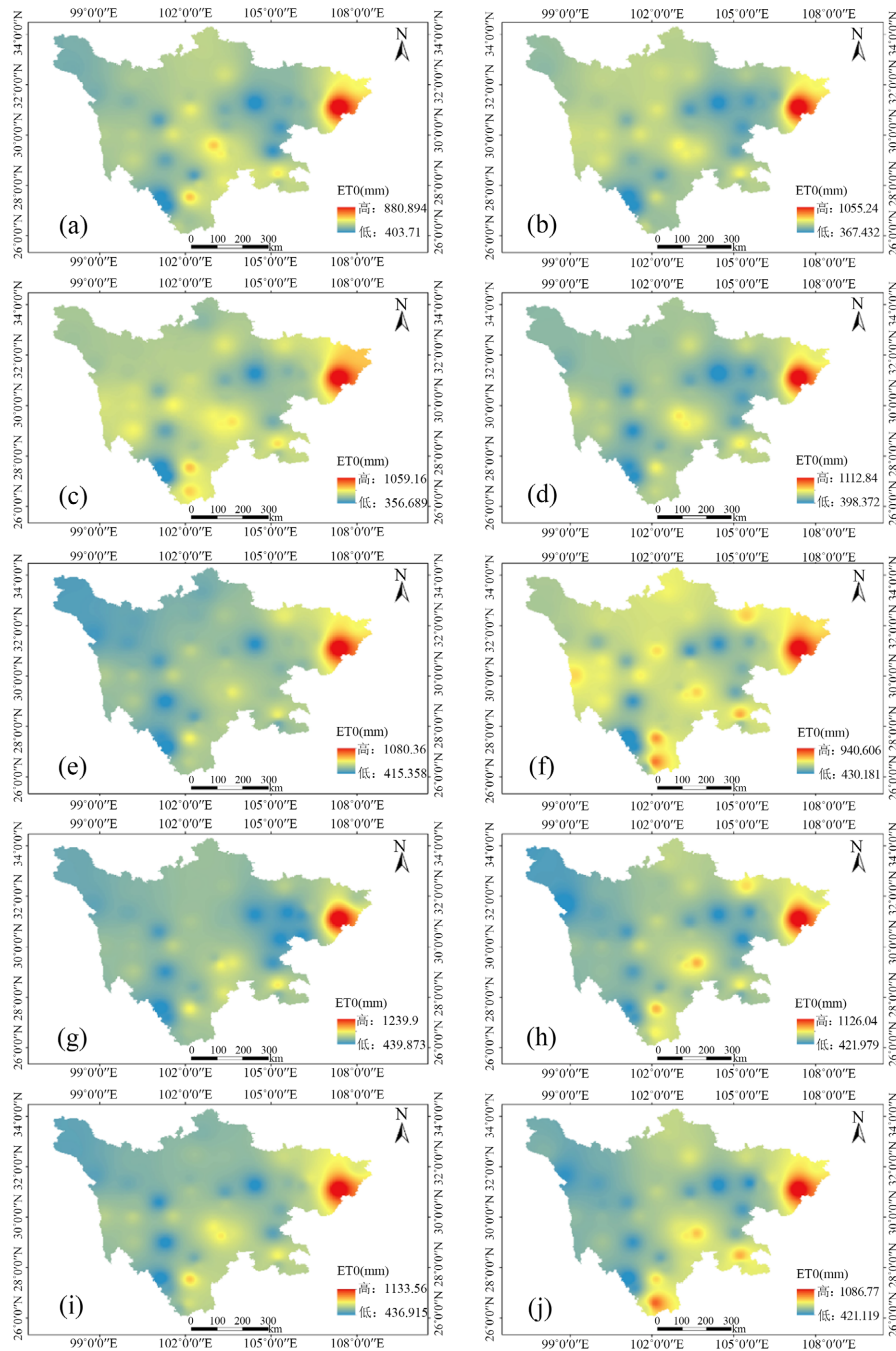


Figure 3. Spatial distribution characteristics of annual ET_0 in Sichuan Province: (a)~(j) 2000~2009

图 3. 四川省 ET_0 空间分布特征: (a)~(j) 分别对应 2000~2009 年

3.3. 突变检测分析

为了判断研究区参考作物蒸散量 ET_0 显著的增加趋势是否是由于突变产生的, 采用 Mann-Kendall 检验对 ET_0 序列进行了突变分析得图 4, 图中红线表示顺序变化曲线 UF、蓝线表示逆序变化曲线 UB、两条临界线 $y = \pm 2.576$ (显著性水平为 0.01)。若 UF 或 UB 大于 0 (小于 0), 则表明序列呈上升(下降)趋势, 当它们超过临界直线, 表明上升或下降趋势显著。由图 4 可知, 研究区平均 ET_0 从 1994 年开始增加, 2007 年 M-K 统计量超过了 2.576, 说明 ET_0 开始显著增加。由于 UF、UB 两条曲线交于 2000 年, 表明研究区平均 ET_0 突变的时间约为 2000 年, 且达到显著性突变的标准。

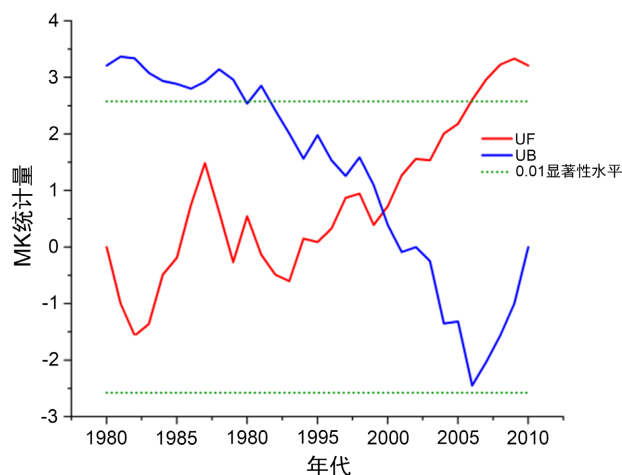


Figure 4. Mutation detection of reference crop evapotranspiration in the Sichuan Province
图 4. 四川省参考作物蒸散量的突变检测

3.4. 周期特征分析

Morlet 小波变换系数实部等值线图, 该值能够反映不同特征时间尺度信号在不同时间的强弱和位相两方面的信息, 正位相代表 ET_0 偏多的时期, 负位相代表 ET_0 偏少的时期。从图 5 可以看出存在 15~20a 强周期对应的位相结构。在这个时间尺度上, 1980~1989 年和 2002~2010 年两时段为正位相, 表示 ET_0 在这两时段内偏多; 而 1990~2001 年为负位相, 表示 ET_0 在这一时段内偏少, 即多→少→多 3 个循环交替的过程。从年小波图像显示预计未来 10 年左右参考作物蒸散量将处于偏少期。

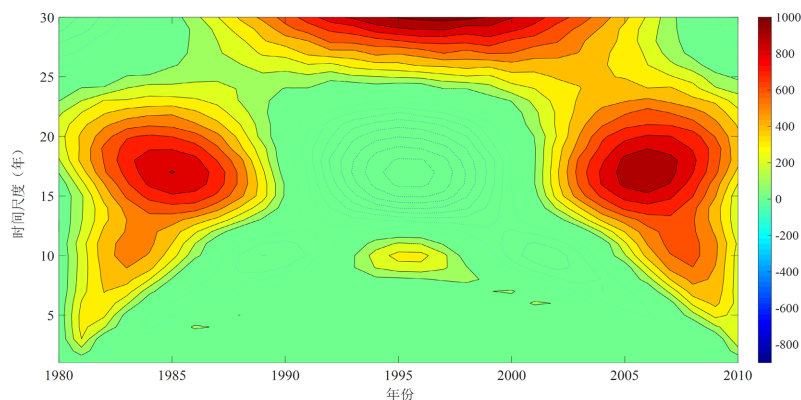


Figure 5. Contour maps of the real part of wavelet coefficients of reference crop evapotranspiration in Sichuan Province
图 5. 四川省参考作物蒸散量小波系数实部等值线图

3.5. 敏感性分析

表 2 是四川省典型站点 ET_0 对当地各气象要素的敏感度系数值及其程度。由表 2 可见相对湿度的敏感度系数在三个站点的绝对值均最大, 高达 0.4 以上, 属于高度敏感级别, 这说明参考作物蒸散量受相对湿度的变化影响显著, 但该值均为负数, 则表明随着相对湿度的升高, 在其他气象要素保持不变的情况下, 参考作物蒸散量表现为下降。参考作物蒸散量对日照时数的敏感程度尽管也达到了高度级别, 但是其值约为相对湿度的一半, 说明日照时数对参考作物蒸散量的影响明显下降。参考作物蒸散量对气温和风速的敏感程度均为中度级别, 但相比之下, 对风速的最小(仅为 0.061), 这说明风速变化对参考作物蒸散量的影响程度最小。

Table 2. Sensitivity coefficient and sensitivity of ET_0 to different meteorological elements
表 2. ET_0 对不同气象要素的敏感度系数和敏感程度

站点	气温		日照时数		相对湿度		风速	
	敏感度系数 S	敏感程度	敏感度系数 S	敏感程度	敏感度系数 S	敏感程度	敏感度系数 S	敏感程度
绵阳	0.190	中度	0.204	高度	-0.404	高度	0.061	中度
雅安	0.191	中度	0.207	高度	-0.408	高度	0.060	中度
遂宁	0.191	中度	0.224	高度	-0.405	高度	0.059	中度

4. 结论

1) 1980~2010 年四川省参考作物蒸散量 ET_0 整体呈增加趋势, 增加速率为 2.56 mm/a, 但是不同站点 ET_0 的增加趋势存在显著差异。四川省 ET_0 空间分布整体表现为从西向东逐渐增加的趋势, 东部达州地区 ET_0 最大, 历年来超过 1000 mm; 其最小值区域位于攀枝花西北地区, 一般低于 400 mm。

2) ET_0 在 2000 年发生显著性突变, 且在 2007 年 ET_0 开始显著增加, 同时存在 15~20a 强周期对应的位相结构。

3) ET_0 对相对湿度有高度的敏感性, 其敏感系数绝对值平均高达 0.4, 远超对日照时数 0.2 的敏感度系数。 ET_0 对风速的敏感度最低, 敏感系数平均为 0.06; 其次是平均温度, 敏感系数平均为 0.19, 不满 0.2 达不到高度敏感等级。

基金项目

成都信息工程大学 2021 年大学生创新创业训练计划项目(202110621023)。

参考文献

- [1] Barbero, R., Fowler, H.J., Lenderink, G., *et al.* (2017) Is the Intensification of Precipitation Extremes with Global Warming Better Detected at Hourly than Daily Resolutions? *Geophysical Research Letters*, **44**, 974-983.
<https://doi.org/10.1002/2016GL071917>
- [2] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., *et al.* (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements—FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.
- [3] Dinpashoh, J., *et al.* (2011) Trends in Reference Crop Evapotranspiration over Iran. *Journal of Hydrology*, **399**, 422-433.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.021>
- [4] Sharifi, A. and Dinpashoh, Y. (2014) Sensitivity Analysis of the Penman-Monteith Reference Crop Evapotranspiration to Climatic Variables in Iran. *Water Resources Management*, **28**, 5465-5476.
<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0813-x>

-
- [5] Liang, L.Q., Li, L.J., Zhang, L., *et al.* (2008) Sensitivity of Penman-Monteith Reference Crop Evapotranspiration in Tao'er River Basin of Northeastern China. *Chinese Geographical Science*, **18**, 340-347. <https://doi.org/10.1007/s11769-008-0340-x>
- [6] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. 农业工程学报, 2006(5): 1-4.
- [7] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 四川地区参考作物蒸散量的变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 35-40.
- [8] 赵璐, 梁川. 近 50 年来四川省潜在蒸散量变化成因研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 26-30.
- [9] 刘悦, 崔宁博, 李果, 等. 近 56 年西南地区四季潜在蒸散量变化成因分析[J]. 节水灌溉, 2018(12): 54-59.
- [10] 郭梦瑶, 余敦先, 张利平, 等. 渭河流域潜在蒸散量变化的气候归因[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 907-919.
- [11] McCuen, R.H. (1974) A Sensitivity and Error Analysis Procedures Used for Estimating Evaporation. *Journal of the American Water Resources Association*, **10**, 486-497.
- [12] Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., *et al.* (2002) Comparison of Two Different Approaches of Sensitivity Analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **27**, 645-654. <https://doi.org/10.1023/A:1021512309480>
- [13] 程正兴, 杨守志, 冯晓霞. 小波分析的理论、算法、进展和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [14] 赵媛媛, 何春阳, 姚辉, 等. 干旱过程对耕地自然生产功能的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 278-284.
- [15] 张青雯, 崔宁博, 冯禹, 等. 中国西南五省参考作物蒸散量时空变化分析[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 80-87.