

近40年来四川盆地参考作物蒸散量时空特征分析

杨羽^{1,2}, 王侯浩^{1*}, 朱瑶¹, 辛治轩¹, 张楚楠¹

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²成都超有爱科技有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2022年10月17日; 录用日期: 2022年11月15日; 发布日期: 2022年11月24日

摘要

准确估算参考作物蒸散量对于灌溉预报、水资源调度和规划有着重要意义。本文基于1978~2016年四川盆地8个资料完整且具有代表性气象站点的观测数据, 利用Penman-Monteith公式计算参考作物蒸散量, 分析了参考作物蒸散量的时空变化特征, 并初步分析了其与气象要素的关系, 结果表明: 1) 四川盆地年参考作物蒸散量近40年来整体上呈显著增加趋势, 空间分布上表现为盆地中部区域最小, 北部区域最大, 最大值达到了1149 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10~16年和50~60年时间尺度周期, 其中50~60年时间尺度的周期较为显著。3) 参考作物蒸散量与气温、日照时数和风速呈极显著正相关, 与相对湿度呈极显著负相关关系。

关键词

参考作物蒸散量, Mann-Kendall突变检验, Morlet小波分析, 四川盆地

Impact of Climate Change on Evapotranspiration of Reference Crops in the Sichuan Basin

Yu Yang^{1,2}, Yuhao Wang^{1*}, Yao Zhu¹, Zhixuan Xin¹, Chunan Zhang¹

¹College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Chengdu ChaoYouAi Technology Co., Chengdu Sichuan

Received: Oct. 17th, 2022; accepted: Nov. 15th, 2022; published: Nov. 24th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 杨羽, 王侯浩, 朱瑶, 辛治轩, 张楚楠. 近40年来四川盆地参考作物蒸散量时空特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(6): 1033-1040. DOI: 10.12677/ccr.2022.116107

Abstract

Accurate estimation of reference crop evapotranspiration is of great significance for irrigation forecasting, water resources scheduling and planning. Based on the observation data from eight meteorological stations with complete and representative data in the Sichuan basin from 1978 to 2016, the spatial and temporal variation characteristics of reference crop evapotranspiration calculated by the Penman-Monteith model is analyzed. The results show that: 1) the annual average reference crop evapotranspiration has shown an overall significant increasing trend in the past 40 years. In terms of spatial distribution, the reference crop evapotranspiration is the smallest in the middle area of the basin and is the largest in the north area with the maximum value 1149 mm. 2) Mann-Kendall mutation detection shows that the annual reference crop evapotranspiration has increased significantly in 2000, and Morlet wavelet analysis shows that the reference crop evapotranspiration has two time scale cycles which are from 10 to 16 years and from 50 to 60 years, among which the latter cycle is more significant. 3) The reference crop evapotranspiration is highly significantly positively correlated with temperature, sunshine hours and wind speed, while is highly negatively correlated with relative humidity.

Keywords

Reference Crop Evapotranspiration, Mann Kendall Mutation Test, Morlet Wavelet Analysis, Sichuan Basin

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

IPCC 第 6 次评估报告指出自工业革命以来全球地表温度上升了约 1°C ，同时未来 20 年平均温度的变化也预示着全球变暖有望达到 1.5°C 甚至更高[1]。全球变暖会直接影响大气环流，进而影响到水资源的空间和时间分布[2]，从而对区域农作物生长产生直接影响。蒸散即植物叶面蒸发(蒸腾)和田间土壤蒸发之和，是植物失水的主要方式，这个过程受气象条件影响显著。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” [3]，是在水分供应不受限制的情况下，某一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[4]。参考作物蒸散量是作物需水量的关键部分，其准确计算对精准灌溉预报、优化水资源调度和区域水资源规划有着重要意义[5]。

学者们对 ET_0 进行深入研究和探讨。朱岗昆[6]采用 Penman 方法进行蒸散量的计算，初步分析了我国蒸散量的时空分布和季节变化特征。之后越来越多的学者开始对国内的 ET_0 进行研究。黄娟[7]分析了 1961~2010 年我国 ET_0 的空间变化特征，结果表明我国 ET_0 整体呈显著下降趋势，但区域差异明显：西北和西南地区的下降幅度明显大于东北和中部地区。檀艳静[8]研究发现黄淮海大部分地区年平均 ET_0 呈减少趋势，空间分布差异明显，大致上 ET_0 自中部向四周逐渐减小。王鹏涛[9]研究发现华北平原区域 53 年 ET_0 呈减少趋势，且空间分布差异显著。

四川盆地是我国重要的粮食生产基地,气候变化直接改变了 ET_0 ,进而影响到作物生长发育和产量。学者们对于西南地区[10]、四川省[11]以及四川省冬春季[12]的 ET_0 也进行了分析研究,但是针对四川盆地 ET_0 的研究较少,且研究时间范围较不能反映近年来的变化趋势。因此,本文拟利用 1978~2016 年四川盆地 8 个代表性气象站点的逐月资料数据,分析四川盆地 ET_0 的时空变化特征,以为当地水资源的协调和规划以及农业水资源的有效利用提供参考依据。

2. 资料与方法

2.1. 站点选取

本文所用数据资料来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov>),包括 1978~2016 年四川盆地绵阳、雅安、乐山、宜宾、广元、巴中、达州和遂宁共 8 个代表性站点的逐月观测资料主要气象要素有地面最高气温(Tmax)、地面最低气温(Tmin)、地面平均温度(Tmean)、日照时数(h)、相对湿度(Rmean)和、地面 2 米高度处风(u_2)。本研究中利用 ArcGIS 10.0 对参考作物蒸散量空间分布特征进行了分析。

2.2. 参考作物蒸散量的计算

参考作物蒸散量由联合国粮食及农业组织(FAO) 1988 年正式提出的 Penman-Monteith 公式计算。具体计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d), R_n 为地表的净辐射量(MJ/(m²·d)), Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C), γ 为干湿表常数(kPa/°C), T 为地表 2 米平均气温(°C), u_2 为地表 2 米高处风速(m/s), G 为土壤热通量(MJ/(m²·d)), e_s 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa)。

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. 结果与分析

3.1. 年际变化特征

由图 1 可见,四川盆地 ET_0 多年平均值为 967 mm, ET_0 的变化范围为 822~1121 mm,最小值出现在 1989 年,约为 749 mm,最大值出现在 2006 年,约为 1264 mm,最大值与最小值之比为 1.69。线性趋势线表明 1978~2016 年 ET_0 随时间呈明显增加趋势,增加幅度约为 3.9197 mm/a,近 40 年来约增加了 152.9 mm。该结论和张青雯[10]对西南地区 ET_0 变化趋势的研究结论相反,主要原因一方面可能是由于所选时间范围不同,本文研究的时间范围是近 30 年来,而张青雯研究的是 1954~2013 年;另一方面研究区域存

在差异，本文仅研究了四川盆地范围内 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。二次多项式回归分析表明，不同时段内 ET_0 的变化趋势存在一定差异的。1979~1997 年 ET_0 总体增长比较缓慢，平均值为 918.2 mm，比 39 年平均低 48.8 mm。1997 年之后， ET_0 总量偏多，平均为 1006.0 mm，比近 39 年 ET_0 平均值和 1979~1997 年平均 ET_0 分别多 39.0 mm 和 87.8 mm。

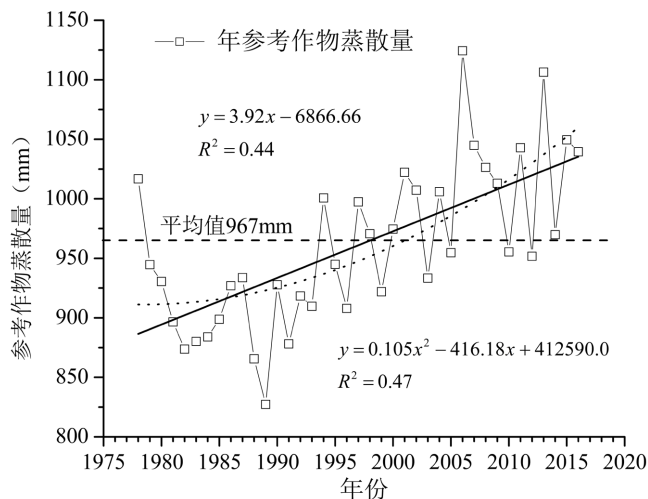


Figure 1. Characteristics of annual average reference crop evapotranspiration hour change variability in the Sichuan basin from 1979~2016

图 1. 1979~2016 年四川盆地参考作物蒸散量变化特征

3.2. 空间分布特征

四川盆地近 40 年 ET_0 空间分布特征如图 2 所示。 ET_0 由北向南逐渐减小又增大，北部为四川盆地最大值区，其中广元 ET_0 大于 1114 mm；绵阳、遂宁、巴中、达州参考作物蒸散量为 837~906 mm；其他地区介于 906~1110 mm 之间。

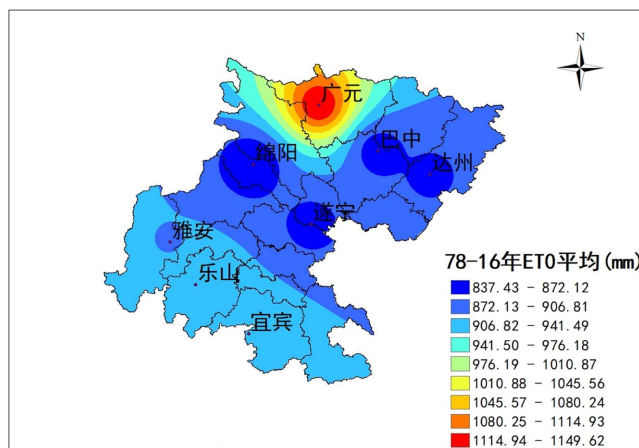


Figure 2. Distribution of annual reference crop evapotranspiration in the Sichuan basin region from 1978 to 2016

图 2. 1978~2016 年四川盆地地区年平均参考作物蒸散量分布

近年来全球气候发生了明显变化，在此背景下不同时期四川盆地 ET_0 的空间分布特征也相应地发生了变化。由图 3 可见，1978~2016 年四川盆地大部分地区 ET_0 呈增加趋势，其中 ET_0 高值区($ET_0 > 1000$ mm) 发生了明显变化。广元地区在整个观测期间都属于 ET_0 高值区，但是从 2008 开始有所下降。宜宾地区 ET_0 在 1978~1987 年属于低值区，但是从 1988~1997 年这个时期开始蒸散量明显增加，属于高值区域。其他区域整体来看， ET_0 在空间分布上表现出随着年代的增长总体上呈增长趋势，如表 1 所示。

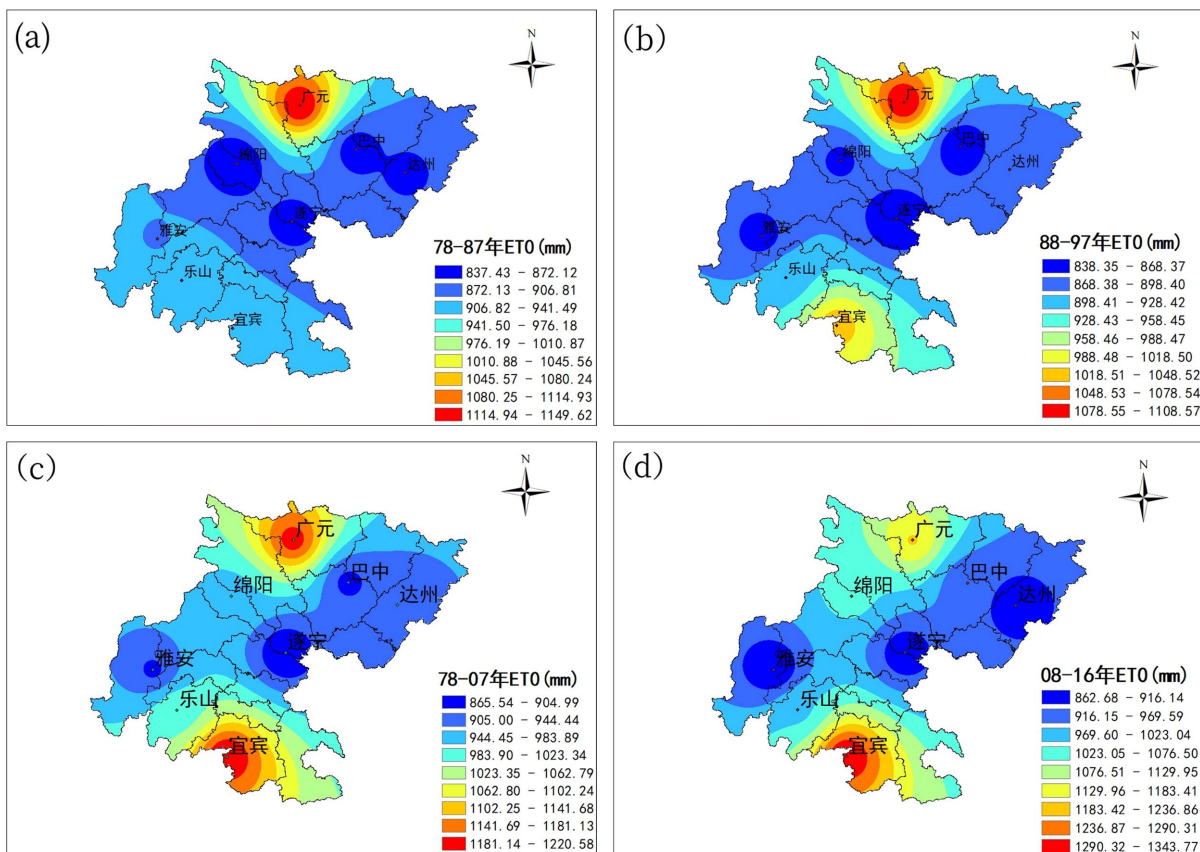


Figure 3. Distribution of annual average reference crop evapotranspiration in the Sichuan Basin by age
图 3. 四川盆地地区各年代年平均参考作物蒸散量分布

Table 1. Regional interdecadal variation in reference crop evapotranspiration
表 1. 参考作物蒸散量区域年代际变化

年代	北部地区 ET_0 (mm)	中部地区 ET_0 (mm)	南部地区 ET_0 (mm)
1978~1987	848.1	956.6	927.6
1988~1997	849.8	945.2	935.6
1998~2007	917.0	1003.2	1041.4
2008~2016	958.3	999.5	1074.1

注：北部地区包括站点为广元、巴中、遂宁；中部地区包括站点为绵阳、遂宁；南部地区包括站点为雅安、乐山、宜宾。

3.3. 突变检测分析

为了判断研究区 ET_0 显著增加趋势是否是由于突变产生的, 本文采用 Mann-Kendall 检验对 ET_0 序列进行了突变分析。图中实线表示表示顺序变化曲线 UF、虚线表示逆序变化曲线 UB、两条临界线 $y = \pm 1.96$ (显著性水平为 0.05)。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 所示, 研究区平均 ET_0 从 1994 年开始增加, 2001 年 M-K 统计量超过了 1.96, 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。

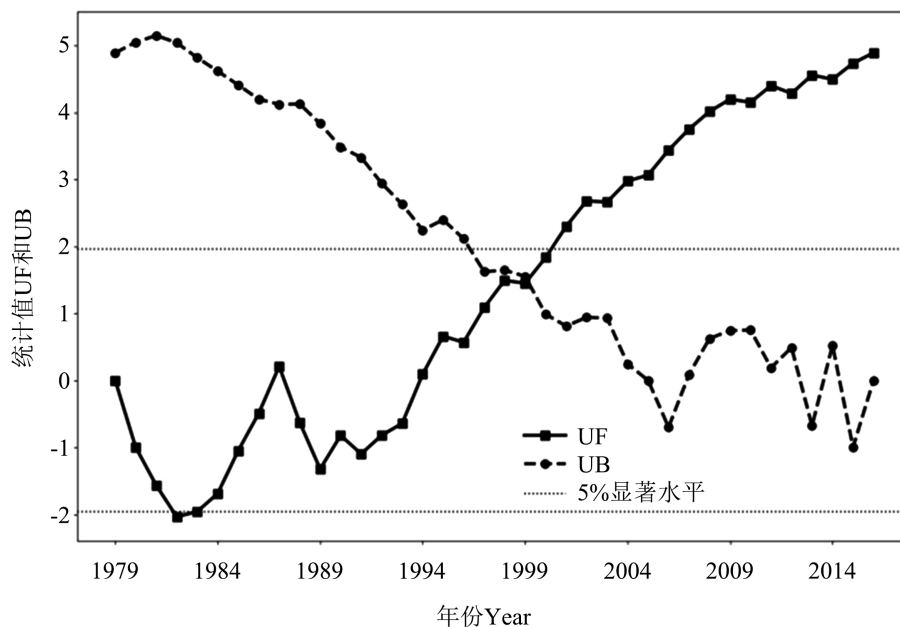


Figure 4. Mutation detection of annual reference crop evapotranspiration in the Sichuan basin
图 4. 四川盆地年参考作物蒸散量的突变检测

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 可以看出在不同时间尺度上, ET_0 序列变化呈现不同的特征。首先存在 50~60a 左右强周期对应的位相结构。在这个时间尺度上, 1978~1978 年和 2007~2016 年两时段为正位相, 表示 ET_0 在这两时段内偏多; 而 1979~2006 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; 突变点分别为 1998 年和 2008 年。其次在 10~16 年尺度上存在着一个相对较弱的次周期, 其位相结构比较有规律表现为正负位相每隔 4~5 年有规律的出现。

3.5. 参考作物蒸散量和各气候要素的关系

由于 ET_0 仅受制于当地的气候条件, 且影响 ET_0 的因素非常多, 本文仅选择气温、日照时数、风速、相对湿度 4 个主要的气象因素, 来分析影响 ET_0 时空变化的原因, 分析结果见表 2。由表可知 ET_0 与气温、日照时数和风速均呈极显著正相关, 但与相对湿度呈极显著负相关关系, 这与于东平对青海省东部高原农业区 ET_0 影响因素的研究结论一致[15]。

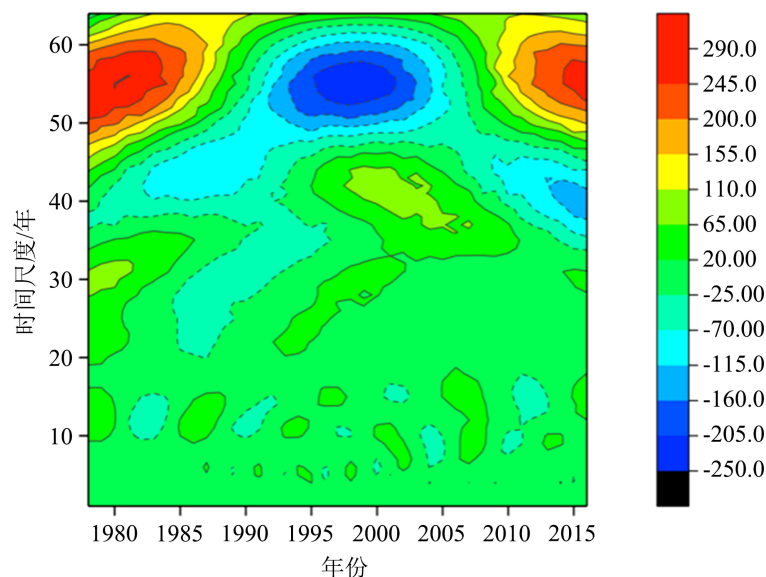


Figure 5. Contour maps of the real part of wavelet coefficients for reference crop evapotranspiration in the Sichuan basin

图 5. 四川盆地年参考作物蒸散量小波系数实部等值线图

Table 2. Correlation between reference crop evapotranspiration and each climatic element
表 2. 参考作物蒸散量与各气候要素的相关关系

	气温	日照	风速	相对湿度
参考作物蒸散量 ET_0	0.831**	0.662**	0.642**	-0.850**

注：*和**分别表示通过 0.05 和 0.01 水平的显著性检验。

4. 结论

本文采用四川盆地地区具有代表性的 8 个站点 1978~2016 年的逐月资料数据，利用线性回归、Mann-Kendall 突变检测、Morlet 小波分析方法，对 40 年来 ET_0 进行了时空特征分析，得出如下结论：

1) 1978~2016 年，四川盆地 ET_0 呈增加趋势，线性递增速率为 3.9197 mm/a，近 10 年年来约增加了 152.9 mm。在空间分布上呈现为由盆地北部向南部地区先减小又增大的趋势。

2) ET_0 在 2000 年发生显著性突变，同时存在 50~60a 的强震荡周期和 10~16 年的弱震荡周期。

3) 整体而言，气温、日照时数、风速、相对湿度均是影响 ET_0 的主要气象因素，且 ET_0 与气温、日照时数和风速均呈极显著正相关，与相对湿度呈极显著负相关关系。

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)支持。

参考文献

- [1] Chen, D., Rojas, M., Samset, B.H., et al. (2021) Framing, Context, and Methods. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 147-286.
- [2] 张志高, 郑美洁, 蔡茂堂, 等. 1960-2019 年河南省参考作物蒸散量时空演变与成因分析[J]. 节水灌溉, 2021(3): 44-50.

-
- [3] Allen, R.G., Pereira, S., Raes, D. and Smith, M. (1998) FAO Irrigation and Drainage Paper 56: Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome.
- [4] Brutsaert, W. and Parl, M.B. (1998) Hydrologic Cycle Explains the Evaporation Paradox. *Nature*, **396**, Article No. 30. <https://doi.org/10.1038/23845>
- [5] 王君勤, 叶生进, 樊毅. 中国不同气候区参考作物蒸散量计算模型适用性评价[J]. 节水灌溉, 2022(3): 82-91.
- [6] 朱岗昆, 杨勿章. 气象记录在经济建设中的应用(II): 中国各地蒸发量的初步研究[J]. 气象学报, 1955, 26(1-2): 1-28.
- [7] 黄娟, 申双和, 李新建, 张文斌. 1961-2010年中国参考作物蒸散量变化趋势与时空格局[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 240-244.
- [8] 檀艳静, 胡程达, 史桂芬. 黄淮海区域参考作物蒸散量的时空变化特征及影响因素[J]. 干旱气象, 2020, 38(5): 794-803.
- [9] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 刘宪锋. 华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5589-5599.
- [10] 张青雯, 崔宁博, 冯禹, 龚道枝, 胡笑涛. 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.
- [11] 刘悦, 崔宁博, 李果, 等. 近 56 年西南地区四季参考作物蒸散量变化成因分析[J]. 节水灌溉, 2018(12): 54-59.
- [12] 周丽, 聂常乐, 任钊潼, 梁晶晶, 徐华. 四川冬春季参考作物蒸散量时空变化及其成因[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(4): 559-570.
- [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, 黄庆旭, 杨洋. 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] 于东平, 张鑫, 何毅, 石鑫. 青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 66-71.