

近60年来阿克苏市参考作物蒸散量变化特征及成因分析

张楚楠

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2022年7月22日; 录用日期: 2022年8月24日; 发布日期: 2022年9月1日

摘要

为了对近60年来阿克苏市参考作物蒸散量(ET_0)的时间变化特征及其成因进行研究, 本文采用气候倾向率分析、M-K检验、小波分析以及敏感性和贡献率分析等方法对阿克苏市1955~2018年的气象数据进行研究, 并得出以下结论: 1) 近60年来阿克苏市 ET_0 总体呈上升趋势, 其中在60年代初至00年代初, ET_0 呈明显下降趋势, 而在10年代中期呈明显上升趋势, 2011年左右 ET_0 发生了突变; ET_0 的变化主周期在50年左右。2) 近60年来, 最高温度、最低温度和日照时长呈上升态势, 而平均湿度和风速则呈下降趋势。 ET_0 对于最高温度、风速和平均湿度的敏感程度高, 其中最高温度、风速与 ET_0 的变化趋势相同, 平均湿度则与其相反; 风速呈较低水平、平均湿度保持较高值是60年代后 ET_0 下降的可能原因; 风速的逐渐上升, 平均湿度的快速降低可能是10年代 ET_0 上升的原因。总体来看, 最低温度是近60年来阿克苏市 ET_0 变化的最主要贡献因子。

关键词

参考作物蒸散量, 变化特征, 成因分析

Variation Characteristics and Causes of Reference Crop Evapotranspiration in Aksu City in the Past 60 Years

Chu'nan Zhang

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

Received: Jul. 22nd, 2022; accepted: Aug. 24th, 2022; published: Sep. 1st, 2022

Abstract

In order to find the temporal variation characteristics and causes of the reference crop evapo-

transpiration (ET_0) in Aksu city in the past 60 years, climate tendency rate analysis, M-K analysis, wavelet analysis, and sensitivity and contribution analysis are used to study the meteorological data of Aksu city from 1955 to 2018, and the result shows that: 1) in the past 60 years, ET_0 in Aksu city generally showed an upward trend, which ET_0 showed a significant downward trend from the early 1960s to the early 2000s, and a significant upward trend in the mid-2010s, with an abrupt change in ET_0 around 2011; the main cycle of ET_0 change was around 50 years. 2) In the past 60 years, the maximum temperature, minimum temperature, and sunshine duration showed an increasing trend, while the average humidity and wind speed showed a decreasing trend. ET_0 was highly sensitive to the maximum temperature, wind speed, and average humidity. The maximum temperature and wind speed had the same trend as ET_0 , while the average humidity was the opposite; the lower level of wind speed and the higher value of average humidity was the possible reason for the decrease of ET_0 after the 1960s; the gradual increase of wind speed and the rapid decrease of average humidity may be the reason for the increase of ET_0 in the 2010s. Overall, the minimum temperature was the most important contributor to the ET_0 changes in Aksu city in the last 60 years.

Keywords

Reference Crop Evapotranspiration, Variation Characteristics, Cause Analysis

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

中国疆域辽阔,水资源总量与其他国家相比较为丰富,但不同地区间存在较大的环境差异,致使各地的水资源条件大不相同,且中国人口基数较大,人均水资源占有量极低,因此,水资源利用问题已成为中国经济发展中的较大挑战,合理地开发利用水资源能促进经济发展、避免造成水资源浪费及水污染问题[1]。参考作物蒸散量(Reference Crop Evapotranspiration, ET_0)又称潜在蒸散量,是指在水分充足、生长情况良好的条件下,冠层蒸散阻力为 70 s/m、反照率为 0.23、高度为 12 cm 的草本植被完全覆盖地面时的蒸散量,其可以表征大气蒸散能力,同时也是农田水资源优化配置、农作物水量需求补偿等问题的重要参考量,对于 ET_0 的准确计算,众多学者进行了相关研究[2] [3] [4] [5] [6],目前推荐的确定 ET_0 的模型是由联合国粮食及农业组织(FAO)提出的 Penman-Monteith (P-M)模型[7]。而研究分析区域内参考作物蒸散量的变化特征及其成因对于预测未来蒸散量的变化趋势、及时为农作物灌溉和农田水资源管理具有重要指导意义。刘玉汐[8]等人根据吉林省 46 个气象站点逐日气象数据,分析 ET_0 时空变化特征,并利用敏感性分析方法对 ET_0 的变化成因进行分析。结果表明吉林省 ET_0 呈由西向东逐渐降低的空间分布,其中风速是 ET_0 年际变化的主导因子,其次为净辐射,水汽压和平均气温。张守红[9]等人基于阿克苏河流域 1960~2007 年逐日气象资料和 P-M 模型估算并分析 ET_0 时空变化特征,并用多元回归方法定量区分气候因子变化对 ET_0 变化的贡献率,得出高海拔地区相对湿度对 ET_0 变化影响最大,其它区域的风速变化对 ET_0 变化的贡献率最高。段峥嵘[10]等人以阿克苏地区国家气象站点的逐日气象资料为基础,应用 P-M 模型分析其时空分布及各气候因子与 ET_0 的相关关系及对 ET_0 影响的贡献度,结果发现阿克苏地区的 ET_0 与年均日照时数和年均风速均呈显著正相关关系,与年均相对湿度呈显著负相关关系。

尽管众学者对于 ET_0 时空变化特征和成因有较多研究,但是研究具有局限性和区域性,目前对于阿

阿克苏市 ET_0 的研究较少, 且以往研究的 ET_0 时间尺度较短, 对于近 10 年来的变化没有涉及; 以往研究对成因分析往往是定性分析, 没有采用敏感性分析和贡献率分析等定量方法直观分析其成因。阿克苏市是我国主要的农产品种植基地, 属于干旱气候区, 水资源紧张, 故本文对于当地 ET_0 的时间变化以及成因进行分析有较大意义, 以期能对当地合理开发和利用水资源、优化农田水分灌溉提供一定指导。

2. 研究区域和资料

2.1. 研究区域

阿克苏市(79°43'26"~82°00'38"E, 39°28'57"~41°30'10"N)位于新疆天山南麓、塔里木盆地西缘, 为新疆阿克苏地区的行署办公驻地[11]。该地区处于亚欧大陆腹地, 属于北半球暖温带、干旱半干旱大陆性荒漠气候区, 以气候干燥、降水稀少、年际变化大为主要气候特点。与同纬度地区相比, 其夏季温度偏高, 冬季偏低, 春秋季节气温升降剧烈, 常常出现春季低温和秋季过早降温, 多年平均气温在 11℃ 以上, 无霜期较长, 全年日照数可达 2900 小时以上, 主要降雨时段集中在 5~9 月, 春季有浮尘, 夏季有冰雹, 有时出现夏季持续高温天气[12]。

2.2. 资料

本文选取国家气象中心制作的中国地面气候资料日值数据集(V3.0) (<http://data.cma.cn>) 1955~2018 年的逐日气象数据, 包括最高温度(T_{max})、最低温度(T_{min})、平均温度(T_{mean})、平均湿度(R_{mean})、日照时数(n)、10 m 高风速(u_{10}), 其中风速用风廓线公式换算到 2 m 高风速(u_2)。缺失的部分气象要素数据做以下处理: 若缺测数据连续天数 ≤ 5 d, 则用线性插值补齐; 若缺测数据连续天数 >5 d, 用站点多年同一日平均值; 若缺测数据连续天数 >20 d, 则舍弃该部分数据。

3. 研究方法

3.1. P-M 模型

P-M 模型基于能量平衡方程和水蒸气扩散理论, 考虑了各种气象因素, 物理意义明确, 其表达式为:

$$ET_0 = \frac{0.484\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中 ET_0 为参考作物蒸散量, Δ 为饱和水汽压 - 温度曲线的斜率, R_n 为净辐射, γ 为湿度计常数, e_s 为饱和水汽压, e_a 为实际水汽压, T_{mean} 为平均温度, G 为土壤热通量[7]。本文以 P-M 模型计算所得 ET_0 为研究对象, 对阿克苏市 1955~2018 年 ET_0 变化特征及成因进行研究分析。

3.2. 线性倾向趋势分析

线性倾向趋势分析即建立气候变量与时间序列之间的一元线性关系[13], 表示式为:

$$x_i = a + bt_i \quad (2)$$

其中 $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。 x_i 与 t_i 相对应, n 为样本量。式中 a 为线性回归常数, b 为线性倾向系数, 定义 $b \cdot 10$ 为气候倾向率(单位为某气候要素的单位/10a), 它们可以通过最小二乘法计算得到:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (3)$$

3.3. M-K 检验法

Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 检验法)是由全球天气机构所提出并普遍应用的非参数检验法,目前已应用于水文的趋势分析和突变点检测[14]。在趋势变化方面, M-K 检验可以去除少数的变异值,并且数据也不必遵循特定的时间分布,更适合于一般数据序列趋势检测。在突变分析方面,通过 M-K 检验通常可以发现数据的突变点[15]。

3.4. 小波分析

小波分析可以对时间和频率进行局部化分析,最终实现高频的时间细分和低频的频率细分。在实际场景中,有效信号频率较低且相对稳定,而噪声频率一般较高。小波变换就是找到一组低通和高通滤波器组,对原始信号进行连续向下分解,得到一系列具有不同分辨率的低频概貌信号和低频细节信号,从而大大增强局部信号。对这些低频和高频信号进行重构,得到去噪后的信号,提高了模型的抗噪性[16]。本研究采用常用的 Morlet 小波,对阿克苏市 1955~2018 年的 ET_0 变化特征进行分析识别。

3.5. 敏感系数

本文为了评价各气象因子对 ET_0 趋势变化产生的影响,研究 ET_0 对于主要气象因子的敏感性,采用了敏感系数进行分析,公式如下[17]:

$$Sv_i = \frac{\Delta ET_0}{\Delta V_i} \cdot \frac{V_i}{ET_0} \quad (4)$$

式中: Sv_i 为气象因子 V_i (本研究主要分析逐日气象资料)的敏感系数; ET_0 、 ΔET_0 分别为逐日参考作物蒸散量及其日变化量; V_i 、 ΔV_i 分别为日气象要素值及其日变化量。 $Sv_i > 0$ 表示 ET_0 与气象因子同增减, $Sv_i < 0$ 则表示 ET_0 与气象因子的增减变化相反, Sv_i 绝对值越大表示该气象因子的变化对 ET_0 的影响越大。为了使敏感系数更加清晰地用于评估分析,本文将敏感系数划分为 4 个等级[18],见表 1。

Table 1. Sensitivity factor level
表 1. 敏感系数等级

| 敏感系数 | 敏感程度 |
|---------------------------|------|
| $0.00 \leq Sv_i < 0.05$ | 忽略 |
| $0.05 \leq Sv_i < 0.20$ | 中 |
| $0.20 \leq Sv_i < 1.00$ | 高 |
| $ Sv_i \geq 1.00$ | 非常高 |

3.6. 贡献率

敏感系数可以表征不同气象因子对 ET_0 的影响程度大小,但其不能直观反映在一定时间内 ET_0 变化量主要是哪个或哪几个气象因子所造成的。对此, Yin [19] 等认为引起 ET_0 的变化原因是单个气象因子的敏感系数与该因子的多年相对变化率相乘,即该因子对 ET_0 变化产生的贡献。贡献分为正贡献与负贡献,正贡献则为 ET_0 增加,负贡献则为 ET_0 减小。具体的表达形式如下:

$$Con_{vi} = S_{vi} RC_{vi} \quad (5)$$

$$RC_{vi} = \frac{64Trend_{vi}}{|av_{vi}|} 100\% \quad (6)$$

其中, Con_{vi} 为单个气象因子的引起 ET_0 变化的贡献率, S_{vi} 为敏感系数, RC_{vi} 为气象因子多年变化率, $Trend_{vi}$ 为因子逐年变化率, av_{vi} 为因子多年平均值。

4. 研究结果

4.1. ET_0 时间变化特征分析

图 1 是阿克苏市 1955~2018 年 ET_0 的年际变化曲线。从图 1 中可以看出, 1960 年之前 ET_0 基本保持在 1100 mm 以上, 为较高水平, 在 1960 年 ET_0 迅速下降。1960 年至 2005 年阿克苏年 ET_0 一直在 1000 mm 左右上下浮动, 而在 2005 年后, ET_0 迅速增加, 在 2015 年已经超过 1250 mm。总体来看, 近 60 年 ET_0 的气候倾向率为 $15.8 \text{ mm}/10\text{a}^{-1}$, 依然呈上升态势。

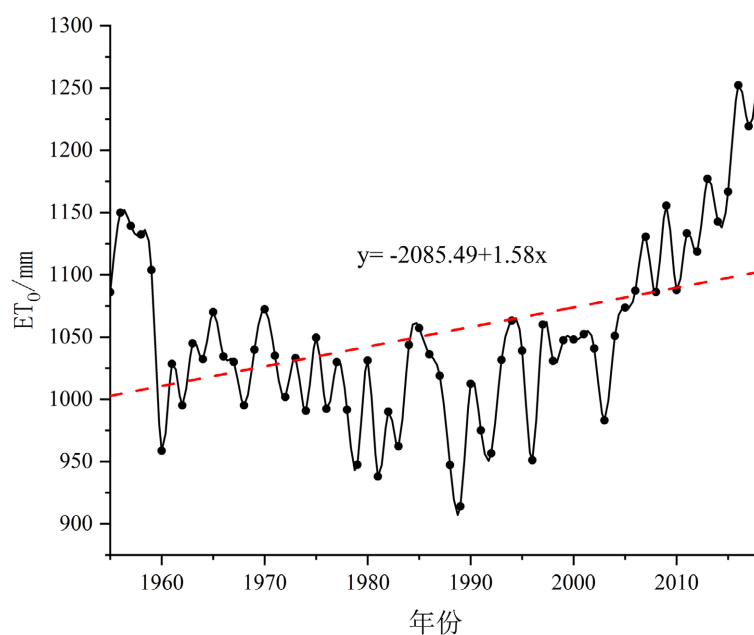


Figure 1. ET_0 trend chart of Aksu city over the past 60 years
图 1. 近 60 年来阿克苏市 ET_0 变化趋势图

为了进一步研究近 60 年来 ET_0 的变化趋势和突变时间, 本文采用 M-K 检验法进行分析。结果如图 2。图 2 中, 当 UF 红色曲线超过 0.05 显著水平上下限时, 即表示 ET_0 具有明显的上升或下降趋势, 当 UF 曲线和 UB 蓝色曲线有交点, 且交点在上下限内时则表示在此处有明显的气候突变。从图 2 可以看出, 在 1960~2002 年, UF 曲线在大部分年份超过 0.05 显著水平下限, 表明此段时间内 ET_0 有明显的下降趋势; 2015 年以后, UF 曲线超过上限, 表明自 2015 年其有明显的上升趋势。两曲线在 2011 年附近有一交点, 未超过上下限, 且为正值, 表明此年份 ET_0 有明显的突变, 其从下降趋势迅速转为上升趋势。

阿克苏市的 ET_0 也具有一定的周期规律。在小波系数填充图中, 红色的代表正距平, 即 ET_0 较高的年份, 蓝色代表负距平, 即 ET_0 较低的年份。从图 3 中可以明显看出, 在周期为 50 年时, ET_0 有明显的交替增减的变化趋势, 因此 ET_0 的变化主周期应在 50 年左右。这与图 1 中显示 ET_0 在 60 年代下降, 在 10 年代回升的情况相符合。

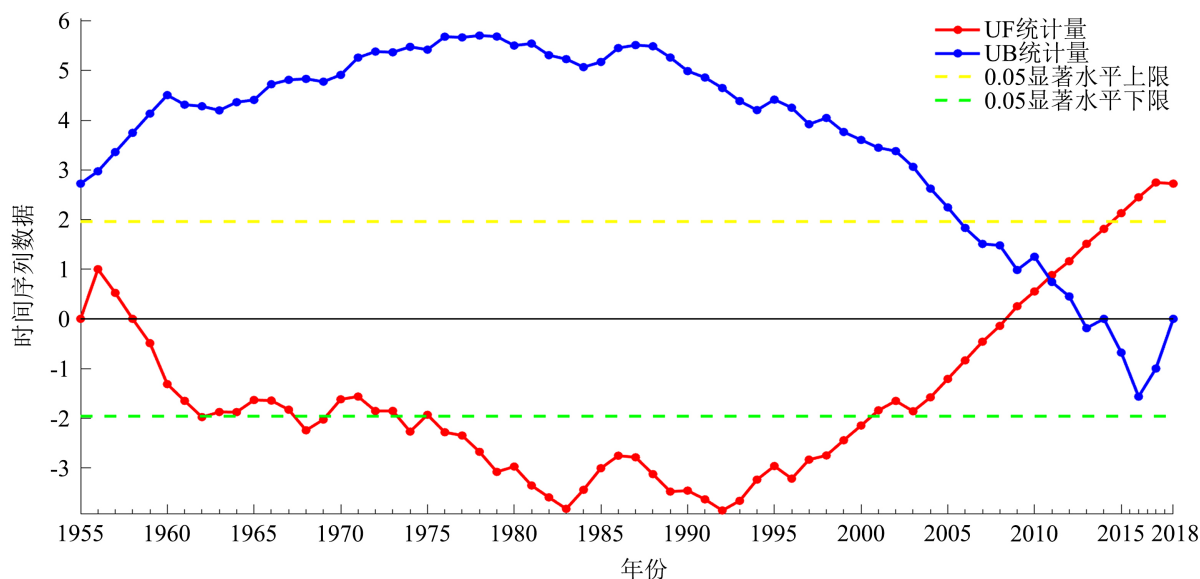


Figure 2. M-K test figure for ET_0 in Aksu city over the past 60 years

图 2. 近 60 年来阿克苏市 ET_0 的 M-K 检验图

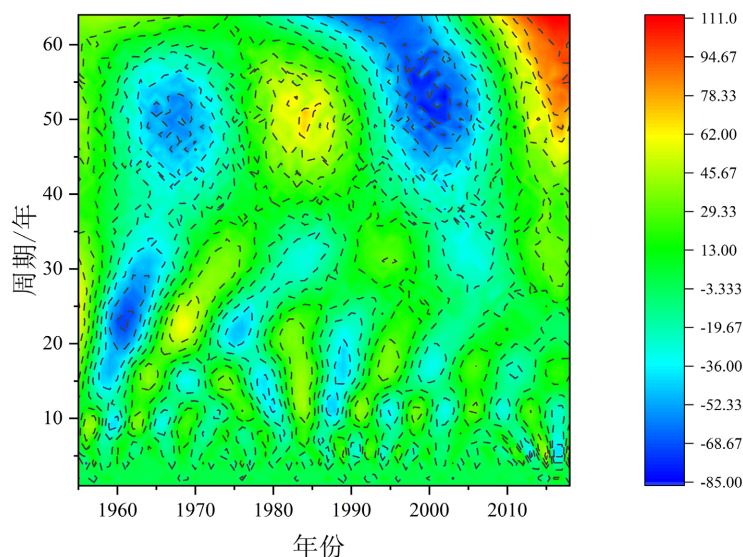


Figure 3. Wavelet coefficient figure for ET_0 in Aksu city for the past 60 years

图 3. 近 60 年来阿克苏市 ET_0 的小波系数填充图

4.2. ET_0 成因分析

为了探究 ET_0 的变化成因，找寻其与主要气象因子的关系，本文统计了各主要气象因子的年际变化大小，并计算出 ET_0 对气象因子的敏感系数以及各因子的贡献率，结果如下。

由图 4 可以看出，近 60 年来，最高最低温度和日照时长呈上升态势，而平均湿度和风速则呈下降趋势。其中最低温度上升速度最快，倾向率达到 $0.6^{\circ}\text{C}/10\text{a}^{-1}$ ，平均湿度下降最快，倾向率达到 $0.7\%/10\text{a}^{-1}$ 。平均湿度与风速的变化较为明显，平均湿度在 60 年代至 00 年代初基本保持在 58% 的较高水平，在 2003 年后迅速降低，最低为 2009 年的 46%；风速在 60 年代初迅速降低至 1.5m/s 左右，后基本保持下降趋势直至 10 年代，10 年代后有所回升。

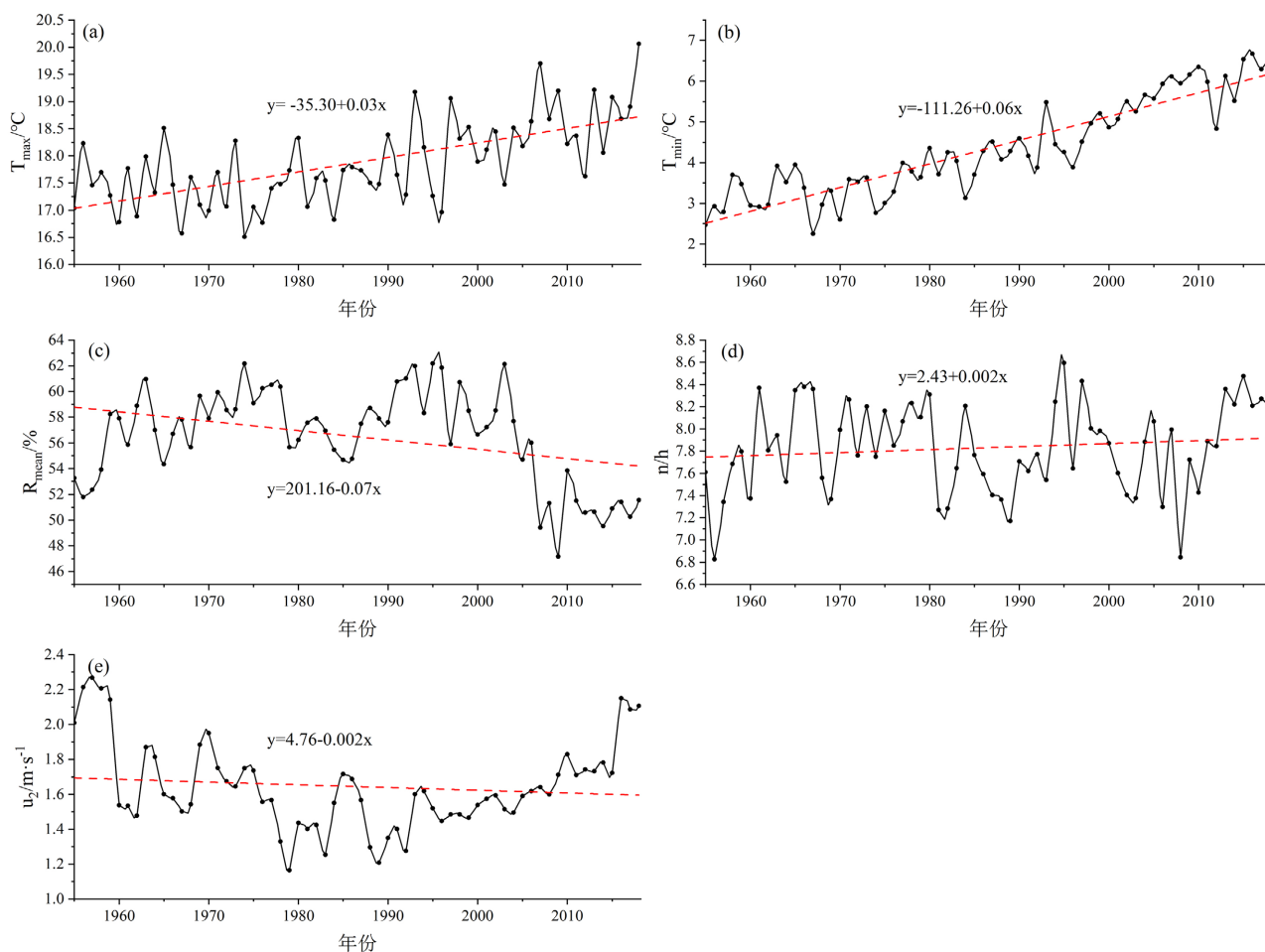


Figure 4. Trends of meteorological factors in Aksu city in the past 60 years: (a) maximum temperature, (b) minimum temperature, (c) average humidity, (d) sunshine duration, (e) (2 m high) wind speed

图 4. 近 60 年来阿克苏市各气象因子的变化趋势: (a) 最高温度, (b) 最低温度, (c) 平均湿度, (d) 日照时长, (e) (2 m 高) 风速

表 2 为 ET_0 对各气象因子的敏感系数和各因子对 ET_0 的贡献率。由表 2 可知, 五种气象因子的敏感系数绝对值从大到小依次为最高温度(0.868)、风速(0.663)、平均湿度(-0.439)、最低温度(0.349)、日照时长(0.161)。除日照时长外, 其余四种因子的绝对值均大于 0.2, 表明 ET_0 对这四种气象因子的敏感程度为高, 其中 ET_0 对于最高温度最为敏感, 其次是风速; 除了平均湿度以外, 其余四种气象因子的敏感系数皆为正值, 表明湿度的变化与 ET_0 增减相反, 其余为相同方向。五种气象因子的贡献率绝对值从大到小分别为: 最低温度(11.980%)、最高温度(9.814%)、平均湿度(7.512%)、风速(-5.174%)、日照时长(2.632%)。表明最低温度是近 60 年来 ET_0 变化的首要贡献因子, 为正贡献, 其次为最高温度和平均湿度, 而风速是其中唯一的负贡献因子。

结合以上研究结果进行分析, 阿克苏市 1960~2002 年 ET_0 明显下降的原因可能是风速在此时间内保持较低水平, 而平均湿度保持较高水平。风速敏感系数较高, 与 ET_0 变化相同且此时段里呈下降趋势; 平均湿度的敏感系数为负, 又保持较高水平, 两者共同作用可能会导致 ET_0 下降。在 00 年代中期, 风速大小上升, 而平均湿度呈快速降低的态势, 同理这可能会导致 ET_0 在 2005 年以后呈明显上升趋势。但总体来看, 近 60 年来阿克苏市 ET_0 呈逐渐上升趋势主要是最低、最高温度的上升和平均湿度的下降造成的, 其中最低温度是最主要的贡献因子。

Table 2. Sensitivity coefficient of each meteorological factor
表 2. 各气象因子的敏感系数

| 气象因子 | 敏感系数 | 贡献率(%) |
|------|--------|--------|
| 最高温度 | 0.868 | 9.814 |
| 最低温度 | 0.349 | 11.980 |
| 平均湿度 | -0.439 | 7.512 |
| 日照时长 | 0.161 | 2.632 |
| 风速 | 0.663 | -5.174 |

5. 结论

本文利用阿克苏市 1955~2018 年的逐日气象数据和 P-M 模型, 并采用气候倾向率分析、M-K 分析、小波分析以及敏感系数和贡献率分析等方法对近 60 年来阿克苏市 ET_0 的时间变化特征及其成因进行了相关研究, 得出以下结论。

1) 近 60 年来阿克苏市 ET_0 总体呈上升趋势; 在 60 年代初至 00 年代初, ET_0 呈明显下降趋势, 而在 10 年代中期呈明显上升趋势, 2011 年左右 ET_0 发生了突变; ET_0 的变化主周期应在 50 年左右。2) 近 60 年来, 最高温度、最低温度和日照时长这三种因子呈上升态势, 而平均湿度和风速则呈下降趋势。其中最低温度上升最快, 平均湿度下降最快。3) ET_0 对于最高温度、风速和平均湿度的敏感程度高, 其中平均湿度与 ET_0 的变化方向相反。最低温度、最高温度和平均湿度是近 60 年来阿克苏市 ET_0 变化的主要贡献因子, 且贡献率均为正, 其中最低温度为首要的贡献因子。4) 风速呈较低水平, 而平均湿度保持较高水平是 60 年代后 ET_0 下降的可能原因; 风速大小上升, 而平均湿度呈快速降低的态势是 00 年代中期 ET_0 上升的可能原因。

参考文献

- [1] 阿丽亚·阿不都克里木. 中国水资源开发利用现状及改善措施[J]. 能源与节能, 2022(3): 174-176.
- [2] 刘斌, 谢正辉. 一种基于 P-M 模型的通量观测插补方案[C]//第 33 届中国气象学会年会 S9 水文气象灾害预报预警. 2016: 145.
- [3] 鲍玲玲, 杨永刚, 刘建军, 张卫华. 基于 5 种人工智能模型计算重庆地区参考作物蒸散量[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 85-92.
- [4] 冯禹, 崔宁博, 龚道枝, 魏新平, 王君勤. 基于极限学习机的参考作物蒸散量预测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 153-160.
- [5] 刘小华, 魏炳乾, 吴立峰, 杨坡. 4 种人工智能模型在江西省参考作物蒸散量计算中的适用性[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(1): 102-108.
- [6] 徐颖, 张皓杰, 崔宁博, 冯禹, 胡笑涛, 龚道枝. 基于不同 ELM 的西北旱区参考作物蒸散量模拟模型[J]. 中国农村水利水电, 2019(1): 6-12.
- [7] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., *et al.* (1998) Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements: Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome, 15-64.
- [8] 刘玉汐, 任景全, 王冬妮, 穆佳, 崔佳龙, 陈长胜, 陈曦, 郭春明. 吉林省参考作物蒸散量时空分布及成因分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2208-2215.
- [9] 张守红, 刘苏峡, 莫兴国, 舒畅, 孙杨, 张春. 阿克苏河流域气候变化对潜在蒸散量影响分析[J]. 地理学报, 2010, 65(11): 1363-1370.
- [10] 段峥嵘, 祖拜代·木依布拉, 夏建新. 新疆阿克苏地区潜在蒸散量时空演变及驱动因素[J]. 新疆大学学报(自然科学)

- 学版), 2018, 35(4): 493-501+512.
- [11] 魏光辉. 新疆阿克苏市近 50 余年主要水文要素变化分析[J]. 水资源开发与管理, 2015(3): 81-84.
- [12] 胡欣欣, 张玉虎, 向柳. 新疆阿克苏地区气象干旱特征研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(35): 96-100+104.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2007: 72-73.
- [14] 徐宗学, 巩同梁, 赵芳芳. 近 40 年来青藏高原气候变化特征分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2006(3): 24-32.
- [15] 周园园, 师长兴, 范小黎, 杜俊. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1361-1369.
- [16] 赵贵章, 王淑丽, 李志萍, 等. 基于小波分析的水质变化及预测研究——以涡河为例[J]. 人民珠江, 2022, 43(2): 79-87.
- [17] 杜普, 梁川, 赵璐. 宁夏中部干旱带参考作物蒸散量近 60 年变化成因研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2020, 56(9): 26-31.
- [18] Lenhart, T., *et al.* (2002) Comparison of Two Different Approaches of Sensitivity Analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, **27**, 645-654. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00049-9)
- [19] Yin, Y., Wu, S., Gang, C, *et al.* (2010) Attribution Analyses of Potential Evapotranspiration Changes in China since the 1960s. *Theoretical & Applied Climatology*, **101**, 19-28. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0197-7>