

DOI: 10.20103/j.stxb.202309232068

罗霄, 杜灵通, 乔成龙, 马龙龙, 吴宏玥, 钟艳霞, 潘海珠. 宁夏沿黄绿洲参考作物蒸散演变特征及其归因. 生态学报, 2024, 44(11): 4782-4794.
Luo X, Du L T, Qiao C L, Ma L L, Wu H Y, Zhong Y X, Pan H Z. Change characteristics of reference crop evapotranspiration of the Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region and its driving analysis. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4782-4794.

宁夏沿黄绿洲参考作物蒸散演变特征及其归因

罗 霄^{1,2}, 杜灵通^{1,2,3,*}, 乔成龙^{1,2}, 马龙龙^{1,2}, 吴宏玥^{1,2}, 钟艳霞^{1,2,3}, 潘海珠^{1,2}

1 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

3 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 银川 750021

摘要: 参考作物蒸散 (Reference crop evapotranspiration, ET_0) 是生态水文过程中的关键因子, 研究 ET_0 在干旱绿洲区的演变, 不仅有助于理解气候变化背景下的绿洲水文过程响应, 亦对绿洲水土资源高效配置和生态系统稳定性维持有指导意义。以宁夏沿黄绿洲为例, 基于 1960—2019 年的气象资料和 Penman-Monteith 模型计算 ET_0 , 利用 Mann-kendall 突变检验、相对敏感系数和 Morlet 小波分析等方法, 对宁夏沿黄绿洲近 60 a 的 ET_0 演变特征及其归因进行研究。结果表明: (1) 宁夏沿黄绿洲 ET_0 年内呈单峰形态, ET_0 在 5—7 月间较高, 累积 ET_0 占年总 ET_0 的 43.6%; 近 60 a 的 ET_0 年均值为 1226.38 mm, 并以 1.66 mm/a ($P < 0.01$) 幅度上升, 但年际波动特征明显, 其中在 1988 年突变之前, ET_0 无显著变化趋势, 而突变之后则以每 10 a 左右的周期显著增加或降低。(2) 年 ET_0 主要以 20—40 a 和 50—60 a 周期振荡, 且有多重时间尺度的复杂嵌套现象, 不同季节的周期振荡差异较大, 夏、秋季振荡幅度较强, 其周期接近于年 ET_0 规律, 而冬、春季振荡幅度较弱。(3) 虽然 ET_0 与 6 种气象因子均存在显著相关性, 但 ET_0 对不同气象因子的敏感性存在差异, 其中对最高温度和相对湿度的敏感性较高, 敏感系数分别为 11.58% 和 8.40%。(4) 宁夏沿黄绿洲 ET_0 与区域气候变化特征有较强的耦合性, 区域气候的持续升温 and 相对湿度持续降低、以及由此引发的饱和水汽压亏缺持续增强是推动 ET_0 上升的重要原因, 而气候由湿润向干旱的突变和平均风速的异常波动是诱发 ET_0 突变的原因。

关键词: 沿黄绿洲; 蒸散发; 敏感系数; 小波分析; 参考作物蒸散

Change characteristics of reference crop evapotranspiration of the Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region and its driving analysis

LUO Xiao^{1,2}, DU Lingtong^{1,2,3,*}, QIAO Chenglong^{1,2}, MA Longlong^{1,2}, WU Hongyue^{1,2}, ZHONG Yanxia^{1,2,3}, PAN Haizhu^{1,2}

1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Reference crop evapotranspiration (ET_0) is a key factor in eco-hydrological processes. The study of ET_0 evolution in arid oasis areas not only helps us to understand the response of hydrological processes of oasis in the context of climate change but also has a guiding significance for the efficient allocation of soil and water resources in oasis and the maintenance of ecosystem stability. In this paper, we took the Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region as an example, calculated ET_0 based on meteorological data from 1960 to 2019 and the Penman-Monteith model, and used the Mann-Kendall test, relative sensitivity coefficients, and Morlet wavelet analysis to study the characteristics of ET_0 evolution and its

基金项目: 宁夏重点研发计划 (2021BEG02010, 2022BEG02051)

收稿日期: 2023-09-23; 网络出版日期: 2024-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dult80@qq.com

driving mechanism in the oasis over the past 60 years. The results showed that: (1) ET_0 of the Yellow River Oasis in Ningxia presented a single peak pattern within a year. The ET_0 was higher from May to July and its accumulated value accounted for 43.6% of the total annual ET_0 . The annual ET_0 from 1960 to 2019 was 1226.38 mm and increased with an amplitude of 1.66 mm/a ($P<0.01$). However, the fluctuation characteristics of interannual ET_0 were significant in that the ET_0 had no trend before the mutation year of 1988 while it increased or decreased significantly with a cycle of about every decade after that. (2) The annual ET_0 mainly oscillated with cycles of 20—40 and 50—60 years, while its cycles overlapped complicatedly in multiple time scales. Furthermore, the cycle and magnitude of oscillation in different seasons varied greatly. The oscillation cycles in summer and autumn were close to that of the annual, but the oscillation magnitude was stronger than that in winter and spring. (3) Although there were significant correlations between ET_0 and the six meteorological factors used to calculate ET_0 , the sensitivity of ET_0 to different meteorological factors varied. The sensitivity of ET_0 on maximum temperature and relative humidity was higher, and the coefficients were 11.58% and 8.40%. (4) There was a strong coupling between ET_0 and the regional climatic changes of the Yellow River Oasis in Ningxia. air temperature sustained warming, relative humidity sustained decreasing, and their aerodynamic coupling result in vapor pressure deficit increasing were critical to promote the enhancement of ET_0 . Meanwhile, the mutation of regional climate from wet to dry and the abnormal fluctuation of average wind speed were the reasons to induce the abrupt change of ET_0 .

Key Words: Yellow River Oasis; evapotranspiration; sensitivity coefficient; wavelet analysis; reference crop evapotranspiration

IPCC 第六次评估报告 (AR6) 指出全球变暖正在加速,并导致一些极端天气事件蔓延至以前不常出现的地方^[1],进而影响人类生存与发展,是当前全球面临的重大挑战^[2]。在水资源匮乏的干旱区,全球变暖如何影响生态水文过程是其面临的关键科学问题^[3],也决定着干旱区社会-生态系统的可持续发展^[4]。参考作物蒸散 (Reference crop evapotranspiration, ET_0) 是指示大气驱动地-气水文循环强弱的指标,表征在水分供应不受限制时,气象条件驱动的标准参考作物下垫面可能达到的最大蒸散量^[4-5], ET_0 不仅能体现区域能量平衡与水文循环的关系,更是直接评估气候变化影响区域干湿状况的直接手段^[6-7]。 ET_0 的计算不仅考虑标准参考作物的生理与生长特性^[8],而且与气温、相对湿度、净辐射等气候因子密切相关^[9-10],并能准确地反映出大气的蒸发能力^[11],侦测其随时间的变化特征能有效揭示某一地区地-气水文循环对气候变化的响应。近年来有学者对中国西北区域性 ET_0 动态变化及其气候驱动因素开展系列研究^[12-15],发现引起 ET_0 变化的主要因素为风速和温度,但由于影响 ET_0 的气象因子众多,不同地理单元的气候特征将导致 ET_0 变化规律及其主导因子存在明显的差异,故开展特定地域或生态单元的 ET_0 变化特征研究非常必要。

中国干旱、半干旱区约占国土面积的 1/2^[16],绿洲与荒漠相互依存是干旱区的一种特殊景观,其中西北内陆干旱地区 95% 以上为荒漠地,仅有 4%—5% 的面积是绿洲,但却发挥着重要的生态系统服务功能,养育了 95% 以上的人口^[17]。绿洲因水而生、因水而兴,研究参考作物蒸散演变对认识气候变化背景下的绿洲水文循环响应至关重要,亦可为绿洲可持续发展和防止绿洲退化消亡提供科学依据。宁夏沿黄绿洲是由黄河流经宁夏所形成的冲积平原,经过历朝历代的引黄灌溉开发,孕育出这片物产丰茂的绿洲,它对区域经济社会发展和西北绿色生态屏障构筑都具有重要的战略意义^[18-19],宁夏沿黄绿洲在气候变化背景下的水文循环响应也具有西北内陆绿洲的代表性。近年来,水资源优化调控成为宁夏沿黄绿洲经济社会与生态环境协调发展的关键问题,尽管已有学者关注到宁夏沿黄绿洲的蒸散耗水问题,也通过气象、遥感或水文学手段开展过一些水资源变化与水平衡机制方面的研究,如马小燕等^[20]基于标准化降水蒸散指数 (SPEI) 分析得出 1995—2015 年宁夏沿黄城市带的 ET_0 随着温度的跃升有所加剧,李晨等^[21]对宁夏不同生态地理单元的 ET_0 时空变化特征及影响因素进行分析,得出宁夏沿黄绿洲 ET_0 对最高气温敏感性最强,且 ET_0 整体为增加趋势。虽然已有研究表明宁夏沿黄绿洲 ET_0 的变化与气象要素关系密切,但现有研究很少考虑 ET_0 在长时间尺度下的周期性演变特征及

振荡强度, ET_0 有极强的气候综合性和多驱动因子耦合效应,而非单一气象因子的驱动结果,所以需要从 ET_0 时间序列数据的内在规律特征出发,分析 ET_0 的周期性和波动性。另一方面,传统的单一时序分析手段在一定程度上能有效地得出 ET_0 的变化趋势和突变特征,但对非平稳信号和多时间尺度的振荡信息获取不足,而 ET_0 既存在长期气候变化的趋势效应,又存在短期气象变化的非周期性响应,需要结合多种技术手段去研究和分析其变化特征。为此,本文基于宁夏沿黄绿洲气象观测资料计算 ET_0 ,并通过线性趋势、Mann-Kendall 检验和 Morlet 小波分析等手段研究 ET_0 的周期演变特征,以期揭示气候变化对该绿洲生态水文循环的影响,并为绿洲水资源可持续利用和区域生态功能稳定性维持提供科学依据。

1 研究区概况、数据和方法

1.1 研究区概况

宁夏沿黄绿洲包括宁夏中北部的中卫平原和银川平原,西南起于中卫市沙坡头区,东北止于石嘴山市惠农区,涵盖了中卫、吴忠、银川和石嘴山 4 市,总面积约 8955 km²,平均海拔约 1250 m(图 1)。研究区属温带大陆性气候,冬季寒冷,夏季炎热,多年平均气温为 9.29 °C;多年平均降水量仅为 188.3 mm,且多集中于夏、秋季^[22],是典型的干旱区绿洲,日照充足,年均日照时数达 2980 h,水面蒸发高达 1600 mm 以上^[23]。由于贺兰山的地形效应和黄河带来丰富的水土资源优势,该区域两千年前便开始发展灌溉农业,并形成了物产丰富的“塞上江南”景观,其耕地面积约占区域总面积的 66%,且以灌溉农田为主^[23]。

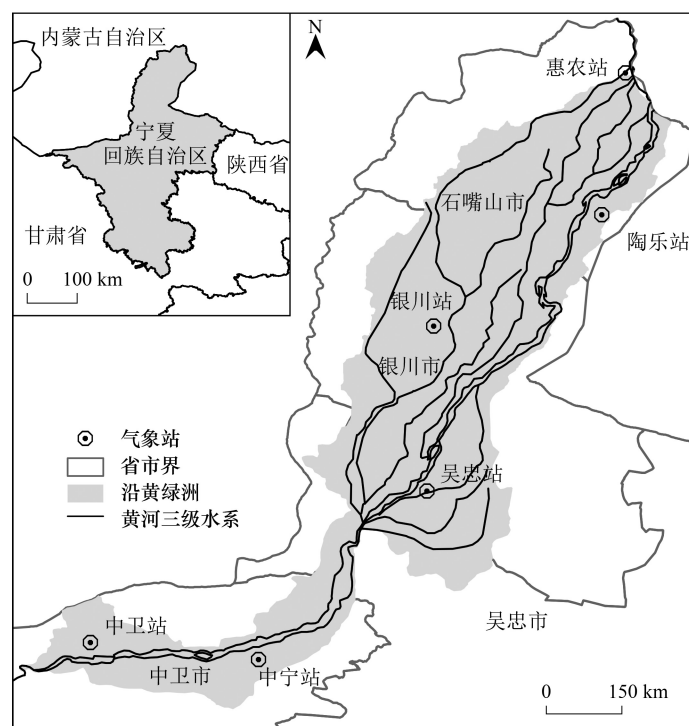


图 1 宁夏沿黄绿洲地理位置及气象站分布图

Fig.1 Location of Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region and site of meteorological stations

1.2 数据

气象数据来自中国气象数据共享网(<http://www.nmic.cn/>)提供的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0),该数据集包括了 1951—2020 年中国 824 个基准、基本气象站的气压、气温、降水量、蒸发量、相对湿度等 9 个气象要素日值数据。为确保所选气象数据资料的均一性和稳定性,剔除数据观测年限较少和数据缺失较多的站点,最终选择宁夏沿黄绿洲范围内 6 个由北向南均匀分布的气象站点(图 1),获取 1960—2019 年的完整气象数据,要素包括日平均温度、日最高温度、日最低温度、相对湿度、平均风速和日照

时数。针对个别数据缺失,有相应实测前后日数据,则用前后日均值插补该缺失数据;其他连续缺失数据则用该日气象要素的多年平均值插补^[22]。最后,形成逐日连续的气象数据集,并基于数据集计算宁夏沿黄绿洲各站的 ET_0 。

1.3 研究方法

1.3.1 Penman-Monteith 模型

Penman-Monteith 模型是目前公认的高精度、低误差的 ET_0 计算模型,它以能量平衡和水汽扩散论为基础,综合考虑作物生理特性和空气动力学参数,有可靠的理论基础^[24]。1998 年联合国粮农组织 (FAO) 对 Penman-Monteith 模型进一步修订,定义了一个高 0.12 m,表面阻抗为 70 s/m,反射率为 0.23 的假想参考作物面来计算参考作物蒸散,不仅增加了地区、季节和年份间的可比性,还可适应于不同的自然环境条件,在国内得到了充分肯定和广泛应用,其公式如下^[11,25]:

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

式中, ET_0 为参考作物蒸散 (mm/d), R_n 为净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), γ 为干湿计常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), T 为气温 ($^\circ\text{C}$), U_2 为 2 m 高度处的风速 (m/s), e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa), Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)。

1.3.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计检验方法,不受个别异常值的干扰,能够客观反映时间序列的突变特征,是世界气象组织推荐的有效工具,已被广泛应用于水文、气象、生态等领域^[26-28],本文使用该方法检验 1960—2019 年宁夏沿黄绿洲 ET_0 的突变特征和突变时间点。针对 ET_0 时间序列变量 $ET_i (i=1, 2, \dots, n)$, n 为时间序列长度,在 $i < n, j < n$ 且 $i < j$ 时,定义统计量:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(ET_j - ET_i) \quad (2)$$

式中, sgn 为符号函数,在原序列的随机独立假设成立的条件下, S 的均值 $E(S)$ 、方差 $\text{Var}(S)$ 分别为:

$$E(S) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

将 S 标准化,构建统计量:

$$UF = \frac{(S - E(S))}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad (5)$$

式中, UF 为时间序列 ET_0 的正序统计量。基于 ET_0 的反向序列,利用上述方法构建 ET_0 时间序列的逆序统计量 UB ,绘制 UF 和 UB 两条曲线,如果它们相交且交点位于显著水平以内,则表明该交点所对应时刻为突变时间点^[29]。

1.3.3 Morlet 小波分析

Morlet 小波分析^[30]可用于获取复杂时间序列数据的内在规律,分析时间序列数据的内在层次结构,分辨时间序列数据在不同尺度上的演变特征,本文采用该方法研究宁夏沿黄绿洲 ET_0 时间序列的周期变化规律,标准 Morlet 小波函数的时域形式为^[31]:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{iet} e^{-t^2/2} \quad (6)$$

式中, c 为常数, i 为虚数, e 为自然常数, t 为时间变量。对于时间序列函数 $f(t)$,其连续变换小波为:

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (7)$$

式中, a 是伸缩尺度, b 为平移因子, $f(t)$ 为原始时间序列函数, $g(t)$ 是 $\psi(t)$ 的复共轭函数, $T(a, b)$ 为小波系数。小波系数实部的变化趋势与信号的起伏基本一致, 等值线中心为高低值中心, 正小波系数为高值, 负小波系数为低值, 中心值的大小可以反映出波动的振荡强度^[32]。小波方差反映了波动能量随时间尺度的分布, 可以用来判断时间序列的主周期, 将小波系数的平方值在 b 域上积分, 就可得到小波方差, 即:

$$W_{p(a)} = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (8)$$

式中, $W_{p(a)}$ 为小波方差, $W_f(a, b)$ 为小波系数^[33]。

为了消除小波变换中边界效应对末端趋势的影响, 本文采用对称延拓边界法对宁夏沿黄绿洲 6 个气象站 1960—2019 年的 ET_0 年值序列进行小波分析。为消除季节变化所带来的影响, 分别对各季节蒸散发及年均蒸散发进行距平, 对各时间序列的距平值进行连续小波变换, 其中季节按照气象常规划分, 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12—次年 2 月为冬季。

1.3.3 敏感系数分析法

利用气象因子增加或减少 20% 时, Penman-Monteith 模型计算出宁夏沿黄绿洲各站点 ET_0 的变化百分率来表征 ET_0 对各气象因子的敏感性^[34—35], 其公式如下:

$$VR_{+20\%} = 100 \times \frac{|ET_{base} - ET_{+20\%}|}{ET_{base}} \quad (9)$$

$$VR_{-20\%} = 100 \times \frac{|ET_{base} - ET_{-20\%}|}{ET_{base}} \quad (10)$$

$$VR_{20\%} = \max\{VR_{+20\%}, VR_{-20\%}\} \quad (11)$$

式中, $VR_{+20\%}$ 为某一气象因素增加 20% 时 ET_0 变化百分比, $VR_{-20\%}$ 为某一气象因素减少 20% 时 ET_0 变化百分比, ET_{base} 为气象要素未扰动时的 ET_0 , $ET_{+20\%}$ 为某一气象要素增加 20% 时对应的 ET_0 , $ET_{-20\%}$ 为某一气象要素减少 20% 时对应的 ET_0 , $VR_{20\%}$ 为最终敏感性系数^[35]。

2 结果与分析

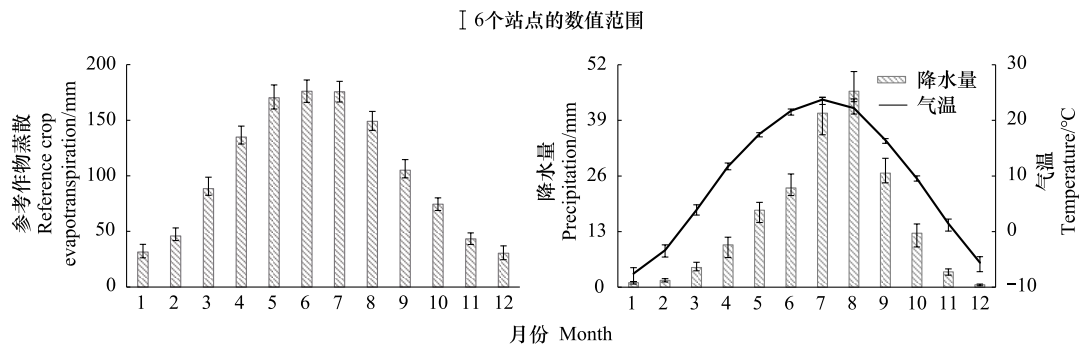
2.1 参考作物蒸散变化特征

2.1.1 年内变化特征

宁夏沿黄绿洲的 ET_0 、降水量和气温年内变化如图 2 所示, 均表现出随季节变化的单峰形态, 但峰值出现的时间和升降变率存在较大差异。宁夏沿黄绿洲的雨热基本同季, 年内最高气温出现在 7 月, 7—8 月的降水量显著高于其他月份, 但 ET_0 在 5—7 月表现出高位, 即水分蒸散消耗较大, 5—7 月的累积 ET_0 达到了 522.17 mm, 占全年总 ET_0 的 43.6%。从 ET_0 的年内变化形态来看, ET_0 从 3 月份开始快速增加, 5—7 月达到顶峰后保持稳定状态, 8 月后转而快速下降, 在 12 月达到了年内的最低, 并在 11 月—次年 2 月间保持稳定低位。 ET_0 年内变化形态与气温的特征更为接近, 可知 ET_0 年内变化主要是受能量驱动, 而与降水量的单峰形态存在较大差异, 亦可得出 ET_0 受降水量限制较弱。此外, ET_0 的年内累积值比年内降水量高出 6.51 倍。

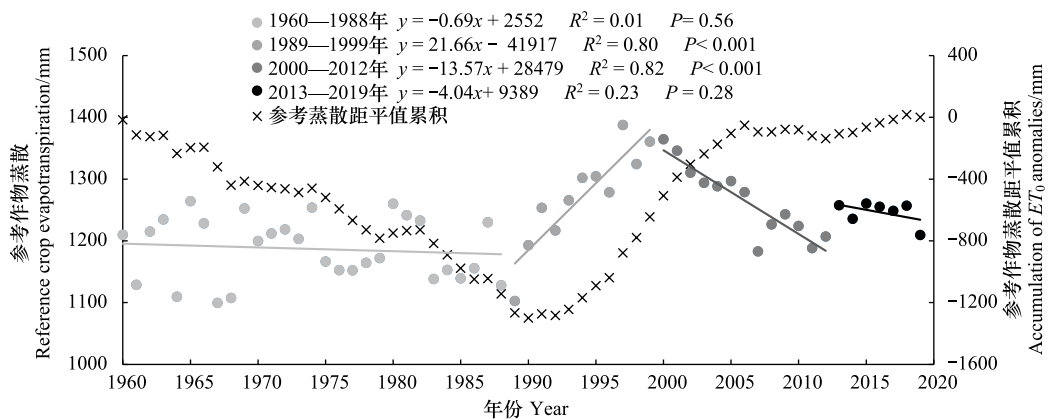
2.1.2 年际变化特征及突变诊断

1960—2019 年宁夏沿黄绿洲的年 ET_0 范围在 1099.47—1387.47 mm, 年 ET_0 均值为 1226.38 mm, 但年际间 ET_0 波动性较大 ($SD=67.48$ mm)。 ET_0 的年际变化如图 3 所示, 近 60 a 宁夏沿黄绿洲的年 ET_0 呈现极显著增长趋势 ($P=0.001$), 年增长率为 1.66 mm/a, 但近 60 a 的 ET_0 却表现出显著的 4 个阶段。从年际间变化的线性趋势分析得出, 1960—1988 年宁夏沿黄绿洲 ET_0 处于持续波动变化状态, 不存在显著的变化趋势; 但 1989—1999 年和 2000—2012 年的 2 个阶段 ET_0 出现了极显著的变化趋势, 其中 1989—1999 年以 21.66 mm/a 的速率极显著增加, ET_0 在 1997 年达到最大值 1387.5 mm 后开始转折下降, 2000—2012 年则以 -13.57 mm/a 的速率极显著降低; 而最近的 2013—2019 年又开始波动, 缺乏显著线性变化趋势。此外, 从近 60 a 的 ET_0 距平值累

图2 宁夏沿黄绿洲 ET_0 、降水量和气温年内变化Fig.2 Variation of ET_0 , precipitation, and air temperature of Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region

ET_0 : 参考作物蒸散 Reference crop evapotranspiration

积变化来看,在1990年之前 ET_0 距平值累积持续在降低,明显的转折点出现在1990年,自1990年以后, ET_0 距平值累积开始持续增加,虽然增加速率在2005年以后出现放缓现象(图3)。

图3 1960—2019年宁夏沿黄绿洲 ET_0 的年际变化Fig.3 Interannual variation of ET_0 of Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region from 1960 to 2019

为进一步分析时间序列 ET_0 的突变特征,利用 Mann-Kendall 检验对宁夏沿黄绿洲1960—2019年的 ET_0 进行分析(图4)。结果表明,UF和UB曲线在1988年存在一个交点,且交点位于95%的置信水平区间内,即宁夏沿黄绿洲近60a的 ET_0 序列存在显著的突变特征。1988年为宁夏沿黄绿洲 ET_0 的突变年,在此之前 ET_0 为波动变化,无显著趋势,在此之后 ET_0 出现显著的增加趋势,这与前述线性分析的结果一致(图3)。

2.2 参考作物蒸散的小波分析

2.2.1 年参考作物蒸散的小波分析结果

宁夏沿黄绿洲1960—2019年 ET_0 距平值的 Morlet 小波变换结果如图5所示,从中可以看出, ET_0 在20—40a中时间尺度和50—60a长时间尺度上出现小波系数周期性正负交替现象,即 ET_0 存在不同强度的周期性振荡规律,且不同时间尺度所对应的年均 ET_0 在结构上有较大的差别,存在多重尺度的复杂嵌套现象(图5)。小波系数反映了信号的强弱,小波系数为正表示年 ET_0 均值偏大,小波系数为负表示年 ET_0 均值偏小,小波系数为零则对应着 ET_0 大小交替的转折点或突变点^[36]。基于小波系数的这一判断标准可以得出,在50—60a长时间尺度上,年均 ET_0 均值经历了一个负值谷(1980年)和一个正值峰(2000年)的整周期交替外,在1960年和2019年前后还存在各自半个不完整的峰、谷周期;其中1970—1990年 ET_0 偏少,1990—2010年间 ET_0 偏多,2010年以后 ET_0 进入下一个偏少的振荡期,但至2019年等值线尚未闭合,说明在长时间尺度上,未来 ET_0

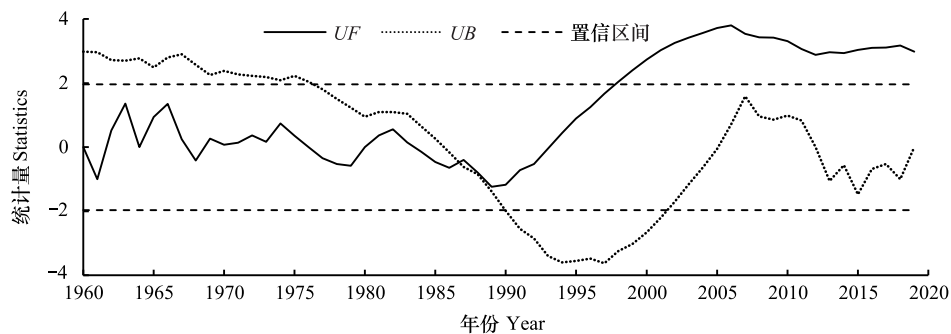


图4 1960—2019年宁夏沿黄绿洲 ET_0 的 Mann-Kendall 突变检验

Fig.4 Mann-Kendall test of ET_0 of Yellow River Oasis in Ningxia Province from 1960 to 2019

UF: 时间序列 ET_0 的正序统计量; UB: 时间序列 ET_0 的逆序统计量

将处于偏低趋势。在 20—40 a 中时间尺度上, 宁夏沿黄绿洲 ET_0 出现 2 个以上的振荡周期, 同样在 ET_0 时间序列结束的 2019 年依然存在等值线未闭合现象, 且此时的 ET_0 是振荡峰状态, 可见在这一时间尺度上, 当前 ET_0 会持续偏高一段时间。

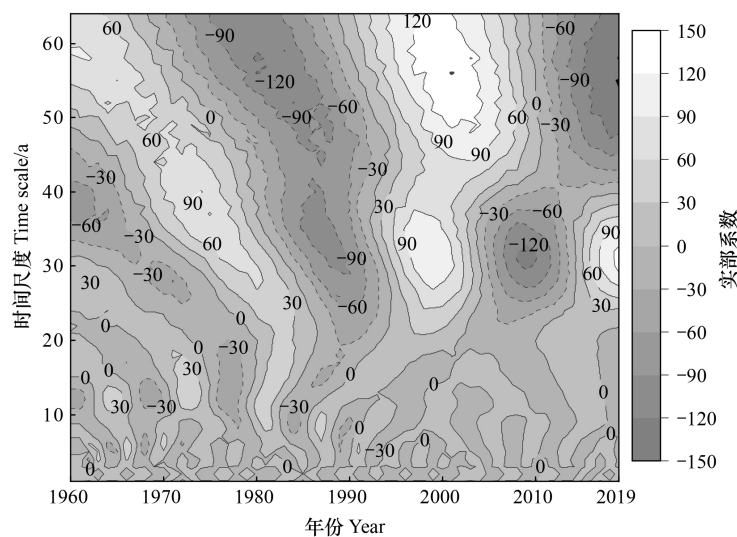
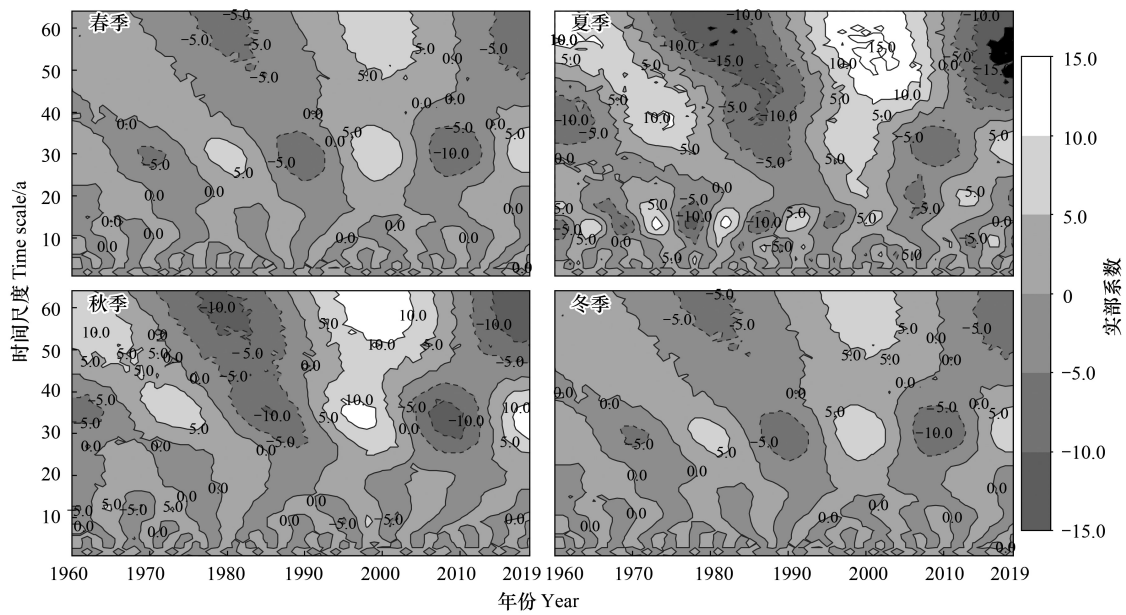


图5 宁夏沿黄绿洲 ET_0 年值的小波变换

Fig.5 Wavelet transform of annual ET_0 of Yellow River Oasis in Ningxia Province

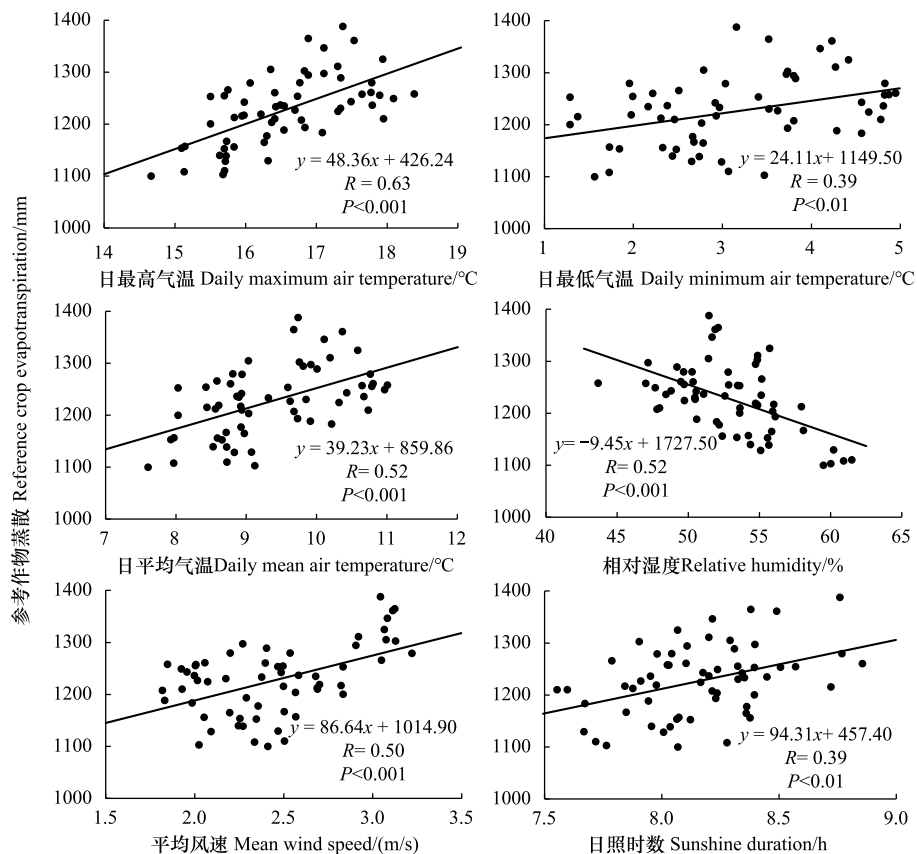
2.2.2 季节参考作物蒸散的小波分析结果

宁夏沿黄绿洲不同季节 ET_0 的小波分析结果存在差异 (图 6), 其中夏、秋季的 ET_0 周期振荡与年 ET_0 比较相似 (图 5), 但春、冬季 ET_0 的周期振荡与年 ET_0 的特征有所不同。夏、秋季 ET_0 出现 50—60 a 的长时间尺度和 30—40 a 的中时间尺度周期振荡, 其中夏季 ET_0 出现的 30—40 a 的中时间尺度周期振荡明显受 50—60 a 长时间尺度振荡效应的影响, 此外夏季 ET_0 还出现了 15 a 左右的短时间尺度的周期振荡, 可见夏季 ET_0 不仅占据年 ET_0 的主要部分 (图 2), 且存在更多时间尺度的周期性变化规律, 即控制着宁夏沿黄绿洲 ET_0 的变化特征。春、冬季 ET_0 出现 50—60 a 的长时间尺度和 30 a 的中时间尺度周期振荡, 但它们的小波系数变化范围明显较小, 多在 -5—5 的范围之内, 而夏、秋季的小波系数则多在 -10—10 的区间, 可见冬、春季的 ET_0 周期振荡幅度较弱, 而夏、秋季振荡幅度较强。从四个季节 ET_0 的当前振荡变化趋势来看, 50—60 a 长时间尺度的振荡在 2019 年依然存在等值线未闭合现象, 且小波系数为负值, 即在长时间尺度周期下, 四个季节的 ET_0 在未来还会处于一个长周期的减弱阶段; 但在 30—40 a 的中时间尺度周期下, 四个季节的 ET_0 则处于一个中周期性的增强阶段。

图6 宁夏沿黄绿洲不同季节 ET_0 的小波变换Fig.6 Wavelet transform of ET_0 in different seasons of Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region

2.3 参考作物蒸散的敏感性分析

从宁夏沿黄绿洲 ET_0 与各气象因子的相关分析来看(图7), ET_0 与日平均温度、日最高温度、日最低温度、

图7 宁夏沿黄绿洲 ET_0 与各气象因子的相关关系Fig.7 Correlation between ET_0 and various meteorological factors of Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region

相对湿度、平均风速和日照时数均存在显著相关关系($P < 0.01$ 或 $P < 0.001$),上述气象因子均会对 ET_0 产生显著影响。但不同的气象因子对 ET_0 的影响存在差异,其中 ET_0 与相对湿度为负相关关系,即空气的相对湿度升高,会对 ET_0 产生抑制作用。而 ET_0 与日平均温度、日最高温度、日最低温度、平均风速和日照时数均成正相关关系,即这些气象要素的升高或增强均会导致 ET_0 上升。此外, ET_0 与不同气象因子的相关系数大小和显著性强弱,也一定程度上反映了气象因子对 ET_0 的驱动强弱,其中日最高气温与 ET_0 的相关系数最大,且在 $P < 0.001$ 的水平显著,可见其对 ET_0 有重要的驱动作用。

利用相对敏感系数分析了 ET_0 对各气象因子的敏感性(表 1),结果表明,宁夏沿黄绿洲 ET_0 对最高气温的高敏感性最强,6 个气象站的敏感系数平均值为 11.58%,即在其他气象条件不变的情况下,最高气温增加或降低 20% 即可引起 11.58% 的 ET_0 波动。相比之下,日平均气温和日最低气温对 ET_0 的敏感性较低,敏感性系数分别为 0.98% 和 1.60%,由此可知,气候变化引起的极端最高气温对 ET_0 的影响要远超过平均升温带来的影响。此外,相对湿度是仅次于日最高气温的敏感因子,在其他气象条件不变的情况下,相对湿度波动 20% 即可引起 8.40% 的 ET_0 波动。当然,不同地区气象站计算得出的 6 个气象因子的敏感系数也存在差异,即不同地区的地理、气候差异,会导致 ET_0 对各气象因子的敏感性表现不同,但各因子的敏感性强弱排序不变,依然是 ET_0 对日最高气温最敏感,对日平均气温最不敏感(表 1)。

表 1 ET_0 对气象因子的敏感性/%

Table 1 Sensitivity of ET_0 to meteorological factors

气象站 Meteorological station	日最高气温 Daily maximum air temperature	日平均气温 Daily mean air temperature	日最低气温 Daily minimum air temperature	相对湿度 Relative humidity	平均风速 Mean wind speed	日照时数 Sunshine hours
中卫	11.64	1.41	1.95	9.71	6.62	5.68
中宁	12.00	0.75	1.36	9.10	6.78	4.58
吴忠	11.26	0.37	1.29	7.39	4.96	4.40
银川	10.78	1.49	2.30	8.28	6.67	6.03
陶乐	11.20	1.03	1.59	8.36	7.04	8.05
惠农	12.61	0.81	1.14	7.55	6.34	3.59
平均 Average	11.58	0.98	1.60	8.40	6.40	5.39

3 讨论

3.1 宁夏沿黄绿洲不存在“蒸发悖论”现象

在气候变暖的背景下,由于云覆盖增强和气溶胶浓度增加导致全球出现了蒸发减弱的特点^[37],即“蒸发悖论”现象普遍存在^[38]。虽然中国不同区域的蒸发变化规律存在差异^[39],但中国北方地区 ET_0 多呈下降趋势^[15]。“蒸发悖论”现象在特定区域也不一定存在普遍差异,如北方农牧交错带西北段的 ET_0 在增强^[40],宁夏引黄灌区 ET_0 也呈略微上升趋势^[41],虽然这些结果均建立在十多年前的数据分析基础上,但均与本研究的结论一致。另外,宁夏沿黄绿洲的净辐射(R_n)与全球太阳辐射持续降低的趋势相一致^[42–43],也在显著降低(图 8),但辐射强迫的降低并没有在该区域引发“蒸发悖论”现象发生,其原因在于驱动 ET_0 变化的主要动力差异。Andres 等^[44]的研究表明, ET_0 的变化主要受控于空气动力和辐射效应两方面,虽然宁夏沿黄绿洲的辐射强迫在减弱,但驱动地—气水文循环的空气动力作用更加强烈,其中尤以物理驱动蒸散增强的饱和水汽压亏缺(VPD)在显著的增强(图 8),可见更强的空气动力作用抵消了辐射强迫减弱的效应,最终导致宁夏沿黄绿洲近 60 a 的年 ET_0 呈 1.66 mm/a 的速率极显著增长($P = 0.001$)。

此外,本研究发现宁夏沿黄绿洲的 ET_0 虽然呈显著线性增加趋势,但也存在短期增强或减弱的阶段性差异化趋势,亦或出现无趋势的波动特征(图 3),其中在 1988 年前后出现了显著的突变现象,这与李晨^[21]等得出的宁夏地区 ET_0 在 1986 年发生突变的结果一致。宁夏沿黄绿洲 ET_0 的突变与该区域的气候干湿转变过程

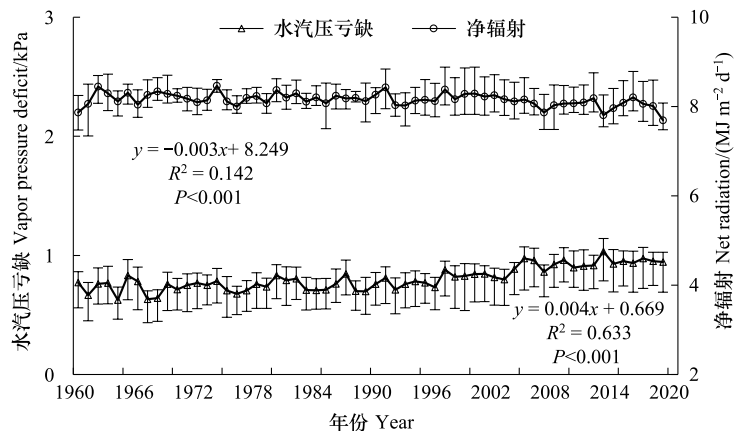


图8 宁夏沿黄绿洲净辐射与水汽压亏缺的演变趋势

Fig.8 Evolution of net radiation and vapor pressure deficit of Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region

有关,前人研究发现宁夏在 1980—1995 年为气候波动期,即气候由早期的湿润期向后期的干旱期波动转变^[45],同时前人发现北方农牧交错带的气温也在 1986 年发生突变^[40]。从宏观规律的耦合现象来推断,该区域在 20 世纪 80 年代中后期发生的气候突变现象,可能是驱动 ET_0 突变的重要原因,即宁夏沿黄绿洲 ET_0 变化受制于区域性气候变化非常明显^[46]。在气候变化背景下,依据 ET_0 变化特征和趋势来预测宁夏沿黄绿洲未来的蒸散耗水,对促进区域水资源高效利用意义重大。近年来,宁夏沿黄绿洲农业垦植面积的不断扩大,特别是贺兰山东麓葡萄种植园等特色农业的发展,导致通过地表蒸散途径消耗的水量越来越大^[23]。而当前气候变化驱动下的 ET_0 在未来亦有增强趋势,在自然和人为双重压力下,宁夏沿黄绿洲必须通过加强农业结构调整、控制合理的农业垦殖力度和制定合理灌溉用水计划来减少蒸散耗水量,从而维持绿洲生态系统的稳定性和可持续性。

3.2 参考作物蒸散演变的气候驱动归因

人类活动引起的温室气体排放及对生态环境的影响,导致地球气候系统发生了复杂的变化,而气候系统的变化又耦合驱动生态系统及其相关物质和能量循环过程的变化^[47],存在复杂的耦合驱动和反馈过程。本研究发现,宁夏沿黄绿洲近 60 a 的气候变化驱动了区域水文循环过程和 ET_0 演变,导致 ET_0 不仅出现显著的增强趋势,还表现出不同周期的波动振荡(图 3、图 5)。气候变化在气象站点尺度上表现出众多气象因子的趋势性演变,从宁夏沿黄绿洲近 60 a 的气象因子演变特征来看,气候变化导致了区域气温升高和空气相对与平均风速的下降(图 9),但日照时数没有显著性的演变趋势特征。由于 ET_0 对日最高气温的敏感性最强,次之是相对湿度,故气候变化导致的宁夏沿黄绿洲气温升高和空气相对湿度下降是导致区域 ET_0 显著性增强的主要原因,这与已有研究结果一致,曹雯等^[48]发现西北地区年均 ET_0 上升的主导因子是气温,而李晨等^[21]报道引起宁夏北部地区 ET_0 上升的主导因子是温度与相对湿度。宁夏沿黄绿洲的平均风速在 1989—2012 年间发生一个明显的波动,其中 1989—1999 年持续增强,并在 1999 年达到最大后开始降低,直至 2012 年又降回了最低点,平均风速的波动是诱发 ET_0 在同期出现异常增强(图 3)的重要原因,也导致了 ET_0 的趋势突变(图 4)。

3.3 研究特色与不足

气候周期性波动及突变现象普遍存在于各要素中,对常规气候要素的演变特征研究已有非常成熟的方法与体系,但气候变化背景下的 ET_0 演变是综合多种气候要素的复杂结果,从单一气候要素特征(图 8、图 9)很难得出 ET_0 的演变规律及未来趋势。宁夏引黄灌区近 60 a 来的 ET_0 时间序列,是一组气候变化背景下表征地表蒸散耗水强弱的指标,对于气候属性的指标序列,其往往存在内在的周期规律和频率特征,但如何检测和甄别是个技术难题。因此,本研究集成短周期线性趋势分析的直观性、Mann-Kendall 非参数检验方法对长周期

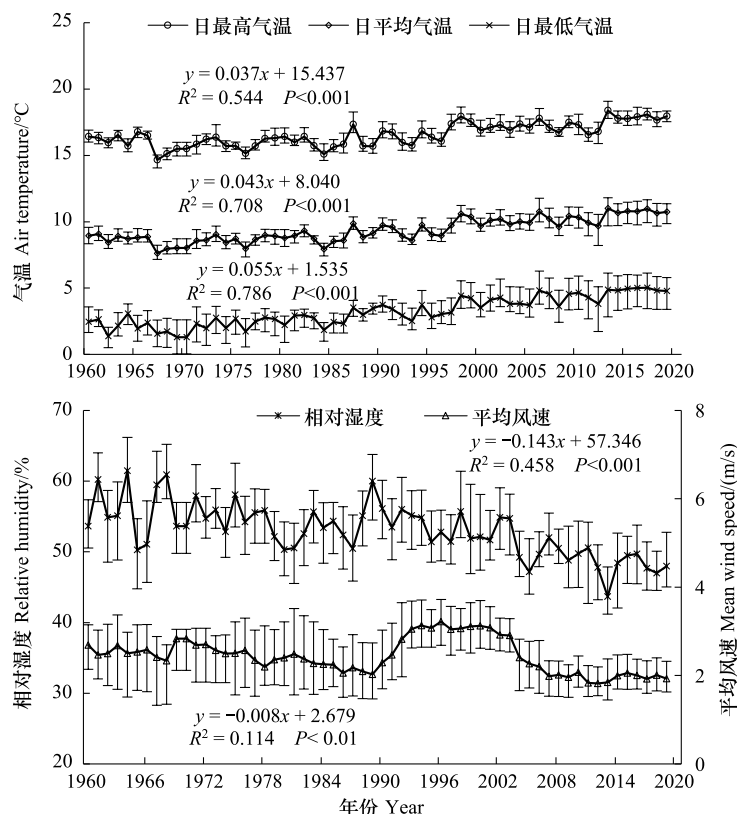


图9 宁夏沿黄绿洲不同气象因子的演变趋势

Fig.9 Evolution of different meteorological factors of Yellow River Oasis in Ningxia Province

突变检验的优势和 Morlet 小波分析对非平稳信号和多时间尺度周期振荡分析的适应性,开展宁夏沿黄绿洲参考作物蒸散演变特征研究,具有系统方法集成的特色与创新。特别是使用 Fourier 分析基础上发展起来的 Morlet 小波分析法,对 ET_0 时间序列信号实施局部分析,可获取任意时间或空间域中的振荡信号,甄别出 ET_0 的振荡周期及振荡强度,揭示信号的瞬时特性和局部变化。

利用 Penman-Monteith 模型计算的 ET_0 物理意义明确,可表征气候变化背景下宁夏沿黄绿洲区域陆表蒸散潜力的大小。它虽然由净辐射、气温、风速、相对湿度等气象要素计算而来,但又有极强的综合性和多驱动因子耦合效应,所以 ET_0 的周期性和波动性与气象驱动因子的周期性和波动性存在差异,在 ET_0 驱动机制分析与预测研究中, ET_0 的影响因素、趋势规律与时空特征,实际上是一个地区气候变化驱动背景下地—气蒸散水文过程的复杂响应,完全解耦其过程,尚需更进一步的系统研究。此外,本研究仅考虑了理想参考作物下垫面的 ET_0 演变特征,而没有考虑地表各类作物覆盖下的实际蒸散。宁夏沿黄绿洲在近几十年的发展过程中有极强的人为活动影响,如农业种植结构调整,绿洲边缘的酿酒葡萄种植,极大地改变了地表作物特征和环境状态,也改变了作物系数和环境调控系数,进而显著地改变宁夏沿黄绿洲的实际蒸散耗水过程。而如何考虑宁夏沿黄绿洲的作物参数,精确研究实际蒸散耗水量及其变化,将是今后研究的重点。

4 结论

采用 Penman-Monteith 模型计算宁夏沿黄绿洲各气象站 1960—2019 年的 ET_0 ,分析了 ET_0 的演变规律和周期振荡特征,探讨了 ET_0 对气象因子的敏感性,揭示了 ET_0 演变的气候归因,得出以下主要结论:(1) 宁夏沿黄绿洲逐月 ET_0 呈现出随季节变化的单峰形态,5—7 月的 ET_0 占全年的比例较高,近 60 a 的年平均 ET_0 为 1226.38 mm,并以 1.66 mm/a 的速率显著上升,但年际间的波动较大,存在阶段性的增加或降低趋势,且以

1988 年为突变点。(2)年 ET_0 存在 20—40 a 和 50—60 a 时间尺度的周期性振荡规律,且有多重尺度的复杂嵌套现象,不同季节的周期振荡差异较大,夏、秋季的特征接近于年 ET_0 规律,且振荡幅度较强,而冬、春季则有别于年 ET_0 特征,且振荡幅度较弱。(3) ET_0 与气象因子存在较强相关性,且 ET_0 对最高气温的高敏感性最强,次之是空气相对湿度,在气候变化背景下,宁夏沿黄绿洲地区的气温升高、空气相对湿度下降以及由此引发的饱和水汽压亏缺持续增强,是导致该区域 ET_0 显著增强的主要原因。

参考文献 (References):

- [1] 刘俊国,陈鹤,田展. IPCC AR6 报告解读:气候变化与水安全. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 405-413.
- [2] 刘立涛,刘晓洁,伦飞,吴良,鲁春霞,郭金花,曲婷婷,刘刚,沈镭,成升魁. 全球气候变化下的中国粮食安全问题研究. 自然资源学报, 2018, 33(6): 927-939.
- [3] Wang L, D'Odorico P, Evans J P, Eldridge D J, McCabe M F, Caylor K K, King E G. Dryland ecohydrology and climate change: critical issues and technical advances. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2585-2603.
- [4] Fu B J, Stafford-Smith M, Wang Y F, Wu B F, Yu X B, Lv N, Ojima D S, Lv Y H, Fu C, Liu Y, Niu S L, Zhang Y J, Zeng H W, Liu Y X, Liu Y X, Feng X M, Zhang L, Wei Y P, Xu Z H, Li F D, Chen X. The Global-DEP conceptual framework—research on dryland ecosystems to promote sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 48: 17-28.
- [5] Yin Y H, Wu S H, Zheng D, Yang Q Y. The regional differences of dry wet change in China in recent 30 years. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(15): 1636-1642.
- [6] 程玉菲,王根绪,席海洋,王军德. 近 35a 来黑河干流中游平原区陆面蒸散发的变化研究. 冰川冻土, 2007, 29(3): 406-412.
- [7] Al-Hasani A A J, Shahid S. Spatial distribution of the trends in potential evapotranspiration and its influencing climatic factors in Iraq. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 150(1): 677-696.
- [8] Zhao L W, Zhao W Z. Evapotranspiration of an oasis-desert transition zone in the middle stream of Heihe River, Northwest China. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(5): 529-539.
- [9] Valipour M, Bateni S, Gholami Sefidkouhi M A, Raeini-Sarjaz M, Singh V. Complexity of forces driving trend of reference evapotranspiration and signals of climate change. *Atmosphere*, 2020, 11(10): 1081.
- [10] Tang Y, Tang Q H. Variations and influencing factors of potential evapotranspiration in large Siberian River Basins during 1975—2014. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126443.
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements; FAO irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO, 1998.
- [12] 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. 地理科学, 2015, 35(8): 1033-1041.
- [13] 范双萍. 甘肃陇中地区近 55 年潜在蒸散量及干旱指数演变趋势. 地球环境学报, 2018, 9(2): 172-181.
- [14] 田露,郭伟,倪向南,李晓婷. 青海湖地区潜在蒸散发变化特征及影响因子分析. 地球环境学报, 2023, 14(3): 328-338.
- [15] 刘宪锋,潘耀忠,张锦水,林志慧. 1960—2011 年西北五省潜在蒸散的时空变化. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2564-2570.
- [16] 韩典辰,张方敏,陈吉泉,李云鹏,卢琦. 半干旱区草地站蒸散特征及其对气象因子和植被的响应. 草地学报, 2021, 29(1): 166-173.
- [17] 闫一丹. 西北干旱区绿洲系统温湿场特征. 农业灾害研究, 2022, 12(12): 72-74.
- [18] 许海芳. 西北干旱区绿洲系统小气候效应研究. 农业灾害研究, 2023, 13(2): 102-104.
- [19] Dong C Y, Qiao R R, Yang Z C, Luo L H, Chang X L. Eco-environmental quality assessment of the artificial oasis of Ningxia section of the Yellow River with the MRSEI approach. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10: 1071631.
- [20] 马小燕,朱晓雯,赵金涛,赵娜,石云. 基于 SPEI 的宁夏沿黄城市带干旱特征及驱动性分析. 水土保持研究, 2022, 29(5): 364-373.
- [21] 李晨,李王成,董亚萍,王双涛,王兴,赵研. 宁夏地区潜在蒸散发变化特征及成因分析. 排灌机械工程学, 2021, 39(2): 186-192.
- [22] 李晨,李王成,赵自阳,董亚萍,高海燕. 宁夏引黄灌区几种参考作物蒸散量计算方法适用性及修正研究. 中国农村水利水电, 2019(11): 54-59, 65.
- [23] 吴宏玥,杜灵通,乔成龙,钟艳霞,潘海珠,张祎,施光耀,易志远. 基于蒸散演变驱动的宁夏绿洲平原生态系统耗水变化. 水土保持学报, 2023, 37(3): 172-180, 189.
- [24] 吴锦奎,丁永建,魏智,王根绪. 干旱区天然低湿牧草地参考作物蒸散量研究——以黑河中游为例. 干旱区研究, 2005, 22(4): 514-519.
- [25] Han J Y, Wang J H, Zhao Y, Wang Q M, Zhang B, Li H H, Zhai J Q. Spatio-temporal variation of potential evapotranspiration and climatic drivers in the Jing-Jin-Ji region, North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256/257: 75-83.
- [26] 胡琦,马雪晴,胡莉婷,王雅婧,徐琳,潘学标. Matlab 在气象专业教学中的应用——气象要素的 M-K 检验突变分析. 实验室研究与探

- 索, 2019, 38(12): 48-51, 107.
- [27] Mao P P, Zhang J, Li M, Liu Y L, Wang X, Yan R R, Shen B B, Zhang X, Shen J, Zhu X Y, Xu D W, Xin X P. Spatial and temporal variations in fractional vegetation cover and its driving factors in the Hulun Lake region. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108490.
- [28] Liu Y, Wang Q Y, Yao X L, Jiang Q, Yu J S, Jiang W W. Variation in reference evapotranspiration over the Tibetan Plateau during 1961—2017: spatiotemporal variations, future trends and links to other climatic factors. *Water*, 2020, 12(11): 3178.
- [29] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 胡远满. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势. *生态学报*, 2013, 33(2): 519-531.
- [30] Peng Y Q, Peng T, Li Y. Spatiotemporal characteristics of drought in Northwest China based on SPEI analysis. *Atmosphere*, 2023, 14(7): 1188.
- [31] 许婧璟, 靳晓言, 强皓凡, 戴辉, 梁川. 新疆艾比湖流域潜在蒸散变化特征与成因分析. *灌溉排水学报*, 2018, 37(2): 89-94.
- [32] 朴英超, 关燕宁, 张春燕, 郭杉, 阎保平. 基于小波变换的卧龙国家级自然保护区植被时空变化分析. *生态学报*, 2016, 36(9): 2656-2668.
- [33] 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2004, 34(12): 1176-1183.
- [34] Zhang L, Yu G R, Gu F X, He H L, Zhang L M, Han S J. Uncertainty analysis of modeled carbon fluxes for a broad-leaved Korean pine mixed forest using a process-based ecosystem model. *Journal of Forest Research*, 2012, 17(3): 268-282.
- [35] 吴戈男, 胡中民, 李胜功, 郑涵, 朱先进, 孙晓敏, 于贵瑞, 李景保. SWH 双源蒸散模型模拟效果验证及不确定性分析. *地理学报*, 2016, 71(11): 1886-1897.
- [36] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 王宗明, 杜嘉. 近 60 年来东北地区参考作物蒸散量时空变化. *水科学进展*, 2010, 21(2): 194-200.
- [37] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
- [38] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396: 30.
- [39] 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 雷志栋. “蒸发悖论”在中国的规律分析. *水科学进展*, 2008, 19(2): 147-152.
- [40] 李敏敏, 延军平. “蒸发悖论”在北方农牧交错带的探讨. *资源科学*, 2013, 35(11): 2298-2307.
- [41] 孙静, 阮本清, 蒋任飞. 宁夏引黄灌区参考作物蒸发蒸腾量及其气候影响因子的研究. *灌溉排水学报*, 2006, 25(1): 54-57, 61.
- [42] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Mattar C. Recent trends in solar exergy and net radiation at global scale. *Ecological Modelling*, 2012, 228: 59-65.
- [43] 高扬子, 何洪林, 张黎, 路倩倩, 于贵瑞, 张祖陆. 近 50 年中国地表净辐射的时空变化特征分析. *地球信息科学学报*, 2013, 15(1): 1-10.
- [44] Andres M R, Isabel G M. Trends of reference evapotranspiration and its physical drivers in southern South America. *International Journal of Climatology*, 2022, 43(3): 1593-1609.
- [45] 杜灵通, 宋乃平, 王磊, 候静, 胡悦. 近 30a 气候变暖对宁夏植被的影响. *自然资源学报*, 2015, 30(12): 2095-2106.
- [46] 韩宇平, 张建龙. 宁夏引黄灌区气候变化特征分析. *华北水利水电学院学报*, 2007, 28(6): 1-3.
- [47] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 14-27.
- [48] 曹雯, 申双和, 段春锋. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因. *生态学报*, 2012, 32(11): 3394-3403.