

毛乌素沙地暖湿化特征分析及其对植被变化的影响

朱永华^{1,2,3}, 罗平平^{2,3}, 郭倩¹, 张盼¹, 王美宇¹, 闫龙⁴, 汪勇⁴

(1.延安大学建筑工程学院,陕西 延安 716000;2.长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,西安 710054;3.长安大学水与环境学院,西安 710054;4.中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:气候暖湿化对植被生长及覆盖率乃至土地合理开发利用、生态环境保护均有重要的现实意义。以毛乌素沙地为研究区,基于1959—2019年的气象数据(气温、降水量及蒸发量),运用气候趋势变化、M-K突变和小波周期分析特征变化,并结合生长季归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)值探究其与研究区气象因子间的响应关系。结果表明:(1)研究区内毛乌素沙地年平均气温、年平均降水量、年平均蒸发量分别升高1.7℃、11.19 mm和33.82 mm,并呈显著上升趋势。(2)70年代是气象因子突变始发时间,且在70—90年代间进行了气温由冷变暖、降水由少变多、气候由干变湿的突变。(3)沙地年平均气温、降水及蒸发在时间序列上以20~30年的周期振荡最明显,且在28年处达峰,为毛乌素沙地气象因子变化的第1主周期。(4)1998—2019年NDVI总体呈现波动增加趋势,与蒸发和降水呈正相关的响应关系,蒸发显著性大于降水。研究结果可为当前气候变化下有效保护和管理生态系统提供科学依据。

关键词:沙地;暖湿化;突变检验;小波分析;植被归一化指数;影响

中图分类号:S271

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)05-0160-013

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.022

Analysis of Warming and Humidifying Characteristics of Mu Us Sandy Land and Its Influence on Vegetation Change

ZHU Yonghua^{1,2,3}, LUO Pingping^{2,3}, GUO Qian¹, ZHANG Pan¹,

WANG Meiyu¹, YAN Long⁴, WANG Yong⁴

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000;

2.Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054; 3.School of Water and Environment, Chang'an

University, Xi'an 710054; 4.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

Abstract: Climate warming and humidification has important practical significance for vegetation growth and coverage, as well as rational land development and utilization and ecological environment protection. Taking Mu Us sandy land as the study area, based on the meteorological data (temperature, precipitation and evaporation) from 1959 to 2019, this paper analyzed the characteristic changes of climate warming and humidification by using climate trend change, M-K mutation and wavelet cycle, and explored the response relationship between it and meteorological factors in the study area based on normalized difference vegetation index (NDVI) value in the growing season. The results showed that: (1) During the study period, the annual average temperature, annual average precipitation and annual average evaporation in Mu Us sandy land increased by 1.7℃, 11.19 and 33.82 mm, respectively, and showed a significant upward trend. (2) The 1970s was the starting time of the sudden change of meteorological factors, and the sudden change of temperature from cold to warm, precipitation from less to more, and climate from dry to wet occurred from 1970s to 1990s. (3) The annual average temperature, precipitation and evaporation in the sandy land oscillated most obviously in the period of 20~30 years, and reached the peak at 28 years, which was the first main period of the change of meteorological factors in Mu Us sandy land. (4) From 1998 to 2019, NDVI generally showed a fluctuating

收稿日期:2022-02-23

资助项目:国家自然科学基金项目(41861124006);陕西省教育厅科技项目(21JK0982);延安市科技局项目(2018KS—02);延安大学博士研究项目(YDBK2019-35, YDBK2019-36, YDBK2017-19);延安大学大学生创新创业训练计划项目(D2021041)

第一作者:朱永华(1986—),男,博士,讲师,主要从事生态水文研究。E-mail:zhuyonghua@yau.edu.cn

通信作者:罗平平(1981—),男,博士,教授,主要从事洪涝灾害和水环境研究。E-mail:lpp@chd.edu.cn

and increasing trend, which was positively correlated with evaporation and precipitation. The significance of evaporation was greater than that of precipitation. The research results could provide a scientific basis for the effective protection and management of these valuable ecosystems under the current climate change.

Keywords: sandy land; warming and humidifying; mutation test; wavelet analysis; vegetation normalization index; influence

尽管气候变化具有不确定性和复杂性,但全球气候变暖已成为不争的事实。气候变暖所带来的大气水汽及循环动力增加,使得降水与蒸发的强度和空间分布也随之发生改变^[1],且北半球变化更为明显。然而,气候变化不仅影响自然环境和生态系统平衡,也能衡量与预测生态系统变化。因此,气候变化对地球上几乎所有的景观和生态系统都产生了重大影响,包括沙地^[2]。

气象因子通过改变相应的生态水文过程,在沙地环境的生态功能中起着至关重要的作用^[3-4]。中国西北部,特别是黄河流域毛乌素沙地,由于独特的地带性与敏感性,其生态系统正面临着比以往更大的挑战与机遇^[5]。因此,识别沙地区域气候变化特征及其与植被变化的响应关系,为生态环境建设提供参考,已成为当前的重要科学课题。

与气温升高^[6]、降水增加^[7]、蒸发改变^[8]等有关的气候变化已经并将继续对沙地生态系统产生重大影响。此前的研究表明,在全球气候变暖背景下,我国西北地区气候正由暖干向暖湿转型^[9]。与此同时,北半球中高纬度特别是亚洲和北美 40°—70°N 地区植被变化呈显著的线性增加趋势^[10]。然而,针对沙地区域气候变化周期与突变特征的精确描述相对较少,导致沙地生态环境未来变化的不确定性显著增强,给科学制定水资源管理与保护对策带来显著影响。自 20 世纪 70 年代首次提出归一化差异植被指数(NDVI)以来,已被广泛用于评估对环境变化的生态响应。因此,本研究在前人研究基础上,试图从基础层面通过 Mann-Kendall 突变检验、Morlet 小波分析和相关分析阐释沙地区域气候变化特征,探索区域植被变化与气候因子的响应关系。研究成果可能有助于理解气候变化对半干旱地区沙地的影响,从而为在当前气候变化下有效保护和管理这些宝贵的生态系统提供科学依据。

1 研究区概况

毛乌素沙地(简称沙地)位于鄂尔多斯高原向陕北高原过渡地带,自西北向东南倾斜,地理坐标为 107°20'—111°30'E,37°30'—39°20'N,面积 4.0×10⁴ km²(图 1)。研究区属温带季风区气候,年平均气温 6.10~8.15℃;多年平均降水量在沙地东南部为 400~440 mm,并向西逐渐递减,直至 250 mm 左右;7—9 月集中全年降水量的 60%~70%,降水强度较大,常以暴雨形式出现;年平均风速 2.1~3.3 m/s,年平均大风

日数 10~40 天,最长达 95 天。沙地的植被大致划分为 3 个(亚)地带与 3 大类群,3 大(亚)地带分别为荒漠草原亚地带,干草原亚地带,干草原亚地带向森林草原过渡地带;3 大类群为梁地上的草原与灌丛植被,半固定、固定沙丘与沙地上的沙生灌丛,滩地上的草甸、盐生与沼泽植被。

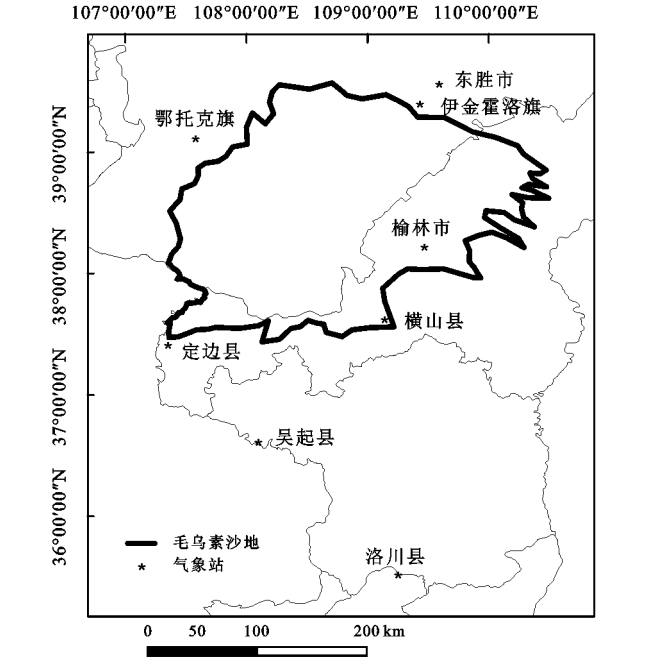


图 1 研究区位置和气象站点分布

2 数据来源与方法

2.1 数据来源及预处理

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网站发布的陕西省、内蒙古自治区 8 个气象观测站(东胜站、鄂托克旗站、伊金霍洛旗站、定边站、横山站、洛川站、榆林站、吴起站)1959—2019 年逐日平均气温和降水量,采用数理统计等方法进行数据预处理,计算得到年平均及生长季(4—10 月)的气温、降水量和蒸发量。

植被指数(NDVI, normalized difference vegetation index)可以准确反映地表植被覆盖状况,对植被变化状况监测、植被资源合理利用和其他生态环境相关领域的研究有十分重要的参考意义^[11]。研究区月尺度 NDVI 数据集源自中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>),基于 SPOT/VEGETATION PROBA-V 1KM PRODUCTS 旬 1KM 植被指数数据(<http://www.vito-eodata.be>),采用最大值合成法生成的 1998 年以来的月尺度植被指数数据集,获取时间为 1998 年 4

月至 2019 年 12 月,空间分辨率为 1 km。基于冬季毛乌素沙地大部分植被停止生长或被冰雪覆盖,NDVI 均值无法准确反映出冬季植被覆盖状况,所以本文以年 NDVI 最大值作为研究数据。

2.2 研究方法

2.2.1 数理统计法计算蒸发量 作为重要气候因子的蒸发量对于区域内水循环增强起着重要促进作用,其值大小可反映区域暖湿化状况。本文基于研究区内 8 个气象站逐月气温和降水量数据,通过数理统计法计算出蒸发量^[12],使研究区的气候要素更加完善,分析结果更加准确,计算公式为:

$$E=\frac{3100P}{3100+1.8P^2\exp\left(-\frac{34.4T}{235.0+T}\right)}$$

式中: E 为月蒸发量(mm); P 为月降水量(mm); T 为月平均气温(℃)。

2.2.2 M-K 突变检验法 气候要素的突变检验采用非参数统计检验方法—Mann-Kendall 突变检验(M-K),明确气象因子的突变期及分析其变化趋势^[13]。该方法具有不要求样本数据一定遵守某特定概率分布,也不受少数异常点的影响,计算简便等优点,并能够准确反映出样本的长期变化趋势和突变情况。

当 M-K 突变检验的 UF 或 UB 的值大于 0 时,表示数据序列呈上升趋势;反之,数据序列则呈下降趋势。在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下,显著性区间为 $(-1.96, 1.96)$,如果 UF 或 UB 值超过临界线 (± 1.96) ,表明数据序列上升或下降趋势显著。当 UF 与 UB 2 条曲线存在交点,且交点位于显著性区间内,则交点为突变点。

2.2.3 Morlet 小波分析法 小波分析是研究时间序列的一种多分辨功能的方法,它不仅给出气候序列变化的尺度,还可以显示出变化的周期规律,揭示时间序列中的变化周期,能充分反映系统在不同时间尺度中的变化趋势,并能够对系统未来发展趋势进行定性估计^[14]。小波分析的基本思想是用一簇小波函数来表示或逼近某一信号和函数,小波函数是指具有振荡性,能够迅速衰减到 0 的一类函数。

小波方差分析是小波分析的重要内容,将时间域上的关于 α 的所有小波系数的平方积分称为小波方差。小波方差图能反映时间序列中所包含的各种尺度(周期)的波动及其强弱(能量大小)随尺度变化的特性。通过方差图,可非常方便地查找一个时间序列中起主要作用的周期。

3 结果与分析

3.1 气候变化特征分析

3.1.1 气温变化趋势 由图 2 可知,1959—2019 年,

沙地研究期内各站均气温均呈上升趋势。定边、洛川、鄂托克旗、榆林、东胜站点极差较大,气温上升倾向率分别为 0.396,0.308,0.324,0.371,0.501 ℃/10 a,东胜站在 1967 年达到平均最低气温 4.43 ℃,2013 年达平均最高气温 8.14 ℃。吴起、横山、伊金霍洛旗站点极差相对较小,但仍在上升,气温上升倾向率分别为 0.160,0.216,0.269 ℃/10 a,吴起站在 1967 年到平均最低气温 6.84 ℃,1998 年达平均最高气温 9.21 ℃。

1959—2019 年,沙地年平均气温呈上升趋势,最低值出现在 1967 年,为 6.46 ℃;最高值出现在 1998 年,为 9.49 ℃,极差 3.03 ℃。温度的年代际变化 1960—1970 年平均气温为 7.4 ℃,1971—1980 年平均气温为 7.5 ℃,1981—1990 年平均气温为 7.6 ℃,1991—2000 年平均气温为 8.4 ℃,2001—2010 年平均气温为 8.8 ℃,2010 年代(2011—2019)平均气温为 8.8 ℃。研究期内沙地年平均气温差值为 1.7 ℃,线性速率达 0.32 ℃/10 a,呈极显著($R=0.744, p<0.001$)变化趋势,区域气候变暖趋势明显。

3.1.2 降水变化趋势 由图 3 可知,在 8 个气象站中,研究区西北部的定边、横山、榆林和伊金霍洛旗站的降雨量呈上升趋势,各站线性速率分别为 7.32,0.73,11.92,5.63 mm/10 a。降水量增加极差变化最大的是定边县站,降水量在 1964 年达到平均最高 554.5 mm,1982 年达平均最低 179.9 mm。降水量增加极差变化最小的是横山站和榆林站,降水量分别在 1964 年、2016 年达到平均最高降水量,分别为 686.9,772.8 mm,1965 年同时达平均最低降水量 165.2,159.1 mm。洛川、鄂托克旗、吴起和东胜站的降雨量呈下降趋势,各站的线性速率分别为 -5.26, -0.025, -0.431, -1.79 mm/10 a。降水量降低极差最小的是洛川站,降水量在 1964 年达到 554.5 mm,1982 年达平均最低 179.9 mm。降水量降低极差最大是鄂托克旗站,降水量在 1976 年达到 661.6 mm,1982 年达平均最低 125.2 mm。

研究期间沙地年平均降雨量呈上升趋势,最低值 217.5 mm 出现在 1965 年,最高值 632.7 mm 出现在 1964 年,极差达 415.2 mm。降水量的年代际变化为,1960 年代(1960—1970)平均降水为 426.8 mm,1970 年代(1971—1980)平均降水为 390.3 mm,1980 年代(1981—1990)平均降水为 390.8 mm,1990 年代(1991—2000)平均降水 362.0 mm,2000 年代(2001—2010)平均降水为 399.1 mm,2010 年代(2011—2019)平均降水为 456.3 mm。研究期内沙地年平均降水量差值为 11.2 mm,线性速率达 1.83 mm/10 a,呈极显著($R=0.744, p<0.001$)变化趋势,区域气候变湿趋势明显。

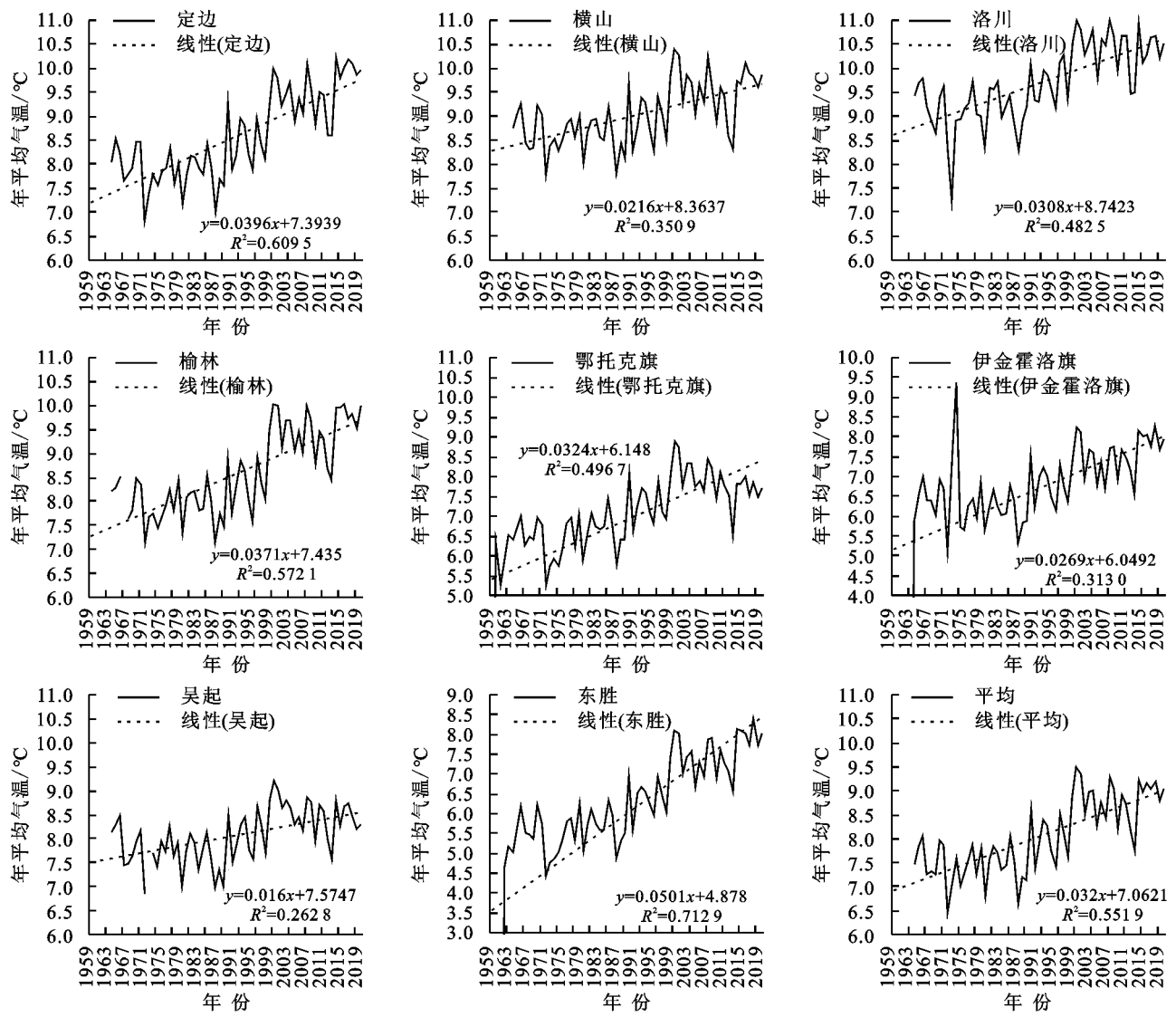


图 2 1959—2019 年研究区年均气温变化曲线

3.1.3 蒸发变化趋势 由图 4 可知,1959—2019 年沙地区域各站蒸发量,除吴起站呈下降趋势,速率为 $-0.12 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 外,定边、横山、洛川、榆林、鄂托克旗、伊金霍洛旗和东胜站均呈现出上升趋势,各站线性速率分别为 $9.04, 5.04, 4.20, 5.83, 5.14, 8.61, 5.97 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。蒸发量升高极差最大的是定边站,蒸发量在 1964 年达 365.2 mm ,1982 年仅为 168.8 mm 。升高极差最小的是洛川站,蒸发量在 2006 年达到 463.6 mm ,1995 年仅为 273.1 mm 。

研究期间沙地年平均蒸发量呈上升趋势,最低值出现在 1965 年,为 188.0 mm ;最高值出现在 1964 年,为 386.9 mm ,极差达 198.9 mm 。蒸发量的年代际变化为,1960—1970 年平均蒸发量为 288.8 mm ,1971—1980 年平均蒸发量为 279.0 mm ,1981—1990 年平均蒸发量为 284.6 mm ,1991—2000 年平均蒸发量为 272.8 mm ,2001—2010 年平均蒸发量为 297.2 mm ,2011—2019 年平均蒸发量为 326.9 mm 。研究期内沙地年平均蒸发量差值为 33.8 mm ,线性速率达

$5.54 \text{ mm}/10 \text{ a}$,呈极显著($R = 0.744, p < 0.001$)变化趋势,区域气候暖湿化趋势明显。

3.2 气候要素的突变分析

3.2.1 气温突变分析 由图 5 可知,研究区 1959—2019 年平均气温突变,横山、榆林、鄂托克旗、东胜站 UF 曲线和 UB 曲线有唯一交点,均出现在 1971 年,且交点在 $\alpha = 0.05$ 显著性临界线范围内,表明该点可作为年平均气温突变时刻;而定边、洛川、伊金霍洛旗、吴起站 UF 曲线和 UB 曲线在 1971 年左右存在多个交点,且均在临界线之间,表明该期间为年平均气温的突变期。

研究区年平均气温曲线 UF 波动较大,并且在 1963—1989 年 $UF(k) < 0$,说明年均气温在该期间呈现降低的趋势;然而,1990—2019 年 $UF(k) > 0$,则表明在 1990—2019 年呈现升高的趋势;且 UF 曲线在 1997 年以后呈现出显著性上升趋势($U_{0.05} = 1.96$),甚至在 1999 年呈极显著性上升趋势($U_{0.001} = 2.58$),表明区域气温变暖趋势显著。从总体趋势看,UF 曲线呈上升趋势表明,近 60 年沙地年均气温呈逐渐上升

趋势,与线性趋势分析的结果一致。曲线 UF 和曲线 UB 在 1971—1981 年几乎全部重合,有多个交点,且交点均处于 0.05 显著性临界线范围内。这表明,

1971 年是沙地研究期间年均气温开始突变的时间,且在 1970—1981 年存在显著的突变,判断在这段时间内气温发生了由冷变暖的突变。

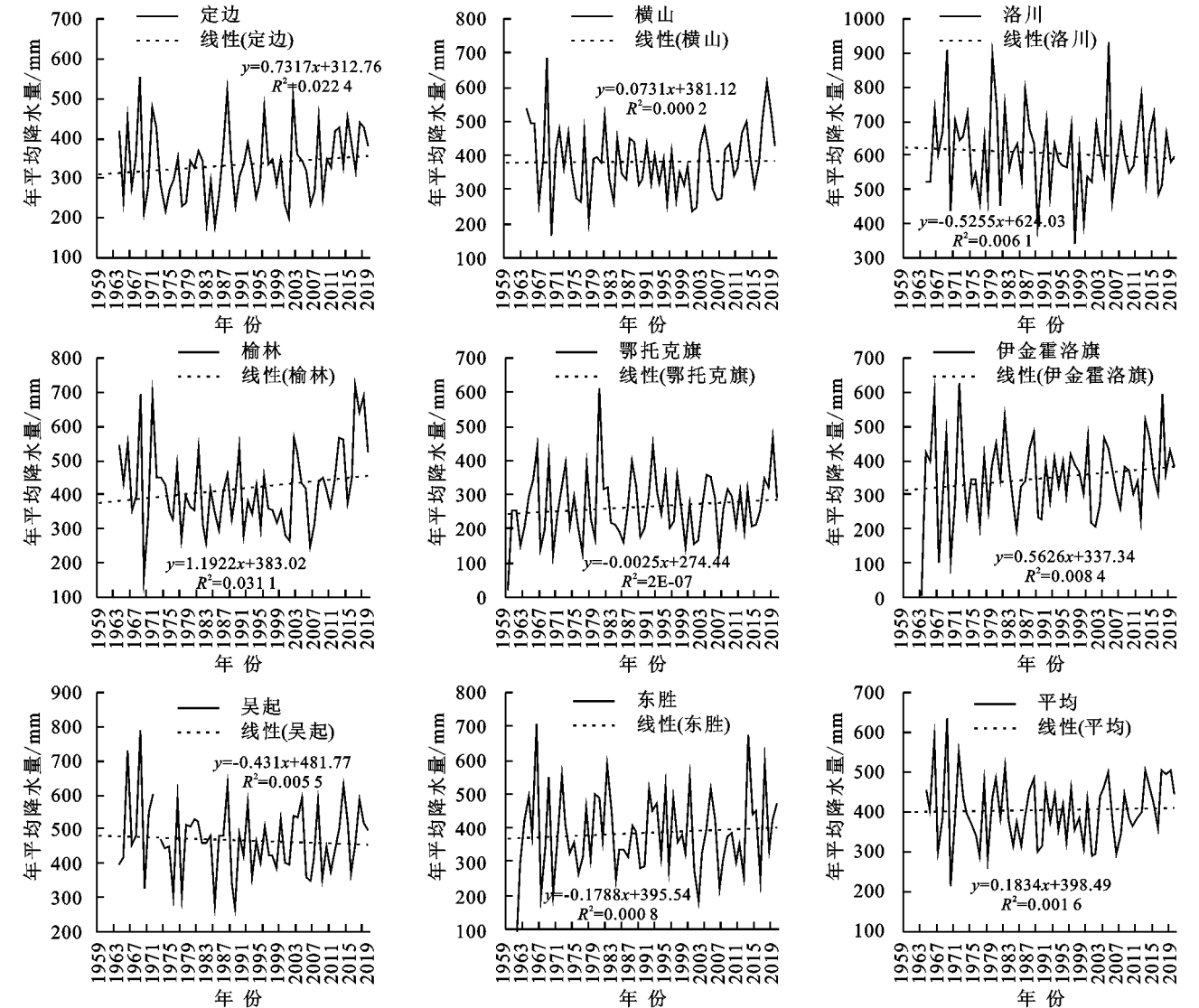


图 3 1959—2019 年研究区年降水变化曲线

3.2.2 降水量突变分析 以沙地年降水量为基础值,对其进行突变分析,由图 6 可知,定边、横山、榆林、鄂托克旗、伊金霍洛旗、吴起、东胜站 UF 曲线和 UB 曲线在 1970—1990 年出现多个交点,且均位于 $\alpha = 0.05$ 显著性临界线范围内,表明降水在 1970 年之后存在显著突变,变化频繁。而洛川站 UF 曲线和 UB 曲线仅在 1975 年和 1991 年处相交,均位于 $\alpha = 0.05$ 显著性临界线范围内,表明洛川站降水在 70—90 年代存在显著性突变。

研究区年平均降水曲线 UF 整体呈波动上升,大部分位于 $\alpha = 0.05$ 显著性临界线范围内,说明近 60 年平均降水在该期间呈现不显著上升趋势,与线性趋势分析的结果一致。曲线 UF 在 1960 年、1962—1963 年、1965—2016 年均 $UF(k) < 0$,说明沙地平均降水在此期间呈现降低趋势;而在 1961 年、1964 年、2017—2019 年均 $UF(k) > 0$,则表明其

在此期间呈现增加趋势,且在 2017 年后上升幅度迅速加快。曲线 UF 和 UB 在 1971—1999 年几乎全部重合,有多个交点,且交点均处于 0.05 显著性临界线范围内。1971 年是沙地研究期间平均降水开始突变的时间,且在 1971—1999 年存在显著的突变,表现出降水由少变多的变化过程,气候由于向湿产生突变。

3.2.3 蒸发量突变分析 以沙地年降水量与气温为基础值,运用公式计算求得的年蒸发量,并对其进行突变分析,由图 7 可知,横山、鄂托克旗、伊金霍洛旗、东胜站 UF 和 UB 曲线分别在 1971—1988 年、1999—2004 年、2016—2018 年附近有多个交点,表明发生多次突变。定边、洛川站均在 2004—2016 年发生突变,吴起站在 1971—1998 年发生突变。各站的平均蒸发 UF 曲线均呈不同程度的上升趋势,表明沙地区域蒸发量上升,气候变化驱动力增强。

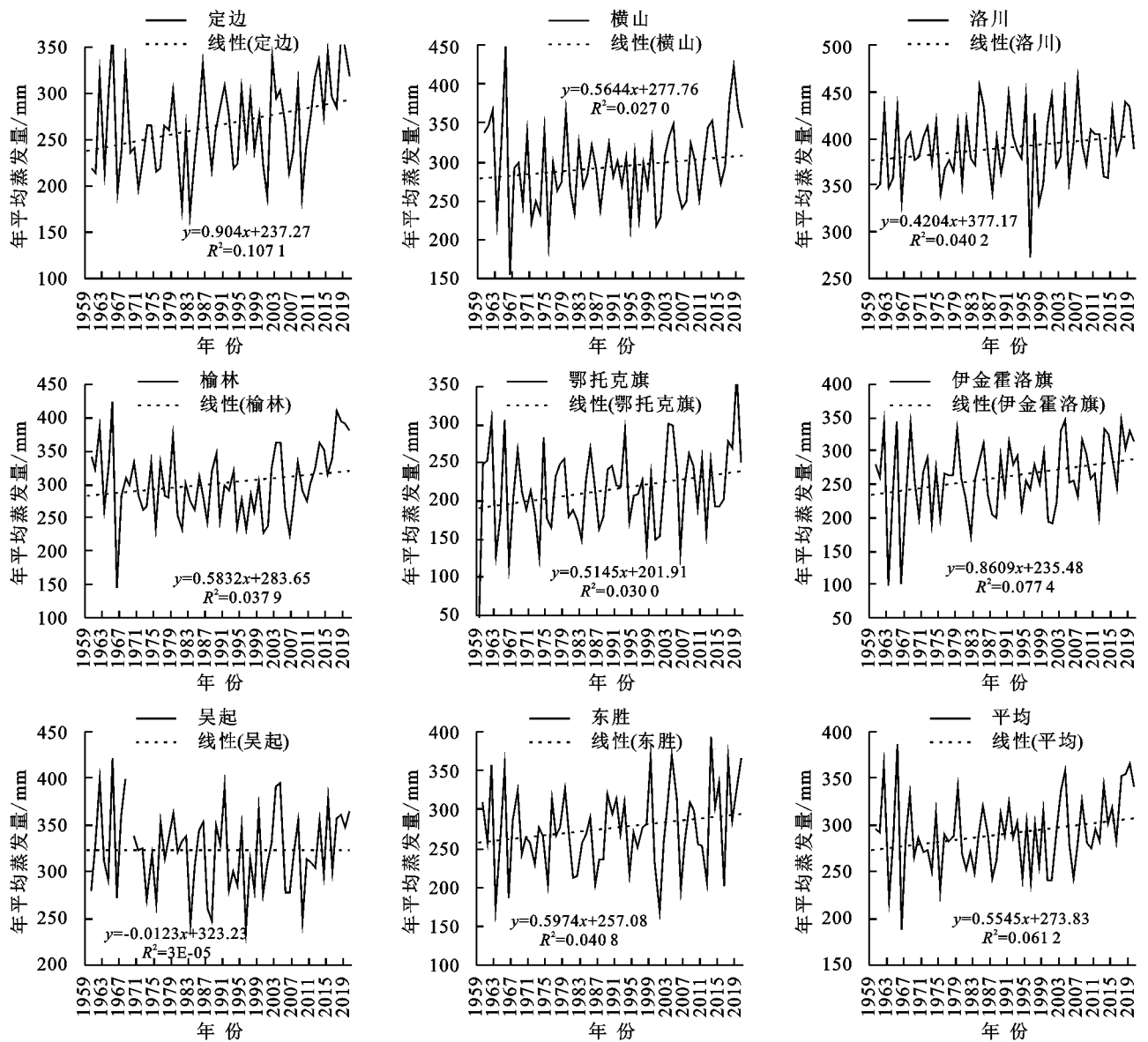


图4 1959—2019年研究区年蒸发量变化曲线

研究区年平均蒸发曲线UF整体呈波动上升,大部分位于 $\alpha = 0.05$ 显著性临界线范围内,说明近60年平均蒸发在该期间呈现不显著上升趋势,与线性趋势分析的结果一致。曲线UF在1962—1963年、1965—2002年、2005—2011年均 $UF(k) < 0$,这说明,沙地平均蒸发量在此期间呈现降低的趋势;而在2003—2004年和2012—2019年均 $UF(k) > 0$,则表明在此期间呈现增加的趋势,且在2012年后上升幅度迅速加快。曲线UF和UB在1971—1988年几乎全部重合,有多个交点,且均处于 $\alpha = 0.05$ 显著性临界线范围内。1971年是沙地1959—2019年平均蒸发量突变的始发时间,且在1971—1988年存在显著的突变。在1999—2000年和2016—2017年UF曲线和UB曲线均有1个交点,这表明降水在1999—2000年和2016—2017年又发生单独的2次突变,且在该突变之后UF曲线继续呈上升趋势,表明区域蒸发量上升趋势持续发展。

3.3 气候变化周期性分析

3.3.1 气温周期变化分析 以沙地年均气温为基础值,进行小波周期分析。由图8可知,定边、横山、洛川、榆林站年平均气温小波系数等值线在14~16,19~23,26~29年左右时间尺度上较为密集,出现小波系数高、低值中心变化;鄂托克旗、伊金霍洛旗、吴起、东胜站年平均气温小波系数等值线在4~9,10~16,19~23,25~30年左右时间尺度上较为密集,出现小波系数高、低值中心变化。区域年平均气温从1960—1970年存在4~6,8~12,15~30年的周期振荡,从1970—2007年存在4~6,10~15,18~23,25~30年的4个振荡周期,从2007年之后又出现4~6,8~12,15~30年的3个振荡周期,其中以25~30年的周期振荡特征最为明显。

结合图8的小波方差图可知,定边、横山、洛川、鄂托克旗、区域平均的小波方差仅在28年处存在单峰,吴起站小波方差在4,7,13,28年达到极值,伊金

霍洛旗站小波方差在 15, 28 年达到极值, 榆林和东胜站小波方差存在 7, 13, 28 年 3 个峰值, 并均在 28 年

最大, 表明 28 年为第 1 主周期, 该结果明确了气温小波系数时间序列等值线图所揭示的周期。

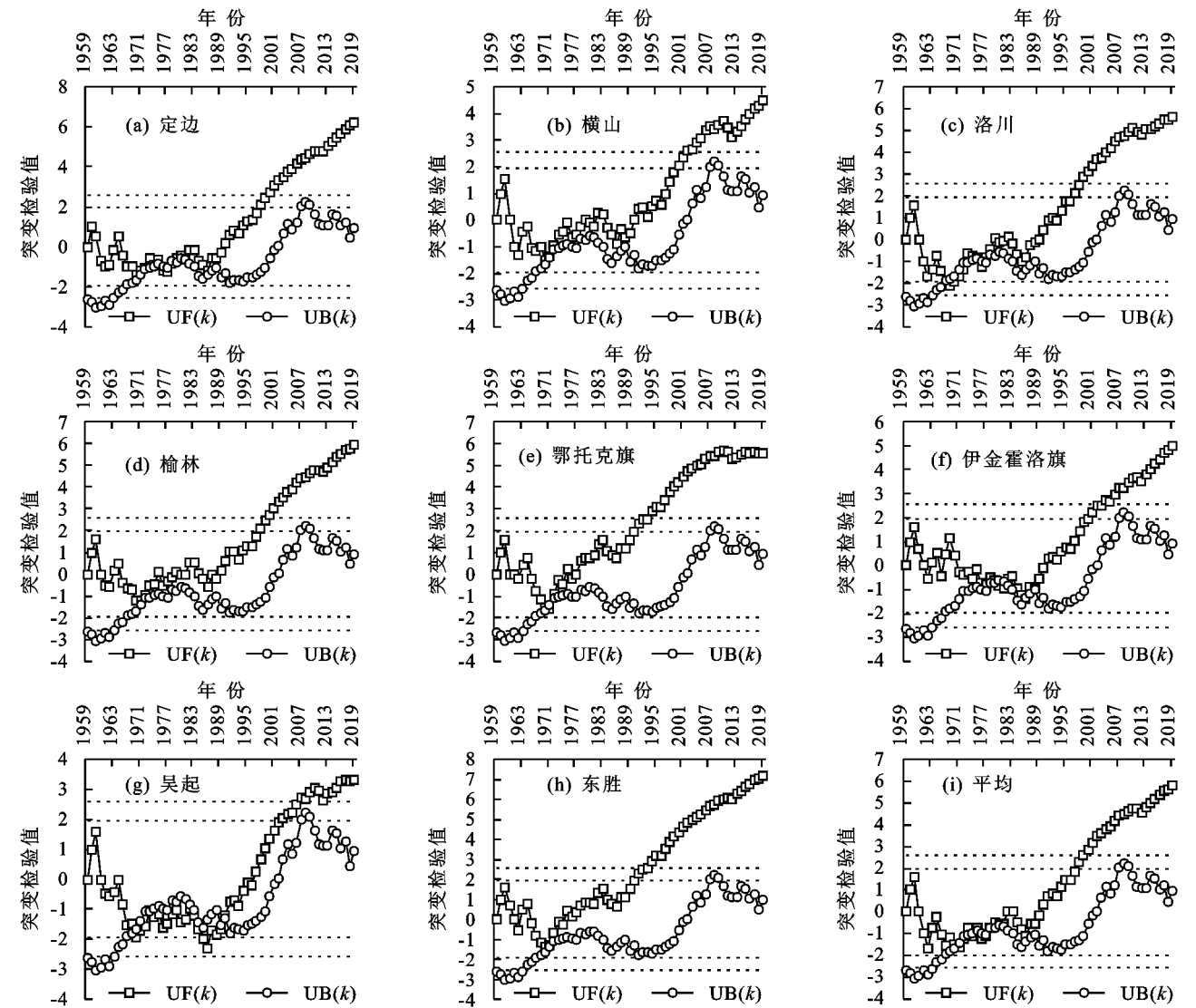


图 5 1959—2019 年研究区年均气温突变检验

3.3.2 降水周期变化分析 以沙地年降水为基础值, 进行小波周期及分析。由图 9 可知, 各站年降水量小波系数等值线在 3~5, 5~9, 10~16, 20~30 年左右时间尺度上较为密集, 综合分析可得, 各站年降水量从 1960—1980 年存在 3~5, 6~9, 10~16, 20~30 年的周期振荡, 出现小波系数高、低值中心变化。而从 1980—2005 年存在 5~15, 17~25, 25~30 年的 3 个振荡周期, 从 2005 年之后又出现 6~10, 12~15, 20~30 年的周期振荡, 其中 20~30 年的周期振荡最明显。

结合图 9 的小波方差图可知, 各站均存在多个峰值, 诸如, 定边站小波方差在 3~9, 13, 28 年达到极值, 东胜站小波方差在 4~5, 7, 13~14, 22, 28 年达到极值, 鄂托克旗站小波方差在 4~5, 13, 22 年达到极值, 吴起站小波方差在 4~13, 28 年达到极值, 洛川、伊金霍洛旗站小波方差在 4~5, 13, 28 年达到极值, 横山、榆林站小波方差在 7, 13, 28 年达到极值; 但各站均在 28 年附近呈现出

最大值, 表明其为各站降水的第 1 主周期。结果明确了降水小波系数时间序列等值线图所揭示的周期。

3.3.3 蒸发周期变化分析 以沙地年降水量与气温为基础值, 运用公式计算求得的年蒸发量, 并对其进行周期变化分析。由图 10 可知, 定边、横山、洛川、榆林、鄂托克旗、东胜站年蒸发量小波系数等值线均在 3~5 年短时间尺度上较为密集; 定边、横山、榆林、吴起站年蒸发量小波系数等值线均在 10~15 年中时间尺度上较为密集; 洛川、鄂托克旗、伊金霍洛旗、吴起、东胜站年蒸发量小波系数等值线均在 20~30 年长时间尺度上较为密集。进一步分析区域蒸发量周期变化, 区域平均年蒸发量从 1960—1970 年存在 3~5, 3~8, 11~15, 20~30 年的周期振荡, 从 1970 年之后到 2019 年存在 5~10, 18~24, 25~30 年的 3 个振荡周期, 其中 20~30 年的周期振荡最强。

结合图 10 的小波方差图可知, 定边、横山站小波方

差存在3个峰值,洛川站存在2个峰值,榆林、吴起站仅存在单一峰,但其极值均为28年处,表明蒸发量以28年为第1主周期;东胜站小波方差在4,12,22,28年达到极值,伊金霍洛旗站小波方差在5,8,13,22,28年达到极值,且均在22,28年最大,表明年蒸发量存在22,28年的第1主周期;鄂托克旗站小波方差在13,22年达到极值,

且22年最大,表明年蒸发存在22年的第1主周期。为进一步明确区域蒸发量周期分布,针对区域平均蒸发量的小波方差图进行分析可知,其在4,7,14,22,28年达到极值,且28年处最大,表明区域年蒸发量以28年的第1主周期,22,14年的第2主周期,7年的第3主周期和4年的第4主周期。

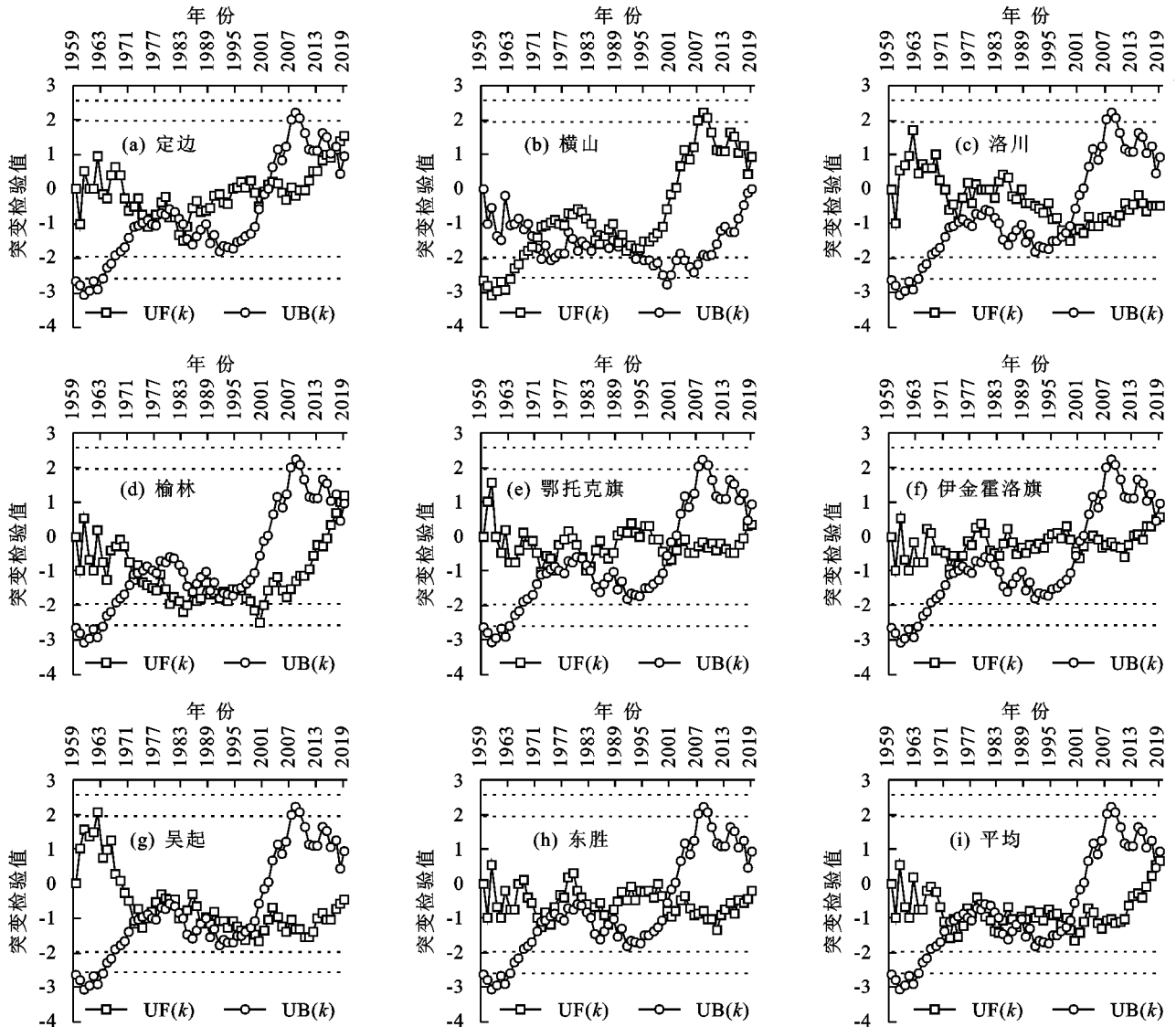


图6 1959—2019年研究区年降水量突变检验

3.4 暖湿化对区域植被的影响

3.4.1 植被覆盖的时间变化特征 1998—2019年沙地生长季NDVI值(图11)在0.47~0.82波动,总体呈现波动增加趋势,变化率为0.135/10 a。NDVI值变化分为4个阶段,其中1998—2002年呈缓慢下降趋势,2002—2004年呈急速上升趋势,2005—2018年呈现小波幅的总体增长趋势,2018—2019年NDVI均值出现了大幅度下降。

3.4.2 毛乌素沙地NDVI变化对气候变化的响应 由图11可知,1998—2019年沙地生长季平均气温呈现小幅下降趋势,降幅仅为0.028℃/10 a;降水量表现为大幅波动上升趋势,上升幅度呈51.92 mm/10

a;蒸发量也呈现上升趋势,幅度达30.12 mm/10 a。该结果表明,1998—2019年毛乌素沙地气候在生长季的暖湿化趋势及水循环动力持续增强。

为探索研究区气候因子与植被的响应关系,本文绘制了其时间序列对照图。由图11可知,平均气温的年际变化与NDVI的年际变化总体上变化趋势一致,仅在2018年随着气温的小幅下降,NDVI值呈现大幅上升;降水的年际变化与NDVI的年际变化在2000—2002年,2014—2016年呈现相反的增减趋势,其余年份的增减趋势均一致;蒸发的年际变化与NDVI的年际变化在2000—2002年、2009—2011年、2013—2017年呈现相反的增减趋势。为进一步探索其间响应关系,本文基于

经典统计学原理进行了相关性分析发现,沙地生长季 NDVI 与降水和蒸发均呈显著正相关,相关系数分别为 0.479($p<0.05$)和 0.500($p<0.05$),而与气温呈负

相关,相关系数仅为 0.041($p>0.05$)。基于上述分析可知,气候因子对植被 NDVI 的响应关系为温度<降水<蒸发。

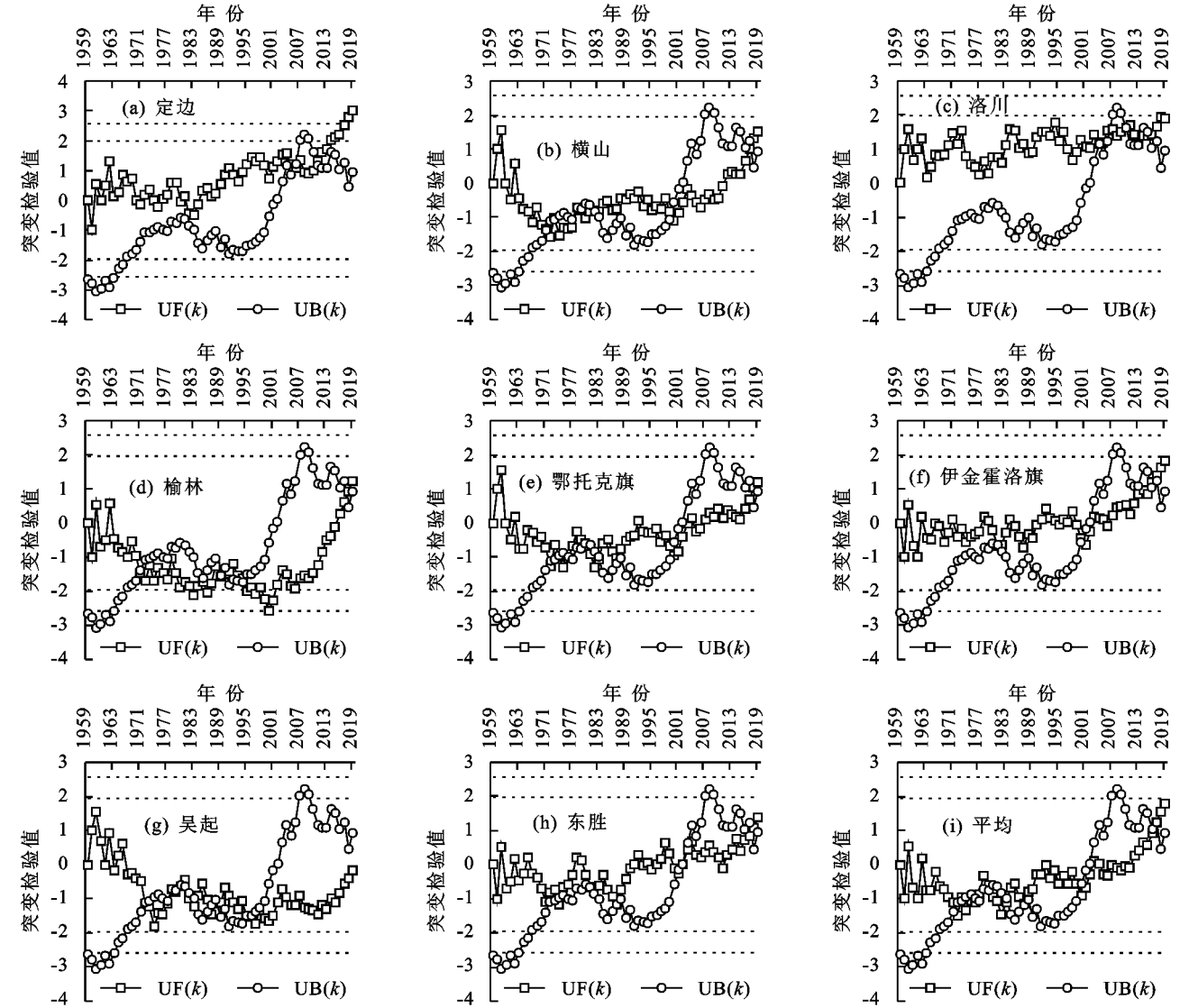


图 7 1959—2019 年研究区年蒸发量突变检验

4 讨论

近几十年来,中国西北地区暖湿化逐渐成为本领域研究的热点与重点问题。由于暖湿化现象存在不确定性,不同地区气候因子的变化特征异质性明显,且其与区域植被变化关系复杂。本研究表明,受西风环流、高原季风和东亚季风环流的综合作用,毛乌素沙地区域气象因子时空特征具有明显的区域性和复杂性。研究区气温、降水及蒸发均呈上升趋势,区域气候向暖湿化趋势发展,该结果验证了施雅风^[15]在 2003 年所提出的西北地区气候暖湿化发展的预测,也与张强等^[16]、Luo 等^[17]及 Huo 等^[18]在该区域对气候因子变化特征的研究结果基本一致,即区域环境因子变化显著。

全球气温上升趋势显著,区域变暖已明确。降水与蒸发同样作为衡量研究区域暖湿化的重要指标,二者呈显著波动上升趋势,变湿增强,这与张强等^[19]基于多源

数据进行的西北暖湿化的时空特征分析结果相似。前人^[19]通过构建干旱指数,并提出西北地区于 21 世纪开始进入增湿期。然而,本文针对研究区各站及区域平均降水与蒸发特征进行 M-K 突变分析发现,突变均起始于 19 世纪 70 年代,且在 80—90 年代带存在显著的突变,气候由“干”转“湿”过程虽然也具有年代性,但时间节点略有不同。首先,推测这与研究区位置有关,区域气候条件受多因素影响,具有显著的空间异质性^[20];其次,可能与数据的时间序列长短有关,百年长序列^[19,21]、50 年以上中序列^[22]和 30 年左右短序列^[23]的气象因子特征及变化规律不统一。本文着重分析了区域气象因子的小波周期及方差分析,揭示其主要存在 28 年的第 1 主周期,5~10 年的小周期更换频繁,与胡永宁等^[24]在沙地典型区乌审旗研究出的结果相一致。气象因子周期性与年际性共同阐释了研究区暖湿化的变化趋势。

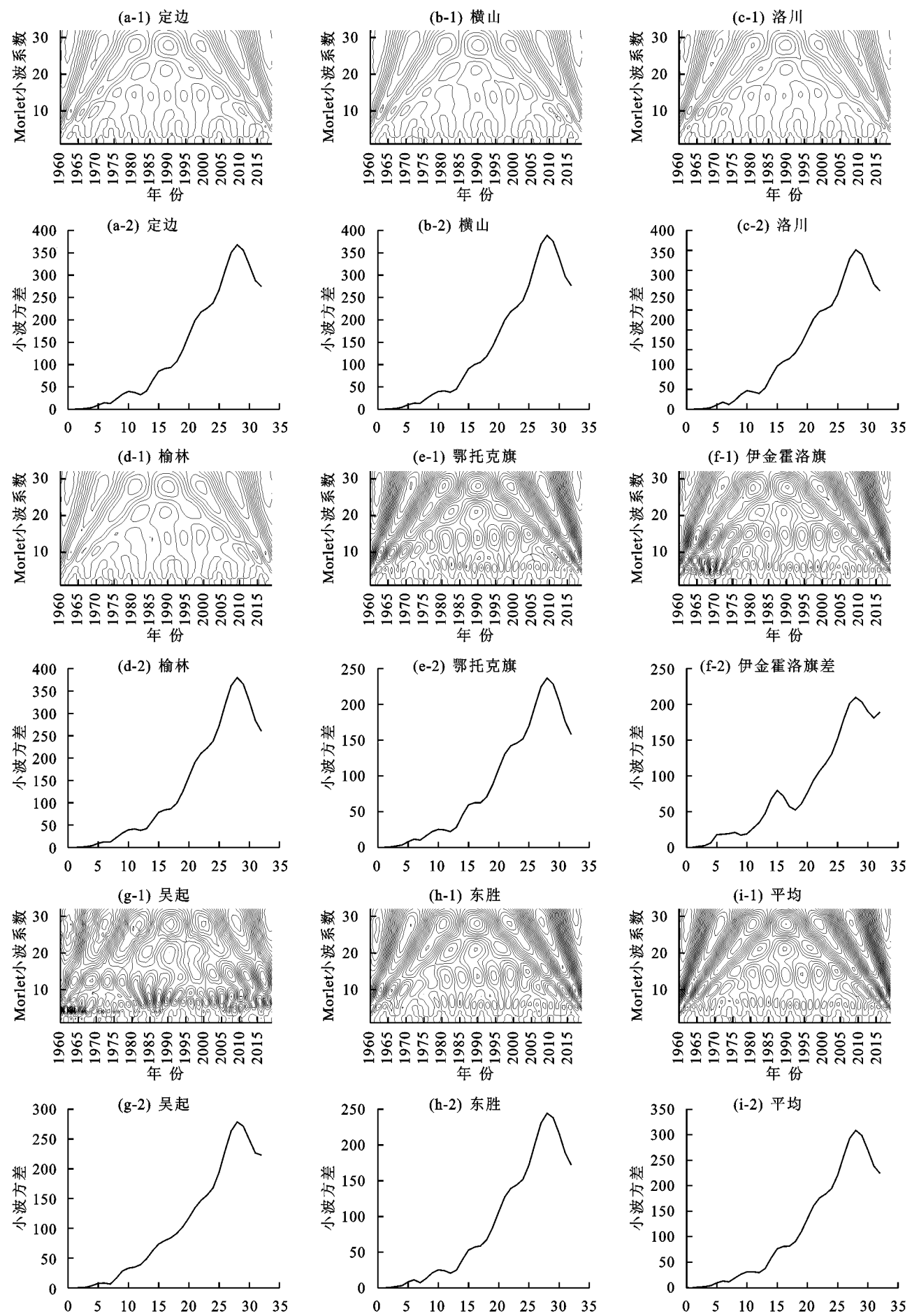


图 8 1960—2019 年研究区年均气温 Morlet 小波系数和小波方差

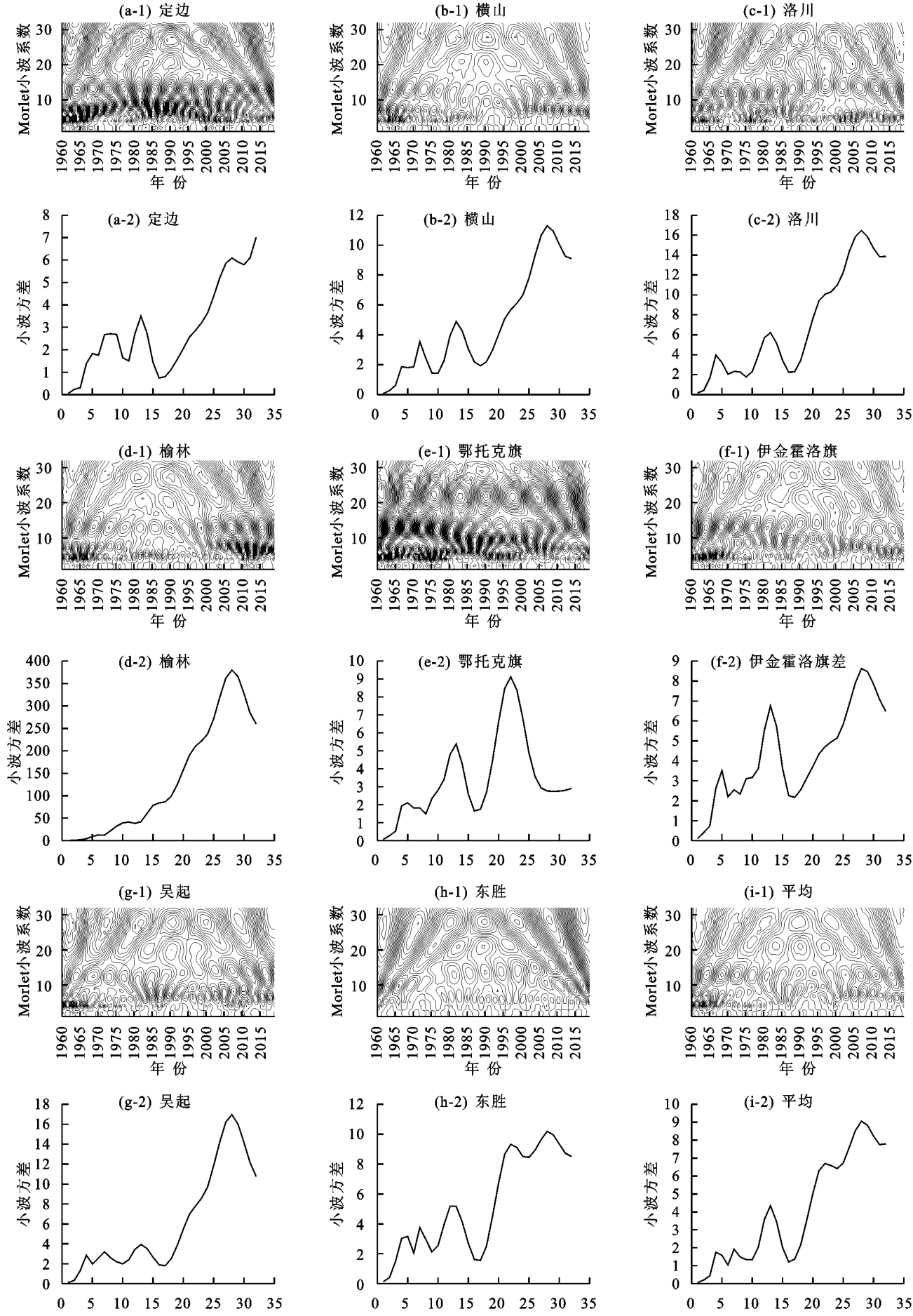


图 9 1960—2019 年研究区年降水量 Morlet 小波系数和小波方差

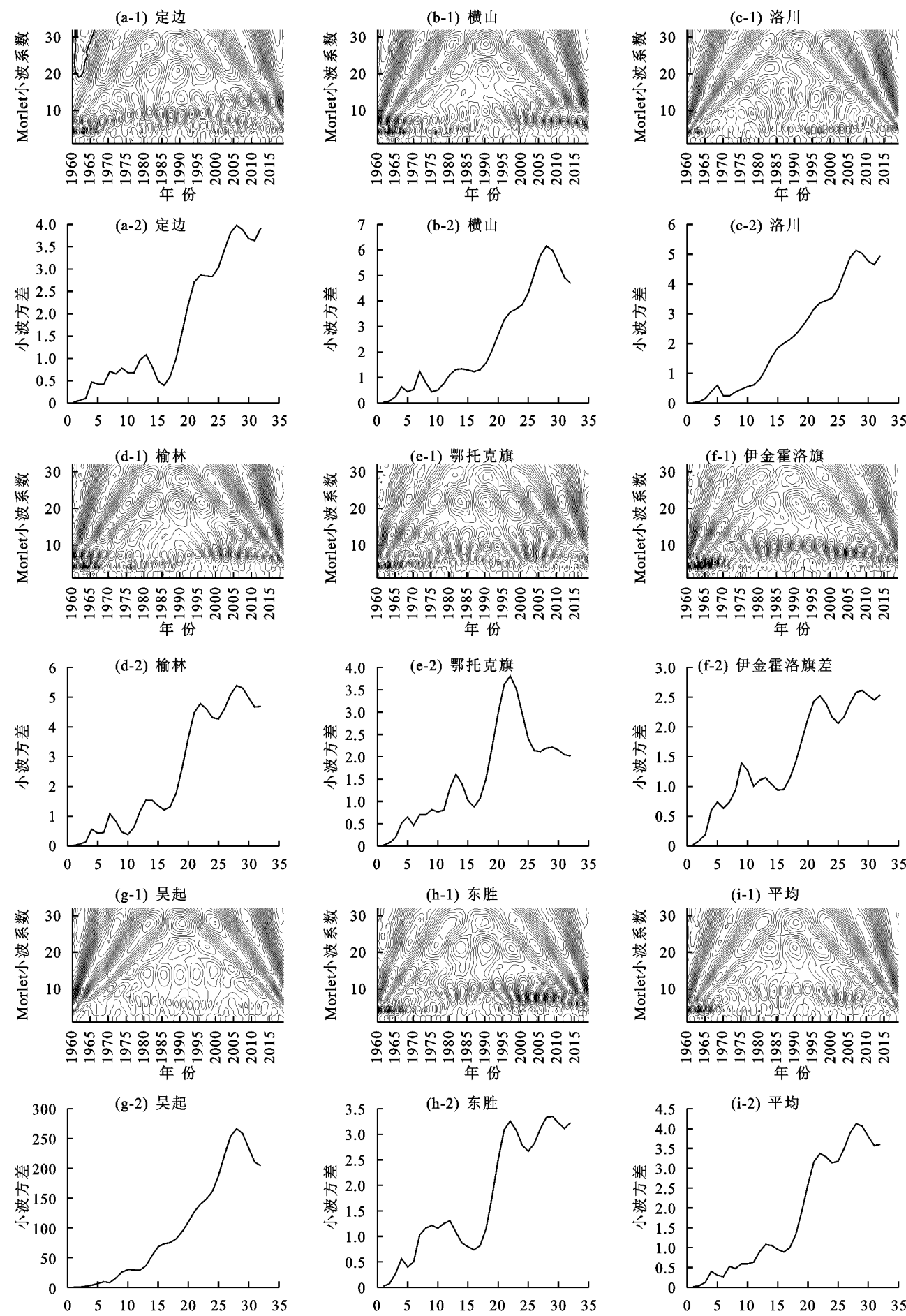


图 10 1960—2019 年研究区年蒸发量 Morlet 小波系数和小波方差

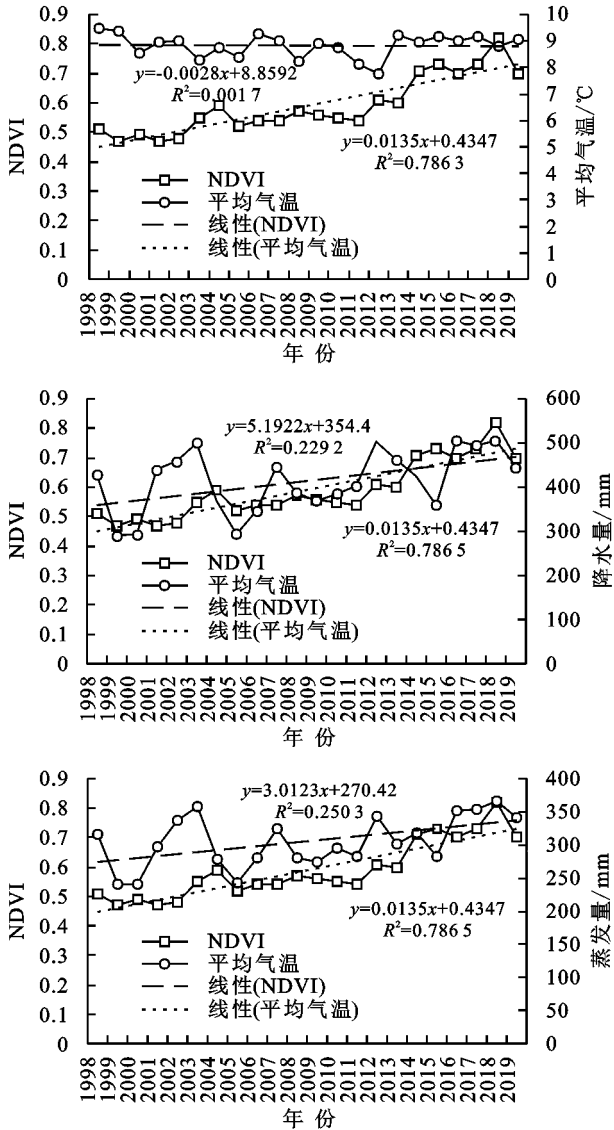


图 11 1998—2019 年研究区生长季 NDVI 与气温、降水量、蒸发量的关系

气候的变化将为该区域生态环境带来全新的机遇与挑战^[25]。毛乌素沙地绿色植被生态演变向好趋势发展显著,气候变化是关键性驱动因素^[26]。本文基于 NDVI 时间序列数据特征分析,探讨其与气象因子间的响应关系发现,研究区植被 NDVI 值呈上升趋势,杨梅焕等^[27]的研究结果证实了这一趋势。并找出植被与蒸发和降水呈正相关的响应关系,蒸发显著性大于降水,证实二者是黄土高原区植被变化的主要限制因素。

蒸发升高与植被的水资源利用率提升有密切联系,对植被生长起到促进作用。然而,由于气象因子的时空差异性,蒸发也会抑制植被变化,针对这种现象,应引起学者们相应关注。植被与气温在研究中呈负相关的响应关系,证实生长季气温降低对植被变化起抑制作用,这与郭紫晨等^[28]指出毛乌素沙地植被 NDVI 上升与气温升高存在关联的结论相似,但在气温变化趋势性与二者相关性方面存在差异。结合本

研究结果,推测气温与植被响应关系存在滞后性和空间异质性^[29],需要将来深化研究。

5 结论

(1)毛乌素沙地 1959—2019 年各站及区域年均气温、降水及蒸发均呈上升趋势,区域气候向暖湿化趋势发展。

(2)沙地年平均气温、降水及蒸发在时间序列上以 20~30 年的周期振荡最明显,且在 28 年处达峰,为毛乌素沙地气象因子变化的第 1 主周期。

(3)毛乌素沙地 1998—2019 年生长季 NDVI 数据呈上升趋势,与同期气候因子响应明显,关系表现为蒸发>降水>温度。

研究结果可为当地政府及相关部门正确认识毛乌素沙地气候暖湿化现象提供了重要信息和科学依据,同时也对合理开发利用土地、保护植被起到推动作用。

参考文献:

[1] Zhang Y, Luo P P, Zhao S F, et al. Control and remediation methods for Eutrophic Lakes in recent 30 years [J]. Water Science and Technology, 2020, 81(6): 1099-1113.

[2] Zhu Y H, Zhang S, Sun B, et al. Spatial variability of soil organic carbon in the West Liao River Basin [J]. Israel Journal of Ecology and Evolution, 2018, 64(1): 25-34.

[3] 朱永华,席小康,马鹏飞,等.植被净初级生产力时空变化及其影响因素分析[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 21-26.

[4] 朱永华,张生,赵胜男,等.气候变化与人类活动对地下水埋深变化的影响[J].农业机械学报, 2017, 48(9): 199-205.

[5] 徐志伟,鹿化煜.毛乌素沙地风沙环境变化研究的理论和新认识[J].地理学报, 2021, 76(9): 2203-2222.

[6] 朱海,黄观文.毛乌素沙地地区 1960—2018 年气温时空特征分析[J].测绘地理信息, 2021, 46(增刊 1): 276-281.

[7] 罗叙,李建平,张翼,等.荒漠草原土壤水分时空变化对降水变化的响应[J].水土保持研究, 2021, 28(4): 142-150, 158.

[8] 乔翠平,王金娜,王艳艳,等.毛乌素沙地风积沙表面蒸发试验研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 102-108.

[9] 施雅风,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.

[10] Ma M G, Wang J, Wang X M. Progress of the relationship between the interannual variation of vegetation and climate based on remote Sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(3): 421-431.

[11] Li P, Wang J, Liu M M, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015 [J]. Catena, 2021, 203(1): e105331.

- tary boundaries: Guiding human development on a changing planet [J]. *Science*, 2015, 347: 736-747.
- [12] 崔旺来, 蔡莉, 奚恒辉, 等. 基于土地利用/覆盖变化的浙江大湾区生态安全评价及多情景模拟分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2136-2148.
- [13] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.
- [14] 童小容, 杨庆媛, 毕国华. 重庆市 2000—2015 年土地利用变化时空特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(11): 2481-2495.
- [15] 王颖慧, 丁建丽, 李晓航, 等. 伊犁河流土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响: 基于强度分析模型[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3106-3118.
- [16] 孙彦旭, 周自翔, 米朝娟. 基于土地利用覆被变化 (LUCC) 的人类活动与流域生物多样性灰色关联分析[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(6): 1782-1792.
- [17] 武爽, 冯险峰, 孔玲玲, 等. 气候变化及人为干扰对西藏地区草地退化的影响研究[J]. *地理研究*, 2021, 40(5): 1265-1278.
- [18] 杨春艳, 沈渭寿, 王涛. 近 30 年西藏耕地面积时空变化特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 264-271.
- [19] 闫立娟. 气候变化对西藏湖泊变迁的影响 (1973-2017) [J]. *地球学报*, 2020, 41(4): 493-503.
- [20] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.
- [21] 陈安, 李景吉, 王茂生, 等. 西藏“一江两河”流域生态系统服务变化及权衡与协同关系研究[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 313-319.
- (上接第 172 页)
- [12] 高桥浩一郎, 王长根. 根据月平均气温, 月降水量推算蒸散量[J]. *气象科技*, 1980(增刊 4): 50-52.
- [13] 陈佳龙. 2015 年夏季那曲地区温度变化特征研究[J]. *自然科学*, 2021, 9(5): 617-625.
- [14] 王红瑞, 叶乐天, 刘昌明, 等. 水文序列小波周期分析中存在的问题及改进方式[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(8): 1002-1008.
- [15] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [16] 张强, 杨金虎, 王玮, 等. 西北干旱区气候暖湿化的进程和多尺度特征及其对生态植被的影响[J]. *气象学报*, 2021, 18(1): 113-127.
- [17] Luo P P, Sun Y T, Wang S T, et al. Historical assessment and future sustainability challenges of egyptian water resources management [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263(2): e121154.
- [18] Huo A D, Peng J B, Cheng Y X, et al. Hydrological analysis of loess plateau highland control schemes in Dongzhi Plateau [J]. *Front Earth Science*, 2020, 8(2): e528632.
- [19] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. *科学通报*, 2021, 66(28): 3757-3771.
- [20] 闫宝伟, 刘昱, 江慧宁, 等. 考虑降雨空间异质性的动态临界雨量预警指标推求[J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 342-348.
- [21] 师玉峰, 梁思琦, 彭守璋. 1901—2017 年黄土高原地区气候干旱的时空变化[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1): 283-289, 325.
- [22] 朱海, 黄观文. 毛乌素沙地地区 1960—2018 年气温时空特征分析[J]. *测绘地理信息*, 2021, 46(增刊 1): 276-281.
- [23] 张乐艺, 李霞, 冯京辉, 等. 2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 276-286.
- [24] 胡永宁, 秦艳, 王林和, 等. 1960—2009 年毛乌素沙地腹地气候变化的多重时间尺度分析: 以乌审旗为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(2): 124-130.
- [25] Zhu Y H, Zhang S, Luo P P, et al. Assessing eco-hydrological factors variations and their relationships at different spatio-temporal scales in semiarid area, northwestern China [J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(8): 2368-2381.
- [26] Zhu Y H, Luo P P, Zhang S, et al. Spatiotemporal analysis of hydrological variations and their impacts on vegetation in semiarid areas from Multiple Satellite Data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4177-4196.
- [27] 杨梅焕, 张美晨. 毛乌素沙地东南缘 NDVI 植被变化特征分析[J]. *地理空间信息*, 2020, 18(5): 105-108.
- [28] 郭紫晨, 刘树林, 康文平, 等. 2000—2015 年毛乌素沙区植被覆盖度变化趋势[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 1099-1107.
- [29] 程杰, 杨亮彦, 黎雅楠. 2000—2018 年陕北地区 NDVI 时空变化及其对水热条件的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(5): 111-119.