

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2022.11.006

薛华柱,李阳阳,董国涛.基于 SPEI 指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征[J].中国农业气象,2022,43(11):923-934

基于 SPEI 指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征*

薛华柱¹, 李阳阳¹, 董国涛^{1,2,3**}

(1.河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000; 2.黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 3.黑河水资源与生态保护研究中心, 兰州 730030)

摘要: 利用河西走廊 1965–2017 年 21 个气象站点逐日气象数据, 基于 Penman-Monteith 蒸散模型计算不同时间尺度的 SPEI, 分析河西走廊气象干旱的变化趋势、发生频率和持续时间等时空变化特征。结果表明: (1) 近 53a 来河西走廊月、季、年尺度 SPEI 均呈显著上升趋势, 即干旱有显著减弱趋势, 但个别站点干旱持续时间较长, 其中武威站在 2013 年持续时长达到 11 个月; (2) 河西走廊四季均存在变湿趋势, 且冬季变湿显著, 其中春、夏、秋季干旱呈不稳定变化, 而冬季在 1989 年前后发生突变, 由干旱向湿润突变; (3) 河西走廊干旱的空间分布具有明显的区域特征, 干旱区域主要集中在西北部, 湿润区域主要集中在南部; (4) 不同时间尺度各等级干旱发生频率的变化规律具有一致性, 轻中旱发生频率远高于重特旱, 且年、季尺度重特旱发生相对高频区空间分布特征与轻中旱正好相反。总之, 近 53a 来河西走廊干旱呈减弱趋势, 有利于当地的农业生产开展和生态环境改善, 但该区域气候变化较复杂, 需要注意局部干旱情况。

关键词: SPEI; Penman-Monteith 蒸散模型; 时空特征; 气象干旱; 河西走廊

Analysis of Spatial-temporal Variation Characteristics of Meteorological Drought in the Hexi Corridor Based on SPEI Index

XUE Hua-zhu¹, LI Yang-yang¹, DONG Guo-tao^{1,2,3}

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Yellow River Conservancy Commission, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003; 3. Heihe Water Resources and Ecological Protection Research Center, Lanzhou 730030)

Abstract: Using the daily meteorological data of 21 meteorological stations in the Hexi corridor from 1965 to 2017, SPEI at different time scales was calculated based on the Penman-Monteith evapotranspiration model, and the temporal and spatial variation characteristics of meteorological drought in the Hexi corridor, such as the change trend, occurrence frequency and duration, were analyzed. The results showed that: (1) in the past 53 years, the SPEI of the Hexi corridor showed a significant upward trend on the monthly, seasonal and annual scales, which indicated that the drought had a significant weakening trend, but the drought lasted for a long time at individual stations, and the drought lasted for 11 months in 2013 in Wuwei. (2) The Hexi corridor had a trend of wetting in four seasons, and it was significantly wet in winter. Among them, the in spring, summer and autumn presented unstable drought changes, while the sudden change in winter around 1989 indicated the trend from drought to wet. (3) The spatial distribution of drought in the Hexi corridor had obviously regional characteristics. The arid area was mainly concentrated in the northwest, and the humid area was mainly concentrated in the south. (4) The frequency variety law of different

* 收稿日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51779099; 42061056)

** 通讯作者: 董国涛, 博士, 正高级工程师, 主要从事水文水资源遥感方面研究, E-mail: dongguotao@hhlj.yrcc.gov.cn
第一作者联系方式: 薛华柱, E-mail: xhz@hpu.edu.cn

grades drought occurrence at different time scales was consistent. The frequency of mild to moderate droughts was much higher than that of severe and extreme droughts, and the spatial distribution characteristics of relatively high frequency areas of severe and extreme droughts on the annual and seasonal scales were opposite to those of mild to moderate droughts. Generally, the drought in the Hexi corridor had weakened in the past 53 years, which was beneficial to the local agricultural production and ecological environment. However, the climate change in this region is complex, and local drought needs to be paid attention to.

Key words: SPEI; Penman-Monteith equation; Spatial-temporal characteristics; Meteorological drought; Hexi corridor

干旱是最具有破坏性的自然灾害之一,对生态、经济和社会造成严重的影响^[1]。已有研究表明,随着气候变化的进一步加剧^[2-3],干旱的严重程度和频率预计将增加,将对陆地植被净初级生产力造成更严重的损害,甚至使生态系统达到崩溃的临界值^[4]。目前干旱类型主要包括气象、农业、水文和社会经济干旱,其中气象干旱是导致各类干旱的主要原因^[5],通常由气候异常引起,是农业干旱的先兆。河西走廊是西北地区最主要的商品粮基地和经济作物集中产区,研究其气象干旱时空变化特征,对当地农业生产、生态环境和经济发展具有重要意义。

干旱是一种受多种因素综合影响的复杂现象,对于干旱状况的定量化描述是干旱分析的关键。国际上提出了很多干旱监测指数,最常用的有帕默尔干旱指数 PDSI、标准化降水指数 SPI 和标准化降水蒸散指数 SPEI。其中,PDSI 指数缺乏时空比较的有效性,在干旱等级划分上具有较强的主观性。SPI 仅基于降水,不考虑温度和蒸散对干旱条件的影响。而 Vicente-Serrano 等^[6]于 2010 年提出的 SPEI,既保留了 PDSI 对潜在蒸散敏感的优点,又具备 SPI 多时间尺度特征,适于全球变暖背景下干旱特征分析^[7-10]。Haile 等^[11]采用 SPEI 指数分析非洲之角的干旱趋势和周期,发现该地区干旱总体呈增加趋势,但受气候和环境条件的影响,存在年代际波动。杨睿等^[12]基于 SPEI 指数对渭河流域气象干旱的演变、趋势和持续时间等时空变化特征分析,发现渭河流域有明显的干湿周期变化,但整体上呈变干趋势,且流域东北部干旱发生频繁,与历史干旱资料记录一致,表明 SPEI 适用于全球变暖背景下的干旱评估与监测。SPEI 计算方法主要有 Thornthwaite 和 Penman-Monteith 两种方法,但两种方法计算潜在蒸散量时考虑的气象要素不同,计算的 SPEI 值会有所差异^[13]。Thornthwaite 方法所需气象要素仅有温度,

计算简便。而 Penman-Monteith 方法除选取温度外,还将太阳辐射、风速和站点海拔等因子纳入潜在蒸散计算过程中。Zhou 等^[14]基于两种潜在蒸散量模型计算 SPEI,评估 1961–2017 年中国干旱、半干旱、半湿润以及湿润气候区干旱的时空分布,发现在湿润地区,SPEI-TH 和 SPEI-PM 都可以较好地评估干旱,但在半干旱和干旱地区,温度决定的 Thornthwaite 可能高估了干旱地区潜在蒸散的变化,而 SPEI-PM 可以更好地评估干旱情况,这与 Chen 等^[8]的结论一致。刘柯等^[15]指出在西北干旱区,基于 Thornthwaite 方法计算的 SPEI 过度夸大了温度对该地区干旱的影响,需谨慎使用。

河西走廊位于中国西北干旱地区,是西北地区重要的生态安全屏障。由于气候、地理环境和人类活动等因素的影响,河西走廊干旱频发,对当地农业生产和社会经济造成巨大影响^[16]。目前大部分干旱研究主要针对在西北地区,也有学者针对河西走廊地区干旱进行讨论。王春林等^[17]采用 SPI 指数分析河西走廊 15 个气象站点的干旱频率和干旱强度等的演化趋势,发现该地区有 66.7% 的站点在年和季节尺度上都呈干旱减弱趋势。而梁丹等^[18]基于 4 种干旱指标在河西走廊进行适用性评估,发现 SPEI 模拟能力好于 SPI。Fu 等^[19]采用 SPI 和 SPEI 监测河西走廊干旱状况的演变,结果表明 SPEI 对量化干旱状况更加可靠,且该地区的干旱程度呈降低变化,同时也指出随着未来全球变暖的加剧,蒸散量在该地区干旱监测研究中的作用不容忽视。总体上基于 SPEI 可以很好地揭示河西走廊气象干旱时空变化特征,但这些研究计算 SPEI 多采用 Thornthwaite 方法,只考虑平均温度和纬度,未考虑太阳辐射、湿度和风速等气候因素的影响,可能高估了全球变暖下的干旱强度和持续时间。在中国西北地区,基于 Penman-Monteith 方法的 SPEI 对干旱趋势分析更为

客观^[14]。因此, 本研究选择河西走廊作为研究区, 基于 Penman-Monteith 方法计算不同时间尺度 SPEI, 分析河西走廊在年、季尺度下气象干旱时空变化特征, 以期为区域农业生产、经济发展提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

河西走廊位于中国西北部, 地理位置处于 37°15′–42°69′, 92°27′–104°20′, 东西跨度约 1000km。流经河西走廊的三条主要河流自西向东为疏勒河、黑河和石羊河, 均发源于祁连山。受大陆性气候和地形的影响, 河西走廊水热资源分布不均匀, 年降水量具有明显的空间差异, 大部分地区年平均降水量在 50~150mm, 年平均蒸发量 1500~2500mm^[19]。研究区内气象站点分布如图 1 所示。

1.2 数据来源及其处理

河西走廊及其周边 21 个气象站点的逐日降水量 (mm)、最高气温 (°C)、最低气温 (°C)、平均气温 (°C)、相对湿度 (%)、风速 (m·s⁻¹)、日照时数 (h)、经纬度 (°) 和海拔高度 (m) 从中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 获取, 时间序列为 1965–2017 年共 53a, 其中额济纳旗有 14 个月降水数据缺失, 对缺测数据采用均值替换法进行插补, 即将该站点历年同一月份的数据求均值, 代替缺失月份的数据。

1.3 研究方法

1.3.1 SPEI 指数计算

SPEI 通过计算月降水量与潜在蒸散量的差值经标准化处理后得到, 计算过程如下^[13]。

(1) 计算逐月潜在蒸散量 PET。

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

式中, PET 为潜在蒸散量 (mm); Δ 为温度随饱和水汽压变化的斜率 (kPa·°C⁻¹); U_2 为离地 2m 高处风速 (m·s⁻¹); e_a 为饱和蒸气压 (kPa); e_d 为实际蒸气压 (kPa); T 为平均气温 (°C); γ 为湿度表常数 (kPa·°C⁻¹); G 为土壤热通量密度 (MJ·m⁻²·d⁻¹)。

(2) 计算逐月降水量与潜在蒸发量差值。

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

$$\begin{cases} D_{i,j}^k = \sum_{m=13-k+j}^{12} D_{i-1,m} + \sum_{m=1}^j D_{i,m} & j < k \\ D_{i,j}^k = \sum_{m=j-k+1}^j D_{i,m} & j \geq k \end{cases} \quad (3)$$

式中, D_i 是计算时间尺度内降水与潜在蒸散量差值的累计值, $D_{i,j}^k$ 为第 i 年第 j 个月开始, k 个月内累积降水蒸散差值。

(3) 采用三参数 log-logistic 分布对 D_i 数据序列进行函数拟合。

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (4)$$

式中, 参数 α 、 β 和 γ 可以采用线性距 (L-moment) 方法拟合获得, 即

$$\begin{cases} \beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \\ \alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \\ \gamma = \omega_0 - \alpha\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta) \end{cases} \quad (5)$$

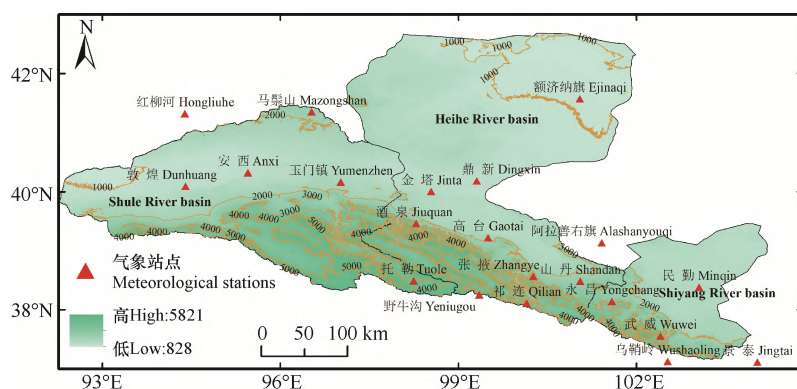


图 1 研究区及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of study area and meteorological stations

其中, $\Gamma(\beta)$ 是关于 β 的 Gamma 函数。由此得到 D_i 的累积概率分布函数, 即

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (6)$$

(4) 对累积概率分布函数进行正态标准化。超过某个 D_i 值的概率为 $P=1-F(x)$, 概率加权距 $\omega = \sqrt{-2\ln(P)}$ 。

$$\begin{cases} \text{SPEI} = \omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3}, & P \leq 0.5 \\ \text{SPEI} = -\left(\omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} \right), & P > 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

式中, 系数 $c_0 = 2.515517$; $c_1 = 0.802853$; $c_2 = 0.010328$; $d_1 = 1.432788$; $d_2 = 0.189269$; $d_3 = 0.001308$ 。

1.3.2 时间尺度设置

选用 1 个月时间尺度的 SPEI 值 (SPEI-1) 反映干旱短时间内的细微变化; 3 个月时间尺度的 5、8、11 月和翌年 2 月的 SPEI 值 (SPEI-3) 分别表示研究区春 (3-5 月)、夏 (6-8 月)、秋 (9-11 月)、冬 (12 月-翌年 2 月) 季 SPEI 值, 反映季节的干旱状况; 12 个月时间尺度的 SPEI 值 (SPEI-12) 描述研究区干旱的年际变化。

1.3.3 干旱等级划分

根据相关研究^[20]并结合河西走廊实际干旱情况, SPEI 干旱等级划分标准如表 1 所示。

表 1 SPEI 干旱等级划分

Table 1 Drought classifications based on SPEI

干旱等级 Drought grade	SPEI 值 SPEI value
无旱 Normal	$-0.5 < \text{SPEI}$
轻旱 Slight drought	$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$
中旱 Moderate drought	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$
重旱 Severe drought	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$
特旱 Extra severe drought	$\text{SPEI} \leq -2.0$

1.3.4 干旱程度及影响分析

(1) 干旱持续性

统计每个站点历年 $\text{SPEI-3} \leq -1.0$ 的连续月份, 将最长连续月份作为站点干旱最长持续时间。

(2) 干旱影响范围

用干旱站比评价年尺度 (SPEI-12) 内干旱影响

范围的大小。干旱站比指研究区域发生干旱站点数占该区域站点总数的百分比, 其计算式为

$$P_j = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (8)$$

式中, P_j 为第 j 年干旱站比 (%), m 为第 j 年 $\text{SPEI-12} \leq -0.5$ 的站点数量, M 为站点总数量, j 为年份。

(3) 干旱发生频率

计算河西走廊 1965 年 1 月-2017 年 12 月 SPEI-3、SPEI-12 的干旱频率, 即

$$F_i = \frac{w}{W} \times 100\% \quad (9)$$

式中, F_i 为 i 站点的干旱频率 (%), w 为时间序列中的干旱次数, W 为时间序列数, i 为不同站点。

1.3.5 时空变化分析

(1) 趋势检验和突变检验

采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验分析研究区干旱变化趋势^[21], 统计量 Z 值为正值表示呈增加趋势, 为负值表示呈减少趋势。 Z 值的绝对值大于 1.96、2.58 分别表明变化趋势通过 0.05 和 0.01 水平的显著性检验。

采用 M-K 突变检验对时间序列变化进行突变检验。M-K 突变检验是在时间序列随机独立的假定下, 分别计算顺序和逆序时间序列的秩序列, 得到统计量 UF 和 UB 。若 UF 或 UB 的值大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 小于 0 则呈下降趋势。若 UF 和 UB 两条曲线出现交叉点, 且交叉点在临界线之间, 交叉点对应的时刻便是突变开始时间。

(2) 反距离权重插值

反距离权重插值是基于地理学第一定律“相近相似”的基本假设, 即相似性会随着距离的减小而增大, 利用与插值点不同距离采样点的加权平均值来确定插值^[22]。采用反距离权重对 SPEI 指数倾向率和干旱频率进行空间插值, 计算式为

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{d_i^p} / \sum_{i=1}^n d_i^p \quad (10)$$

式中, S 为估计值, S_i 为第 i 个样本值 ($i=1, \dots, n$), d_i 为距离, n 为插值的气象站点数量, p 为距离的幂, 默认为 2。

1.4 数据处理

通过 R 语言程序包计算多时间尺度 SPEI (<https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/>), 采用

matlab 实现 M-K 趋势检验和突变检验, 利用 Google Earth Engine 云计算平台 (<https://earthengine.google.com>) 进行反距离权重插值, 使用 ArcGIS 软件制作各干旱特征的空间分布图。

2 结果与分析

2.1 河西走廊气象干旱随时间变化特征分析

2.1.1 多时间尺度 SPEI 值变化趋势

由图 2 可见, 不同时间尺度的 SPEI 时间序列变化趋势存在一定的差异。月尺度 SPEI (图 2a) 的波动频率最为频繁, 季尺度取每年 5、8、11 月和翌年 2 月的 SPEI-3 值 (图 2b), 其波动频率次之, 年尺度 SPEI (图 2c) 波动频率最小。不同时间尺度的 SPEI 对降水和潜在蒸散量的敏感性不同, 时间尺度越大, SPEI 对短期降水和潜在蒸散量的反映就越不明显, 仅长期降水和潜在蒸散才能使之发生波动, 这对于检测长期水分状况是合理的^[23]。根据表 1 中干旱级别划分标准, 当 SPEI 值小于 -0.5 时发生干旱, 统计年尺度 (图 2c) 发生干旱的年份有 1965、1966、1968、1970 年等共 17a, 其中 1965 年 SPEI 值最低, 说明该年发生的干旱最为严重。整体上, 月尺度、季尺度和年尺度 SPEI 线性倾向率分别为 $0.000622 \cdot 10a^{-1}$ 、 $0.0311 \cdot 10a^{-1}$ 、 $0.022 \cdot 10a^{-1}$, 均呈上升趋势, M-K 趋势检验计算 Z 值分别为 2.67、2.86、2.55, 其中月尺度和季尺度通过 0.01 水平的显著性检验, 年尺度通

过 0.05 水平的显著性检验, 说明 53a 河西走廊干旱有显著减弱趋势。

计算逐年 12 月 SPEI-12 的干旱站比, 由图 2d 可见, 近 53a 该区域干旱站比的平均值为 33.87%, 其中干旱站比超过 75% 的年份有 1965、1980、1997 年, 分别对应 SPEI-12 值为 -2.03、-1.36 和 -1.5, 这三年均为干旱年份, 即年尺度 SPEI 指数的干旱年份和干旱站比较高的年份结果一致。整体上干旱站比的线性倾向率为 $-0.0459 \cdot 10a^{-1}$, M-K 趋势检验计算 $Z = -2.26$, 通过 0.05 水平的显著性检验, 说明近 53a 该区域干旱范围有显著缩小趋势。

2.1.2 四季干旱指数变化趋势

为进一步分析河西走廊四季的变化趋势, 选取 5、8、11 月和翌年 2 月的季尺度 SPEI 分别代表春季 (3-5 月)、夏季 (6-8 月)、秋季 (9-11 月) 和冬季 (12 月-翌年 2 月) 四季的 SPEI, 研究期内四季变化趋势见图 3。由图可见, 春季 (图 3a)、夏季 (图 3b)、秋季 (图 3c) 和冬季 (图 3d) SPEI 分别以 $0.125 \cdot 10a^{-1}$ 、 $0.091 \cdot 10a^{-1}$ 、 $0.096 \cdot 10a^{-1}$ 和 $0.226 \cdot 10a^{-1}$ 的速率呈上升趋势, M-K 趋势分析计算春、夏、秋、冬季的 Z 值分别为 1.63、1.15、0.92 和 2.13, 其中, 冬季通过 0.05 水平的显著性检验, 即河西走廊冬季干旱有显著减弱趋势。春季 SPEI 正负交替, UF 和 UB 曲线出现 8 个交点, 说明春季干旱情况多变; 在 1981 年之

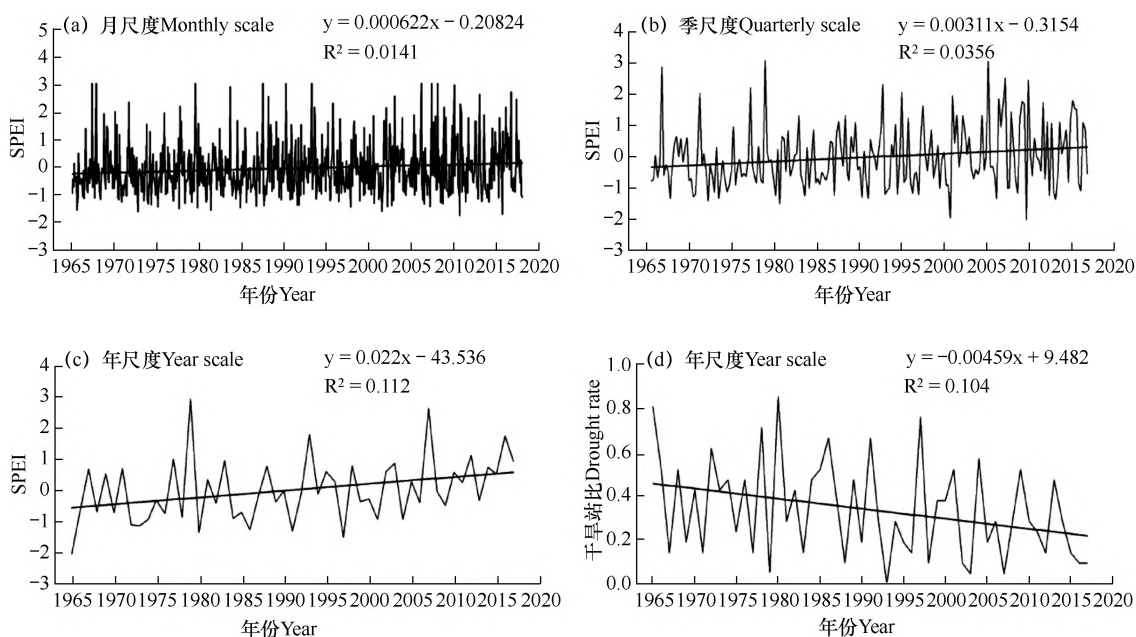


图 2 1965–2017 年河西走廊不同时间尺度 SPEI 及干旱站比

Fig. 2 Ratio of SPEI and drought stations at different time scales in the Hexi corridor from 1965 to 2017

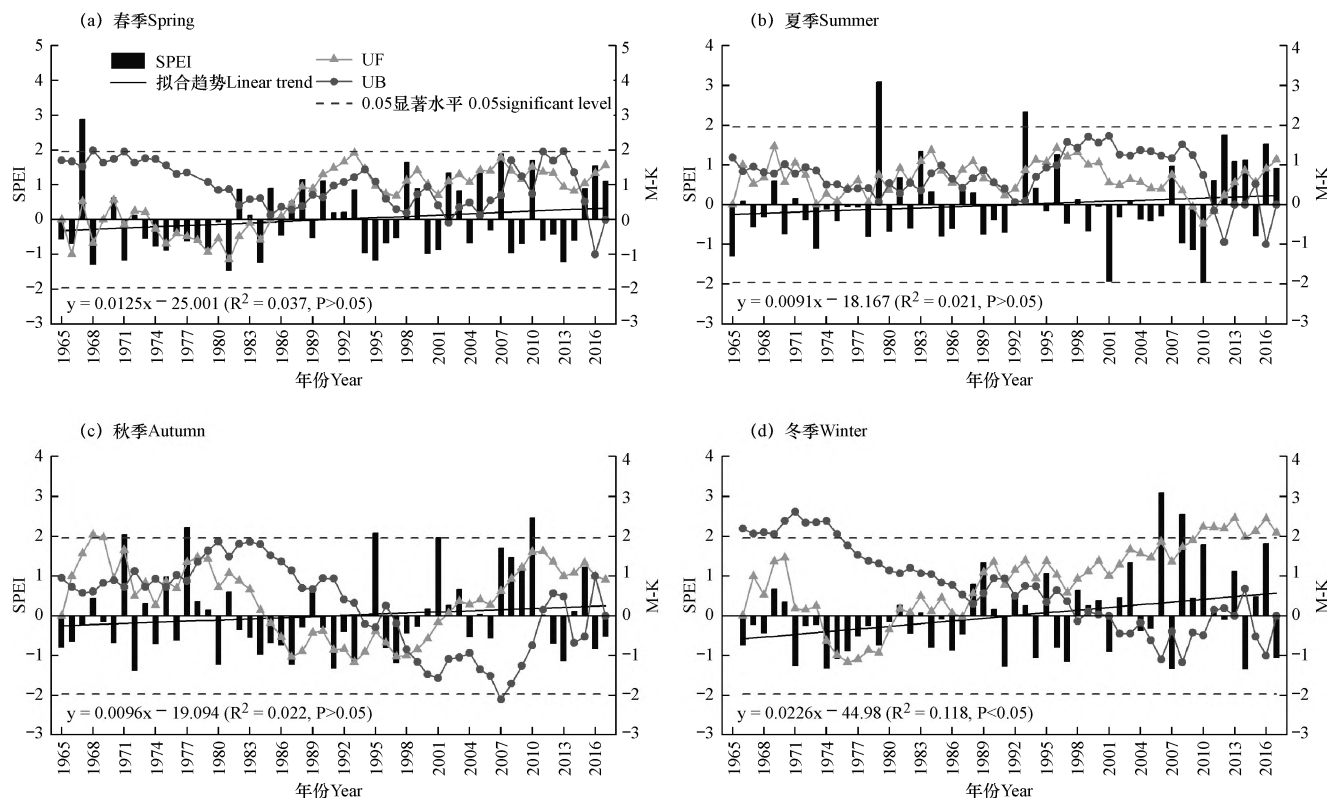


图 3 1965–2017 年河西走廊四季干旱指数变化及 M-K 突变检验

Fig. 3 Changes of four seasons drought index and M-K mutation test in the Hexi corridor from 1965 to 2017

前, 14a 春季 SPEI 为负值, 仅 3a 的 SPEI 为正值; 1982 年之后, 春季湿润状态增加, 其中 19a 的 SPEI 为正值, 且有 16a 的 SPEI 大于 0.5。夏季 SPEI 正负交替频繁, UF 和 UB 曲线出现 19 次相交, 其中 16 次交点分布在 1965–1992 年, 说明这段时间夏季干旱状态不稳定; 干旱等级较大的年份主要集中在 2000–2010 年, 其中 2001 年和 2010 年 SPEI 达到重度干旱状态, 2010 年之后干旱状态减弱。秋季没有重度干旱情况出现, UF 和 UB 曲线出现 10 次相交, 其中 7 次交点分布在 1970–1979 年, 说明这段时间秋季干旱呈不稳定变化。冬季 UF 和 UB 曲线相交于 1989 年前后, 说明 1989 年是个突变年; 在 1988 年之前, 只有 2a 的 SPEI 大于 0.5, 在 1989 年之后, 冬季湿润化状态增加。

2.2 河西走廊气象干旱指数变化空间分布特征分析

2.2.1 SPEI 指数倾向率空间分布

河西走廊及其周围地区 1965–2017 年各气象站点年、季尺度的 SPEI 倾向率变化存在一定的空间异质性 (图 4)。由图 4a 可见, 年尺度 SPEI 倾向率仅马鬃山站为负值, 其他站点表现为湿润趋势, 其中托勒、野牛沟、祁连、永昌站点通过了 0.05 水平的

显著性检验, 变湿趋势显著。从各站点季尺度的年际变化上看 (图 4b–图 4e), 春季除马鬃山、鼎新、酒泉站点呈干旱趋势, 其他站点均呈湿润趋势, 其中额济纳旗、野牛沟站点变湿趋势显著。夏季 38.1% 的站点呈干旱趋势, 主要分布在疏勒河流域的西北部, 黑河流域和石羊河流域北部, 但干旱趋势均不显著; 而托勒、野牛沟站点变湿显著。秋季呈干旱趋势的站点包括马鬃山、永昌、武威, 其他站点均呈湿润趋势, 其中安西、乌鞘岭变湿显著。冬季仅托勒、马鬃山站点呈干旱趋势, 其他站点均呈湿润趋势, 其中有 8 个站点湿润趋势达到显著水平。综合来看, 在各站点中, 仅马鬃山在年、季尺度上都呈干旱趋势; 从变化趋势的空间差异上看, 河西走廊年尺度以及夏季、秋季, 干旱主要集中在研究区的西北部和石羊河流域, 春季和冬季主要集中在研究区的西北部和中部区域; 湿润化区域主要集中在河西走廊的南部。

2.2.2 干旱频率空间分布

图 5 为河西走廊年、季尺度干旱频率空间分布。由图 5a1 可见, 年尺度轻中旱发生频率为 21%~38%, 平均为 30.19%, 轻中旱高频区集中在红柳河、

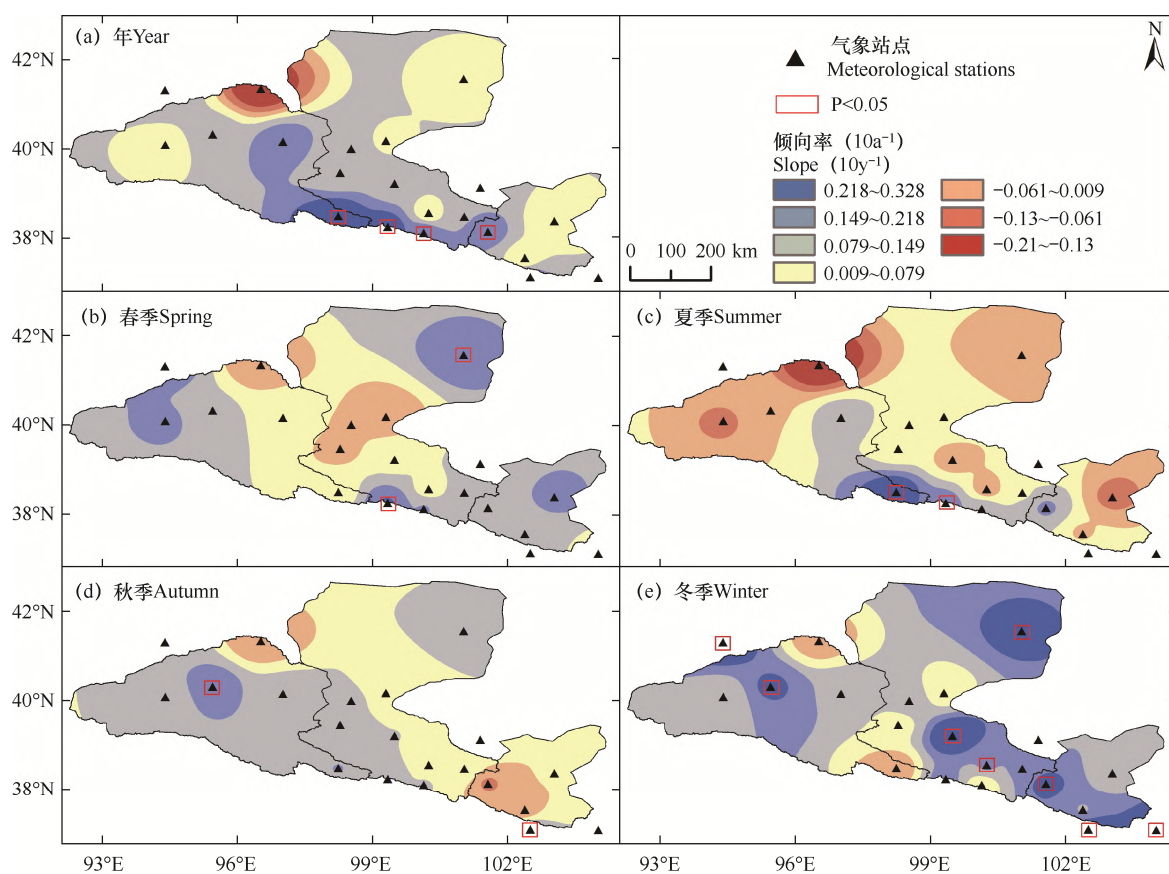


图 4 河西走廊年尺度和季尺度 SPEI 倾向率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of SPEI propensity rate on annual and quarterly scales in the Hexi corridor

马鬃山、民勤站点,干旱频率分别为 38%、38%、36%;相对于轻中旱,年尺度重特旱(图 5a2)发生频率较低,在 0~8%,主要分布在黑河流域中部和石羊河流域的南部。

春季轻中旱(图 5b1)发生频率为 19%~43%,平均为 35.48%,除南部地区外全区均易发生干旱,其中额济纳旗、玉门镇干旱频率达到 43%;重特旱(图 5b2)发生频率在 0~8%,主要集中在托勒、祁连、野牛沟、武威站点。夏季轻中旱(图 5c1)发生频率为 19%~40%,平均为 30.48%,轻中旱高频区集中在敦煌、金塔、酒泉站点;重特旱(图 5c2)发生频率在 0~8.6%,且主要分布在托勒、野牛沟、山丹站点以及石羊河流域。秋季轻中旱(图 5d1)发生频率为 27%~49%,平均为 37.24%,除景泰、乌鞘岭站点,其他站点轻中旱发生频率都超过 30%,其中安西站轻中旱频率最高,达到 49%;重特旱(图 5d2)发生频率在 0~6%,比较轻中旱发生频率低很多,主要集中在乌鞘岭、永昌、景泰站点

和黑河上游地区。冬季轻中旱(图 5e1)发生频率为 21%~43%,平均为 35.33%,重特旱(图 5e2)发生频率在 0~8%,两者的空间分布特征都很明显;轻中旱发生频率从南到北不断增加,而重特旱集中在石羊河流域周围。

综合来看,河西走廊年、季尺度轻中旱发生率均高于重特旱频率。除个别站点外,年尺度、夏季轻中旱高频区集中在河西走廊西北部,春、秋、冬季集中在中部和北部。而年、季尺度的重特旱相对高频区空间分布特征与轻中旱正好相反。同时,秋季轻中旱频率稍高,而年、季尺度重特旱发生率差别不大。

2.2.3 干旱持续时间空间分布

对河西走廊 21 个气象站点不同年代干旱最长持续时间进行统计分析,结果见图 6。由图可见,1965~1969 年最长持续期达到 6 个月以上的站点仅 1 个,为乌鞘岭站点(1965 年 4~10 月);1970~1979 年持续时间达到 6 个月以上的有 2 个站点,分别为

野牛沟(1970年6–12月)和高台(1974年10月–1975年3月及1976年9月–1977年2月);而1980–1989年无站点达到6个月持续时长,仅野牛沟、山丹、祁连、托勒、民勤站点达到5个月持续时长;

1990–1999年和2000–2009年也都仅有2个站点达到6个月持续时长以上,分别为托勒(1997年6–12月)和野牛沟站(1991年6–11月)、张掖(2004年7月–2005年1月)和马鬃山(2001年2–8月)站;相

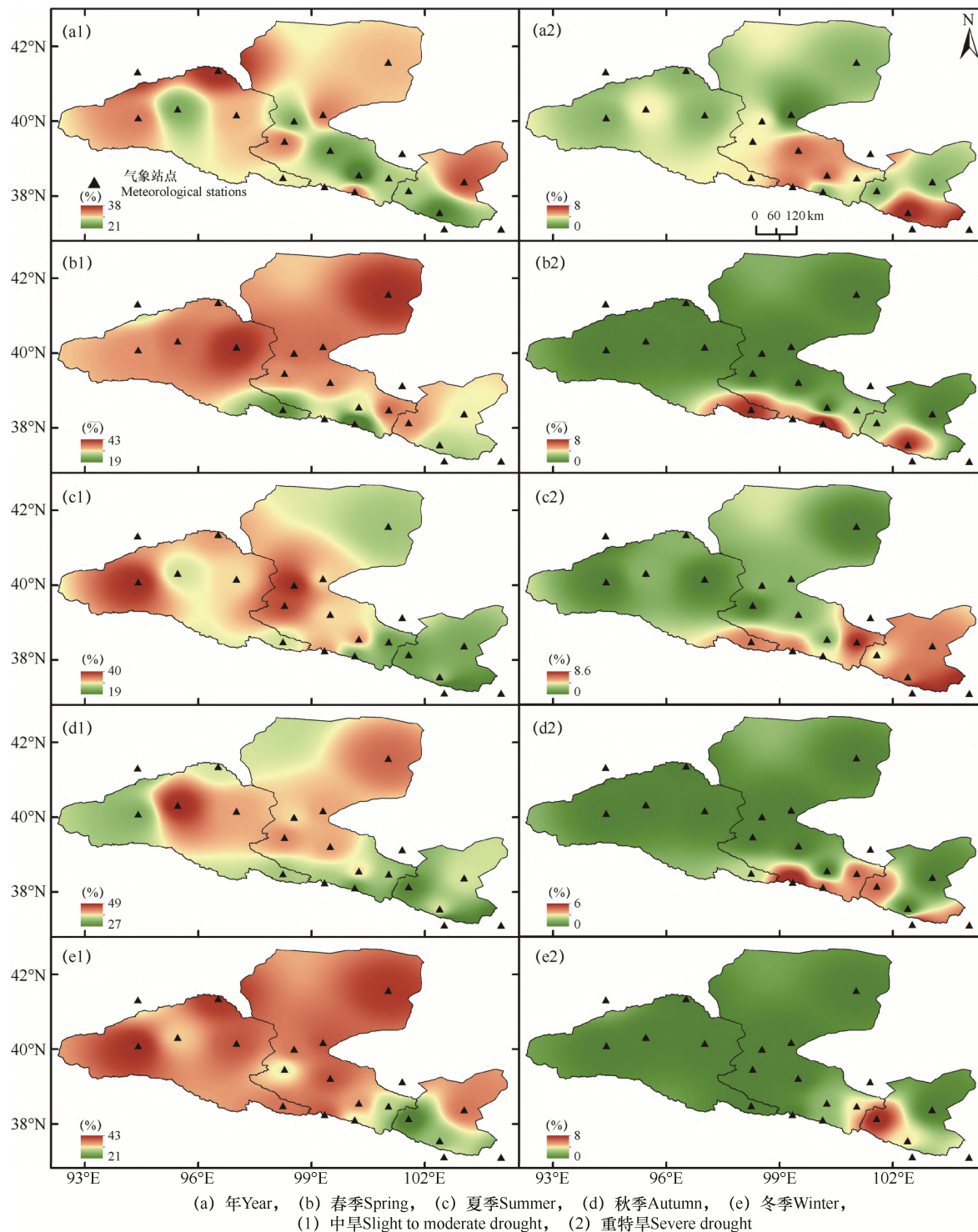


图5 河西走廊年尺度和季尺度干旱发生频率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual and seasonal drought frequency in the Hexi corridor

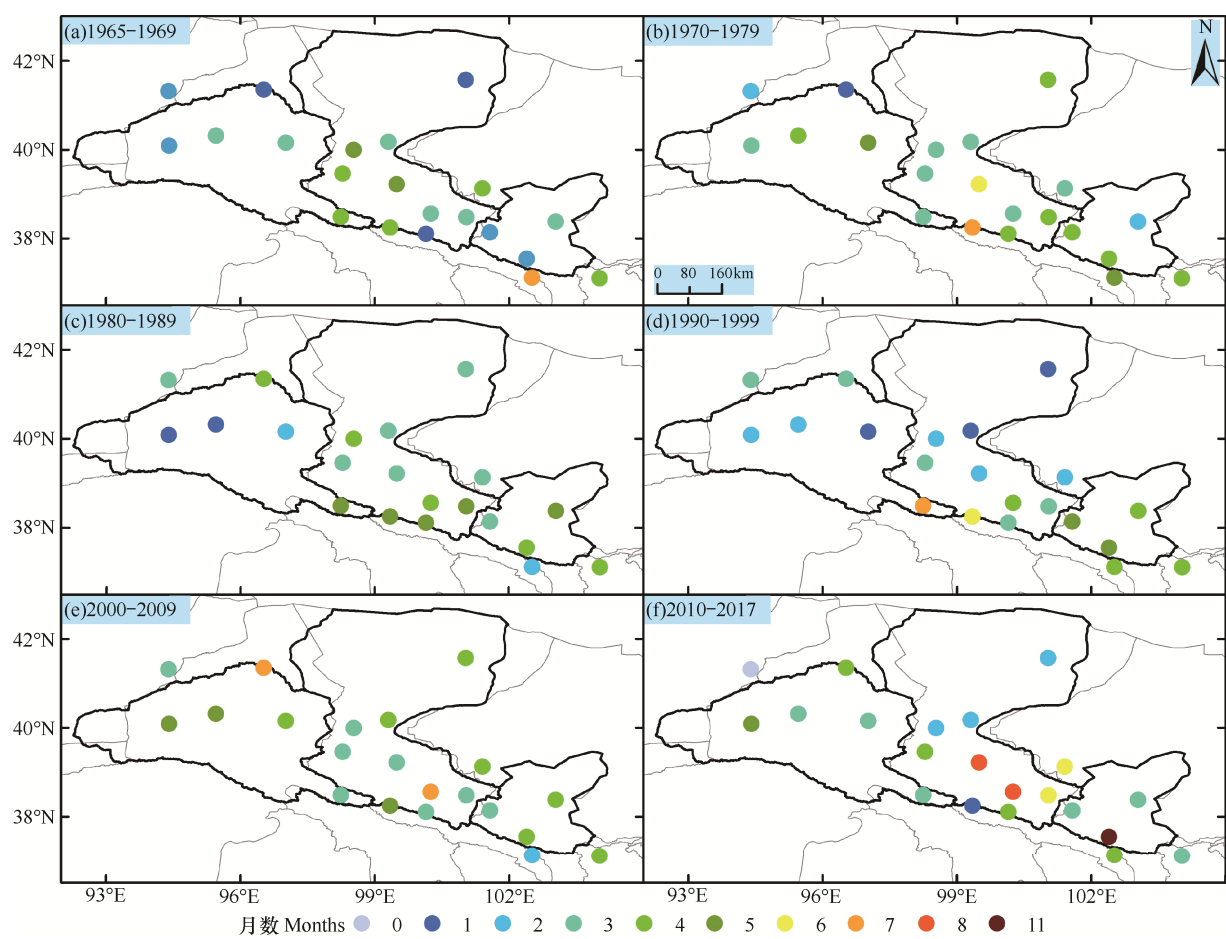


图 6 河西走廊各站不同时段干旱最长持续月数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the longest duration of drought in different periods at each station in the Hexi corridor

对于其他年代际干旱持续时间, 2010–2017 年干旱持续性略强, 持续时长达到 6 个月以上的有 5 个站点, 其中武威最长持续时间达到 11 个月(2013 年 3 月–2014 年 1 月)。

由图 7 可见, 河西走廊 21 个气象站点干旱平均

持续月数的年际变化呈波动下降趋势。1965–1969 年和 1970–1979 年干旱平均时长为每次 1.3 个月和 1.4 个月; 1980–1989 年和 1990–1999 年逐步下降, 分别为每次 1.2 个月和 1 个月; 2000–2009 年有所回升, 为每次 1.2 个月; 而 2010–2017 年干旱平均时长为每

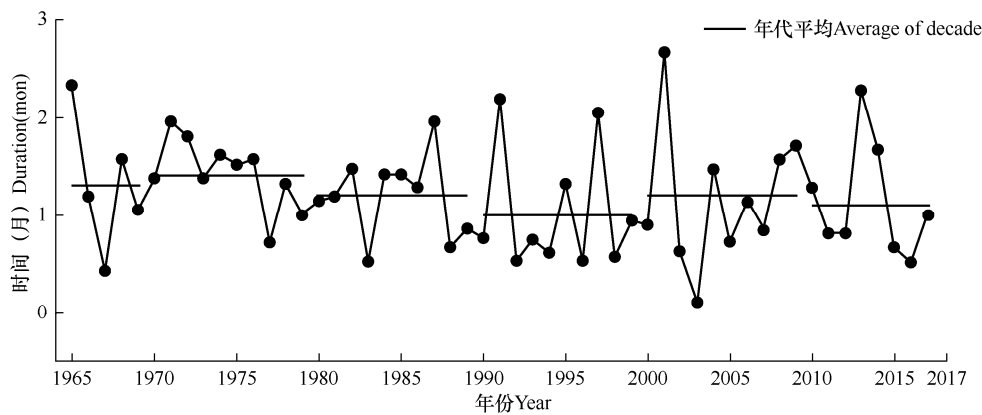


图 7 1965–2017 年河西走廊 21 个站点干旱平均持续月数的年际变化

Fig. 7 Inter-annual variation of the average duration of drought in 21 stations in the Hexi corridor from 1965 to 2017

次 1.1 个月。因此,从干旱最长持续时长和平均持续时长的年代际变化来看,河西走廊干旱持续时长稍低,平均持续时长最长仅达到每次 1.4 个月,但少部分站点干旱持续性较长,武威在 2013 年持续时长达到 11 个月,河西走廊应注意局部地区的干旱情况。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 河西走廊地区月、季尺度 SPEI 呈极显著上升趋势,年尺度 SPEI 呈显著上升趋势,说明近 53a 来河西走廊干旱有减弱趋势;河西走廊干旱站比呈显著下降趋势,且年尺度 SPEI 指数的干旱年份与干旱站比较高的年份一致,近 53a 该区域干旱范围有显著缩小趋势。

(2) 河西走廊四季 SPEI 均呈上升态势,存在变湿趋势,且冬季变湿显著。春、夏、秋季干旱呈不稳定变化;冬季在 1989 年前后发生突变,由干旱向湿润突变。

(3) 从 SPEI 倾向率空间分布上看,年尺度 SPEI 倾向率除马鬃山站为负值,其他站点均为正,存在变湿趋势,其中,明显变湿的站点分布在研究区的南部;在季节尺度上,除春季的马鬃山、酒泉、鼎新站点,夏季疏勒河流域的西北部、黑河流域和石羊河流域北部部分站点,秋季的马鬃山、永昌、武威站点以及冬季的马鬃山、托勒站点 SPEI 倾向率为负值,其他站点均呈湿润趋势,只是变湿的幅度和显著水平上存在一定的差异。

(4) 不同时间尺度各等级干旱发生频率的变化规律具有一致性,年、季尺度轻中旱发生频率远高于重特旱发生频率。从空间上看河西走廊西北部是干旱多发区,且年、季尺度重特旱发生相对高频区空间分布特征与轻中旱正好相反。河西走廊地区不同年代际干旱持续性差异不大,但是个别站点干旱持续性具有明显的年代际差异,其中武威在 2013 年持续时长达到 11 个月,需要注意河西走廊局部干旱情况的发生。

3.2 讨论

在干旱半干旱地区,潜在蒸散量 PET 的计算影响 SPEI 指数的准确性。目前河西走廊干旱研究大多采用 Thornthwaite 方法计算 PET,继而得到 SPEI,但该模型仅考虑温度变化对潜在蒸散量的贡献,忽略了对蒸散有决定性的气象因素,如相对湿度、日照时数和风速等,可能高估气候变暖下的干旱趋势。

本研究采用 Penman-Monteith 方法计算出的 PET 综合考虑了热量和空气动力两个因子,计算得到的 SPEI 更能客观反映河西走廊的干旱情况。多项研究证明,基于 Penman-Monteith 方法的 SPEI 在中国及各地区干旱监测中的表现优于 Thornthwaite 方法的 SPEI^[8, 14-15]。本研究得出河西走廊在年尺度上干旱呈显著减弱趋势,这与前人^[19-20]的研究结果一致。季节尺度上,河西走廊四季 SPEI 均呈上升态势,存在变湿趋势,且冬季变湿显著,主要原因是河西走廊在冬季的 12 月和翌年 1 月由于降水量增加,地表湿润指数在 1961-2012 年增加了 5%~25%^[24]。在空间尺度上,仅马鬃山站在年、季尺度中呈干旱增加趋势,这与王春林等^[17]的研究结果一致;河西走廊受地形和海拔等因素的影响,西北部的降水呈下降趋势^[25],这是马鬃山站呈干旱化的可能原因。河西走廊东部受季风影响,西部受环流控制,中部处于两种环流系统的交汇处,再加上青藏高原季风的影响,局部气候变化较复杂^[26],武威站在 2013 年持续时长达到 11 个月,需要注意河西走廊局部干旱情况。本研究计算出研究区干旱呈减弱趋势,这与 Huang 等^[27]结论不一致,可能原因是 Huang 等的研究采用基于 Thornthwaite 方法计算 SPEI 指数,忽略了相对湿度、风速等气象变化对潜在蒸散的影响,夸大了温度对该区干旱的影响。已有研究表明 1980 年以来西北特别是西北西部地区的暖湿化趋势被大量观测数据证实^[28-29],而基于 Thornthwaite 方法的 SPEI 未能监测出这一趋势。

河西走廊地区水资源系统脆弱,干旱发生会严重影响生态环境建设和社会经济发展。基于 SPEI 干旱指数评估 1965-2017 年河西走廊的干旱情况,对指导该区域抗旱工作具有现实意义。总体上河西走廊干旱呈减弱趋势,将更有利于农业生产,但秋季节轻中旱发生频率较高,当地应做好相应措施。此外,Meng 等^[30]研究表明河西走廊年平均气温和四季气温都呈显著增加趋势,并且夏季增温率随海拔的升高而增加,这会导致祁连山区冰雪融水增加,从而增加洪水事件发生的可能性,因此该区域也要加强防御局部暴雨和洪灾工作。但本研究也存在一定的局限性,如基于气象站点数据计算 SPEI,进行插值分析河西走廊干旱状况,存在区域性站点稀少,空间覆盖不全面的问题。今后应考虑气象站点数据与多源遥感数据相融合,提高干旱评估的准确性,以

期为河西走廊地区水资源的管理和规划做出更好的指导和支撑。

参考文献 References

- [1] 杨晋云,张莎,白雲,等.基于机器学习融合多源遥感数据模拟 SPEI 监测山东干旱[J].中国农业气象,2021,42(3): 230-242.
Yang J Y,Zhang S,Bai Y,et al.SPEI simulation for monitoring drought based machine learning integrating multi-source remote sensing data in Shandong[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2021,42(3):230-242.(in Chinese)
- [2] 赵海燕,张文千,邹旭恺,等.气候变化背景下中国农业干旱时空变化特征分析[J].中国农业气象,2021,42(1):69-79.
Zhao H Y,Zhang W Q,Zou X K,et al.Temporal and spatial characteristics of drought in China under climate change[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2021,42(1):69-79.(in Chinese)
- [3] Wang S,Li R,Wu Y,et al.Effects of multi-temporal scale drought on vegetation dynamics in Inner Mongolia from 1982 to 2015,China[J].Ecological Indicators,2022,136: 108666.
- [4] Crocetti L,Forkel M,Fischer M,et al. Earth observation for agricultural drought monitoring in the Pannonian basin (Southeastern Europe):current state and future directions[J]. Regional Environmental Change,2020,20(4):123.
- [5] Dikshit A,Pradhan B,Huete A.An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network[J].Journal of Environmental Management, 2021,283:11979.
- [6] Vicente-Serrano S M,Beguería S,López-Moreno J I.A multiscale drought index sensitive to global warming:the standardized precipitation evapotranspiration index[J].Journal of Climate,2010,23(7):1696-1718.
- [7] 黄浩,张勃,马尚谦,等.甘肃河东地区气象干旱时空变化及干旱危险性分析[J].中国农业气象,2020,41(7):459-469.
Huang H,Zhang B,Ma S Q,et al.Temporal and spatial variations of meteorological drought and drought risk analysis in Hedong area of Gansu Province[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2020,41(7):459-469.(in Chinese)
- [8] Chen H P,Sun J Q.Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index[J].Journal of Climate,2015,28(13):5430-5447.
- [9] Li L C,She D X,Zheng H,et al.Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices(SPI and SPEI) in China[J].J Hydrometeorol, 2020, 21(7):1513-1530.
- [10] Shelton S,Ogou F K,Pushpawela B.Spatial-temporal variability of droughts during two cropping seasons in Sri Lanka and its possible mechanisms[J].Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences,2022,58(1):127-144.
- [11] Haile G G,Tang Q H,Leng G Y,et al.Long-term spatiotemporal variation of drought patterns over the Greater Horn of Africa[J].Science of the Total Environment,2020,704:135299.
- [12] 杨睿,耿广坡,周洪奎,等.基于 SPEI-PM 指数的渭河流域气象干旱时空演变特征[J].中国农业气象,2021,42(11): 962-974.
Yang R,Geng G P,Zhou H K,et al.Spatial-temporal evolution of meteorological drought in the Wei river basin based on SPEI-PM[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2021,42(11):962-974.(in Chinese)
- [13] 李翔翔,居辉,刘勤,等.基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析[J].生态学报,2017,37(6):2054-2066.
Li X X,Ju H,Liu Q,et al.Analysis of drought characters based on the SPEI-PM index in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):2054-2066.(in Chinese)
- [14] Zhou J,Wang Y J,Su B D,et al.Choice of potential evapotranspiration formulas influences drought assessment: a case study in China[J].Atmos Res,2020, 242:104979.
- [15] 刘珂,姜大膀.基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析[J].大气科学,2015,39(1):23-36.
Liu K,Jiang D B.Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2015,39(1):23-36.(in Chinese)
- [16] Guo H,Bao A,Liu T,et al.Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966-2015[J].Science of the Total Environment,2018,642:1523-1538.
- [17] 王春林,司建华,赵春彦,等.河西走廊近 57 年来干旱灾害特征时空演化分析[J].高原气象,2019,38(1):196-205.
Wang C L,Si J H,Zhao C Y,et al.Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of drought disasters in the Hexi corridor in recent 57 years[J].Plateau Meteorology,

- 2019,38(1):196-205.(in Chinese)
- [18] 梁丹,赵锐锋,李洁,等.4 种干旱指标在河西走廊地区的适用性评估[J].中国农学通报,2015,31(36):194-204.
- Liang D,Zhao R F ,Li J,et al.Applicability assessment of four drought indexes in Hexi corridor regions[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2015,31(36):194-204.(in Chinese)
- [19] Fu J,Niu J,Kang S Z,et al.Crop production in the Hexi corridor challenged by future climate change[J].Journal of Hydrology,2019,579:124197.
- [20] Gao L,Zhang Y N.Spatio-temporal variation of hydrological drought under climate change during the period 1960-2013 in the Hexi corridor,China[J].J Arid Land,2016,8(2):157-171.
- [21] Wang W J,Guo B,Zhang Y Q,et al.The sensitivity of the SPEI to potential evapotranspiration and precipitation at multiple timescales on the Huang-Huai-Hai Plain,China[J]. Theoretical and Applied Climatology,2021,143(1-2):87-99.
- [22] 贾悦,崔宁博,魏新平,等.基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J].农业工程学报,2016, 32(6):130-138.
- Jia Y,Cui N B,Wei X P,et al.Applicability evaluation of different algorithms for reference crop evapotranspiration in Yangtze river basin based on inverse distance weighted method[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(6):130-138.(in Chinese)
- [23] 王飞,王宗敏,杨海波,等.基于 SPEI 的黄河流域干旱时空格局研究[J].中国科学(地球科学),2018,48(9):1169-1183.
- Wang F,Wang Z M,Yang H B,et al.Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow river basin based on SPEI[J].Scientia Sinica(Terrae),2018,48(9):1169-1183.(in Chinese)
- [24] 王素萍,李耀辉,冯建英,等.1961-2012 年甘肃省干湿变化特征及其影响因子[J].中国沙漠,2014,34(6):1624-1632.
- Wang S P,Li Y H, Feng J Y,et al.Changes and driving factors of surface wetness index in Gansu,China from 1961-2012[J].Journal of Desert Research,2014,34(6):1624-1632.(in Chinese)
- [25] Li Z,Liu H H.Temporal and spatial variations of precipitation change from Southeast to Northwest China during the period 1961-2017[J].Water,2020,12(9):2622.
- [26] Li X,You Q L,Ren G Y,et al.Concurrent droughts and hot extremes in Northwest China from 1961 to 2017[J].Int J Climatol,2019,39(4):2186-2196.
- [27] Huang W J,Yang J J,Liu Y,et al.Spatiotemporal variations of drought in the arid region of Northwestern China during 1950-2012[J].Advances in Meteorology,2021,2021: 6680067.
- [28] 王澄海,张晟宁,李课臣,等. 1961-2018 年西北地区降水的变化特征[J].大气科学,2021,45(4):713-724.
- Wang C H,Zhang S N,Li K C,et al.Change characteristics of precipitation in Northwest China from 1961 to 2018[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2021,45 (4):713-724.(in Chinese)
- [29] Qin J C,Su B D,Tao H,et al.Spatio-temporal variations of dryness/wetness over Northwest China under different SSPs-RCPs[J].Atmos Res,2021,259:105672.
- [30] Meng X J,Zhang S F,Zhang Y Y,et al.Temporal and spatial changes of temperature and precipitation in Hexi corridor during 1955-2011[J].Journal of Geographical Sciences, 2013,23(4):653-667.