

陕西省气象干旱事件的识别及时空演变特征研究

周冰婵¹, 赵 灿^{2,3*}, 汪媛媛^{1,3}

¹陕西省气象服务中心, 陕西 西安

²陕西省气候中心, 陕西 西安

³中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年5月14日; 录用日期: 2025年6月13日; 发布日期: 2025年6月23日

摘 要

基于1961~2024年陕西省100个气象站逐日观测数据, 采用Penman-Monteith公式估算潜在蒸散量, 构建标准化降水蒸散指数(SPEI), 从时间演变、空间分布及干旱事件识别与迁移特征等方面, 系统分析陕西省气象干旱的时空变化特征及其主控因子。结果表明, 陕西省年平均SPEI自1980年代起持续下降, 干旱程度显著加剧, 2015~2019年达到极端重旱水平。季节上表现为“冬春偏干、夏季湿润、秋季再干”的年内变化。空间上, 冬季干旱最严重, 夏季则受季风影响显著转湿。相关性分析显示, 不同气象因子对SPEI的影响存在显著区域差异, 气温、地温在陕北与SPEI呈正相关, 而相对湿度则在全省表现为正相关。通过三维空间聚类识别出22次典型干旱事件, 发现其呈现“持续时间长 + 覆盖范围广”的演变特征, 2000年后干旱事件持续性显著增强, 干旱空间迁移以南北向为主, 有明显的方向性扩展趋势。研究结果揭示了区域干旱演变特征, 可为干旱监测与风险防控提供科学依据。

关键词

干旱, 潜在蒸散, 时空特征, 相关分析, 干旱事件识别

Research on the Identification and Spatiotemporal Evolution Characteristics of Meteorological Drought Events in Shaanxi Province

Bingchan Zhou¹, Can Zhao^{2,3*}, Yuanyuan Wang^{1,3}

¹Shaanxi Meteorological Service Center, Xi'an Shaanxi

*通讯作者。

文章引用: 周冰婵, 赵灿, 汪媛媛. 陕西省气象干旱事件的识别及时空演变特征研究[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 571-584. DOI: 10.12677/ccrl.2025.144057

²Shaanxi Climate Center, Xi'an Shaanxi³China Meteorological Administration Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau Key Laboratory, Xi'an ShaanxiReceived: May 14th, 2025; accepted: Jun. 13th, 2025; published: Jun. 23rd, 2025

Abstract

Based on daily observational data from 100 meteorological stations in Shaanxi Province from 1961 to 2024, potential evapotranspiration was estimated using the Penman-Monteith equation, and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was constructed. The spatiotemporal variation characteristics and controlling factors of meteorological drought in Shaanxi Province were systematically analyzed from the perspectives of temporal evolution, spatial distribution, and drought event identification and migration features. The results show that the annual mean SPEI in Shaanxi Province has continuously decreased since the 1980s, with drought severity significantly intensifying and reaching extreme-to-severe levels during 2015~2019. Seasonally, intra-annual variation manifests as “drier in winter and spring, wetter in summer, and drier again in autumn”. Spatially, winter drought is most severe, whereas summer conditions become significantly wetter under monsoon influence. Correlation analysis indicates marked regional differences in the impact of meteorological factors on SPEI: air temperature and 5 cm soil temperature in northern Shaanxi are positively correlated with SPEI, while relative humidity exhibits a positive correlation across the entire province. Through three-dimensional spatial clustering, 22 typical drought events were identified, revealing an evolution characterized by “long duration and wide coverage”. After 2000, drought event persistence significantly increased, and spatial migration of droughts primarily followed a north-south trajectory, exhibiting a clear directional expansion trend. These findings elucidate the regional evolution characteristics of drought and provide a scientific basis for drought monitoring and risk prevention and control.

Keywords

Drought, Potential Evapotranspiration, Spatiotemporal Characteristics, Correlation Analysis, Drought Event Identification

Copyright © 2025 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

气候变化已成为 21 世纪人类社会面临的重大挑战之一，全球变暖背景下极端天气气候事件频率与强度呈明显增加趋势，干旱灾害作为其中最为严重的自然灾害之一，受到国际社会的广泛关注[1]-[4]。干旱以其影响范围广、持续时间长、突发性强以及经济损失巨大等特点，严重威胁着农业生产、生态安全以及经济社会的可持续发展[4] [5]。根据世界气象组织的统计，干旱所造成的经济损失超过其他自然灾害，尤其在过去的三十年中，这种趋势愈加显著。因此，准确识别和监测干旱事件及其影响因素，具有重大的理论意义和实际价值。

近年来，随着气象干旱监测与评估方法的不断发展，研究人员提出了众多指标来有效识别和监测干旱状况。早期的研究较多关注降水量作为单一指标，例如 Henry [6]利用降水距平的方法定义干旱，认为当降水量

连续 21 天低于长期平均值的 70%时可界定为干旱；Blumenstock [7]则提出适合短期干旱监测的指标，认为连续 48 小时降水总量不足 2.5 mm 即可视为发生干旱。McKee 等[8]提出的标准化降水指数(SPI)由于计算简单、适用范围广，得到广泛应用，但仅考虑降水因素，忽略了蒸散发这一重要影响因素，不能全面反映干旱事件的真实状况。为解决上述问题，Vicente-Serrano 等[9]进一步提出了标准化降水蒸散指数(SPEI)，该指数通过考虑降水和潜在蒸散发，能更加全面、准确地识别不同尺度的气象干旱事件。近年来，SPEI 被广泛应用于全球和区域尺度的干旱研究中，逐渐成为当前气象干旱研究中最有效和普遍采用的工具之一[10][11]。

陕西省位于我国西北地区，地处黄土高原与秦巴山区之间，是重要的农业大省。受大陆性季风气候影响，陕西省降水时空分布不均，生态环境脆弱，干旱灾害频发，严重影响当地农业生产与经济社会的可持续发展[12]。陕西省地貌复杂，陕北高原、中部关中平原及南部秦巴山区气候差异显著，表现出明显的降水和温度梯度特征[13]。近年来，陕西省整体呈现出明显的干旱化趋势，尤其在 20 世纪 90 年代后期，干旱现象尤为严重[13][14]。例如，陕西苹果产区的干旱趋势在近几十年显著增加，特别是渭北东部产区和关中地区干旱风险持续上升，已对农业生产造成了不利影响[15]。因此，开展陕西省气象干旱事件的时空演变特征及其影响因素研究，对于提高区域气象灾害防御能力、保障农业生产安全和生态环境稳定具有重要的现实意义。

因此，本文选用标准化降水蒸散指数(SPEI)，对陕西省气象干旱事件进行全面识别与分析，探讨其时空分布特征及演变规律，深入分析干旱事件的主要影响因素，为区域干旱监测预警及农业生产规划提供科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

本文选取陕西省 100 个气象观测站点 1961~2024 年逐日气象资料，各个站点位置分布如图 1 所示，数据来自于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)。首先采用 100 个站点的逐日平均气温、平均相对湿度和日照时数等气候要素，根据 Penman-Monteith 公式计算陕西省各站点逐日潜在蒸散量，后利用降水量与潜在蒸散量计算得到月尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI)，并对其进行空间插值以得到全省 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的网格数据，进一步研究 SPEI 的时空变化特征。

2.2. 潜在蒸散量(PET)

本文采用由联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式，用以计算潜在蒸散量(PET)并作为实际蒸散参考值[16][17]。该方法具有明确的物理基础，在干旱监测与评估中得到了广泛应用。其计算所需的主要气象变量包括风速、日照时数和气温等。其表达形式如下所示：

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2-1)$$

其中， R_n 为作物表面的净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)； G 表示土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)； T 是 2 m 高处日平均气温($^\circ\text{C}$)； U_2 为 2 m 的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)； e_s 是在该温度下的饱和水汽压(kPa)， e_a 是实际水汽压(kPa)； Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)， γ 是干湿计常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)。

若风速测量高度与标准的 2 米不一致，则需换算为标准高度风速，换算公式如下：

$$U_2 = \frac{u_z \cdot 4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (2-2)$$

其中， u_z 为在离地 z 米高度测得的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

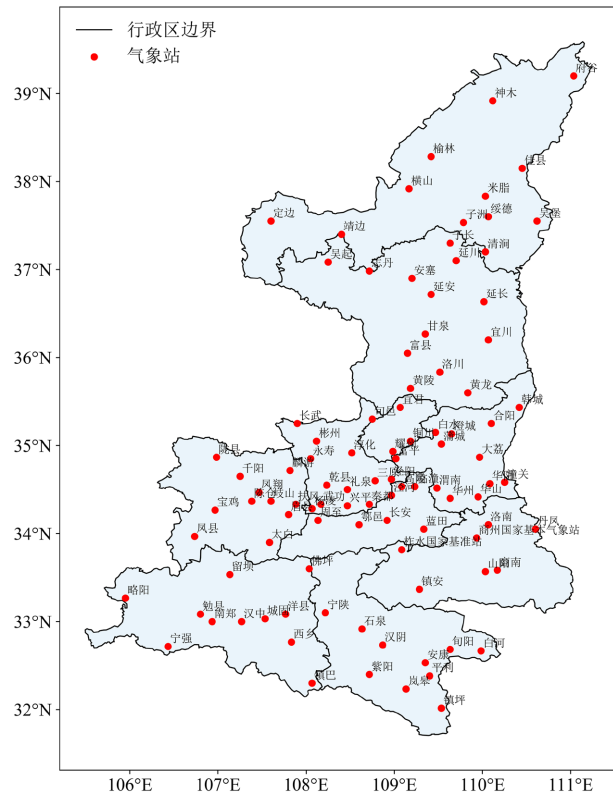


Figure 1. Distribution of meteorological stations in Shaanxi province
图 1. 陕西省气象站点分布图

2.3. 标准降水蒸散指数(SPEI)

标准化降水蒸散指数(SPEI)是一种兼顾水分供需关系的干旱评估指标，特别适用于气候变暖背景下干旱事件的监测[11]。Vicente-Serrano 等[9]首次提出该指标，其计算方法已被广泛应用于全球气象干旱研究中[10] [18]。SPEI 的核心思想是将气象变量标准化为具有统计意义的干旱等级，其计算过程主要包括以下三步：

(1) 首先，构建逐月降水量 P_i 与潜在蒸散量 PET_i 的差值序列，定义为气象水分盈亏量 D_i ：

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2-3)$$

(2) 其次，将该水分盈亏序列 D_i 拟合至三参数的对数 Log-Logistic 分布，计算其累计分布函数分别如下：

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

$$F(x) = \int_0^x f(t) dt = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (2-5)$$

(3) SPEI 计算如下：

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (2-6)$$

其中, W 表示为

$$W = \begin{cases} \sqrt{-2\ln(P)}, & P \leq 0.5 \\ \sqrt{-2\ln(1-P)}, & P > 0.5 \end{cases} \quad (2-7)$$

$C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

Table 1. SPEI drought severity categories

表 1. SPEI 干旱等级

干旱程度	SPEI
无旱	>-0.5
轻旱	$-1.0 \sim -0.5$
中旱	$-1.5 \sim -1.0$
重旱	$-2.0 \sim -1.5$
特旱	≤ -2.0

2.4. 识别干旱事件

当标准化降水蒸散指数(SPEI)小于等于-1且持续时间达到3个月以上时,可认为发生了明显干旱事件,并据此界定一次完整的干旱过程。为提取干旱事件的时空演变信息,本文引入三维空间聚类方法进行干旱事件识别分析,该三维结构由经度、纬度与时间共同组成[18][19]。干旱事件识别及其迁移分析的步骤如下:

(1) 三维空间聚类法识别干旱集群:当某一网格单元的SPEI值低于-1时,可判断该格点处于干旱状态。若其周围8个相邻网格中有不少于8个也满足 $SPEI \leq -1$ 的条件,则该中心格点可被视为干旱核心点,9个相邻网格构成一个空间上连续的干旱集群单元。按照此标准逐一检测区域内所有干旱像元,直到连续空间区域中第 k 个像元的SPEI值大于-1,即可认定干旱过程在此终止。记录其对应的空间分布与发生时刻,便可完成一次干旱集群的识别。为避免误识别局地波动带来的噪声,部分文献建议设定干旱集群的最小空间阈值,一般为研究区总面积的1.5%~1.6% [20]。本研究采用其中的中间值标准,设定最小有效干旱识别面积为研究区域总面积的1.5%。

(2) 干旱集群的时空连续性判断:当第 t 个干旱集群与第 $t+1$ 个干旱集群在空间上存在非零重叠区域,则二者可被视为处于同一干旱过程内;若第 $t+1$ 个与第 $t+2$ 个集群亦满足该条件,则三者同样属于同一干旱事件。依次类推,直到相邻两个干旱集群之间的空间重合面积为0时,标志着该次干旱事件的终结。由此,第 t 个干旱集群的发生时间可定义为该干旱事件的起始时间,第 $t+2$ 个集群对应时间为终止时间,该集群代表的干旱事件持续时间即为3个月。该干旱事件的空间影响范围则定义为所涵盖的所有干旱集群中最大空间覆盖面积所对应的值。

(3) 干旱集群的重心:为了刻画干旱集群在时空演变过程中的位置变化特征,本文参考聂明秋[21]与刘陈立[22]的研究,使用重心迁移模型计算干旱集群重心的经度与纬度:

$$\begin{cases} x_i^t = \frac{\sum_{i=1}^m (DI_{ti} x_i)}{\sum_{i=1}^m x_i} \\ y_i^t = \frac{\sum_{i=1}^m (DI_{ti} y_i)}{\sum_{i=1}^m y_i} \end{cases} \quad (2-8)$$

其中, DL_{it} 表示第 i 个干旱像元对应的 SPEI 值; x_i 和 y_i 分别为该像元的经度和纬度; m 为当前干旱集群包含的像元总数。在同一干旱事件中, 多个干旱集群依时间序列排列, 构成的重心轨迹即为该干旱事件的空间移动路径。若第 t 个干旱事件的第 i 个集群重心为 (x_i^t, y_i^t) , 第 $i+n$ 个集群重心为 (x_{i+n}^t, y_{i+n}^t) , 则可通过连接这些重心点获得干旱事件的移动轨迹。

(4) 干旱事件的迁移方向和迁移距离: 通过干旱集群重心经纬度可计算实际迁移方向和距离。

3. 陕西省干旱时空特征

如图 2(a)所示, 1961~2024 年陕西省年平均 SPEI 呈显著下降趋势, 表明区域干旱化进程显著。1960 年代至 1970 年代中期, SPEI 值总体维持在 0.5 以上, 甚至在 1962 年和 1965 年达到 1.0 左右, 属于明显的湿润状态; 1980 年代后 SPEI 逐渐下降, 年际波动明显但均值持续走低。进入 21 世纪后, 干旱形势明显加剧, 尤其 2015~2019 年间 SPEI 降至 -1.5 以下, 达到重旱等级, 为整个研究期间中的最早阶段。尽管 2020 年后 SPEI 略有回升, 但整体仍处于负值区间, 未显著摆脱干旱状态。综上可见, 陕西省气候干旱程度经历了“湿润-波动下降-干旱加剧”的转变过程。图 2(b)反映了年内 SPEI 的季节变化特征。年内月均 SPEI 整体处于 -0.2 至 +0.25 之间, 多年平均月份 SPEI 高于 -0.5, 未达到干旱等级标准, 但仍表现出一定的干湿分异。1 月为全年 SPEI 较低(-0.12), 之后 2~3 月上升并转为正值, 6~7 月为全年最湿润时期 (SPEI 为 0.22 和 0.24), 8 月后迅速转干, 至 11 月(-0.21)和 12 月(-0.19)降至年内最低。从年内整体趋势看, 陕西省表现出“冬春偏干-夏季湿润-秋冬再度转干”的气候特征, 反映了典型的温带东亚季风区干旱时序特征, 干旱主要集中在年初与年末。根据干旱等级划分标准(表 1), 虽然年内大多数月份未达干旱阈值($SPEI \leq -0.5$), 但季节间的水分盈亏波动较大, 尤其冬季至早春、秋末至初冬期间干旱风险相对较高, 值得在农业生产调度和干旱预警中给予特别关注。

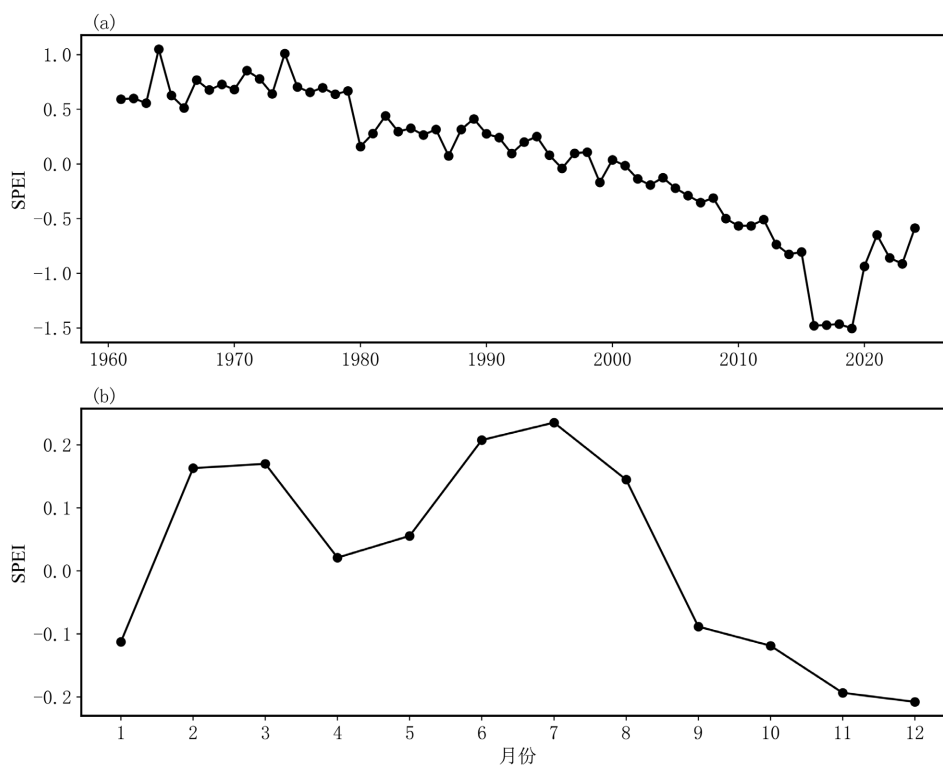


Figure 2. SPEI from 1961 to 2024: (a) Inter-annual variation and (b) Intra-annual variation
图 2. 1961~2024 年 SPEI: (a) 年际变化与(b) 年内变化

图 3 所示是 1961~2024 年陕西省全年及四季 SPEI 空间分布,可以看出陕西省干旱状况在时空尺度上存在显著差异。全年平均 SPEI (图 3(a))显示出全省大部分区域处于无旱状态。季节尺度上,干旱的空间异质性更加突出。冬季(图 3(b))为全年最干旱时段,陕北大部分地区 SPEI 显著低于 -0.5 ,干旱范围广、程度深,是区域水资源最为紧张的时期;而关中南部分普遍偏湿。春季(图 3(c))干旱状况有所缓和,大部分冬季干旱区域 SPEI 上升至 0 以上,呈现湿润特征,显示出春季降水及地表水分回补在一定程度上改善了水分赤字状况。夏季(图 3(d))是全年最湿润的季节,东亚夏季风带来的强降水使陕西大部分区域 SPEI 显著上升,局部达到 0.4 以上,关中和陕南地区亦基本摆脱干旱影响,是全年水分最充足的时期,具有重要的农业缓解窗口期意义。秋季(图 3(e))则随着季风系统减弱、降水骤减,陕北、关中及陕南大部地区 SPEI 再次降至 0 以下,甚至局部逼近 -0.5 ,虽未达到干旱标准,但区域水分缺失明显。综合来看,陕西省呈现出显著的“秋冬偏干、春夏湿润”的季节性干旱变化规律,尤其是陕北地区,年内 SPEI 波动幅度最大,从冬季干旱状态跃升至夏季偏湿后再快速下降至秋季偏干,突显出其对季风水汽输送的响应最为敏感。

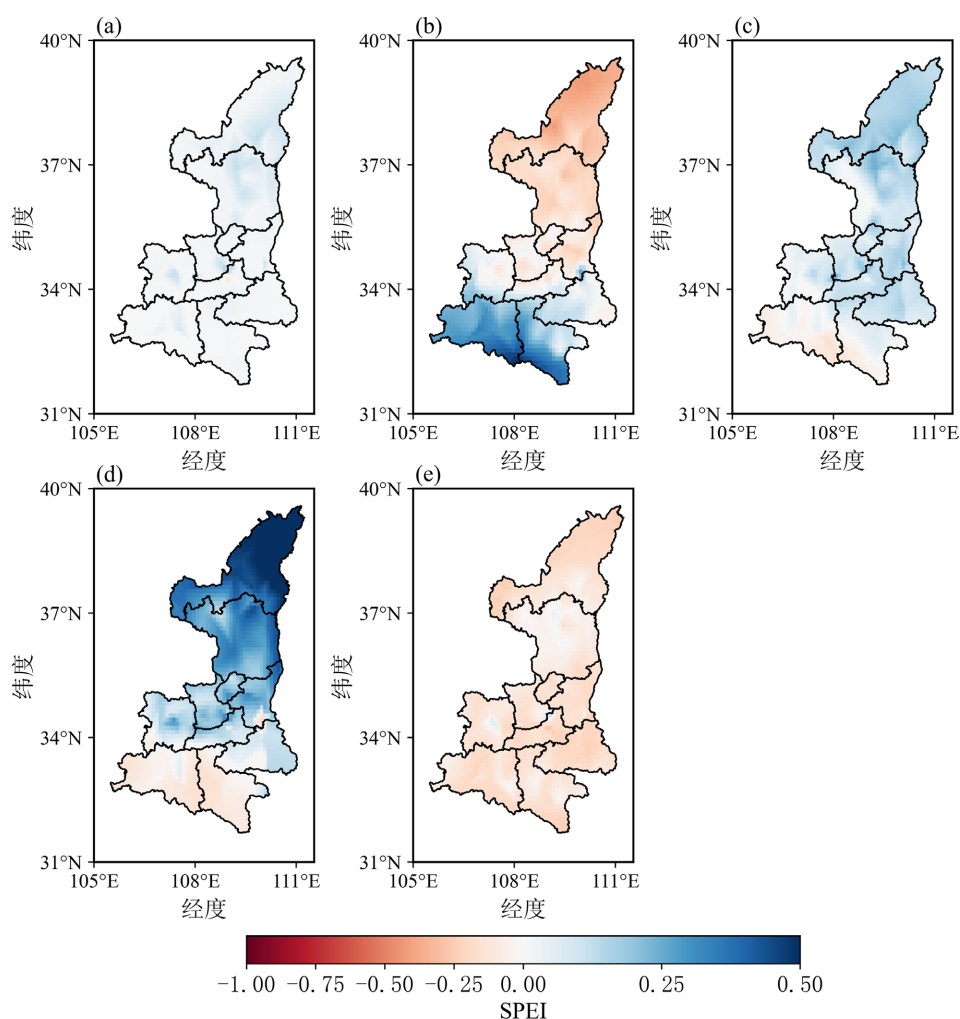


Figure 3. Spatial distribution of SPEI from 1961 to 2024: (a) Annual; (b) Winter; (c) Spring; (d) Summer, and (e) Autumn
图 3. 1961~2024 年(a) 全年; (b) 冬季; (c) 春季; (d) 夏季; (e) 秋季的 SPEI 空间分布

1961~2024 年期间,陕西省不同气象要素(气温、气压、相对湿度、日照时数、风速及 5 cm 地温)与标准化降水蒸散指数(SPEI)的相关性呈现显著的空间异质性(图 4)。从气温(图 4(a))来看,其与 SPEI 在陕

北地区主要表现为微弱正相关,反映该区域气温升高并未直接导致 SPEI 下降,即未显著加剧干旱风险,可能与其本地蒸散速率受限有关;而在陕南地区则普遍呈现出负相关,表明气温升高有可能增强蒸散发,降低水分盈余,间接引发干旱过程。气压(图 4(b))与 SPEI 在空间上表现出鲜明的反向格局:陕北大部分地区为负相关,而陕南则以正相关为主。陕北负相关表明高压背景下抑制了降水过程,使 SPEI 降低,而陕南正相关区域可能受暖湿气流辐合或地形引导的局地对流活动影响,表现出高压与湿润化过程的耦合特征。相对湿度(图 4(c))与 SPEI 在全省整体上呈现出正相关格局,尤以陕北和关中区域最为显著,表明湿度增加有助于水分盈余提升、SPEI 上升,从而有效缓解干旱趋势。日照时数(图 4(d))在陕西全境几乎均表现为负相关,表明强辐射条件会促使地表蒸散增强,降低 SPEI,加剧干旱风险。风速(图 4(e))与 SPEI 在全省大部分区域表现为正相关,说明适度的风速有助于湿润空气输送和局地对流发展,从而增强降水、提升 SPEI 值,缓解干旱过程。但在局部高山或裸地地区亦存在轻微负相关。5 cm 浅层地温(图 4(f))显示出与气温相似的空间分布特征:在陕北地区以正相关为主,陕南则普遍为负相关。陕北地温升高可能与土壤积温能力强、蒸散作用受限有关,因此反而与 SPEI 升高有关;而在陕南地区,地温升高明显促进了水分亏缺的发生,导致 SPEI 下降、干旱风险加剧。

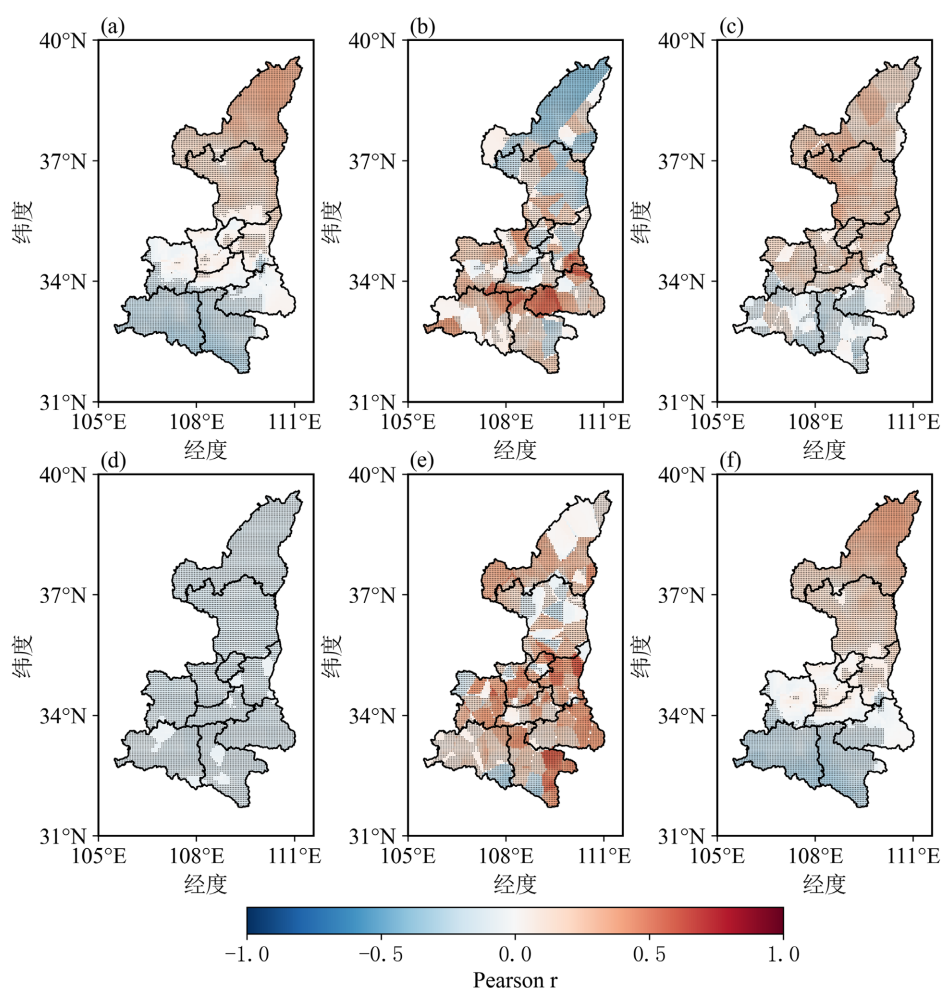


Figure 4. Spatial distribution of correlations between SPEI and (a) Air temperature, (b) Air pressure, (c) Relative humidity, (d) Sunshine duration, (e) Wind speed, and (f) 5 cm soil temperature from 1961 to 2024

图 4. 1961~2024 年(a) 气温; (b) 气压; (c) 相对湿度; (d) 日照时数; (e) 风速; (f) 5 cm 地温与 SPEI 相关性的空间分布

综上，气象因子对 SPEI 的影响呈现出区域分异显著的特征。陕南地区气温、地温升高及湿度降低更易导致 SPEI 下降，从而加剧干旱；而在陕北和关中，湿度升高、风速增强对缓解干旱更为关键，日照与气压则视区域与季节条件表现出不同方向的影响。该结果揭示了陕西省干旱变化受多因耦合作用控制，尤其是在地形复杂与季风边缘地带，气象要素与干旱指标之间的关系呈现出高度非均质性。

4. 陕西省干旱事件识别

根据 1961~2024 年 SPEI 序列，通过三维空间聚类干旱事件识别方法在陕西省共识别到 22 次典型干旱事件(见表 2)，用于干旱事件最大影响范围的重心经纬度区别不同的干旱事件，这些事件具有不同的持续时间、影响范围和空间重心特征，反映了陕西省干旱过程的阶段性与区域性差异。在 22 次干旱事件中，1980 年以前共识别出 1 次(D1~D2)，1980~2000 年间识别出 8 次(D3~D9)，2001 年后识别出 13 次(D10~D22)，其中近十年(2015~2024)就占据了 2 次(D21~D22)，显示出近年来干旱事件发生的频次有所下降。从干旱持续时间来看，大多数典型干旱事件的持续时间集中在 3~6 个月之间，占比 70%，其中 7 次事件持续 3 个月(D1、D3、D5、D7、D11、D13、D18)，占比达 31%；6 个月以上的有 5 次，其中 D20、D21、D22，持续时间均超过 24 个月，表明这些年份陕西干旱过程连续性强、累积效应明显。从影响面积来看，干旱影响范围最大的事件为 D21 和 D22 (2018.01~2019.11)，影响面积均达 24.15%，其次为 D20 (2008.07~2010.08)，达 21.96%。可见近十年的干旱过程的影响范围更广。

Table 2. Characteristics of 22 typical drought events in Shaanxi Province from 1961 to 2024
表 2. 1961~2024 年陕西省 22 个典型干旱事件及其特征

干旱事件	起始时间	结束时间	持续时间	影响面积(%)	重心经纬度
D1	1962.12	1963.03	3	21.2	108.74°E, 35.05°N
D2	1983.09	1984.02	5	9.73	109.21°E, 36.78°N
D3	1985.11	1986.02	3	9.64	109.37°E, 36.42°N
D4	1992.09	1993.01	4	1.99	108.53°E, 34.44°N
D5	1995.10	1996.01	3	6.16	109.70°E, 36.79°N
D6	1996.09	1997.02	5	19.77	109.05°E, 35.76°N
D7	1997.10	1998.01	3	2.17	110.50°E, 35.98°N
D8	1998.10	1999.03	5	17.58	109.13°E, 36.43°N
D9	1999.10	2000.02	4	13.59	109.41°E, 36.39°N
D10	2002.08	2003.02	6	18.5	108.79°E, 35.69°N
D11	2003.07	2003.10	3	1.77	109.42°E, 33.96°N
D12	2003.11	2004.04	5	9.83	109.04°E, 37.02°N
D13	2004.07	2004.10	3	3.28	109.26°E, 34.33°N
D14	2005.01	2005.05	4	7.54	108.71°E, 36.63°N
D15	2005.08	2006.07	11	19.68	109.23°E, 36.23°N
D16	2006.07	2007.04	9	10.11	109.11°E, 36.27°N

续表

D17	2007.05	2007.12	7	11.68	109.46°E, 36.16°N
D18	2007.09	2007.12	3	2.31	108.08°E, 34.82°N
D19	2008.01	2008.05	4	6.64	109.60°E, 35.49°N
D20	2008.07	2010.08	25	21.96	109.23°E, 35.29°N
D21	2016.01	2018.01	24	24.15	108.84°E, 35.24°N
D22	2018.01	2019.11	22	24.15	108.85°E, 35.25°N

图 5 展示了 1961~2024 年间陕西省识别出的 22 个典型干旱事件的持续时间(月)与影响面积的时序分布特征。由图可见, 陕西省干旱事件在时长与影响程度上存在显著的非均质性, 部分事件表现出较强的持续性和广泛性。从图 5(a)来看, 大部分干旱事件的持续时间集中在 3 至 6 个月之间, 典型如 D1 至 D14 事件, 说明此阶段干旱多表现为季节性或中短期事件, 具有一定的周期性波动。然而, 自 2015 年起干旱事件的持续性明显增强, 尤其是 D20、D21 与 D22, 是本时期最为突出的长时段干旱过程, 显著高于前期平均水平(约 5 个月)。这表明在近十年内, 陕西省干旱过程呈现出持续性增强的趋势, 可能与全球变暖背景下高温蒸散加剧密切相关。图 5(b)显示了各事件的影响面积分布。整体上, 不同干旱事件影响范围差异显著。D21 和 D22 的干旱影响面积均为 24.15%, 并列为影响最广的事件; 其次是 D20 (21.96%)、D1 (21.2%)、D6 (19.77%)和 D15 (19.68%), 均属于覆盖范围广、影响强度高的干旱过程。相较之下, D4、D11 等事件的影响面积不足 2%, 属于局地性干旱, 空间影响有限。综合分析图 5(a)与图 5(b)可知, 部分干旱事件(如 D20、D21、D22)具备“长持续 + 广范围”的复合特征, 对农业生产、水资源调配及生态系统的冲击尤为显著; 而另一些干旱事件虽持续时间短, 但影响面积大(如 D1、D6), 则说明在某些年份内短时极端干旱亦可迅速扩展, 造成大范围干旱灾害。总体来看, 陕西省干旱事件呈现出强度增强、时间延长、范围扩大的发展趋势。尤其 2015 年后出现的多个典型干旱事件, 标志着该地区干旱风险的系统性上升。

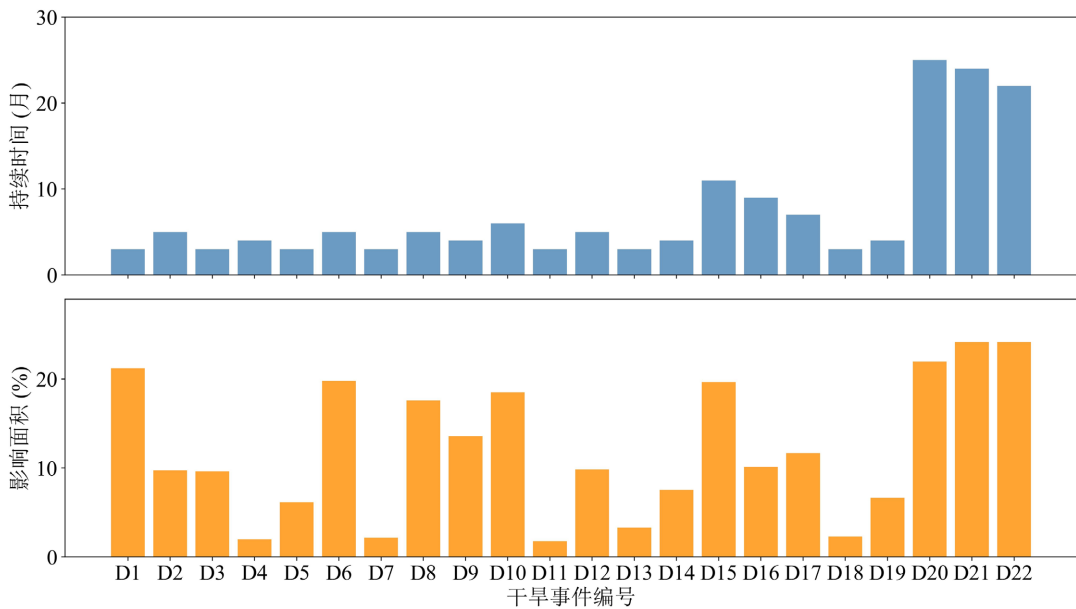


Figure 5. Duration (a) and affected area (b) of the 22 drought events
图 5. 22 个干旱事件的(a) 持续时间和(b) 影响面积

为进一步揭示干旱事件在空间上的演变过程，本文利用典型干旱事件的重心经纬度变化，构建了1961~2024 年陕西省 22 次干旱事件的空间迁移路径图(图 6)，并从迁移方向、迁移频次与平均迁移距离等方面进行了定量分析(图 7)。图 6 显示，多数干旱事件起始于关中地区北部与陕北南缘，即北纬 34.5°~36.5°、东经 108.5°~109.5°区域，这一区域也是前文识别出的干旱影响核心区。干旱事件迁移路径以南北移动为主。例如，D1、D4、D10、D18 等事件均表现为向北推进；D3、D11 等事件则呈现南向迁移趋势，表明其干旱重心随事件进程发生显著偏移。

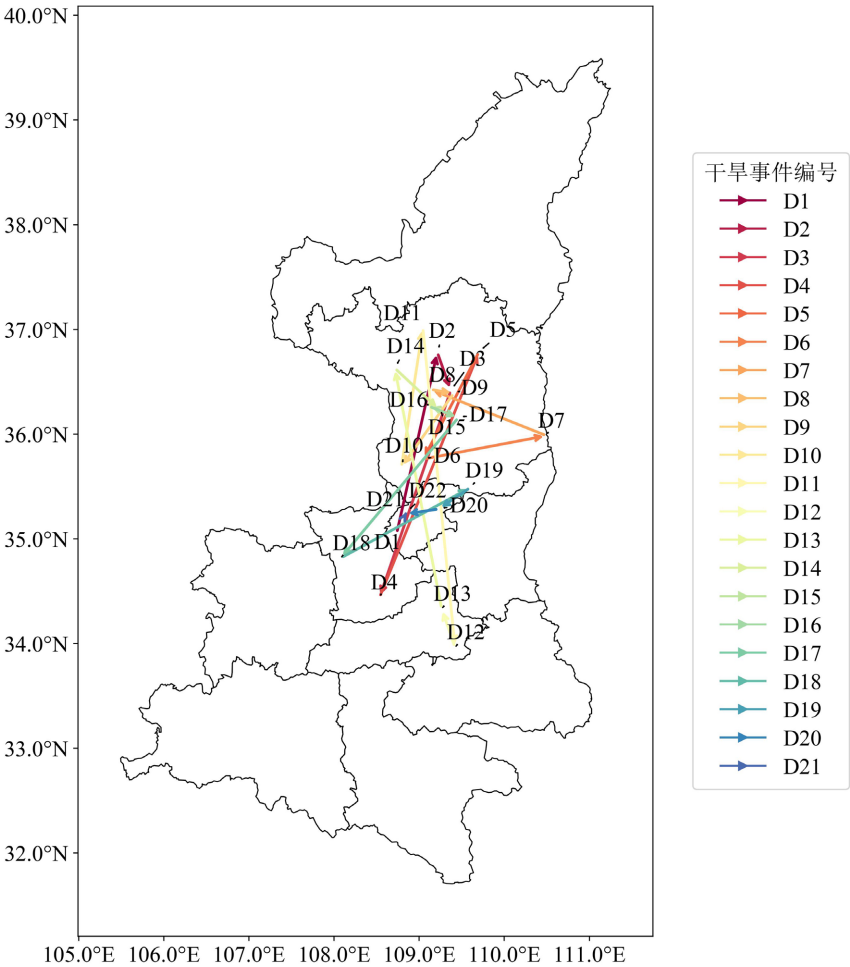


Figure 6. Spatial migration paths of the 22 typical drought events in Shaanxi Province from 1961 to 2024
图 6. 1961~2024 年陕西省 22 次典型干旱事件的空间迁移路径

图 7 综合展示了 1961~2024 年陕西省 22 次典型干旱事件的空间迁移特征，从迁移方向(图 7(a))、迁移频次(图 7(b))和平均迁移距离(图 7(c))三个方面揭示了干旱事件的空间迁移变化特征。如图 7(a)所示，干旱事件的迁移方向在空间上呈现出一定的偏向性，主要分布于北向、南向及东向，整体上表现出“南北向为主、东西向为辅”的迁移格局。其中个别迁移路径长度超过 300 公里，反映出该类干旱事件具备较强的空间延伸性与区域影响力。图 7(b)进一步定量统计了各方向上的干旱事件迁移频次。统计结果表明，北向和南向分别发生了 4 次迁移事件，为最主要的迁移方向，占总数的近四成，说明陕西省干旱事件更倾向于沿经向方向发展，这可能与陕北 - 关中 - 陕南的地形过渡带和气候梯度有关。东方向紧随其后，迁移频次为 3 次，提示干旱重心亦具备一定的纬向传播能力。而西向、西北、西南等方向的迁移频

次相对较低(均为 2 次)。图 7(c)所示为各方向上干旱事件的平均迁移距离。从数据结果看,东南方向干旱事件的平均迁移距离最长,达到约 192 km,显示出尽管此方向迁移频率不高,但其扩展范围广、影响力强;其次为南向(约 162 km)和北向(约 157 km),表明这两个方向不仅迁移频繁,且具备较强的空间传播能力,可能在一定程度上造成区域范围内干旱过程的连续性发展。相比之下,东、西南方向的平均迁移距离仅约 40 km,说明该方向的干旱事件多为短距离局地调整型,迁移能力相对较弱。

总体而言,陕西省干旱事件在空间迁移方面呈现出方向性显著、频次分化、路径长度不均等特点。尤其是北向与南向的高频迁移以及东南方向的远距离扩展,表明干旱事件具有明显的空间推进趋势和跨区域影响潜力。

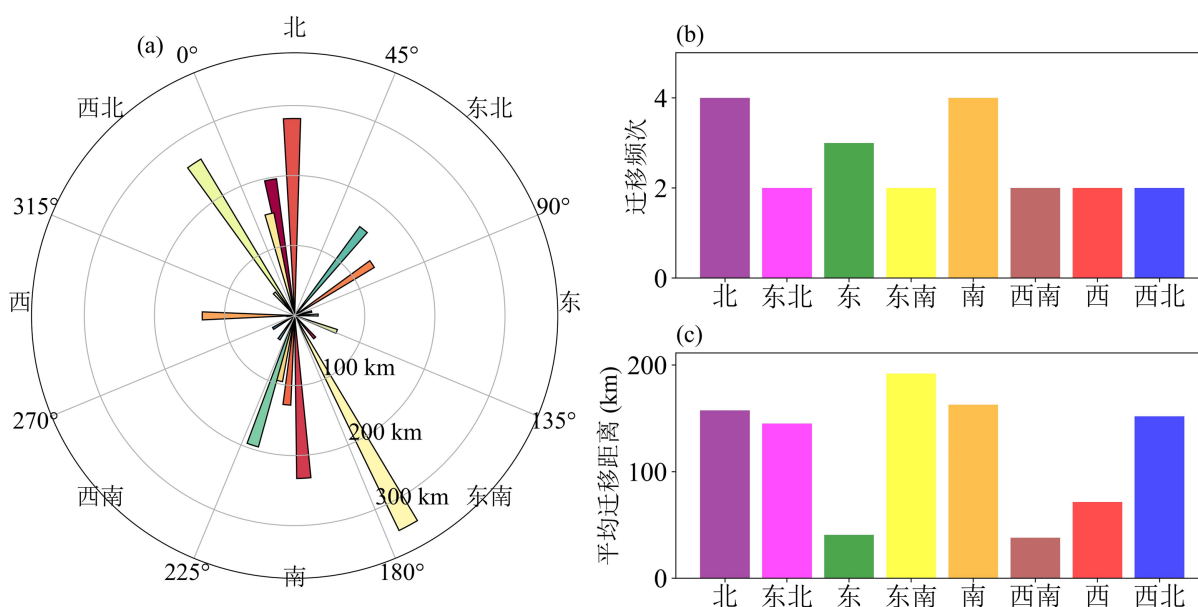


Figure 7. Characteristics of spatial migration changes for the 22 typical drought events in Shaanxi Province from 1961 to 2024
图 7. 1961~2024 年陕西省 22 次典型干旱事件的空间迁移变化特征

5. 结论

本文基于 1961~2024 年陕西省 100 个气象站逐日气象资料,采用 Penman-Monteith 方法估算潜在蒸散量,结合降水量构建标准化降水蒸散指数(SPEI),从时间演变、空间分布及干旱事件识别等方面,系统分析了陕西省气象干旱的时空演变特征及其影响因素,主要结论如下:

(1) 陕西省年平均 SPEI 值在 1960 年代至 1970 年代初期整体偏高,处于湿润状态;1980 年代后开始波动下降,干旱趋势逐步增强,2015~2019 年间 SPEI 降至-1.5 以下,达到重旱等级,成为近 60 年来最为干旱的阶段。年内表现出“冬春偏干-夏季湿润-秋季再干”的季节性变化。

(2) 空间上, SPEI 全年分布整体处于无旱状态,但季节差异明显。冬季为最干旱时段,陕北与关中北部普遍 SPEI 低于-0.5;夏季受季风影响水分充沛,全省呈现湿润格局,局地 SPEI 高于 0.4。陕北地区季节内波动幅度最大,对季风水汽变化响应最为敏感。

(3) 不同气象因子对 SPEI 的影响具有显著空间分异特征。气温在陕北表现为弱正相关、陕南为负相关;气压在陕北为负相关、陕南为正相关;相对湿度在陕北和关中与 SPEI 显著正相关,日照时数则在全省范围内与 SPEI 呈负相关,表明辐射增强加剧干旱;风速与 SPEI 主要为正相关,可能与对流发展和水汽输送有关;浅层地温与气温特征相似,陕北以正相关为主,陕南为负相关。

(4) 基于三维空间聚类方法, 共识别出 22 次典型干旱事件, 干旱过程具有明显的时空连续性。2000 年后长持续时间干旱事件频发, 其中 D20、D21、D22 持续时间均超 24 个月, 为研究期内最典型的持续性干旱。

(5) 干旱事件的空间迁移具有方向性。南北向迁移事件最频繁, 占比近四成, 表明干旱过程受区域性气候梯度与地形影响。东南方向虽迁移频次较低, 但平均迁移距离最长, 显示其干旱扩展潜力最大。

基金项目

陕西省气象局秦岭与黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021Y-3); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-QN-0340)。

参考文献

- [1] Devereux, S. (2000) Famine in the Twentieth Century. Institute of Development Studies.
- [2] Mishra, A.K. and Singh, V.P. (2010) A Review of Drought Concepts. *Journal of Hydrology*, **391**, 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- [3] Zhang, Q., Han, L.Y., Lin, J.J. and Cheng, Q.Y. (2018) North-South Differences in Chinese Agricultural Losses Due to Climate-Change-Influenced Droughts. *Theoretical and Applied Climatology*, **131**, 719-732. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2000-x>
- [4] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500-521.
- [5] Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B. and Khan, F.I. (2011) A Review of Drought Indices. *Environmental Reviews*, **19**, 333-349. <https://doi.org/10.1139/a11-013>
- [6] Henry, A.J. (1906) The Climatology of the United States. US Weather Bureau Bulletin.
- [7] Blumenstock, G. (1942) Drought in the United States Analyzed by Means of the Theory of Probability. United States Department of Agriculture, Economic Research Service.
- [8] McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Boston, 17-22 January 1993, 179-184.
- [9] Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I. (2010) A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, **23**, 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2909.1>
- [10] Wang, J., Zhang, Q., Zhang, L., Wang, Y., Yue, P., Hu, Y., et al. (2022) The Global Pattern and Development Trends and Directions on the Drought Monitoring Research from 1983 to 2020 by Using Bibliometric Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **103**, E2081-E2107. <https://doi.org/10.1175/bams-d-21-0324.1>
- [11] Li, L., She, D., Zheng, H., Lin, P. and Yang, Z. (2020) Elucidating Diverse Drought Characteristics from Two Meteorological Drought Indices (SPI and SPEI) in China. *Journal of Hydrometeorology*, **21**, 1513-1530. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-19-0290.1>
- [12] 葛杰. 陕西省气象干旱时空变化特征与成因分析[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
- [13] 闫彩, 张鑫, 孙媛, 等. 基于 SPEI 的陕西省干旱特征及其对玉米产量的影响[J]. 节水灌溉, 2023(1): 10-18.
- [14] 景兰舒, 黄喜峰, 李勇民, 等. 1973-2023 年陕北地区气象干旱时空演变规律分析[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(5): 9-15.
- [15] 张勇, 黄俊芳, 刘璐, 等. 基于 SPEI 的陕西苹果产区近 60a 干旱变化特征[J]. 中国农学通报, 2024, 40(23): 105-117.
- [16] Ye, Y., González-Vidal, A., Zamora-Izquierdo, M.A. and Skarmeta, A.F. (2025) Transfer and Deep Learning Models for Daily Reference Evapotranspiration Estimation and Forecasting in Spain from Local to National Scale. *Smart Agricultural Technology*, **11**, Article 100886. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100886>
- [17] Shu, Z., Jin, J., Menzel, L., et al. (2025) Evaluating the Performance of Different Surface Resistance Schemes Coupled with the Penman-Monteith Model. *Journal of Hydrology*, **656**, Article 130174.
- [18] 王健顺. 基于机器学习方法的中国北方干旱时空特征及其影响因素研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2024.

-
- [19] Lloyd-Hughes, B. (2011) A Spatio-Temporal Structure-based Approach to Drought Characterisation. *International Journal of Climatology*, **32**, 406-418. <https://doi.org/10.1002/joc.2280>
 - [20] 王学锦. 中国北方农牧交错带植被恢复的水文气候效应[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.
 - [21] 聂明秋. 考虑时空连续的气象干旱迁移及其向农业干旱的传递研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2022.
 - [22] 刘陈立. 基于生态系统健康-风险-服务的甘南高寒牧区生态安全评价[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2022.