

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.024; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.024.

杨广, 史海静, 姜艳敏, 等. 基于日尺度 SPEI 的黄土高原干旱时空变化特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 244-254.

Yang Guang, Shi Haijing, Jiang Yanmin, et al. Spatial-temporal variation characteristics and influencing factors of drought in the Loess Plateau based on daily scale SPEI[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 244-254.

# 基于日尺度 SPEI 的黄土高原干旱时空变化特征及影响因素分析

杨广<sup>1</sup>, 史海静<sup>1,2</sup>, 姜艳敏<sup>2,3</sup>, 吴友福<sup>1</sup>, 王椰<sup>2,3</sup>, 李冀<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** [目的]探究黄土高原地区气象干旱的时空变化特征及其影响因素, 以为该地区的干旱监测、旱作农业粮食生产、水资源管理及生态恢复建设提供科学支撑。 [方法]基于黄土高原地区 119 个站点 1957—2019 年逐日气象资料, 使用 FAO Penman-Monteith 公式计算了日尺度潜在蒸散发及标准化降水蒸散指数 (SPEI), 并采用 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 趋势分析, 探讨了干旱天数、干旱事件发生次数和强度的分布特征及变化趋势。同时, 使用皮尔逊相关系数分析气象因子与干旱指标的关系, 并结合土地利用类型转移矩阵探讨了人类活动对气象干旱的影响。 [结果] (1) 日尺度 SPEI 在识别干旱天数、干旱事件发生次数和强度方面比月尺度 SPEI 更为精确; (2) 1957—2019 年黄土高原西北地区干旱事件发生次数增加, 大部分区域干旱强度呈现不断增加的趋势, 不同类型干旱的天数有所降低; (3) 黄土高原东南部和西北部地区存在明显的变干趋势, 而北部和南部地区则呈现出湿润化趋势; (4) 气象因子与干旱指标之间存在中等相关关系, 土地利用/地表覆盖对黄土高原地区的气象干旱产生了一定程度的影响。 [结论]黄土高原地区的气象干旱受气候因素和人类活动的双重影响, 其时空变化特征复杂。研究结果为该地区的干旱监测与管理提供了重要的科学依据。

**关键词:** 黄土高原; 日尺度 SPEI; 气象干旱; Theil-Sen Median 斜率估计

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0244-11

## Spatial-temporal variation characteristics and influencing factors of drought in the Loess Plateau based on daily scale SPEI

Yang Guang<sup>1</sup>, Shi Haijing<sup>1,2</sup>, Jiang Yanmin<sup>2,3</sup>, Wu Youfu<sup>1</sup>, Wang Ye<sup>2,3</sup>, Li Ji<sup>1</sup>

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the spatial and temporal characteristics of meteorological drought and its influencing factors in the Loess Plateau region, and to provide scientific support for drought monitoring, dry-crop agricultural food production, water resource management and ecological restoration construction in this region. [Methods] Based on the day-by-day meteorological data of 119 stations in the Loess Plateau region from 1957 to 2019, the daily-scale potential evapotranspiration (PET) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) were calculated using the FAO Penman-Monteith formula. Theil-Sen Median slope estimation and Mann-Kendall trend analysis were used to explore the distribution characteristics and trends of the number of drought days, the number and intensity

收稿日期: 2024-05-09

修回日期: 2024-05-21

接受日期: 2024-06-27

资助项目: 西部青年学者项目 (XAB2020YN04); 国家自然科学基金 (41501055); 国家科技基础条件平台建设项目 (2005DKA32300)

第一作者: 杨广 (2000—), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境遥感。E-mail: elliott67@163.com

通信作者: 史海静 (1983—), 女, 陕西扶风人, 博士, 副研究员, 主要从事数字水土保持与大数据分析、生境异质性对生态过程与格局影响的研究。E-mail: shihaijingcn@nwafu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

of drought events. Meanwhile, Pearson correlation coefficient was used to analyze the relationship between meteorological factors and drought indicators. The impact of human activities on meteorological drought was explored in combination with the land use type transfer matrix. [Results] (1) The daily-scale SPEI was more accurate than the monthly-scale SPEI in identifying the number of drought days, the number of drought events and intensity. (2) The number of drought events increased in the northwestern part of the Loess Plateau from 1957 to 2019, and the intensity of drought in most regions showed an increasing trend, with the number of days of different types of droughts decreasing. (3) There was a clear trend of drying in the southeastern and northwestern regions of the Loess Plateau, while the northern and southern regions show a trend of wetting. (4) There was a moderate correlation between meteorological factors and drought indicators, and the land use/surface cover affected meteorological droughts to a certain extent in the Loess Plateau region. [Conclusions] Meteorological drought in the Loess Plateau region is influenced by both climatic factors and human activities, and its spatial and temporal changes are characterized by complexity. The results of the study can provide an important scientific basis for drought monitoring and management in this region.

**Keywords:** Loess Plateau; daily scale SPEI; meteorological drought; Theil-Sen median slope estimation

气候变化是目前人类面临的主要环境问题之一<sup>[1]</sup>, 而由气候变化引发的一系列极端干旱事件已严重阻碍了人类赖以生存的农业、经济和社会的发展以及环境建设进程<sup>[2]</sup>。作为传统的农业大国,我国深受干旱灾害的影响,且干旱灾害影响区的范围持续扩大<sup>[3]</sup>。因此,亟需开展准确高效的干旱监测及预测研究,为我国区域干旱的风险防范、农业资源管理工作提供依据。

黄土高原位于半湿润气候和半干旱、干旱气候的过渡区域,是我国主要的旱作农业区之一<sup>[4]</sup>。然而,复杂的地理环境和不稳定的气象因子导致该地区干旱灾害呈增加趋势,成为全国干旱灾害发生最频繁的地区之一,农业生产也因此受到了严重的影响<sup>[5]</sup>。寻求更加科学的方法对黄土高原地区干旱灾害进行分析,从而准确获取干旱特征信息、提高干旱事件预测能力,对于保证黄土高原地区旱作农业粮食生产、提供水资源管理政策以及保证生态恢复建设工作的持续推进具有重要意义<sup>[5]</sup>。

目前,多使用干旱指数如 Palmer 干旱指数、SPI 以及 SPEI 等作为评价指标对气象干旱、农业干旱和水文干旱进行监测研究<sup>[6]</sup>。其中,Palmer 干旱指数虽然综合考虑了土壤水平衡模型中的降水、蒸发、径流量和土壤水分等因素,但受制于其固有的时间尺度,不能很好地进行多尺度、大范围区域干旱事件的监测分析<sup>[7]</sup>; SPI 拥有多尺度监测的能力,但由于其仅考虑降水因素,忽略了气温、相对湿度、日照时数等对干旱事件的影响,因此在一些气象因子复杂多变的地区并不适用<sup>[8]</sup>; SPEI 综合考虑了气温、降水、海拔、相对湿度、日照时数等多种气象因素,根据不同时间尺度内降水和潜在蒸散发的差值来反映干旱程度,并且基于 Penman-Monteith 方法修正后的潜在蒸散发计算得出的

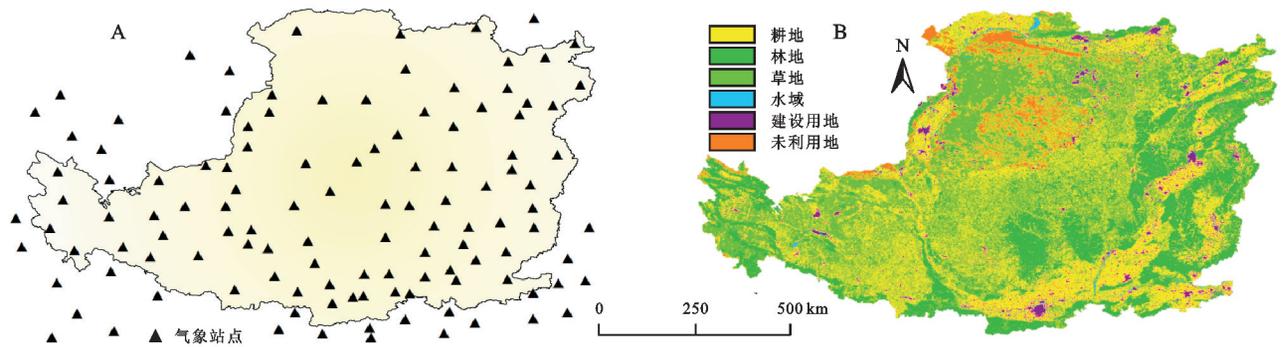
SPEI 已经被证实适用于中国干旱地区的干旱事件监测<sup>[2]</sup>。但目前基于 SPEI 的干旱研究中,SPEI 的时间尺度多为年尺度、季节尺度和月尺度,这容易忽略干旱发生的起始时间、持续时长等关键特征,无法准确识别干旱的实际持续天数、干旱发生的强度和频率<sup>[9]</sup>。

基于此,为了更精确地识别黄土高原地区干旱发生的时长、强度和频率等特征信息,本研究参照 Wang 等<sup>[10]</sup>的算法,使用 Penman-Monteith 方法计算日尺度蒸散发,将 SPEI 的时间尺度提升至日尺度,统计干旱天数、干旱事件发生次数和强度 3 项干旱指标,运用 Mann-Kendall 检验和 Sen 斜率估计方法,探讨黄土高原 1957—2019 年的气象干旱时空分布及变化特征,并使用皮尔逊相关系数和土地利用转移矩阵进行气象干旱驱动因子研究,旨在为干旱预测、农牧业发展和科学管理提供参考依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原地区(33°41'—41°16'N,100°52'—114°33'E)位于中国太行山以西,青海省日月山以东,秦岭以北,长城以南,总面积约 63.5 万 km<sup>2</sup><sup>[11]</sup>。如图 1 所示,该地区横跨中国温带和暖温带的南北边界,海拔 94~5 010 m,地势西高东低,跨越半湿润、半干旱和干旱的东西边界,气候类型复杂多样,主要土地利用类型包括草地、林地和耕地,年平均降水量为 123.3~948.9 mm,西北地区年均降水少于东南地区,年平均气温 4.3~14.3 °C,东南地区年均温高于西北地区<sup>[12]</sup>。较高的年均温度和稀少的降水使得该地区整体较为干燥,复杂的地理环境和近年来频繁的人类活动导致黄土高原地区土壤水分流失严重,加剧了黄土高原地区的干旱状况<sup>[13]</sup>。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2016)2923 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 黄土高原气象站点分布和土地利用类型

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and land use type on the Loess Plateau

## 1.2 数据来源

1.2.1 气象数据 气象数据来自中国气象局国家气象信息中心“中国地面气候资料日值数据 V3.0”(http://cdc.cma.gov.cn/),主要包括 1957—2019 年中国 2 474 个国家级地面站气压、气温、降水量、相对湿度、风向风速、日照时数和 0 cm 地温要素的日值数据。本研究使用黄土高原地区 119 个气象站点数据,对于缺测序列  $\leq 5$  d 的数据,采用近几日数据线性插值插补,若缺测数据序列  $> 5$  d,则利用同一日的多年平均值插补。

1.2.2 土地利用数据 本文使用的土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/) 的中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC),空间分辨率为 30 m,时间节点为 1980 年、2000 年、2018 年 3 期。利用 ArcGIS 软件进行土地利用重分类、掩膜等操作得到黄土高原地区 1980 年、2000 年、2018 年 3 期土地利用数据,根据 LUCC 分类体系,将黄土高原地区土地利用分为 6 类:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

1.2.3 旱情资料数据 本文使用旱情资料与计算所得日尺度 SPEI 进行对比,从而验证日尺度 SPEI 在黄土高原地区的适用性。旱情资料来自《中国气象灾害大典》<sup>[14]</sup>和《中国气象灾害年鉴》<sup>[15]</sup>。

## 1.3 研究方法

1.3.1 SPEI 指数计算 基于 Vicente-Serrano 等提出的 SPEI 计算方法中的潜在蒸发计算模块进行计算,具体参考文献[16]。在计算潜在蒸散发时,本研究采用 FAO(联合国粮食及农业组织)推荐的 Penman-Monteith 法代替 Thornthwaite 方法计算潜在蒸发,更适用于我国干旱半干旱地区<sup>[17]</sup>,公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中:  $ET_0$  为潜在蒸散量 (mm/d);  $R_n$  为净辐射 [MJ/

( $m^2 \cdot d$ )];  $G$  为土壤热通量 [MJ/( $m^2 \cdot d$ )];  $T$  为日平均温度 ( $^{\circ}C$ );  $u_2$  为 2 m 处风速 (m/s),由 10 m 处的风速乘以 0.75 求得;  $e_s$  为饱和水汽压 (kPa);  $e_a$  为实际水汽压 (kPa);  $\Delta$  为饱和水汽压-温度曲线斜率 (kPa/ $^{\circ}C$ );  $\gamma$  为干湿表常数 (kPa/ $^{\circ}C$ )。

1.3.2 空间插值方法 本研究使用的气象数据为地面气象站点的监测数据,需使用空间插值方法转为栅格数据。目前插值方法主要有泰森多边形法 (Thiessen Polygon)、反距离权重法 (Inverse Distance Weighted)、克里金法 (Kriging)、样条函数法 (Spline) 等<sup>[18]</sup>。基于半变异函数的克里金法和局部曲率最优的样条函数法在插值结果的精度上表现较出色。考虑到数据结构、误差估计以及计算的便捷性,在气候数据插值方面,样条函数的应用更为广泛。

1.3.3 干旱评价指标 根据国家气象干旱评级标准 (GB/T20481—2017),将 SPEI 划分为 5 个等级,当某一地区日 SPEI 小于或等于 -0.5 时,将其视为处于干旱状况,具体干旱状况等级划分见表 1。根据以上标准汇总日尺度 SPEI,从而实现黄土高原区不同干旱类型的划分以及各类干旱天数统计。

表 1 标准化降水蒸散指数 (SPEI) 干旱等级划分

Table 1 Drought classification by Normalized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

干旱等级	干旱类型	SPEI 范围
1	无旱	$SPEI > -0.5$
2	轻度干旱	$-1 \leq SPEI \leq -0.5$
3	中度干旱	$-1.5 \leq SPEI < -1$
4	严重干旱	$-2 \leq SPEI < -1.5$
5	极端干旱	$SPEI \leq -2$

此外,本文基于王晓丹等<sup>[19]</sup>的研究,引入干旱事件发生次数和干旱事件强度两个指标来进行黄土高原气象干旱的定量评估描述:考虑到逐日 SPEI 值的波动性,参考黄土高原实际情况,我们定义连续 7 d 时间内日尺度 SPEI 值小于 -0.5 的第一天为干旱事

件的起始。如果连续时段内所有日尺度 SPEI 值均小于  $-0.5$ , 则将其视为一次完整的干旱事件。一旦 SPEI 值大于或等于  $-0.5$ , 则表示干旱事件结束。我们将研究时段内干旱事件的数量定义为干旱发生次数, 而干旱事件发生过程中逐日 SPEI 绝对值之和表示为干旱事件的强度。

#### 1.3.4 Sen 斜率估计方法和 Mann-Kendall 检验

Sen 斜率估计方法是一种非参数统计的趋势计算方法, 该方法计算效率高, 对于测量误差和离群值数据不敏感, 因此适用于长时间序列数据的趋势分析<sup>[19]</sup>。其计算公式为:

$$\beta = \text{mean} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), j > i \quad (2)$$

式中:  $x_j$  和  $x_i$  为时间序列数据;  $\beta$  大于 0 表示时间序列呈现上升趋势;  $\beta$  小于 0 表示时间序列呈现下降趋势。

Mann-Kendall 方法是一种非参数统计检验方法, 其主要优点是不需要假设测量值服从正态分布, 并且不受缺失值和异常值的影响<sup>[20]</sup>。因此, 在长时间序列数据的趋势显著性检验中, Mann-Kendall 方法得到了广泛的应用。其统计检验方法如下:

对于时间序列  $x_i, i = 1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n$ 。定义标准化检验统计量  $Z$ :

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & (\theta = 0) \\ -1 & (\theta < 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $x_j$  和  $x_i$  为时间序列数据;  $n$  为数据个数; 当  $n \geq 8$  时, 检验统计量  $S$  近似为正态分布, 其均值和方差如下:

$$E(S) = 0 \quad (6)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

在给定显著性水平  $\alpha$  下, 如果  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ , 表明不存在趋势的假设被拒绝, 时间序列数据存在明显的趋势变化。  $Z_{1-\alpha/2}$  为在置信水平  $\alpha$  下, 标准正态函数分布表对应的值。当  $Z$  的绝对值大于 1.65, 1.96, 2.58 时, 表示趋势分别通过了信度为 90%, 95% 和 99% 的显著性检验。

1.3.5 皮尔逊相关系数法 相关分析法可以度量不同序列关系密切程度, Pearson 相关系数用于衡量两个不同序列之间线性关系的强度。当相关系数  $r$  接近于 1

时, 表示两组数据之间的正相关性越强, 而当  $r$  接近于  $-1$  时, 表示两组数据之间的负相关性越强<sup>[21]</sup>。在本文中, 我们使用皮尔逊相关分析法来探究黄土高原地区干旱天数、干旱事件发生次数、强度以及气象要素之间的相关性。皮尔逊相关系数  $r$  的计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中:  $i$  为年份;  $n$  为时间序列长度;  $x_i$  和  $y_i$  为第  $i$  年的样本值。

1.3.6 土地利用转移矩阵 为研究人类活动对气象干旱的影响, 计算黄土高原地区土地利用类型转移矩阵。土地利用类型转移矩阵显示了从一个时段到另一个时段土地利用类型的变化情况, 是目前土地利用研究中应用最为广泛的方法之一<sup>[22]</sup>, 计算公式为:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{i1} & \cdots & S_{ij} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{S}$  为研究时段内的转移矩阵;  $S_{ij}$  为研究时段内第  $i$  种土地利用/土地覆被类型转化为第  $j$  种类型的面积;  $n$  为土地利用的类型数量。

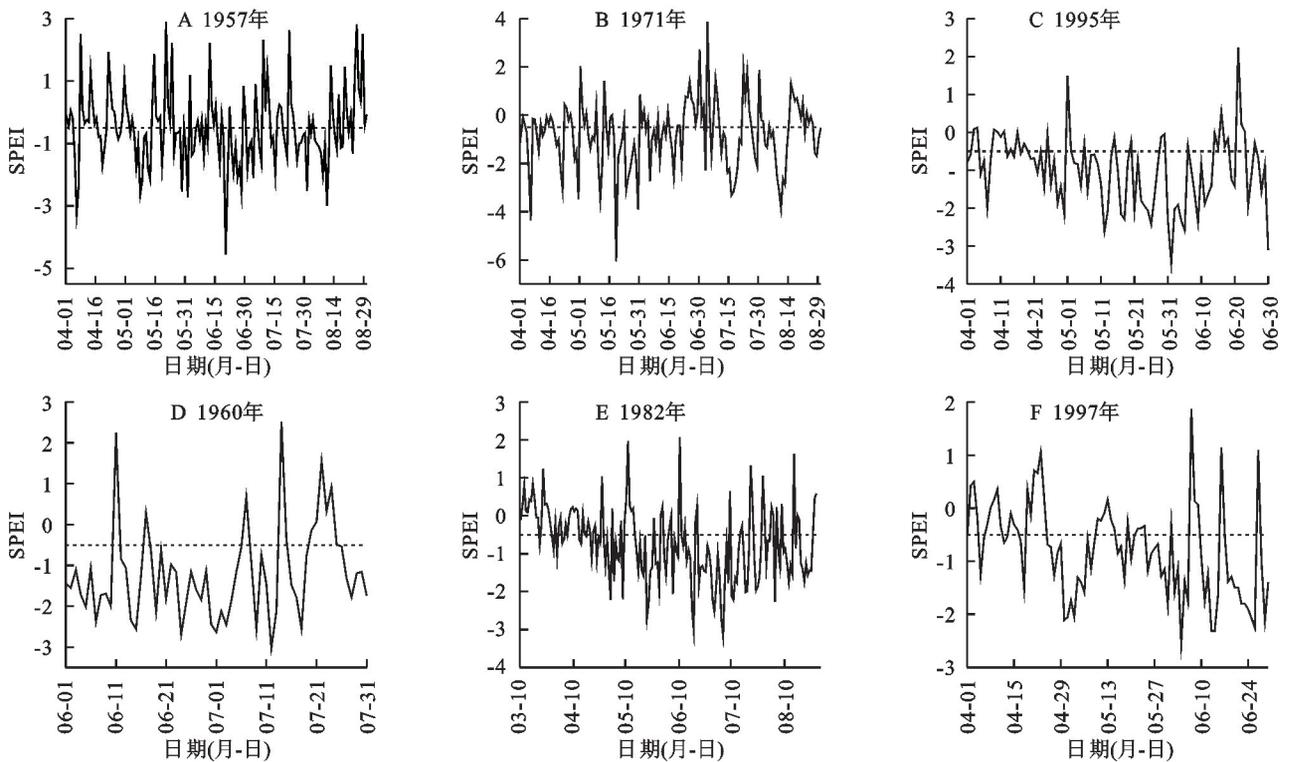
## 2 结果与分析

### 2.1 日尺度 SPEI 指数适用性验证

本文以《中国气象灾害大典》中关于黄土高原地区的旱情记录为依据, 随机选取陕西榆林市、宁夏同心县部分年份旱情记录进行黄土高原地区日尺度 SPEI 适用性验证。由图 2 和表 2 可见, 日尺度 SPEI 图像波动较大, 但总体能够反映干旱状况, 并且与 SPEI 均值和干旱天数相结合能更好地描述干旱, 因此日尺度 SPEI 在黄土高原地区适用性较好, 特别是在识别具体某次干旱事件的发生过程时, 日尺度 SPEI 与旱情资料记载具有高度一致性。

### 2.2 日尺度和月尺度 SPEI 识别干旱能力对比

本研究选择陕北地区榆林站进行日尺度和月尺度 SPEI 识别干旱能力对比分析, 由于日尺度数据较多, 因此本研究选择干旱状况较轻的 2003 年和干旱状况较严重的 2013 年的日尺度和月尺度 SPEI 进行比较 (图 3)。基于月尺度的研究结果表明, 在干旱状况较轻的 2003 年, 榆林地区只有 4 月份的 SPEI 小于 0, 且由于该月 SPEI 为  $-0.227$ , 因此认定 2003 年榆林地区并未发生干旱; 在干旱状况较为严重的 2013 年, 榆林地区 3—6 月 SPEI 均小于  $-0.5$ , 且 3—6 月份 SPEI 分别为  $-1.17$ ,  $-1.44$ ,  $-1.52$  和  $-1.29$ ; 2 月、3 月、4 月、6 月份属于中度干旱等级, 5 月份属于严重干旱等级。



注:虚线代表  $SPEI = -0.5$ ,虚线以下代表发生干旱。

图 2 日尺度 SPEI 适用性验证

Fig. 2 Verification of the applicability of daily SPEI

表 2 日尺度 SPEI 与旱情记载对比

Table 2 Comparison between SPEI and drought records on daily scale

旱情记载	SPEI 图像	SPEI 均值	干旱天数及占比
1957 年 4 月初—8 月中旬,榆林地区持续干旱	图 2A	-0.59	79(56.52%)
1971 年 4—8 月,榆林地区一直干旱	图 2B	-0.78	89(64.4%)
1995 年受干旱影响,陕北地区从 4 月份开始,直至 5 月、6 月春播一直无法人种	图 2C	-0.98	60(65.94%)
1960 年,同心县 6—7 月份发生夏旱	图 2D	-1.21	51(83.61%)
1982 年,宁夏同心出现春、夏、秋连旱	图 2E	-0.68	117(65%)
1997 年 4—6 月,在遭受了 1992 年以来的连续干旱后又发生了特大干旱	图 2F	-0.78	74(81.3%)

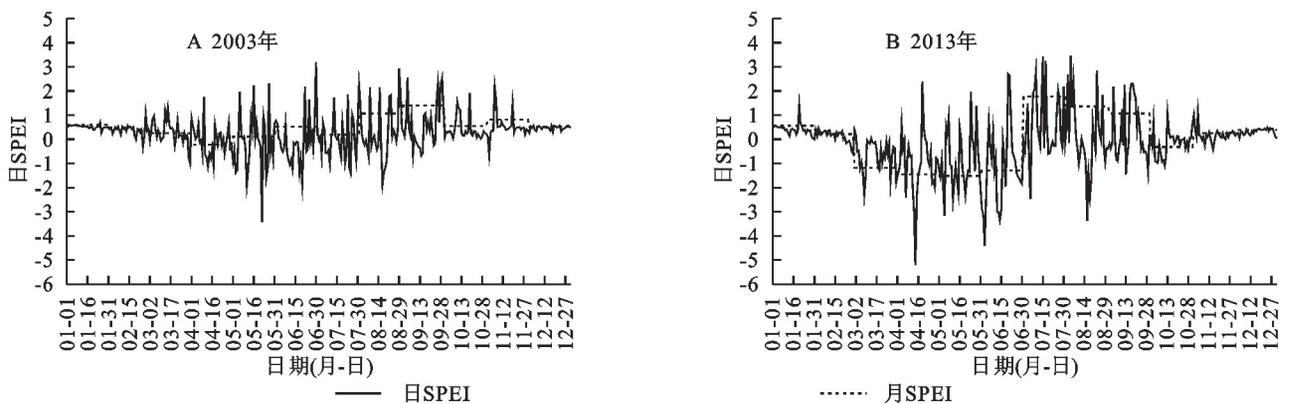


图 3 榆林市 2003 年、2013 年日尺度 SPEI 与月尺度 SPEI 对比

Fig. 3 Comparison of daily and monthly SPEI in Yulin City in 2003 and 2013

基于日尺度的研究表明,2003 年榆林地区 4—8 月份均存在 SPEI 小于 -0.5 的现象,说明 4—8 月该地区发生了干旱,这与月尺度 SPEI 监测结果存

在差异。且该地区在 4—8 月份共 150 d 内日尺度 SPEI 小于 -0.5 的累计天数为 50 d,其中处于轻度、中度、重度和极端干旱分别为 30 d,15 d,4 d 和 1 d。

在干旱情况较为严重的 2013 年,榆林地区有 110 d 处于干旱状态,其中轻度、中度、严重和极端干旱天数分别为 45 d,24 d,20 d 和 22 d,轻度干旱主要分布在 3 月、4 月、10 月份,轻度干旱和严重干旱主要分布在 4 月、5 月份,极端干旱主要集中于 5 月、6 月份。

根据月尺度和日尺度 SPEI 对比发现,时间尺度越大,SPEI 值波动越小,这与侯青青等<sup>[23]</sup>研究一致。不同时间尺度的 SPEI 均可以反映出某一地区的整体干旱程度,SPEI 尺度越小,对短期降水和温度就越敏感<sup>[24]</sup>。此外,在干旱情况较重的年份,日尺度和月尺度 SPEI 在判别干旱强度方面的能力相差并不大,但在识别具体干旱天数以及发生月数方面,日尺度 SPEI 更为精确。在干旱情况相对较轻的年份,月尺度 SPEI 往往无法识别干旱,而日尺度 SPEI 不仅能够敏锐地识别干旱的发生,而且可以精确地指出干旱发生的等级和主要发生月份。

### 2.3 干旱的时空变化特征

2.3.1 干旱的年际变化特征 由图 4 可知,1957—2019 年黄土高原地区干旱事件发生次数呈先减少后

增加的变化特征,总体呈现缓慢增加趋势,平均干旱事件发生次数为 1.47 次/a。其中 1957—1972 年干旱事件发生次数较多,达到 1.75 次/a;自 1973 年起至 1993 年的 20 年间黄土高原地区干旱事件发生次数显著减少,平均发生次数为 1.03 次/a;随后干旱事件发生次数便逐渐增加,除了 2003 年为 0.76 次外,其余各年份干旱事件发生次数均维持在 1.65 次/a 左右。在研究时段内,黄土高原地区干旱事件强度同样呈现先减小后增大的变化特征,总体来看 1957—1976 年、1993—2019 年发生的干旱事件强度较大,1977—1992 年发生的干旱事件强度较小。与干旱事件发生次数相比,干旱强度的增加趋势更加明显。1957—2019 年,黄土高原轻度、中度、严重、极端 4 类干旱总体变化特征与干旱次数和干旱事件强度基本一致。该地区干旱类型以轻度和中度干旱为主,占总干旱天数的 72.82%,其次是严重干旱和极端干旱,分别占比 13.65%和 13.53%。此外,4 类干旱发生的天数均呈现降低趋势,极端干旱和严重干旱天数下降趋势明显。

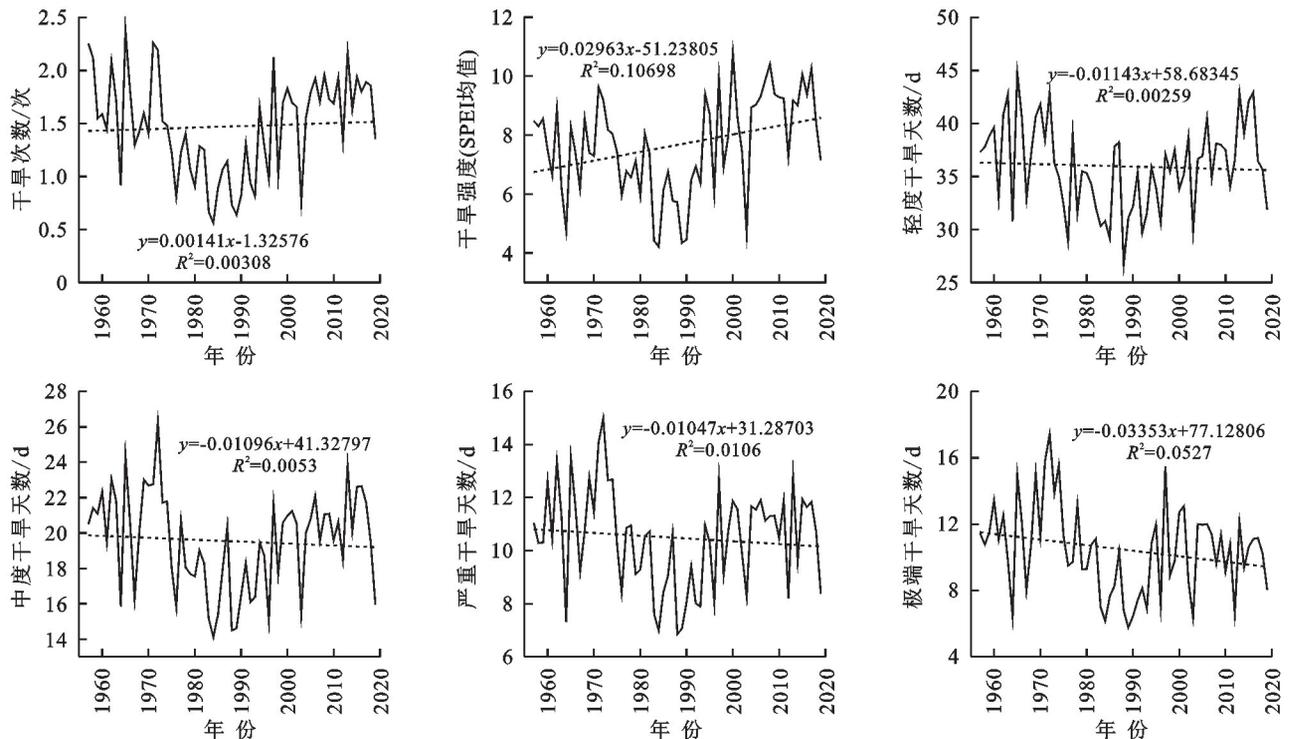


图 4 黄土高原干旱时间变化

Fig. 4 Temporal variation of drought on the Loess Plateau

2.3.2 干旱的空间变化特征 本研究选取干旱事件发生次数和干旱事件年均强度两项指标,使用 ArcGIS 软件样条函数法进行空间插值,以便清晰地刻画黄土高原地区干旱的空间变化特征。由于研究时段跨度较大,因此选取每 10 a 平均干旱事件发生次数和干旱事件年均强度进行空间插值。由图 5 可知,黄土高原地

区干旱事件发生次数和年平均强度均呈现出西北部高、东部和南部地区低的特征。1957—1980 年干旱事件发生次数较多,年平均强度较高,其中黄土高原北部内蒙古巴彦淖尔地区干旱事件次数和强度均显著增加,西南部甘肃省兰州地区和陕西宝鸡地区干旱事件次数和强度均显著减少;1980—2000 年黄土高原西北

部地区干旱事件发生次数大幅减少,年平均强度降低,东南地区干旱事件发生次数减少,干旱事件强度增加;2000—2019年黄土高原西北部地区干旱事件发生次数再次增加,年平均强度稍有降低,干旱事件发生次数增加区域主要位于宁夏银川、吴忠、中卫地区。东南地区

干旱事件发生次数和干旱事件强度均发生了不同程度的增加。总体来说,1957—2019年,黄土高原地区干旱事件发生次数先增后减,西北地区增加较为明显,而除了部分地区干旱事件强度减少外,黄土高原大部分区域干旱事件强度处于不断增加状态。

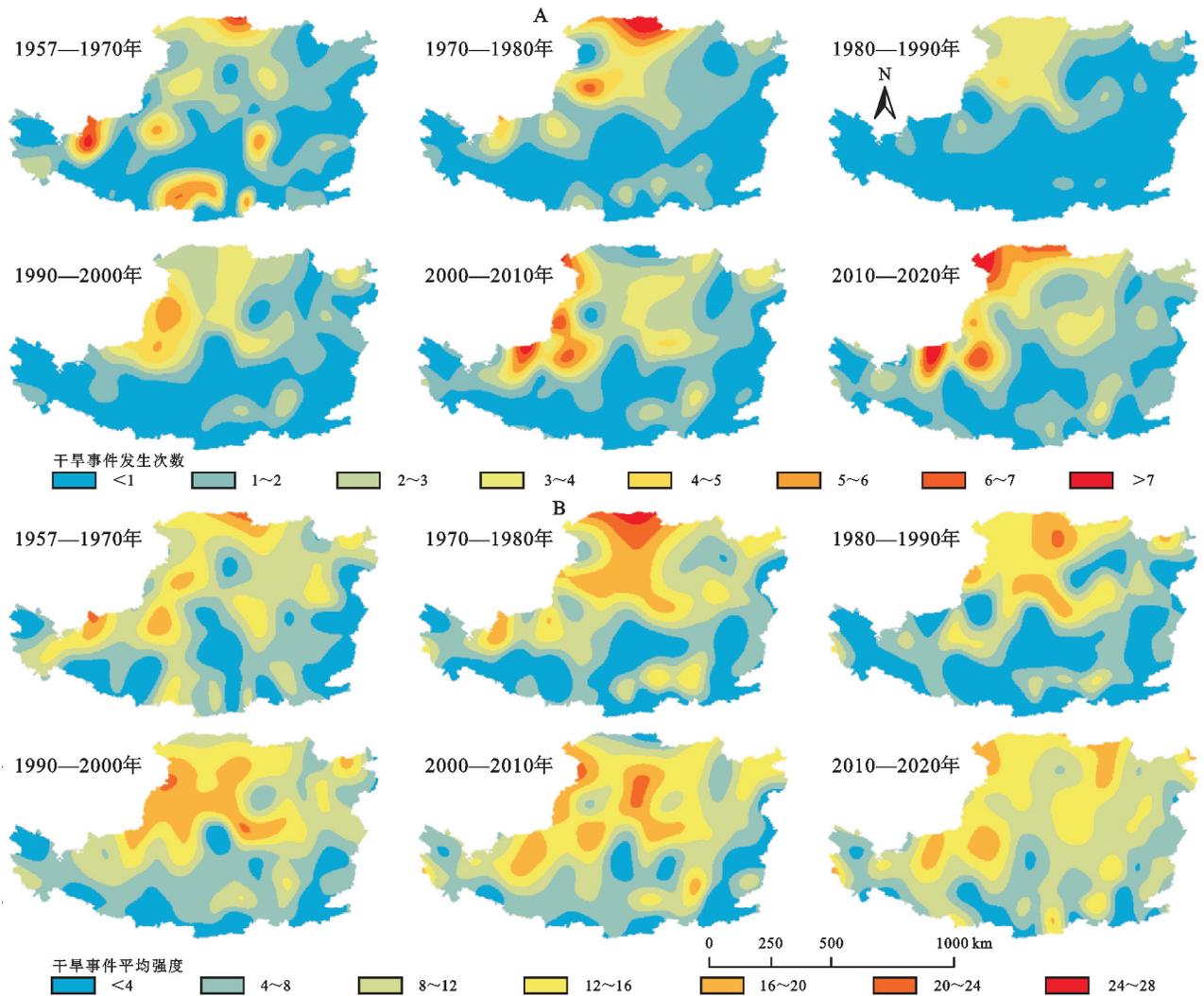


图 5 黄土高原地区干旱空间变化

Fig. 5 Spatial variation of drought in the Loess Plateau

#### 2.4 黄土高原干旱特征趋势分析

本文采用 Sen 斜率估计方法,选取黄土高原地区干旱天数、干旱发生次数和强度进行趋势分析,从而综合反映一定时间序列下黄土高原干旱演变规律,同时结合 Mann-Kendall 法对其进行显著性检验(图 6)。黄土高原地区 63 年间年干旱天数具有较为明显的增加或减少趋势,年干旱天数表现为显著增加、显著减少的区域分别占 26.41%,31.18%。其中,显著减少的区域主要位于黄土高原中部和北部,包括内蒙古巴彦淖尔、鄂尔多斯地区,甘肃省庆阳、吴忠地区,陕西省榆林、铜川地区,山西省吕梁、太原、大同地区;年干旱天数显著增加的区域主要位于黄土高原西北部、中部和东南部,主要包括内蒙古鄂尔多斯西部地

区,陕西省榆林南部、延安北部地区,山西晋中、长治、晋城一线区域。

相较于干旱天数,干旱事件发生次数和强度两项指标存在十分明显的增加趋势(表 3)。其中干旱事件发生次数显著增加区域占比 38.69%,主要位于黄土高原中部和西北部,包括内蒙古阿拉善、乌海地区,宁夏银川、吴忠地区,甘肃省白银、定西、庆阳地区,山西省晋中、晋城地区以及陕西省除延安、咸阳、宝鸡外的大部分区域;发生次数显著降低区域主要位于甘肃省兰州地区、陕西省宝鸡、咸阳地区以及内蒙古巴彦淖尔东部地区。干旱事件强度显著增加区域占比 27.38%,主要位于宁夏吴忠地区,甘肃省白银、定西地区,陕西延安地区和山西临汾地区。

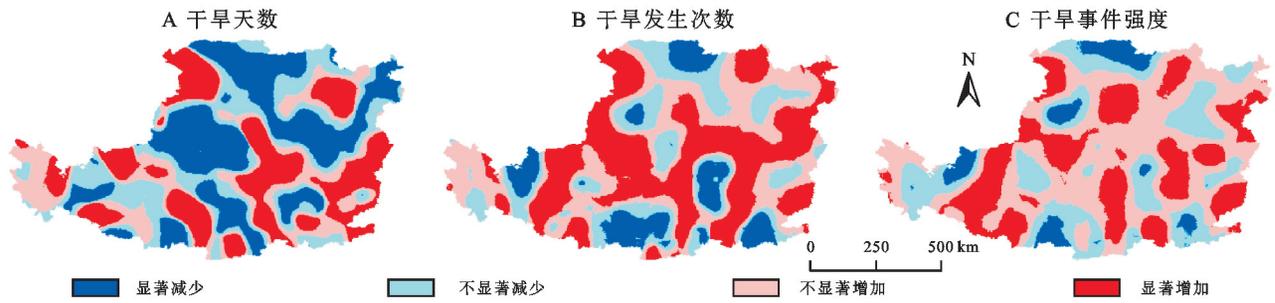


图 6 干旱特征趋势分析

Fig. 6 Trend analysis of drought characteristics

表 3 不同干旱特征趋势变化及占比

Table 3 Trend changes and proportions of different drought characteristics

干旱天数趋势 变化及区域占比	干旱事件次数趋势 变化及区域占比	干旱事件强度趋势 变化及区域占比
显著增加(26.41%)	显著增加(38.69%)	显著增加(27.38%)
不显著增加(19.04%)	不显著增加(29.53%)	不显著增加(42.00%)
显著减少(31.18%)	显著减少(11.99%)	显著减少(6.71%)
不显著减少(23.37%)	不显著减少(19.79%)	不显著减少(23.91%)

### 3 讨论

#### 3.1 气象因素对干旱的影响

使用 python 软件将黄土高原地区逐日降水、温度、日相对湿度、日照时数和平均风速数据合成为年均值,使用皮尔逊相关系数法计算黄土高原地区年降水量(PRE)、温度(TEM)、平均相对湿度(RH)、平均

日照时数(SD)、平均风速(AWS)、干旱天数(DAYS)、干旱事件发生次数(FRE)和干旱事件强度(INT)的相关性,并绘制热图。

结果表明,1957—2019 年黄土高原年干旱事件次数和干旱事件强度均呈增加趋势,干旱状况较重的年份主要集中于 1960—1970 年和 1990 年至今,1970—1990 年黄土高原地区则处于干旱程度较轻的状态,这与冯仕远等<sup>[25]</sup>研究结果一致。随着干旱事件次数和干旱事件强度不断增加,4 类干旱发生的天数缓慢减少,这意味着黄土高原干旱化趋势加重,极端干旱天气正不断增加。这与黄土高原地区的降水、气温等气象条件密不可分<sup>[26]</sup>,由图 7 可知,近年来黄土高原地区降水总体呈现缓慢增加趋势,平均温度则以 0.031 °C/a 的速率持续波动增加,加剧了黄土高原地区的干旱情况。

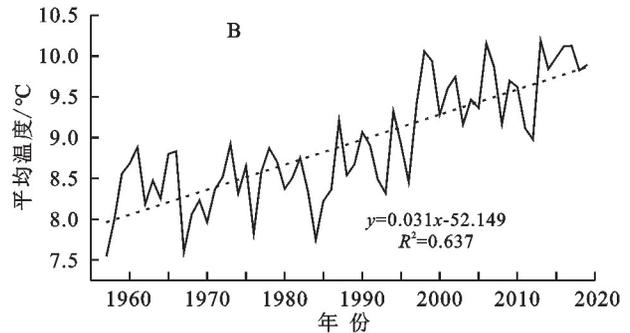
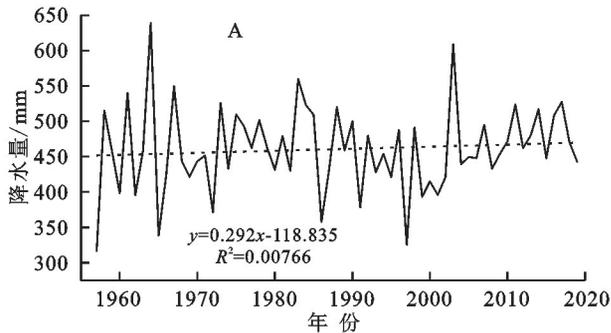


图 7 黄土高原地区年降水和温度

Fig. 7 Annual precipitation and temperature in the Loess Plateau

由图 8 可知,3 项干旱指标间相关系数均在 0.7 以上,表明 3 类干旱指标之间存在极强的正相关关系,降水量和干旱事件发生次数(FRE)、干旱事件强度(INT)和干旱天数(DAYS)相关系数分别为-0.37,-0.29 和-0.46,表明降水量和 3 项干旱指标间存在中等负相关关系;温度和干旱事件发生次数(FRE)、干旱事件强度(INT)和干旱天数(DAYS)相关系数分别为 0.35,0.5,0.22,表明温度和 3 项干旱指标间存在中等正相关关系;相对湿度与干旱天数呈较弱负相关关系,日照时数与 3 项干旱指标均呈负相关关系,平均风速与干旱天数呈正相关关系。

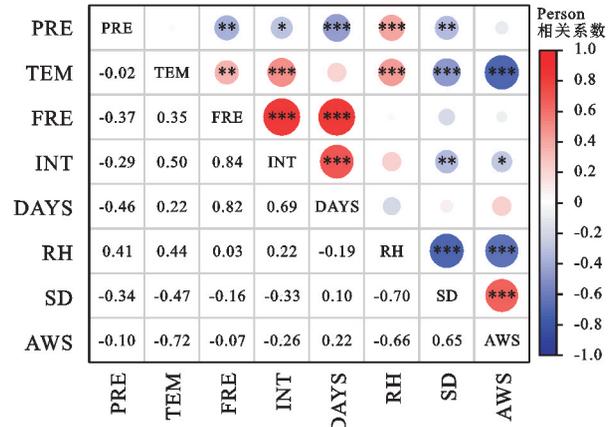
#### 3.2 人为土地利用/地表覆盖因素对干旱的影响

在 IPCC 报告中,人类活动引起的气候变化主要包括温室气体排放、土地利用覆盖变化以及气溶胶与污染排放<sup>[27]</sup>。尽管这些因素都对气候变化有影响,但在本研究中,重点探究土地利用覆盖变化对气候变化的影响。相关研究表明,除了降水、温度等气象因子外,由人类活动引起的土地利用方式转变还会通过影响净辐射来改变区域气候。此外,土地利用变化也可以通过影响降水在土壤水分、蒸散和径流之间的分配过程来改变区域气候,说明土地利用覆盖变化不仅会影响地表能量平衡,还会对水文循环产生影响,从而对

区域气候产生重要影响<sup>[28]</sup>。本研究选取 1980 年、2000 年、2018 年 3 期黄土高原土地利用数据,使用 ArcGIS 软件计算 1980—2000 年(退耕还林前)和 2000—2018 年(退耕还林后)土地利用转移矩阵,结果见表 4—5。

1980—2000 年黄土高原土地利用变化主要包括耕地和建设用地的增加,增加面积分别为 2 204.4 km<sup>2</sup>,1 762.4 km<sup>2</sup>,与此同时,林地、草地、水域、未利用地共减少 3 966.76 km<sup>2</sup>,同时段内干旱事件发生次数和强度增加明显,各类干旱天数也随之增加,说明人类活动引起的土地利用变化(地表覆盖)在一定程度上导致了黄土高原地区气象干旱加重。自 21 世纪以来,退耕还林还草等政策的实施极大地促进了生态环境的恢复<sup>[29]</sup>,2000—2018 年黄土高原地区耕地和草地面积分别减少 11 265.87 km<sup>2</sup>,96.27 km<sup>2</sup>,林地和建设用地面积分别增加了 3 397.47 km<sup>2</sup>,11 902.1 km<sup>2</sup>,同时段内干旱事件发生次数和强度基本稳定,

各类干旱天数有降低趋势,说明生态环境的恢复减少了极端灾害天气的发生。



注: \* 代表  $p \leq 0.05$ ; \*\* 代表  $p \leq 0.01$ ; \*\*\* 代表  $p \leq 0.001$ 。

图 8 气象因子与干旱特征相关性热图

Fig. 8 Heat map of the correlation between meteorological factors and drought characteristics

表 4 1980—2000 年土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transition matrix in 1980—2000

km<sup>2</sup>

年份	土地利用类型	2000 年					
		耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
1980 年	耕地	123135.00	12109.00	56225.90	8327.64	2287.21	2014.66
	林地	12531.00	56674.30	20901.30	499.09	385.72	659.99
	草地	58217.30	20574.00	165457.00	2365.06	2123.30	11893.00
	建设用地	7087.66	414.92	2036.59	3114.79	238.09	221.83
	水域	2856.39	399.20	2115.85	300.64	3144.07	657.70
	未利用地	2476.47	760.66	12384.80	269.02	603.03	26813.00

表 5 2000—2018 年土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transition matrix in 2000—2018

km<sup>2</sup>

年份	土地利用类型	2018 年					
		耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
2000 年	耕地	139909.06	9631.38	42054.46	11477.76	1940.03	1269.41
	林地	7571.28	67579.16	13991.36	1094.49	289.63	497.25
	草地	38690.26	15974.76	190574.06	4930.54	1443.08	7601.05
	建设用地	4978.50	268.17	1366.16	7942.68	145.43	103.68
	水域	1753.30	259.63	1421.40	438.42	4369.26	437.26
	未利用地	2113.83	707.54	9710.04	822.83	536.98	28350.96

黄土高原大部分地区存在显著或不显著的干旱化加重趋势,但局部地区仍存在不断增加的湿润趋势,如宁夏、甘肃部分地区干旱天数、次数及强度均呈显著减少趋势,这可能是因为气候变暖环境下冰川融水增加土壤含水量和河流径流量,从而改善当地水文系统和环境,缓解了当地干旱的负面影响<sup>[30]</sup>。

总体来看,受到气温、降水等气候条件的空间异质性影响,黄土高原地区干旱趋势加重和减轻的区域较为分散,即使在同一地区,干旱天数、干旱事件发生次数和强度也表现出不同的增加和减少趋势,从侧面体现出黄土高原地区干旱情况的错综复杂。

## 4 结论

(1) 日尺度 SPEI 在黄土高原地区适用性较强,且与月尺度 SPEI 相比,在识别干旱具体天数、干旱事件发生次数和强度方面更为精确。

(2) 1957—2019 年黄土高原存在明显的干旱化趋势,干旱事件发生次数和强度呈增加趋势,轻度、中度、严重和极端干旱天数分别以不同速率降低。黄土高原西北地区干旱事件发生次数缓慢增长,大部分区域干旱事件强度都处于不断增加的状态。

(3) 1957—2019 年黄土高原地区东南部的陕西

榆林、山西地区和西北部内蒙古阿拉善地区干旱化趋势明显,北部内蒙古地区和南部陕西宝鸡、咸阳地区湿润化趋势明显。总体来说,黄土高原地区干旱情况较为复杂。

(4) 1957—2019年黄土高原地区3项干旱指标间存在极强的正相关关系,降水和温度分别与3项干旱指标呈中等负相关和中等正相关关系,日照时数和风速分别对干旱事件强度和干旱天数有影响;黄土高原土地利用方式的转变在一定程度上引起干旱天数、干旱事件发生次数和强度的变化。

#### 参考文献(References):

- [1] 戴君,胡海珠,毛晓敏,等.基于CMIP6多模式预估数据的石羊河流域未来气候变化趋势分析[J].干旱区研究,2023,40(10):1547-1562.  
Dai J, Hu H Z, Mao X M, et al. Future climate change trends in the Shiyang River Basin based on the CMIP6 multi-model estimation data[J]. Arid Zone Research, 2023,40(10):1547-1562.
- [2] 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.
- [3] 刘哲琼,余敦先,夏军,等.黄土高原地区气象干旱动态格局演变及其对植被的影响[J].地理科学,2023,43(9):1659-1671.  
Liu Z Q, She D X, Xia J, et al. Impacts of meteorological drought on vegetation and their dynamic pattern evolutions on the Loess Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023,43(9):1659-1671.
- [4] 吕一河,高光耀,罗毅,等.黄土高原区域生态综合研究:机理深化与方法拓展[J].生态学报,2016,36(22):7069-7073.  
Lü Y H, Gao G Y, Luo Y, et al. Integrated regional ecological research on the Loess Plateau: advancing the scientific understanding and methodological tools [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(22):7069-7073.
- [5] 王佳瑞,孙从建,郑振婧,等.近57年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系[J].生态学报,2021,41(13):5340-5351.  
Wang J R, Sun C J, Zheng Z J, et al. Drought characteristics of the Loess Plateau in the past 60 years and its relationship with changes in atmospheric circulation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(13):5340-5351.
- [6] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.农业干旱监测研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(11):1835-1848.  
Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Agricultural drought monitor: progress, challenges and prospect [J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(11):1835-1848.
- [7] 胡鹏飞,李净,王丹,等.基于MODIS和TRMM数据的黄土高原农业干旱监测[J].干旱区地理,2019,42(1):172-179.  
Hu P F, Li J, Wang D, et al. Monitoring agricultural drought in the Loess Plateau using MODIS and TRMM data[J]. Arid Land Geography, 2019,42(1):172-179.
- [8] 宋艳玲.全球干旱指数研究进展[J].应用气象学报,2022,33(5):513-526.  
Song Y L. Global research progress of prougt indices [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022,33(5):513-526.
- [9] 贾艳青,张勃.基于日SPEI的近55a西南地区极端干旱事件时空演变特征[J].地理科学,2018,38(3):474-483.  
Jia Y Q, Zhang B. Spatial-temporal variability characteristics of extreme drought events based on daily SPEI in the southwest China in recent 55 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(3):474-483.
- [10] Wang Q F, Shi P J, Lei T J, et al. The alleviating trend of drought in the Huang-Huai-Hai Plain of China based on the daily SPEI[J]. International Journal of Climatology, 2015,35(13):3760-3769.
- [11] 李妙宇,上官周平,邓蕾.黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J].生态学报,2021,41(17):6786-6799.  
Li M Y, Shangguan Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(17):6786-6799.
- [12] 张俊华,朱连奇,李国栋,等.中国南北过渡带土壤碳氮空间特征及暖温带与亚热带界限[J].地理学报,2021,76(9):2269-2282.  
Zhang J H, Zhu L Q, Li G D, et al. Spatial patterns of SOC/TN content and their significance for identifying the boundary between warm temperate and subtropical zones in China's north-south transitional zone[J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(9):2269-2282.
- [13] 王椰,史海静,姜艳敏,等.基于TVDI的黄土高原干旱时空变化与其影响因素[J].农业机械学报,2023,54(7):184-195.  
Wang Y, Shi H J, Jiang Y M, et al. Spatio-temporal variation of drought characteristics and its influencing factors in Loess Plateau based on TVDI[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(7):184-195.
- [14] 温克刚,翟佑安.中国气象灾害大典:陕西卷[M].北京:气象出版社,2005.  
Wen K G, Zhai Y A. Encyclopedia of meteorological disasters in China: Shaanxi [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005.
- [15] 中国气象局.中国气象灾害年鉴[M].北京:气象出版社,2012.  
China Meteorological Administration. Yearbook of mete-

- orological disasters in China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [16] 梁晶晶,张勃,马彬,等.基于日值 SPEI 的青藏高原干旱演变特征[J].冰川冻土,2018,40(6):1100-1109.  
Liang J J, Zhang B, Ma B, et al. Drought evolution characteristics on the Tibetan Plateau based on daily standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1100-1109.
- [17] 杨改强,张志强,辛鑫,等.山西省耕地 NPP 时空变化及其气候因子驱动分析[J].科学技术与工程,2023,23(24):10557-10567.  
Yang G Q, Zhang Z Q, Xin X, et al. Spatial-temporal variation of farmland npp and climate factor-driven analysis in Shanxi Province [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(24):10557-10567.
- [18] 李海涛,邵泽东.空间插值分析算法综述[J].计算机系统应用,2019,28(7):1-8.  
Li H T, Shao Z D. Review of spatial interpolation analysis algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(7):1-8.
- [19] 王晓丹,张勃,马彬,等.基于日值 SPEI 东北地区近 58a 干旱时空演变特征[J].高原气象,2022,41(3):721-732.  
Wang X D, Zhang B, Ma B, et al. Spatial and temporal evolution of drought in northeast China in recent 58 years based on daily SPEI[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(3):721-732.
- [20] 张治国,康鸿杰.2000—2020 年武威市土地利用/覆被时空变化及驱动力分析[J].科学技术与工程,2023,23(20):8579-8587.  
Zhang Z G, Kang H J. Spatiotemporal variability characteristics and driving forces of land use/land cover in Wuwei City from 2000 to 2020[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20):8579-8587.
- [21] 李兴宇,丁文魁,蒋菊芳,等.气候变化背景下石羊河下游径流特征[J].江苏农业科学,2020,48(18):286-293.  
Li X Y, Ding W K, Jiang J F, et al. Runoff characteristics in the lower reaches of Shiyang River Basin under background of climate change[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(18):286-293.
- [22] 赵益祯,曹建农,张晓栋,等.陕北黄土高原生态脆弱地区土地利用变化的时空分析:以志丹县为例[J].云南大学学报:自然科学版,2020,42(2):299-307.  
Zhao Y Z, Cao J N, Zhang X D, et al. Spatial-temporal analysis of land use change in ecologically vulnerable regions of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province: a case study of Zhidan County [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2020, 42(2):299-307.
- [23] 侯青青,裴婷婷,陈英,等.1986—2019 年黄土高原干旱变化特征及趋势[J].应用生态学报,2021,32(2):649-660.  
Hou Q Q, Pei T T, Chen Y, et al. Variations of drought and its trend in the Loess Plateau from 1986 to 2019 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2):649-660.
- [24] 刘世梁,田韞钰,尹艺洁,等.云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对干旱的响应[J].生态学报,2016,36(15):4699-4707.  
Liu S L, Tian Y Y, Yin Y J, et al. Temporal dynamics of vegetation NDVI and its response to drought conditions in Yunnan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15):4699-4707.
- [25] 冯仕远,初萍萍,姚欣,等.基于 SPEI 的西北地区干旱时空分布特征及成因分析[J].人民珠江,2021,42(10):38-48.  
Feng S Y, Chu P P, Yao X, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and causes of drought in northwest China based on SPEI [J]. Pearl River, 2021, 42(10):38-48.
- [26] 刘荔昀,鲁瑞洁,丁之勇,等.黄土高原气候变化特征及原因分析[J].地球环境学报,2021,12(6):615-631.  
Liu L Y, Lu R J, Ding Z Y, et al. Analysis of climate change characteristics and circulation factors in the Loess Plateau [J]. Journal of Earth Environment, 2021, 12(6):615-631.
- [27] 黄磊,王长科,巢清尘. IPCC《气候变化与土地特别报告》解读[J].气候变化研究进展,2020,16(1):1-8.  
Huang L, Wang C K, Chao Q C. Interpretation of IPCC special report on climate change and land [J]. Climate Change Research, 2020, 16(1):1-8.
- [28] 杨丹,王晓峰.黄土高原气候和人类活动对植被 NPP 变化的影响[J].干旱区研究,2022,39(2):584-593.  
Yang D, Wang X F. Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2):584-593.
- [29] 张慧雯,赵燕,陈怡平.近 40 年来黄土高原植被变化趋势及其生态效应[J].地球科学与环境学报,2023,45(4):881-894.  
Zhang H W, Zhao Y, Chen Y P. Vegetation trends and ecological effects on the Loess Plateau, China in the last forty years [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4):881-894.
- [30] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J].地理学报,2020,75(5):961-974.  
Jin K, Wang F, Han J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5):961-974.