

山东省气象干旱-农业干旱时空演变规律研究

宗喜龙,谭秀翠*

山东农业大学水利土木工程学院,山东 泰安 271018

摘要: 山东省作为农业大省,开展干旱规律研究,对有效制定抗旱措施,保障粮食安全具有重要意义。本文以山东省为研究区域,采用1951-2022年降水、潜在蒸散发数据,2000-2020年土壤湿度数据,计算气象干旱指数SPEI、农业干旱指数SSI。采用slope趋势分析法、皮尔逊相关系数法、重心迁移模型研究山东省气象干旱、农业干旱的时空变化规律及传递关系。结果表明:气象干旱、农业干旱时间尺度越小变化越剧烈;山东省气象干旱、农业干旱以轻旱、中旱为主,平均面积占比分别为12.37%、10.44%,14%、10.5%;气象干旱中轻旱、中旱、重旱、特旱发生频率最高的分别为21.1%、19.7%、11.3%、4.2%,农业干旱轻旱、中旱、重旱、特旱发生频率最高的分别是45%、45%、20%、10%;气象干旱与农业干旱之间存在传递关系,平均传递时间为2.83个月。研究结果可为山东省干旱时空变化规律提供参考资料及技术支持。

关键词: 气象干旱; 农业干旱; 干旱频率; 干旱传递

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)02-0252-11

Spatiotemporal Evolution Patterns of Meteorological and Agricultural Droughts in Shandong Province

ZONG Xi-long, TAN Xiu-cui*

College of Water Conservancy and Civil Engineering /Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: As a major agricultural province, research on drought patterns in Shandong Province is of significant importance for effectively formulating drought resistance measures and ensuring food security. Taking Shandong Province as the study area, this paper utilizes precipitation and potential evapotranspiration data from 1951 to 2022, and soil moisture data from 2000 to 2022, to calculate the meteorological drought index (SPEI) and agricultural drought index (SSI). It employs the slope trend analysis method, Pearson correlation coefficient method, and centroid migration model to study the spatiotemporal variation patterns and transmission relationships of meteorological and agricultural droughts in Shandong Province. The results indicate that the smaller the time scale, the more drastic the changes in meteorological and agricultural droughts. In Shandong Province, light and moderate droughts dominate both meteorological and agricultural droughts, with average area proportions of 12.37% and 10.44% for meteorological droughts, and 14% and 10.5% for agricultural droughts, respectively. The highest frequencies of light, moderate, severe, and extreme meteorological droughts are 21.1%, 19.7%, 11.3%, and 4.2%, respectively, while for agricultural droughts, the highest frequencies are 45%, 45%, 20%, and 10%, respectively. A transmission relationship exists between meteorological and agricultural droughts, with an average transmission time of 2.83 months. The findings of this study can provide reference materials and technical support for understanding the spatiotemporal variation patterns of drought in Shandong Province.

Keywords: Meteorological drought; agricultural drought; drought frequency; drought transmission

在当今全球气候变化的大背景下,干旱作为一种极具破坏力的自然灾害现象,给生态系统、社会经济和人类生活带来严重危害。干旱是一种由于一定时间内降水量明显低于同期平均降水量,导致人类生活和经济活动受到影响的现[1]。根据国家水利部发布的《2023中国水旱灾害防御公报》统计,近年来山东旱涝灾害频发,受灾农作物面积较大。山东是农业大省,粮食产量

在全国占有重要地位,干旱会导致土壤水分不足,影响农作物的生长和发育[2]。因此,研究监测干旱早情并了解气象干旱、农业干旱的时空变化规律对山东省农业发展具有重要意义。

干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱四类[3],气象干旱通常指某段时间内降水低于同时期水平而引起的天气干燥、蒸发量增大的异常天气现象;长时间的气象干旱将会

收稿日期: 2025-03-25

修回日期: 2026-03-08

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME058)

第1作者简介: 宗喜龙(2000-),女,硕士研究生,研究方向:水文与水资源。E-mail:2042054766@qq.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail:tanxiucuiqq@163.com

引发土壤水分下降,影响作物正常生长发育,从而导致农业干旱;水文干旱是指持续的降水偏少,导致河川与地下水位下降,难以满足供水需求的水文现象;社会经济干旱是对水分影响生产以及消费活动等的描述。其中农业干旱是最复杂的一种,因为它与气象、土壤、地形、种植结构、灌溉措施、品种抗旱能力等众多因素相关^[4]。

干旱监测主要借助干旱指数对干旱特征进行量化^[5]。气象干旱指数主要有标准化降水指数(SPI)^[6]、标准化降水蒸散发指数(SPEI)^[7]、帕默尔干旱指数(PDSI)等。成硕^[8]等基于遥感降水数据集利用SPI和游程理论方法识别黄河源区气象干旱事件。SPI指数易于计算,但是忽略了温度的影响^[9],而潜在蒸散发是引起干旱的主要气象驱动因素,利用降水和潜在蒸散发计算的SPEI指数更能有效的评估干旱,唐金利^[10]等利用SPEI(标准化降水蒸散发指数)分析广西气象干旱的时空变化特征。农业干旱直接影响作物生长和产量形成,并在大范围内造成严重损失,用土壤含水量、农作物水分等表征农业干旱,是监测和预测农业干旱最有效的方法之一^[11]。刘明超等^[12]基于抚河流域逐月土壤含水率,计算标准化土壤湿度指数(SSSI)表征抚河流域农业干旱状况。SSSI指数是基于土壤湿度、Palmer Z指数以及SPI的统计结构构建的农业干旱指数,研究结果表明SSSI指数能有效监测和预测农业干旱。目前,关于气象干旱向农业干旱传递,国内外已有大量研究。牛犇^[13]等基于Coupla熵和干旱传播指数分析黄河流域不同类型干旱间的时空传递特征,对于气象干旱向农业干旱传递过程,干旱传播时间1-4月份较长,5-12月份较短。气象干旱至水文干旱的传播时间较短且更为集中,主要为2-5个月。邵淑婷^[14]等基于多时间尺度下SPI指标与NSRI指标及sc PDSI指标计算了无定河气象干旱向水文干旱和农业干旱传递,结果显示,气象干旱向农业干旱传递的时间平均为8-9个月,而气象干旱向水文干旱的传递时间约为3.5个月,可见气象干旱对水文干旱的影响比对农业干旱的影响显现的更早。Yoo Geun Ham^[15]等研究了朝鲜半岛两次最严重的气象干旱之间土壤水分(SM)的不同响应。

目前,关于山东省干旱时空变化规律国内外已有大量研究^[16],因此本论文使用基于遥感数据

生成的气象资料计算SPEI、SSI分析山东省气象干旱、农业干旱的时空变化规律,并采用皮尔逊相关系数法、最大系数法计算气象干旱向农业干旱传递的时间,为山东省监测和预测干旱情况提供技术支持。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

山东省,位于中国东部沿海、黄河下游,全省陆域面积15.81万km²,毗邻海域面积约为15.86万km²,共辖16个地级市(见图1)。气候类型属于暖温带季风气候,全省多年平均陆地蒸发量为450-600 mm、水面蒸发量为1 000-1 400 mm。山东省大部分地区年平均降水量在600-750 mm之间,人均水资源占有量315 m³,亩均水资源占有量263 m³。其分布特点是南多北少,东多西少。山东是农业大省,粮食产量在全国占有重要地位,受季风影响,水资源较为短缺^[17]。

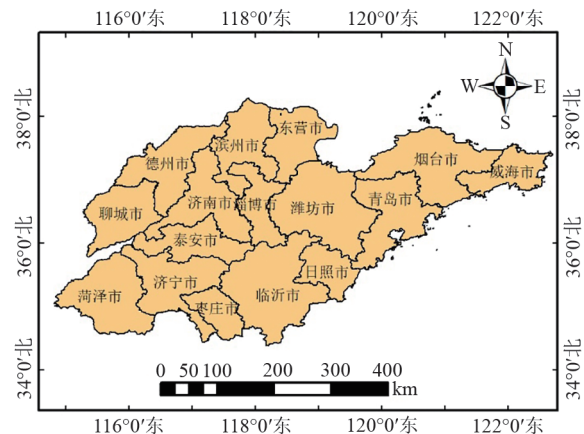


图1 山东省地图

Fig. 1 Map of Shandong Province

1.2 数据来源

研究中采用的数据主要来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>),包括降水量^[18]、潜在蒸散发^[19]和土壤含水量数据^[20],降水、潜在蒸散发数据为1951-2022年逐月数据,空间精度为1 km,土壤含水量数据为2000-2020年逐日数据,空间精度为1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 干旱指数的计算 标准化降水蒸散指数^[21](SPEI),采用逐月降水、潜在蒸散发数据,

做差值处理。

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

式中, P_i 为降水量; PET_i 为潜在蒸发量。计算不同时间尺度的水分盈/亏累积序列,

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}), n \geq k \quad (2)$$

式中, k 为时间尺度(月); n 表示某个月。采用三参数的 log-logistic 概率密度函数拟合所建立的数据序列,

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (3)$$

式中, α 为尺度参数; β 为形状参数; γ 为 origin 参数, 这些参数可通过 L-矩参数估计方法求得, 给定时间尺度的累计函数计算如下,

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

经过标准化处理后可得,

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (5)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad P \leq 0.5 \quad (6)$$

式中, $P = 1 - F(x)$, 当 $P > 0.5$ 时, 公式(6)中 P 变为 $1 - P$ 。参数 $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$, SPEI 干旱等级划分见表 1。

标准化土壤湿度指数^[22](SSI), 采用月尺度土壤含水量数据计算月尺度的标准化土壤湿度指数。

$$SSI = \frac{SM - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

式中, SM 代表月尺度土壤含水量的数值; μ 代表月尺度土壤含水量的平均值; σ 代表月尺度土壤含水量数值的标准差, SSI 干旱等级划分见表 1。

表 1 干旱等级划分表

Table 1 Table of drought classifications

等级	SPEI 值	SSI 值	类型
Grade	SPEI value	SSI value	Type
1	SPEI > -0.5	SSI > -0.5	无旱
2	-1 < SPEI ≤ -0.5	-1 < SSI ≤ -0.5	轻旱
3	-1.5 < SPEI ≤ -1	-1.5 < SSI ≤ -1	中旱
4	-2 < SPEI ≤ -1.5	-2 < SSI ≤ -1.5	重旱
5	SPEI ≤ -2	SSI ≤ -2	特旱

1.3.2 slope 趋势分析法 趋势分析法^[23]是一种通过对随时间变化的变量进行线性回归分析, 从而预测其变化趋势的方法。其计算方法如下,

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times X_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n X_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (8)$$

式中, Slope 为像元回归方程斜率; X 值为年 X 值; n 为研究的时间长度。当 Slope > 0 时, 表示该像元 X 为增加趋势; 当 Slope = 0 时, 表示该像元 X 基本不变; 当 Slope < 0 时, 表示该像元 X 为减少趋势。

1.3.3 气象干旱向农业干旱传递 采用 2001-2020 年气象干旱指数、农业干旱指数分析干旱传递规律。气象干旱向农业干旱传播时间采用最大系数法计算^[24], SPEI 表征气象干旱, SSI 表征农业干旱, 采用皮尔逊相关系数法计算月尺度 $SPEI_n (n=1, 2, \dots, 12)$ 与月尺度 SSI1 的相关系数, 每个月份会得到 12 个相关系数, 最大的相关系数所对应的 n 就是干旱传播时间。皮尔逊相关系数衡量的是两个变量之间的线性关联强度, 其取值范围在 -1 到 1 之间。系数的正负表示变量之间的相关方向, 绝对值大小表示相关程度。其计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中, \bar{x} , \bar{y} 分别是变量 X , Y 的样本均值。

1.3.4 重心迁移模型 重心迁移模型^[25]是一种用于分析地理要素空间分布及其变化趋势的方法, 该模型基于力学中的重心概念, 将研究区域内的地理要素视为具有质量的质点, 通过计算这些质点的加权平均位置来确定该要素的重心。随着时间的推移, 由于各子区域要素的数量、密度或分布等发生变化, 重心的位置也会相应地发生迁移, 从而反映出该地理要素在空间上的动态变化趋势。其计算方式如下:

$$\begin{cases} X = \frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \\ Y = \frac{\sum_{i=1}^n P_i Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \end{cases} \quad (10)$$

式中, X , Y 是干旱指数的经度和纬度; i 代表第 i 个干旱指数网格; X_i , Y_i 表示第 i 个网格的经纬度; n 是干旱指数的网格总数, 网格的分辨率是

1 km; P_i 是第 i 个网格的干旱指数。

2 结果与分析

2.1 山东省气象干旱时空变化规律分析

2.1.1 SPEI 时间变化规律 选取 1、3、6、12 月时间尺度的 SPEI 值,对山东省气象干旱进行分析。从图 2 可以看出 SPEI 干旱指数在不同的时间尺度上呈现出一定的差异性,不同时间尺度的

SPEI 干旱指数基本上都在 $[-3, 3]$ 范围波动。时间尺度越小,变化越剧烈。SPEI1 上下波动剧烈,旱涝交替频繁,能够快速反映短时间内降水与蒸散的平衡变化,对短期干旱或湿润事件较为敏感。SPEI3 更能体现季节内的干湿变化趋势,SPEI6 能更好地反映出一些持续性的干旱或湿润过程,SPEI12 频率相对平稳波动周期长,体现了干旱的年际变化特征。

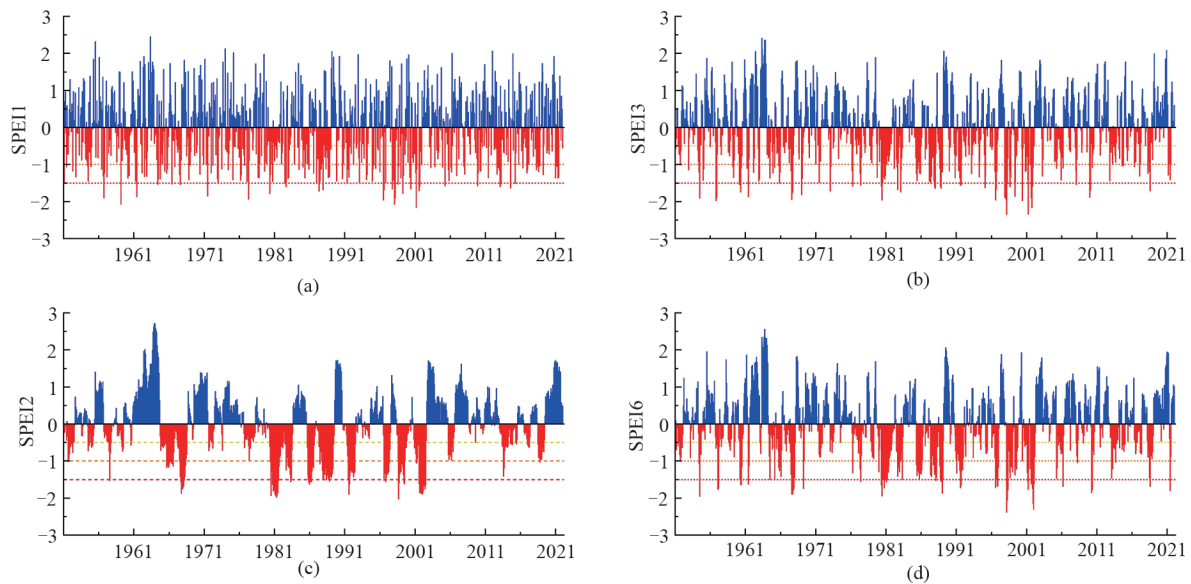


图 2 不同时间尺度 SPEI 变化规律
Fig. 2 SPEI variation patterns at different time scales

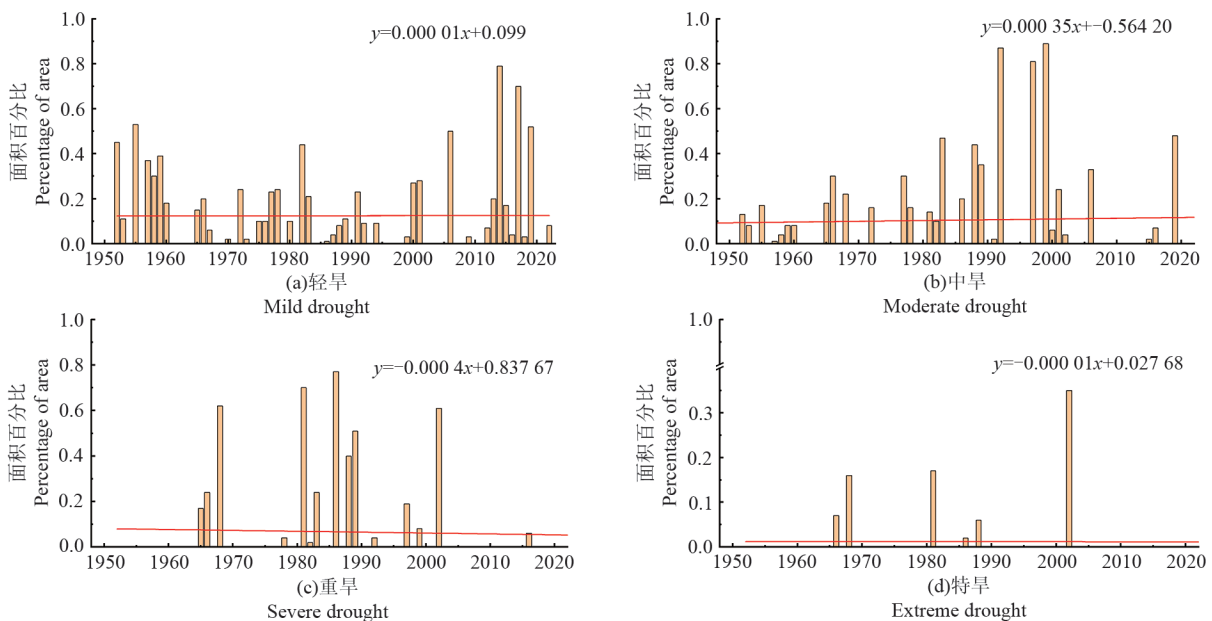


图 3 1952-2022 年干旱面积时间变化规律
Fig. 3 Temporal variation pattern of drought area from 1952 to 2022

选取 12 月尺度的 SPEI12 分析 1952-2022 年干旱面积时间变化规律,根据山东省 SPEI12 干旱指数统计不同气象干旱强度类型的面积占比,从图 3 中可以看出,轻旱、中旱所占面积呈增加趋势,而重旱、特旱面积呈下降趋势。1951-2022 年,轻旱、中旱、重旱、特旱的平均面积占比分别为 12.37%、10.44%、6.62%、1.17%。山东省的气象干旱以轻旱、中旱为主,重旱在 1980-1990 年间面积占比较大,而 2000 年后,仅在 2002 年发生较为严重的重旱、特旱,面积占比分别为 61%、35%。

2.1.2 SPEI 空间变化规律 通过计算 SPEI 值随时间变化的线性回归斜率,量化山东省干旱或湿润趋势的强度和方向。斜率为正表示 SPEI 值随时间呈上升趋势,即气候趋于湿润;斜率为负表示 SPEI 值随时间呈下降趋势,即气候趋于干旱;斜率为零则表示气候状态相对稳定,干旱或湿润程度没有明显的长期变化。从图 4 中可以看出,

山东东部 SPEI 值随时间呈下降趋势,西部呈上升趋势。图 5 中可以看出,1 月至 12 月, SPEI 变化差异明显,1、3、4、7、9、10、12 月 SPEI 以负向趋势为主,而 2、5、6、8、11 月 SPEI 以正向趋势为主。

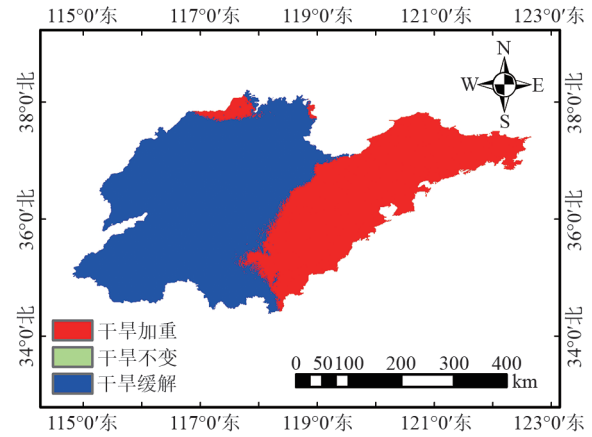


图 4 山东省 SPEI 年际变化趋势

Fig. 4 Interannual variation trends of SPEI in Shandong Province

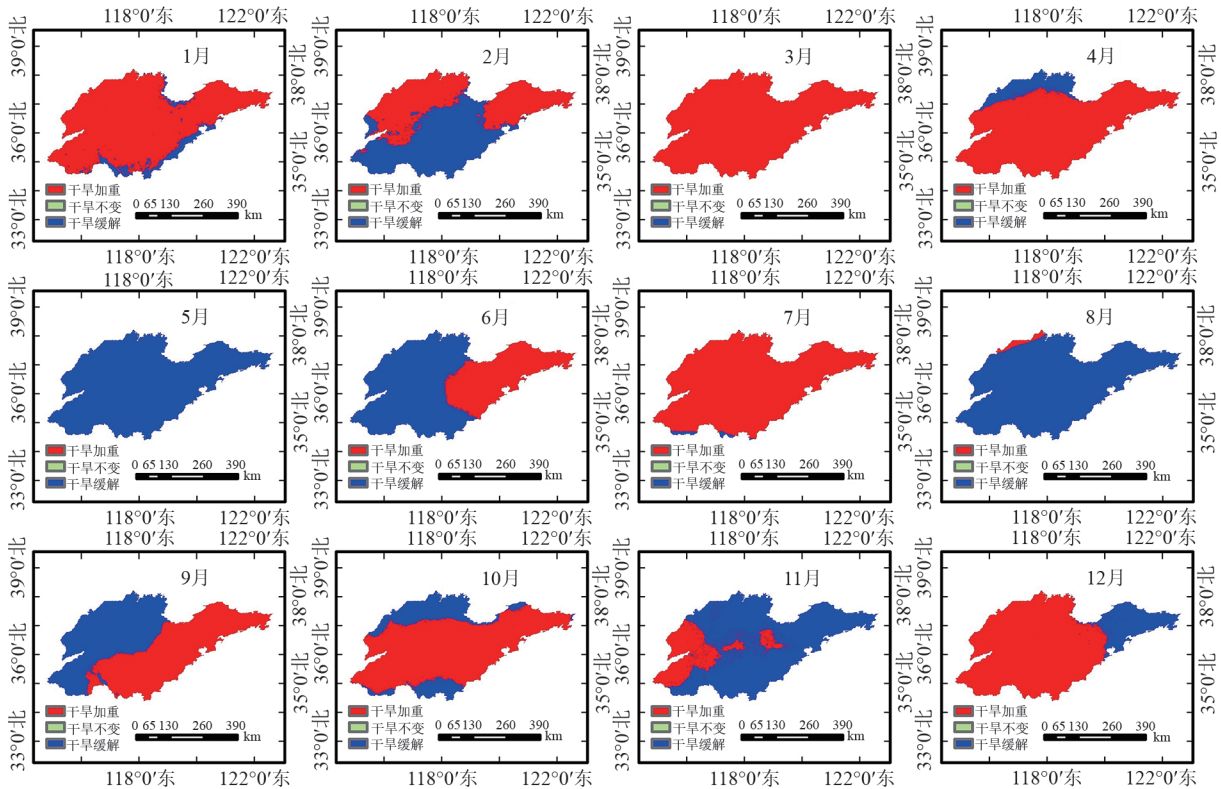


图 5 山东省 SPEI 年内变化趋势

Fig. 5 Intra-annual variation trends of SPEI in Shandong Province

气象干旱 SPEI 频率分析主要是为了了解干旱事件在不同程度、不同时间尺度下发生的频繁程度。从图 6 中可以看出,轻旱、中旱、重旱、特旱发生频率最高的分别是 21.1%、19.7%、11.3%、

4.2%。轻旱发生频率高的省份主要是德州市,中旱发生频率高的省份主要是东营市、烟台市的东部地区,重旱发生频率高的地方主要是烟台市的东部地区,特旱发生频率高的地方主要是潍坊市

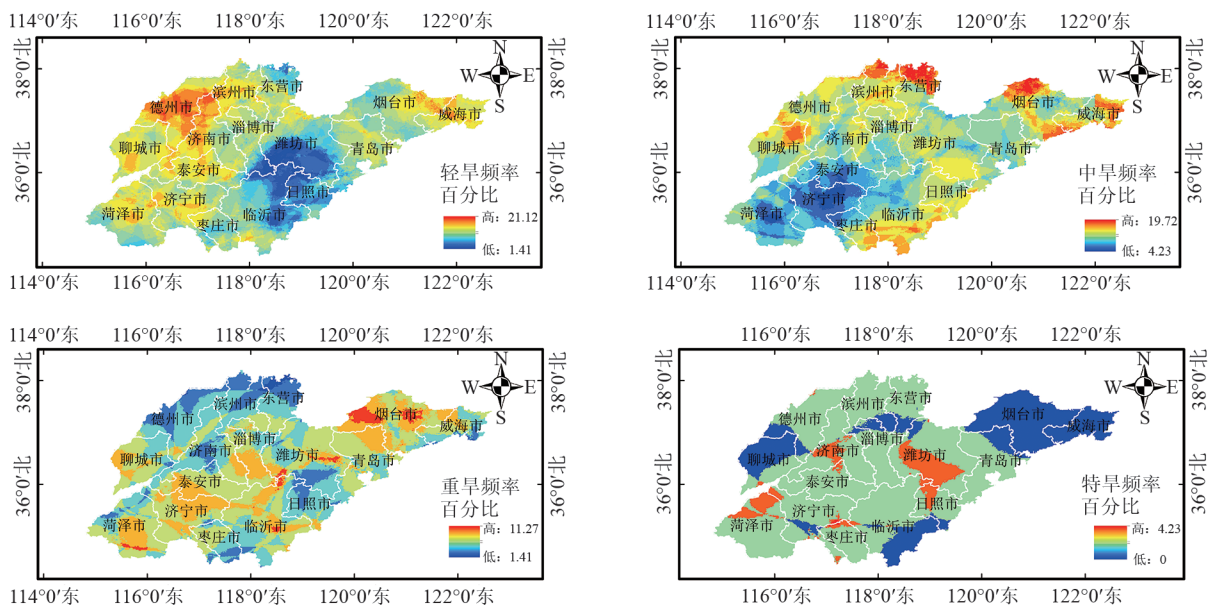


图 6 1952-2022 年干旱频率分析

Fig. 6 Drought frequency analysis from 1952 to 2022

的西南地区、菏泽市的西北地区,烟台市、威海市则是没有发生过特旱。

2.2 山东省农业干旱时空变化规律分析

2.2.1 SSI 时间变化规律 选取 1、3、6、12 时间尺度的 SSI 值,对山东省农业干旱进行分析,从图 7 可以看出,SSI 干旱指数在不同的时间尺度上呈现出一定的差异性,不同时间尺度的 SSI

干旱指数基本上都在[-2, 2.5]范围波动。时间尺度越小,SSI 值变化较为频繁剧烈,干湿交替现象明显,对短期干旱或湿润事件较为敏感。SSI3 更能体现季节内的干湿变化趋势,SSI6 能更好地反映出一些持续性的干旱或湿润过程,SSI12 频率相对平稳波动周期长,SSI 值会呈现出一定的趋势性变化体现了干旱的年际变化特征。

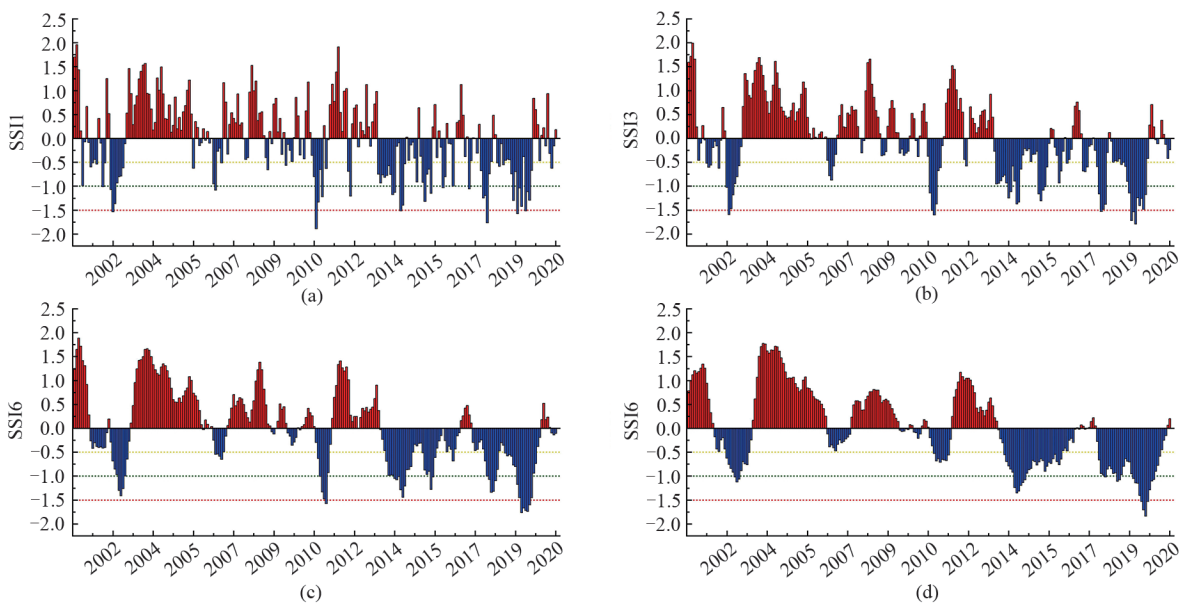


图 7 不同时间尺度 SSI 变化规律

Fig. 7 SSI variation patterns at different time scales

计算 SSI 干旱指数表征农业干旱, 选取 12 月尺度的 SSI12 代表年度变化规律, 统计各类干旱面积占山东省的比例, 从图 8 可以看出轻旱、中旱、重旱、特旱所占面积呈增加趋势。2001-2022 年, 轻旱、中旱、重旱、特旱的平均面

积占比分别为 14%、10.5%、5.43%、2%, 山东省农业干旱中以轻旱和中旱为主, 中旱、重旱发生最严重年份在 2014~2019 年, 2019 年发生了较为严重的重旱、特旱, 面积占比分别为 53%、32%。

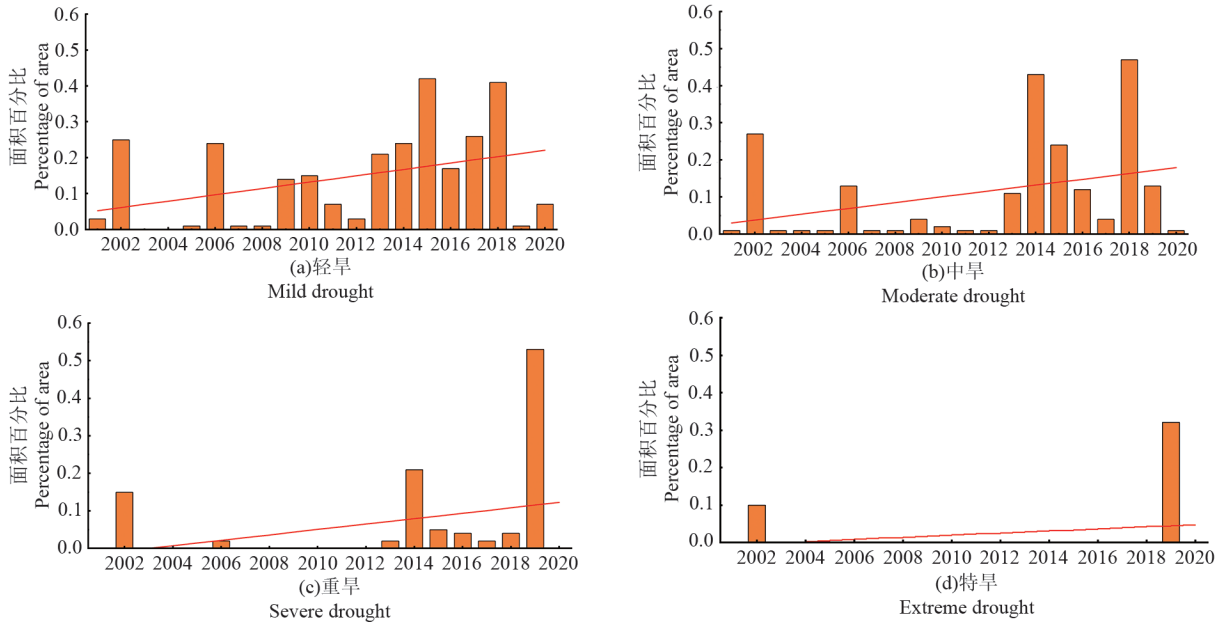


图 8 2001-2020 年干旱面积时间变化规律

Fig. 8 Temporal variation pattern of drought area from 2001 to 2020

2.2.2 SSI 空间变化规律 通过计算 SSI 值随时间变化的线性回归斜率, 来表示干旱或湿润趋势的强度和方向。斜率为正表示 SSI 值随时间呈上升趋势, 即土壤趋于湿润; 斜率为负表示 SSI 值随时间呈下降趋势, 即土壤趋于干旱; 斜率为零则表示土壤状态相对稳定, 干旱或湿润程度没有明显的长期变化。从图 9 可以看出, 山东省 SSI 值以下降趋势为主, 图 10 是 2001-2020 年农业干旱的年内变化趋势, 从图中可以看出, 8 月份山东省北部 SSI 值以正向趋势为主, 1、10、11、12 月, 山东省南部 SSI 值以正向趋势为主, 其余月份 SSI 值以负向趋势为主。

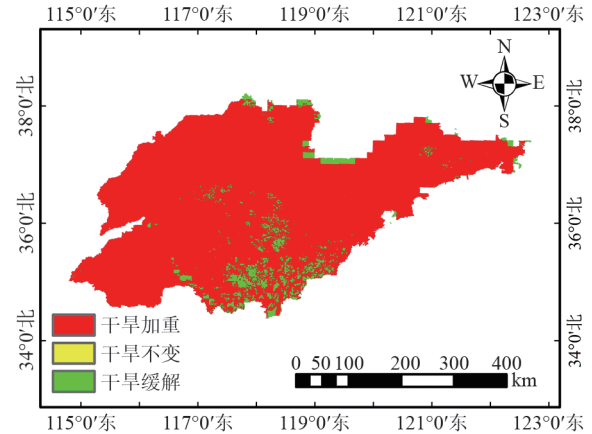


图 9 山东省 SSI 年际变化趋势

Fig. 9 Interannual variation trend of SSI in Shandong Province

由图 11 可以看出, 山东省轻旱、中旱、重旱、特旱发生频率最高分别为 45%、45%、20%、10%, 平均发生频率分别为 13.6%、10.5%、5.4%、2.1%。轻旱发生频率高的地方各城市均有分布。中旱发生频率最高的地方主要集中在菏泽北部、淄博北部、潍坊南部及烟台北部区域。重旱发生频率最高的地方主要集中在青岛北部、潍坊东部及鲁西北平原地区, 特旱发生频率高的地方主要集中

在枣庄、临沂等地, 而其他地区发生频率较低。

2.3 气象干旱向农业干旱传递规律研究

采用皮尔逊相关系数法计算 1-12 月尺度气象干旱指数 SPEI1-12 与 1 月尺度农业干旱指数 SSI1 的相关系数, 每个月份对应 12 个相关系数, 通过最大系数法确定气象干旱向农业干旱传递

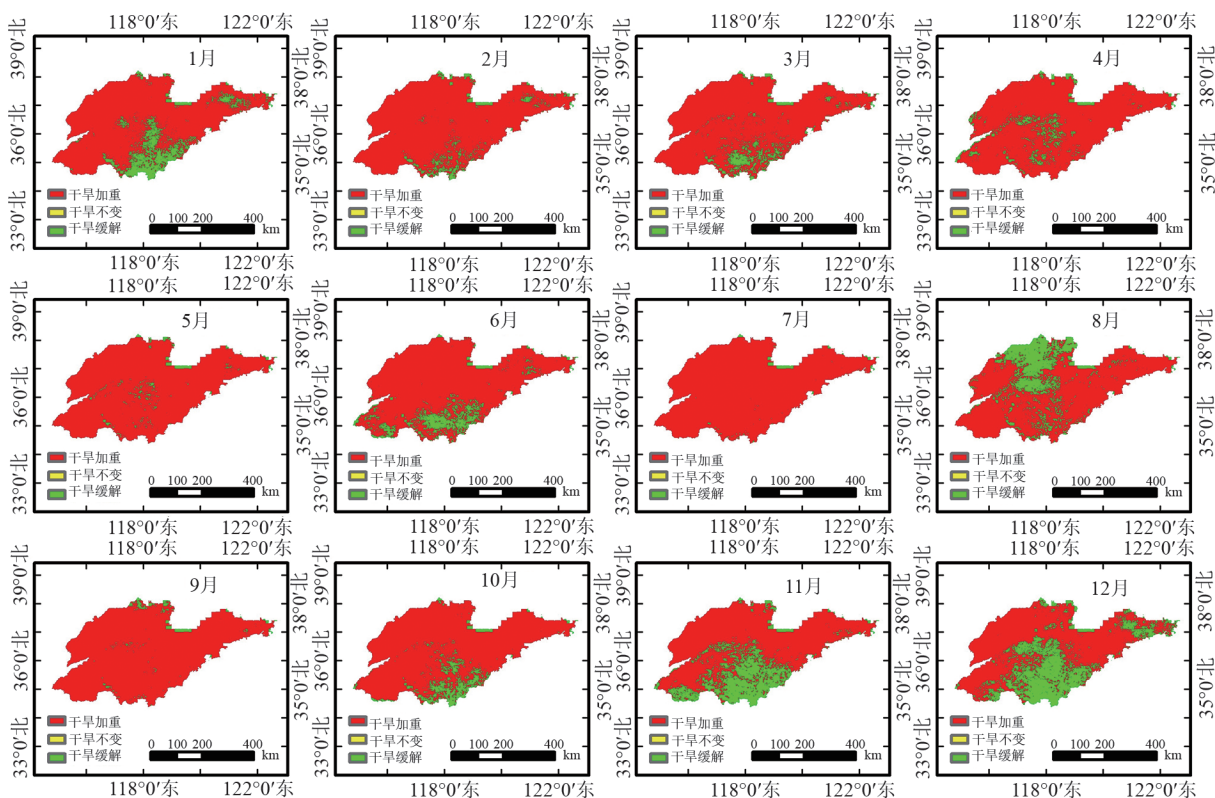


图 10 山东省 SSI 年内变化趋势

Fig. 10 Intra-annual variation trends of SSI in Shandong Province

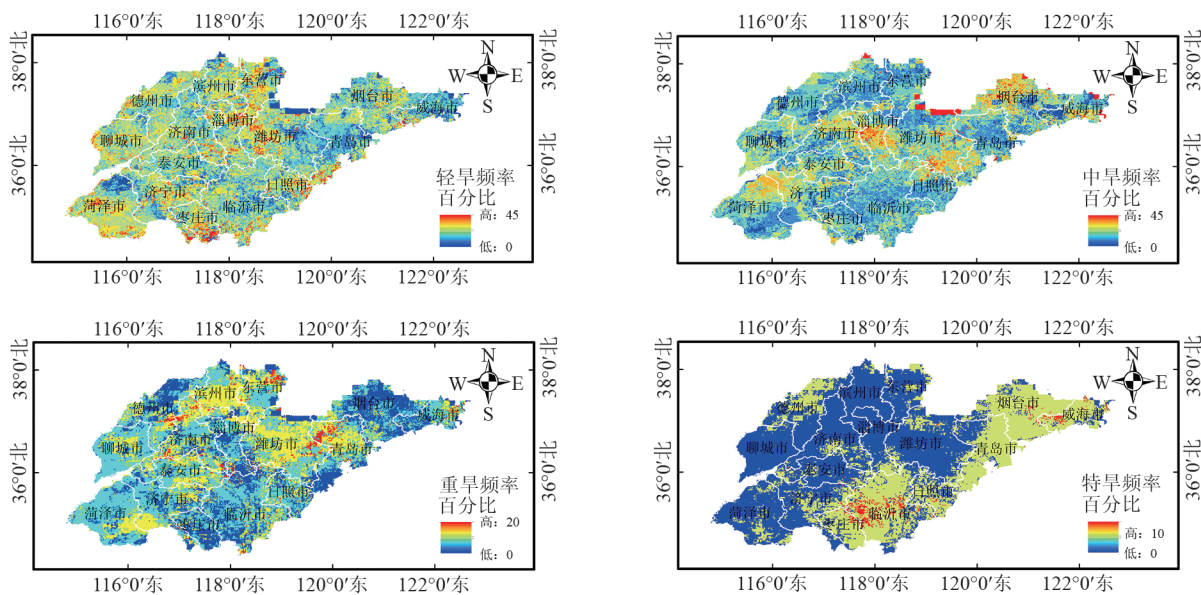


图 11 2001-2020 年干旱频率分析

Fig. 11 Drought frequency analysis from 2001 to 2020

的时间,从图 12 中可以看出,气象干旱向农业干旱传递的时间为 2.83 个月,其中 2 月份传递时间最长为 5 个月,而 4-7 月及 10 月份,干旱传递的时间仅为 2 个月。

农业干旱面积的年际变化规律分析表明,农业干旱中特旱发生最严重的是 2019 年,特旱面积占比为 32%,重旱 53%,中旱所占面积为 13%。

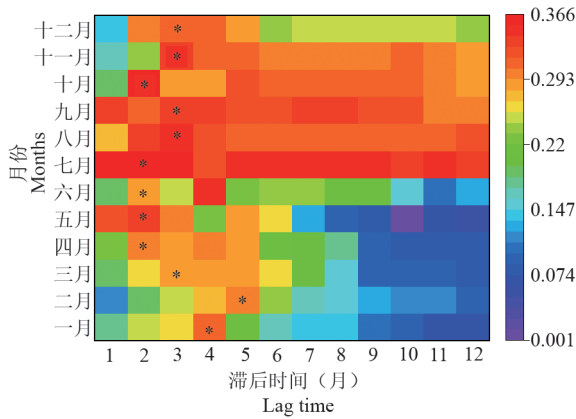


图 12 气象干旱向农业干旱传递时间热点图
 Fig. 12 Heat map of transfer time from meteorological drought to agricultural drought

考虑气象干旱向农业干旱传递, 12 月份的干旱传递时间是 3 个月, 采用 2019 年 10-12 月山东省 SPEI、SSI 空间分布图进行分析, 见图 13。2019 年 10-12 月气象干旱以中旱和轻旱为主, 占比均达到 99% 以上, 且中旱主要集中在山东

东部地区。2019 年 10-12 月农业干旱以特旱和重旱为主, 10-12 月特旱占比分别为 13.2%、19.1%、32%, 10-12 月重旱占比分别为 43.1%、58.5%、53%, 占比均达 56% 以上。2019 年 10 月份、11 月份、12 月份大面积气象干旱导致了 2019 年 12 月份农业干旱的爆发, 至 2019 年 12 月, 山东省农业干旱中特旱所占山东省的面积为 32%, 重旱占 53%, 中旱占 13%, 其余占比仅为 2%。

分析 2019 年 10-12 月气象干旱、农业干旱的重心迁移规律, 从图 14 中可以看出, 气象干旱重心在济南、泰安市, 而农业干旱重心在淄博市。10-11 月份气象干旱重心迁移的规律是西南到东北方向, 11-12 月干旱重心迁移的规律是东南到西北方向, 总体迁移规律是西南到东北方向。10-12 月农业干旱重心迁移的规律基本是从东南到西北方向。气象干旱和农业干旱重心迁移规律的共同特征是干旱重心向北迁移。

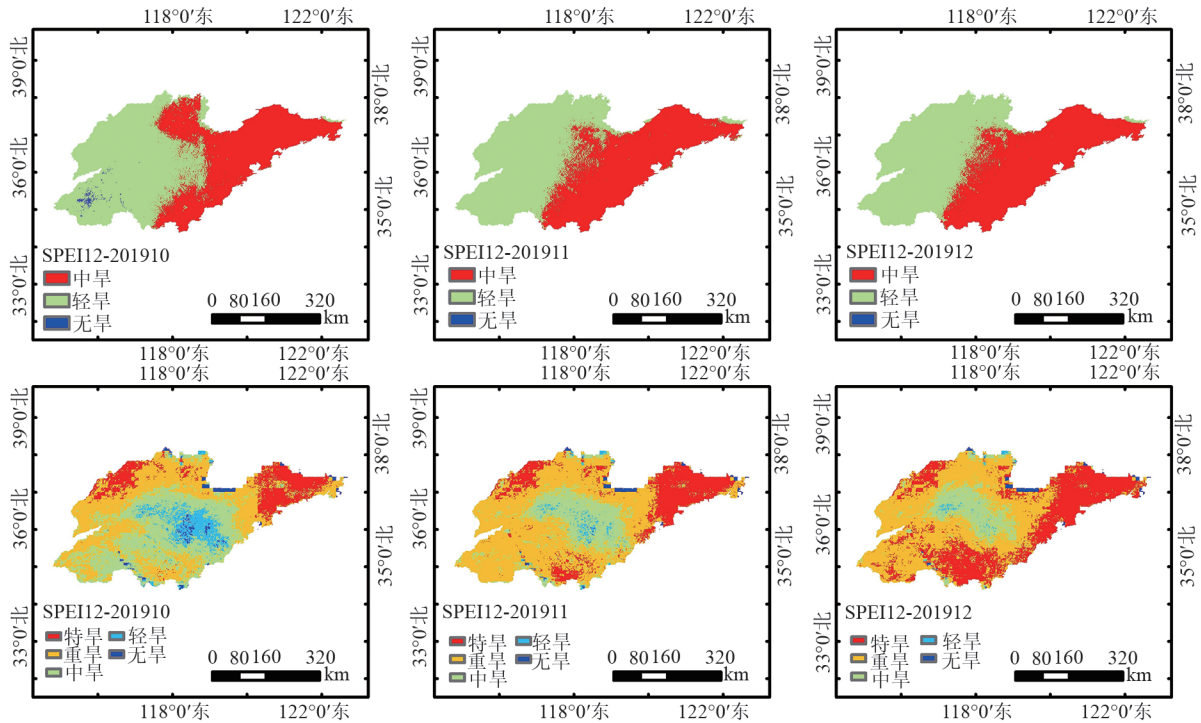


图 13 2019 年 10-12 月 SPEI 值、SSI 值空间分布图
 Fig. 13 Spatial distribution maps of SPEI and SSI values from October to December 2019

3 讨论

本文采用遥感数据研究山东省气象干旱、农业干旱时空变化规律, 已有研究表明, 遥感数据

所监测的干旱发生、发展情况与实际旱情相符, 与实际旱情的相关系数大多超过了 0.8, 并通过了 95% 的显著性检验^[26]。不同时间尺度的 SPEI、SSI 值波动规律呈现出差异性, 时间尺度

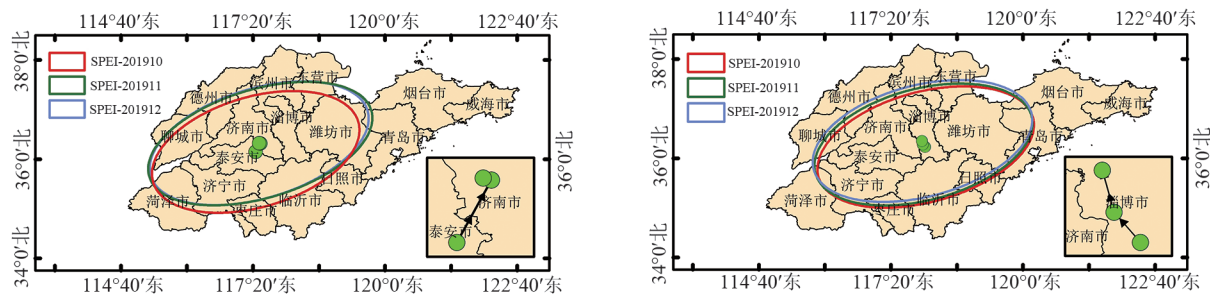


图 14 干旱重心迁移图

Fig. 14 Drought center migration diagram

越小, SPEI、SSI 值变化较为频繁剧烈, 干湿交替现象明显, 能够快速反映短时间内降水与蒸散的平衡变化, 对短期干旱或湿润事件较为敏感, 这与前人研究结论保持一致^[27,28]。

本文研究表明, 山东省气象干旱频率分析中, 中旱发生频率在 4.25%-19.7%, 主要分布在山东中部地区, 与刘佳^[29]等基于山东省 1961-2016 年站点观测的月降水量和月平均气温计算分析的中旱发生频率和分布地区基本保持一致, 但两者研究中关于重旱和特旱发生频率和平均值略有差异, 主要是由两者研究的时间范围及空间精度差异导致。

本文仅研究气象干旱向农业干旱传递, 传递的平均时间为 2.83 个月, 未研究气象干旱向水文干旱传递、农业干旱向水文干旱传递。在关于不同干旱之间传递的相互联系以及影响因素方面未能深入研究, 干旱传递可能受到人为灌溉和地下水等级的影响, 未来的研究须全面考量。

4 结论

本研究对山东省的气象干旱、农业干旱以及传递关系进行研究, 运用趋势分析法、皮尔逊相关系数法、重心迁移模型对研究区域的干旱的时空变化规律进行分析, 得到以下结论:

(1) 气象干旱指数 SPEI、农业干旱指数 SSI 时间尺度越小变化越剧烈, 月尺度干旱指数旱涝交替频繁, 对短期干旱或湿润事件较为敏感。年尺度干旱指数, 频率相对平稳波动、周期长, 反映干旱的年际变化特征。

(2) 山东省气象干旱、农业干旱以轻旱、中旱为主, 面积占比分别为 12.37%、10.44%、14%、10.5%。气象干旱最严重是 2002 年, 农业干旱最

严重的一年是 2019 年。

(3) 气象干旱中轻旱、中旱、重旱、特旱发生频率最高的分别是 21.1%、19.7%、11.3%、4.2%。平均发生频率分别为 12.4%、10.4%、6.6%、1.2%。农业干旱中轻旱、中旱、重旱、特旱发生频率最高的是 45%、45%、20%、10%, 平均发生频率分别为 13.6%、10.5%、5.4%、2.1%。

(4) 气象干旱和农业干旱之间存在传递关系, 1-12 月气象干旱向农业干旱传递时间平均为 2.83 个月, 最短时间为 2 个月。

参考文献

- [1] 吴志勇, 施怡然, 刘杨合, 等. 长江流域干旱形成演变机制与预测研究进展[J]. 人民长江, 2025, 56(10): 166-174.
- [2] 杨晋云. 基于多源遥感数据的山东干旱监测[D]. 青岛: 青岛大学, 2021.
- [3] 姚璐. 海河流域气象干旱与水文干旱演变特征及响应分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [4] 马蒙蒙. 近 60 年山东省干旱时空分布特征分析[D]. 济南: 济南大学, 2020.
- [5] 童德明. 基于遥感数据的山东干旱特征分析[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [6] Moradian S, Gharbia S, AghaKouchak A, et al. Integrated multi-index drought monitoring and projection under climate change[J]. Atmospheric Research, 2025, 316: 107946.
- [7] Samiei S, Alijanian M. A comprehensive spatiotemporal and risk reduction drought assessment study utilizing SPEI index for Urmia Lake Basin, Iran[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 58: 102203.
- [8] 成硕, 黄曼捷, 余文君, 等. 基于长序列遥感降水融合数据集的黄河源气象干旱特征研究[J]. 大气科学学报, 2025, 48(01): 49-61.
- [9] Wang Q, Wu J, Ling X, et al. A comprehensively

- quantitative method of evaluating the impact of drought on crop yield using daily multi-scale SPEI and crop growth process model[J]. *International Journal of Biometeorology*,2017,61(4):685-699.
- [10] 唐金利,胡宝清,余碧云,等. 基于 SPEI-PM 分析广西干旱时空变化及其与 ENSO 的关系[J]. *中国农业气象*,2024,45(09):1067-1078.
- [11] Lu Y, Yang T, Fu J, et al. Utility of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) to detect agricultural droughts over China[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*,2025,58:102190.
- [12] 刘明超,简鸿福,韩会明,等. 抚河流域农业干旱特征及其驱动因子分析[J]. *灌溉排水学报*,2024,43(10):114-120.
- [13] 牛 犇. 黄河流域气象-农业-水文干旱的时空传递特征[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023.
- [14] 邵淑婷. 无定河流域不同类型干旱时空变化特征与传递关系研究[D]. 西安:长安大学,2022.
- [15] Ham G Y, Jeong Y, Seo E. Distinct propagation to agricultural drought between two severe meteorological droughts in the Korean Peninsula[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(22): e2024GL109927-e2024GL109927.
- [16] 张延松,曹幸幸,杜文州,等. 基于 NEX-GDDP 降尺度数据的山东省干旱时空特征研究[J]. *中国水利*, 2025(06):31-37.
- [17] 褚 越,薛晓萍,张丽娟,等. 山东省干旱灾害风险评估与区划[J]. *中国农学通报*,2023,39(10):101-112.
- [18] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集(1901-2023)[Z]. 国家青藏高原数据中心 .2020.
- [19] 彭守璋. 中国 1km 逐月潜在蒸散发数据集(1901-2023)[Z]. 国家青藏高原数据中心 .2022.
- [20] 上官微,李清亮,石高松. 基于站点观测的中国 1km 土壤湿度日尺度数据集(2000-2022)[Z]. 国家青藏高原数据中心 .2022.
- [21] 陈 雨,章启兵,吕海深,等. 基于 SPEI 指数的淮北地区气象干旱时空特征研究[J]. *灌溉排水学报*,2024, 43(02):67-77.
- [22] 刘振男,焦卫国,王笑宇,等. 基于标准化土壤湿度指数的贵州省农业干旱评价[J]. *中国农村水利水电*, 2022(11):1-5+12.
- [23] 徐聪颖. 九江市降水变化特征分析及基于 VMD-QPSO-SVR 的降水预测[D]. 南京:南京信息工程大学, 2024.
- [24] Feng K, Yuan H, Wang Y, et al. Propagation dynamics from meteorological to agricultural drought in northwestern China: key influencing factors[J]. *Agronomy*,2024,14(9):1987-1987.
- [25] 冯志刚,张志强,王生亮. 世界技术活动地理重心迁移规律研究-基于专利大数据分析视角[J]. *情报科学*,2024,42(09):16-27+60.
- [26] 杜灵通. 基于多源空间信息的干旱监测模型构建及其应用研究[D]. 南京:南京大学,2013.
- [27] 徐泽华. 山东省植被时空变化特征及其对气象干旱指数的响应[D]. 济南:山东师范大学,2019.
- [28] 徐泽华,韩 美. 山东省干旱时空分布特征及其与 ENSO 的相关性[J]. *中国生态农业学报*,2018,26(08):1236-1248.
- [29] 刘 佳. 山东省气象干旱时空变化分析及农业气象干旱风险评估[D]. 济南:山东科技大学,2019.