

气候变化背景下山西省气象干旱时空演变特征

姚宁¹ 蒋昆昊¹ 谢文馨¹ 张东彦² 杨晓娟³ 于强⁴

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

4. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 干旱频发对生态资源、农业发展造成了严重影响,为揭示山西省干旱时空演变特征,基于1971—2020年山西省24个气象站点的逐月气象资料,利用改进的Mann-Kendall方法检验各气象因子的年变化趋势,采用FAO56 Penman-Monteith公式计算参考作物腾发量(ET_0),分析单个气象因子变化情况下 ET_0 的变化特征和对气象因子的敏感性,比较各时间尺度(月、季、年尺度)不同干旱指数(降水距平百分率(Pa)、标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI))对山西省干旱灾害监测能力。结果表明: ET_0 与相对湿度呈负相关,气象因子对 ET_0 的敏感性由大到小依次为相对湿度、日最高气温、2 m处风速、日最低气温、日平均气温, ET_0 呈波动下降趋势。SPEI能够在多时间尺度上有效反映山西省干旱状况,是该地区干旱监测的有效工具。在月、季、年尺度下,比较3个干旱指数,Pa检测效果较差,SPI和SPEI在某些地理区域存在较大差异,整体而言,SPEI在多数地区检测干旱的性能更好;SPEI-1尺度下,各干旱等级发生频率由大到小依次为轻旱(14.8%)、中旱(10.6%)、重旱(5.6%)、特旱(1.9%),3月干旱发生率最高(34%),12月发生率最低(31.8%),吕梁市、晋中市、大同市干旱情况较为严重;SPEI-3尺度下,季节发生干旱频率由大到小依次为秋季(33.5%)、夏季(32.5%)、春季(31.9%)、冬季(31.4%),大同市、长治市特旱发生频率最高,旱情最为严重,忻州市轻旱频率、朔州市中旱频率、吕梁市重旱频率最高;SPEI-12尺度下,轻、中、重、特旱频率分别为14.8%、10.5%、5.4%、2.3%,SPEI-12相较SPEI-1和SPEI-3识别重旱、特旱的站点更多,并基于游程理论得出,山西省南部干旱频次更多,东部干旱历时更长、干旱严重程度更大,干旱峰值主要出现在山西省南北部,由于年均降水呈波动性下降,年均气温整体上升,山西省的气候趋于暖干化,南北部旱情将有所加重,中部地区旱情有所减缓,全域性干旱仍有很大发生可能。

关键词: 干旱指数; 干旱特征; 参考作物腾发量; 游程理论; 山西省

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0270-12

OSID:



Temporal and Spatial Evolution of Drought Disasters in Shanxi Province under Background of Climate Change

YAO Ning¹ JIANG Kunhao¹ XIE Wenxin¹ ZHANG Dongyan² YANG Xiaojuan³ YU Qiang⁴

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture,

Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

4. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Frequent droughts caused serious impacts on ecological resources and agricultural development. In order to reveal the spatial and temporal evolution characteristics of drought in Shanxi Province, based on the month-by-month meteorological data from 24 meteorological stations in Shanxi Province from 1971 to 2020, the annual trends of each meteorological factor were examined by using the improved Mann-Kendall method, and the FAO56 Penman-Monteith formula was used to calculate the reference crop evapotranspiration (ET_0) of reference crop emergence, analyze the characteristics of ET_0

收稿日期: 2023-06-13 修回日期: 2023-10-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209070)和国家外国专家项目(QN2022172005L)

作者简介: 姚宁(1988—),男,副教授,博士,主要从事作物生长对干旱时空变异响应研究,E-mail: yaoning@nwfau.edu.cn

and its sensitivity to meteorological factors under the changes of individual meteorological factors, and compare the ability of different drought indices (percentage of precipitation anomaly (Pa), standardized precipitation index (SPI), and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI)) in monitoring drought hazards in Shanxi Province at various time scales (monthly, seasonal, and annual scales). The results showed that ET_0 was negatively correlated with relative humidity, and the sensitivity of meteorological factors to ET_0 was in descending order of relative humidity, daily maximum temperature, wind speed at 2 m, daily minimum temperature, daily average temperature, with a fluctuating and decreasing trend of ET_0 . SPEI was able to reflect the drought condition of Shanxi Province effectively in multiple time scales, which was an effective tool for drought monitoring in this region. Comparing the three drought indices at monthly, seasonal and annual scales, Pa was less effective in detecting droughts, SPI and SPEI differed significantly in some geographic regions, and overall, SPEI performed better in detecting droughts in most regions; at the SPEI - 1 scale, the frequency of each drought class in descending order was light drought (14.8%), moderate drought (10.6%), severe drought (5.6%), extreme drought (1.9%), with the highest occurrence rate of drought in March (34%) and the lowest in December (31.8%), and more severe drought conditions in Lüliang City, Jinzhong City, and Datong City; under the SPEI - 3 scale, the frequency of seasonal drought, in descending order, was in the fall (33.5%), summer (32.5%), spring (31.9%), and winter (31.4%), and Datong City, Changzhi City had the highest frequency of special drought and the most serious drought, and Xinzhou City, Shuozhou City, and Lüliang City had the highest frequency of light, moderate, and severe drought, respectively; at the SPEI - 12 scale, the frequencies of light, moderate, severe, and special drought were 14.8%, 10.5%, 5.4%, and 2.3%, respectively, and SPEI - 12 recognized more sites with severe and special drought compared with SPEI - 1 and SPEI - 3, and based on the travel theory, it was concluded that the frequency of drought in southern Shanxi Province was higher than that of other provinces in China. It was concluded that the frequency of drought was more frequent in the southern part of Shanxi Province, the drought in the eastern part lasted longer and the severity of drought was greater, and the peak of drought mainly occurred in the northern and southern parts of Shanxi Province. Due to the fluctuating decline of the mean annual precipitation and the overall increase of the mean annual temperature, the climate in Shanxi Province tended to be warm and dry, the drought in the southern and northern parts of Shanxi Province would be aggravated, the drought in the central part of Shanxi Province would be slowed down, and the whole-area drought was still very possible.

Key words: drought index; drought characteristics; reference crop evapotranspiration; travel theory; Shanxi Province

0 引言

IPCC 第六次评估报告指出,全球变暖水平稳定在 1.5 ~ 2.0℃,气象干旱的影响区域总体上小于农业生态干旱的影响范围^[1]。在全球变暖和经济高速发展的影响下,干旱发生频率不断增加,具有极大的危害性和灾难性,严重影响社会经济、生态系统^[2]。干旱的形成机制较为复杂,包括自然因素和人为因素^[3]。我国地处东亚,干旱事件频发,平均每 2 ~ 3 年就会发生一次严重干旱^[4],其强度和范围不断增大,这不但给国民经济特别是农业生产等带来巨大损失,还会造成水资源短缺、荒漠化加剧、沙尘暴频发等诸多不利影响,据《中国水旱灾害防御公报》可知,1950—2021 年,全国因干旱受灾面积达 1.42×10^9 hm²,粮食损失 1.16×10^9 t,饮水困难人口达 6.81×10^8 人^[5]。

干旱指数是表征干旱程度的标准,也是旱情描述的数值表达,但由于干旱地面监测既要考虑气象因素,也要考虑水文、土壤、作物、水利灌溉等诸多因素,因而提出精确而普遍使用的干旱指数有很大困难。为了监测干旱,研究者先后提出了降水距平比百分率 (Percentage of precipitation anomaly, Pa)、帕默尔干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI)、标准化降水指数 (Standardized precipitation index, SPI) 等 50 多种干旱指数^[6]。其中 SPI 由于具有计算简单、时间尺度灵活和对干旱时空变化指示效果较好等优点而被广泛应用,邵进等^[7]研究认为 SPI 与 ArcGIS 组合应用于分析旱涝的时空分布及其变化规律具有较好的实用性。后来, VICENTE-SERRANO 等^[8]提出的标准化降水蒸散指数 (Standardized precipitation evapo-transpiration index, SPEI) 考虑了降水与蒸散,也保留了 PDSI、SPI 指数

对于干旱事件的敏感度,受到广泛的关注。JHA 等^[9]使用 SPI 分析了印度农业气候带的气象干旱时空趋势;熊光洁等^[10]利用不同时间尺度的 SPI、SPEI 和 M 指数对西南地区进行干旱检测,结果表明,SPEI 指数利用降水和蒸发这两个影响干旱的重要决定因素,对西南地区不同时间尺度的干旱表征能力较好;针对 2015—2017 年南非西开普省特大干旱事件,张翔等^[11]使用 SPI、SPEI 和 SRI 指数从多个角度分析此次干旱事件的时空变化。不同的干旱指数考虑的因素不同,所适用的情况不同,一般而言,SPEI 为最稳健的模式,干旱频率和严重程度均显著增加,但是不同指数在城市干旱监测和分析中的表现存在差异,需要进一步比较^[12]。由于山西省地形复杂,时间序列较长,为更好地分析干旱时空演变特征,鉴于 PDSI 指数仅对 9~12 个月尺度的干旱响应最好,因此选择多时间尺度的 Pa 指数、SPI 指数和 SPEI 指数。

华北地区属于暖温带半湿润季风气候区,是典型的气候脆弱区,常发生极端气候事件,对农业生产、粮食安全和社会经济造成严重威胁^[13]。华北地区中的山西省位于黄河中游、黄土高原东部,属于温带大陆性气候,独特的地貌格局和地理位置使山西省气候变化情况更加复杂,导致山西省的降水量在时间和空间上的分布极其不均匀,从而使该地区干旱频繁发生,干旱已成为制约山西省经济健康发展的重要因素之一^[14]。诸多学者已基于不同的方法和指标对山西省气象干旱、水文干旱、农业干旱等进行了研究^[15-17],贺鹏等^[18]仅用温度植被干旱指数(TVDI)分析了山西省春季旱情,杨世刚等^[19]利用 Pa、PDSI、Z 指数检测干旱,分析得到不同指数在干旱频次和强度分析上各有优势,但都略有欠缺,未使用综合性更强的干旱指数,田国珍等^[20]基于作物缺水指数方法进行山西省干旱检测,但该方法受气象条件影响大,容易产生误差。因此本研究以山西省各气象因子为出发点,分析参考作物腾发量(ET_0)对单个气象因子的敏感性,探讨各气象因子和 ET_0 时空变化规律,比较 3 个干旱指数 Pa、SPI、SPEI 对山西省干旱灾害预警能力,通过 MK 趋势检验、干旱频率统计以及空间插值等方法分析山西省 1971—2020 年干旱事件时空演变特征。

1 数据与方法

1.1 研究站点与数据集

选取山西省 24 个具有长序列气象资料的气象站点进行研究。山西省高程数据由地理数据空间云提供,高程范围为 198~3 061 m(图 1)。气象数据

来自中国气象数据网,主要包括逐日降水量(P)、相对湿度(R_H)、日最高气温(T_{max})、日最低气温(T_{min})、2 m 处风速(U_2)和日平均日照时数(n)等,数据已通过严格的质量控制,气象数据历时为 1971—2020 年,数据记录基本完整,对存在错误的数据进行改正,对漏测、缺测的数据进行插值处理,数据经过处理后,能代表山西省的实际降水量,能够反映山西省降水的时空分布规律。

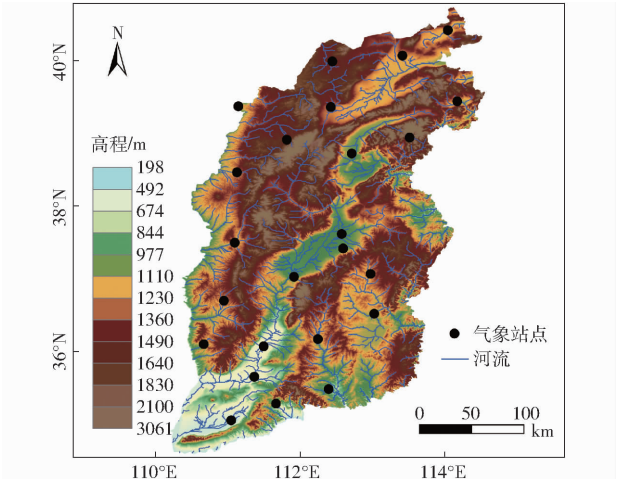


图 1 山西省气象站点分布及地理信息
Fig. 1 Shanxi Province site distribution and geographical information

1.2 参考作物腾发量估算

采用标准化和广泛接受的 FAO56 Penman-Monteith (FAO56-PM) 公式计算参考作物腾发量,计算式为

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

- 式中 ET_0 ——参考作物腾发量,mm
 Δ ——饱和水气压曲线斜率,kPa/℃
 R_n ——作物表面净辐射,MJ/(m²·d)
 G ——土壤热通量密度,MJ/(m²·d)
 γ ——湿度计常数,kPa/℃
 T_{ave} ——2 m 处平均温度,℃
 e_s ——饱和水气压,kPa
 e_a ——实际水气压,kPa

1.3 基于气象要素变化的敏感性分析

由 FAO56-PM 公式可知,除了地理要素如海拔和经纬度,共有 6 个气象因子影响 ET_0 。为考察单一气象因子(T_{min} 、 T_{ave} 、 T_{max} 、 U_2 、 R_H 和 n)变化对 ET_0 带来的影响,由单个重构气象因子与其余 5 个实际的气象因子组合估算,设定各重构单气象因子变化趋势(ΔT 为 0、±5%、±10%、±15%、±20%、±25%、±30%),从而确定 ET_0 对敏感性分析的不

同情景。这里气温 (包括 $T_{\min}$ 、 T_{ave} 和 $T_{\max}$) 可能有负值。对于负的气温, $ET_{0,\Delta T} = ET_0(1 - \Delta T)$, 而对于正的气温, $ET_{0,\Delta T} = ET_0(1 + \Delta T)$ 。

1.4 干旱指数计算

1.4.1 降水距平百分率

降水距平百分率 Pa 计算式为

$$Pa = \frac{P_1 - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\%$$
 (2)

式中 P_1 ——某时段降水量, mm
 $\bar{P}$ ——计算时段同期平均降水量, mm

1.4.2 标准化降水指数(SPI)计算

每个站点、每个分区以及全国的逐月降水量用来计算 1 个月(月)、3 个月(季)和 12 个月(年)时间尺度的 SPI, SPI 的计算涉及到将 Gamma 概率密度函数拟合到给定的降水时间序列。Gamma (x) 概率密度函数为

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (x > 0)$$
 (3)

式中 α ——形状参数 β ——尺度参数
 Γ ——Gamma 函数
 α 和 β 可以用极大似然法求得, 即

$$\beta = \frac{\bar{P}}{\alpha}$$
 (4)

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{4A}{3}}}{4A}$$
 (5)

其中 $A = \lg \bar{P}' - \frac{1}{m'} \sum_{i=1}^{m'} \lg P'_i$ (6)

式中 m' ——降水量时间序列长度
 $\bar{P}'$ ——降水序列中非零项平均值
 P'_i ——降水序列中非零项

由于式(6)中不包括 $P = 0$ 的情况, 而实际降水量可以为 0, 因此定义累积概率为

$$H(x) = q + (1 + q)G(x)$$
 (7)

式中 $G(x)$ ——累积概率 q ——概率
 $H(x)$ ——累积概率函数
当降水量为 0 时, 其概率 q 为

$$q = \frac{m}{m'}$$
 (8)

式中 m ——降水量为 0 的序列长度
将 $H(x)$ 正态化处理即可得到 SPI 为

$$SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right)$$
 (9)

其中, 当 $H(x) \leq 0.5$ 时, $t = \text{sqrt}(\ln(1/H^2(x)))$; 当 $H(x) > 0.5$ 时, 用 $1 - H(x)$ 替换 $H(x)$, 并且取反符号。 $c_0 = 2.515\,517$, $c_1 = 0.802\,853$, $c_2 = 0.010\,328$, $d_1 = 1.432\,788$, $d_2 = 0.189\,269$, $d_3 = 0.001\,308$ 。

1.4.3 标准化降水蒸散指数(SPEI)

首先采用 Penman - Monteith 模型公式计算参考作物腾发量 ET_0 , 然后计算月、季和年时间尺度的累计水分亏缺量 ($D_i = P_i - ET_{0,i}$); 采用三参数的 Log - logistic 概率分布函数对 D 数据序列进行正态化, 计算式分别为

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma'} \right)^\beta \right]^{-1}$$
 (10)

$$SPEI = - \left(\omega - \frac{c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3} \right)$$
 (11)

式中 $F(x)$ ——概率分布函数
 γ' ——位置参数

其中, 超过某个 D 数据的概率为 $p(D) = 1 - F(x)$, 当 $p \leq 0.5$ 时, $\omega = \text{sqrt}(-2\ln(p(D)))$; 当 $p > 0.5$ 时, 用 $1 - p(D)$ 替换 $p(D)$, 并且取反符号。 $c_0 = 2.515\,517$, $c_1 = 0.802\,853$, $c_2 = 0.010\,328$, $d_1 = 1.432\,788$, $d_2 = 0.189\,269$, $d_3 = 0.001\,308$ 。

Pa 、 SPI 和 $SPEI$ 3 个干旱指数的干旱等级分类如表 1 所示^[21]。

表 1 Pa 、 SPI 和 $SPEI$ 的干旱等级分类
Tab.1 Classification of drought levels for Pa , SPI and $SPEI$

干旱分类	等级	Pa/%			SPI	SPEI
		月尺度	季尺度	年尺度		
正常	0	> -40	> -25	> -15	(-0.5, 0.5]	(-0.5, 0.5]
轻旱	1	(-60, -40]	(-50, -25]	(-30, -15]	(-1.0, -0.5]	(-1.0, -0.5]
中旱	2	(-80, -60]	(-70, -50]	(-40, -30]	(-1.5, -1.0]	(-1.5, -1.0]
重旱	3	(-95, -80]	(-80, -70]	(-45, -40]	(-2.0, -1.5]	(-2.0, -1.5]
特旱	4	≤ -95	≤ -80	≤ -45	≤ -2.0	≤ -2.0

1.5 趋势分析

由于水文-气象时间序列不属于正态分布, 相较于参数检验法, 应用非参数检验法更为合适, 因此, 本研究中趋势检验采用改进的非参数 Mann -

Kendall(MK)方法, 改进的 MK 方法考虑了时间序列中自相关结构的影响^[22]。当统计量 Z 大于 0 时, 表示时间序列有上升趋势, 反之呈现下降趋势。当 $|Z|$ 大于 1.65、1.96、2.58 时, 表示时间序列的趋势

性通过置信度为 90%、95%、99% 的显著性检验。

1.6 干旱事件识别和表征

利用游程理论来识别和描述 12 个月时间尺度的干旱事件^[23]。游程被定义为时间序列 X_t 的一部分,其中所有的值均低于或高于所选择的阈值 X_1 ^[24]。当 SPEI 小于 -1 时,认为该月份为干旱事件的开始,直到 SPEI 大于 0 时认为该干旱事件结束。干旱历时定义为所有干旱事件的连续干旱月份 (SPEI 小于 -1) 的总和,干旱严重程度是指所有干旱事件从干旱开始到结束的整个过程的 SPEI 绝对值,干旱峰值是干旱期间 SPEI 最小值^[25]。

2 结果与分析

2.1 1971—2020 年气象因子时空变化规律

山西省各气象因子和 ET_0 的时间变化如图 2 所示。对气象因子进行标准化处理后,进行趋势检验,随着时间的增加,风速 U_2 、日平均日照时数 n 、相对湿度 R_H 呈显著下降趋势,降水量 P 呈不显著下降趋势,最高温度 T_{max} 、最低温度 T_{min} 和平均温度 T_{ave} 呈显著上升趋势,参考作物腾发量 ET_0 在山西省呈降低趋势,其线性趋势与表 2 中的 MK 检验结果基本一致。

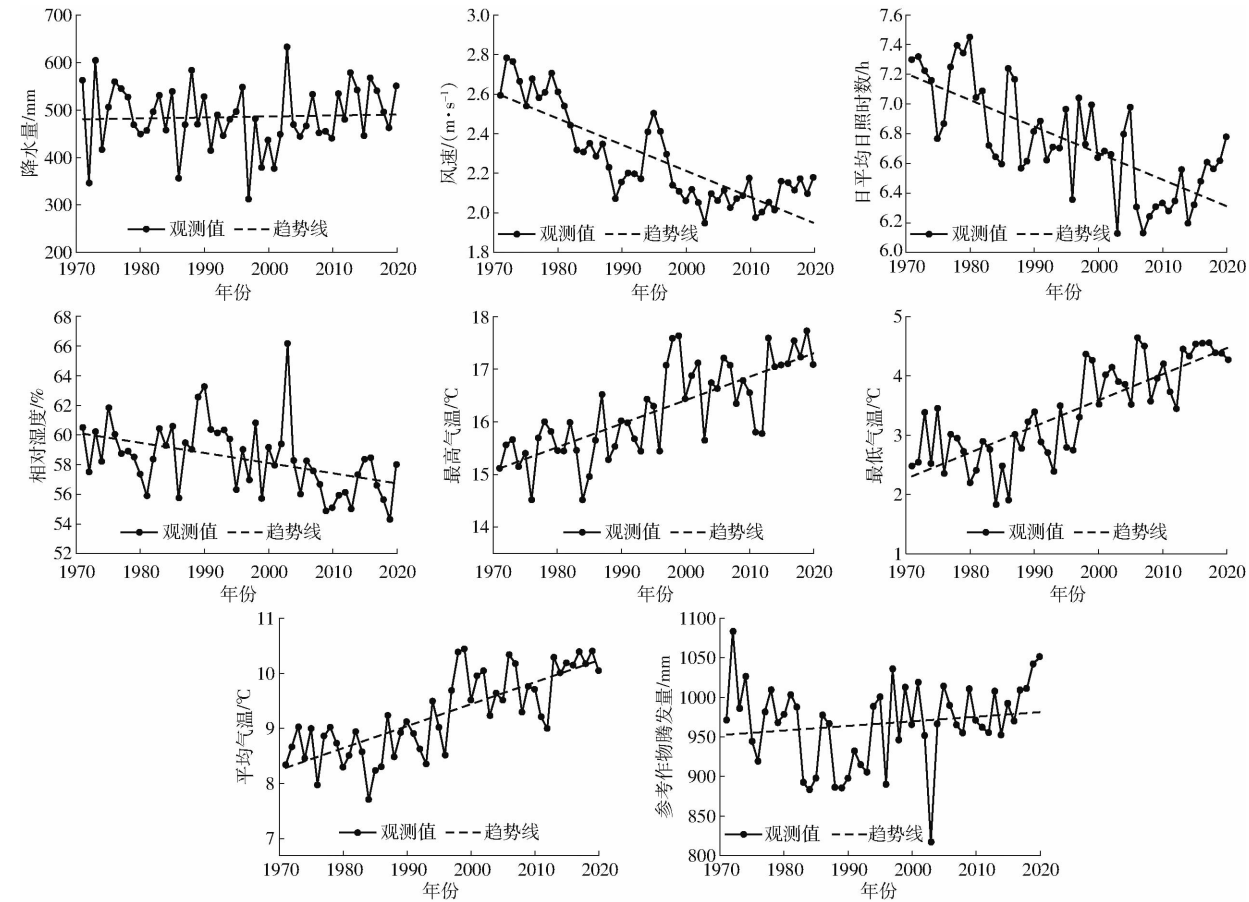


图 2 山西省 1971—2020 年各气象因子与 ET_0 的变化曲线

Fig.2 Change curves of meteorological factors and ET_0 in Shanxi Province from 1971 to 2020

表 2 山西省气象因子与 ET_0 的趋势检验结果
Tab.2 Results of trend test of meteorological factors and ET_0 in Shanxi Province

变量	Z	趋势值
P	0.11	0.000 9
U_2	-2.08 *	-0.054 7
n	-2.08 *	-0.045 2
R_H	-2.10 *	-0.031 5
T_{max}	2.10 *	0.051 5
T_{min}	2.02 *	0.054 8
T_{ave}	2.01 *	0.052 2
ET_0	1.11	0.013 9

由图 3 可以看出,山西省各地气候条件不同,忻州市东部五台山气象站除日平均日照时数外,其他指数较为极端,这是由于五台山地区雨水充沛,湿度大^[26]。山西省其他地区的气象要素有较明显趋势性,年平均降水量、年平均温度、年平均相对湿度、年平均最高气温和年平均最低气温由北向南呈递增趋势,日平均日照时数由北向南呈递减趋势;参考作物腾发量范围在 678.4~1 166 mm 之间,大同市、吕梁市和运城市 ET_0 较高,五台山地区 ET_0 较小,其他地区分布较为均匀。

各气象因子和 ET_0 趋势检验空间分布及其站点

注: * 表示通过 95% 显著性水平的显著性检验。

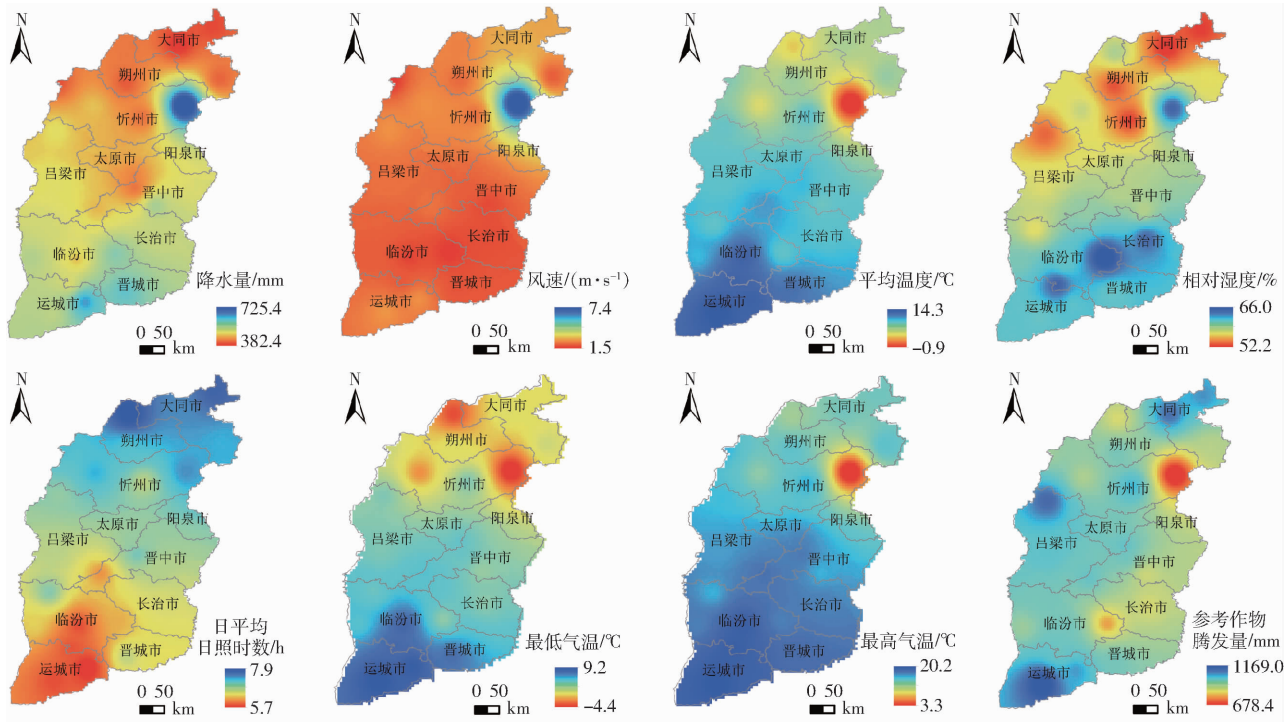


图 3 山西省各气象因子和 ET_0 的空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of each meteorological factor and ET_0 in Shanxi Province

数统计见图 4 和表 3。山西省有一半站点的 P 呈上升趋势,但并不显著;所有站点 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 和 T_{ave} 呈一定的上升趋势,但有 3 个站点的 $T_{\min}$ 呈非显著下降趋势。较多站点的 U_2 、 R_H 、 n 呈降低的趋势。对于 ET_0 而言,15 个站点具有降低的趋势,9 个趋势增加的站点主要分布在晋东南区。气候变量的不同趋势

和分布(尤其 P 和 ET_0)都会影响 Pa 、 SPI 和 $SPEI$ 的时空格局。

图 5 为单一气象因子变化下的 ET_0 变化情况,山西省年平均 ET_0 为 967.41 mm,随 U_2 、 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 、 n 和 T_{ave} 从 -30% 增加到 30%,对应各情景重新计算的 $ET_{0,\Delta T}$ 增加,其中, $ET_{0,\Delta T}$ 随 R_H 的变化最为敏感,

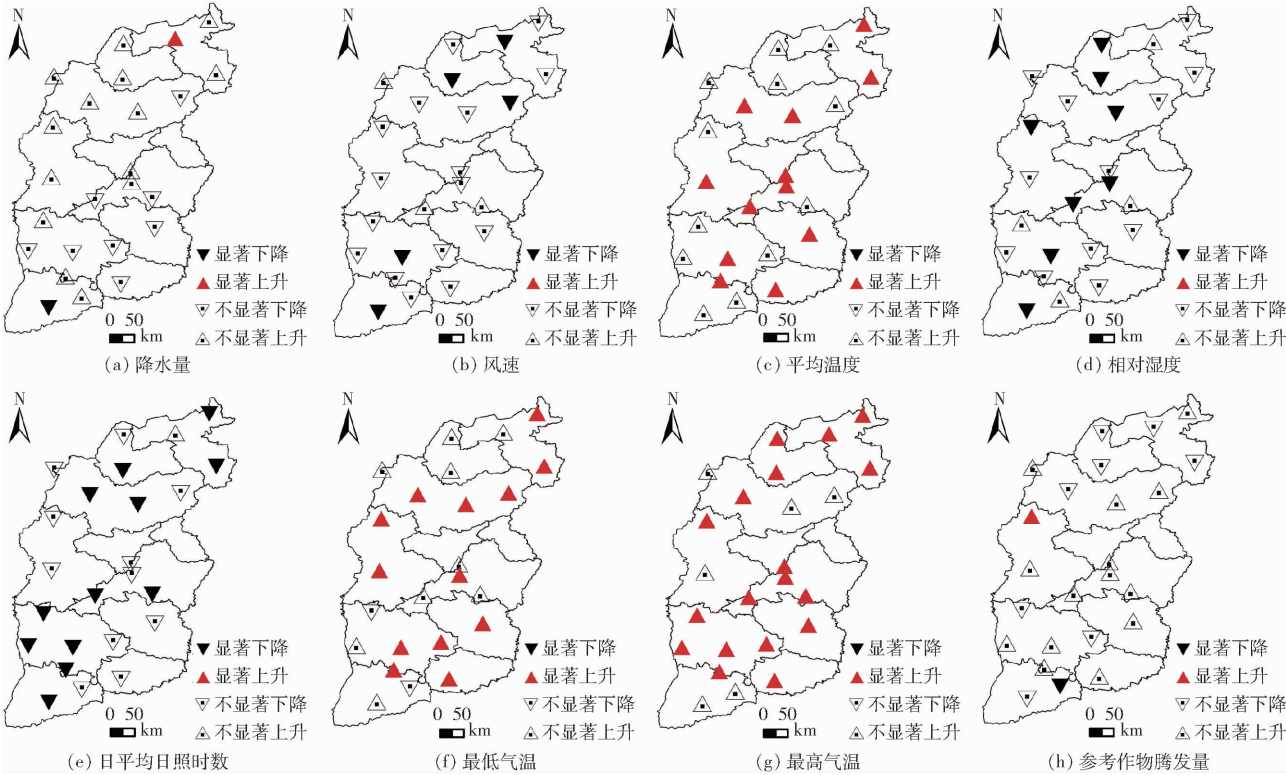


图 4 各气象因子和 ET_0 的趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of trends in each meteorological factor and ET_0

表3 各气象因子和ET₀的趋势及站点数统计

Tab.3 Trend and site number statistics of each meteorological factor and ET₀

趋势	<i>P</i>	<i>U</i> ₂	<i>T</i> _{ave}	<i>R</i> _H	<i>n</i>	<i>T</i> _{min}	<i>T</i> _{max}	ET ₀
显著上升	1	0	12	0	0	13	18	1
不显著上升	14	3	12	4	1	9	6	8
不显著下降	8	16	0	12	11	2	0	14
显著下降	1	5	0	8	12	0	0	1

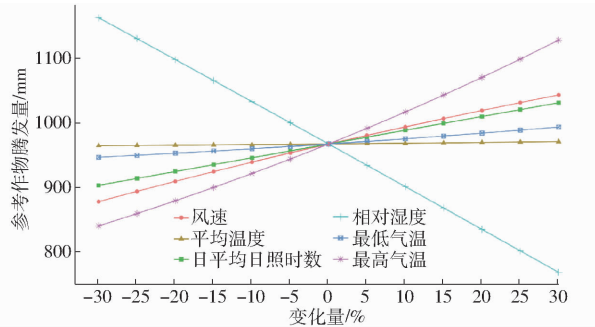


图5 单个气象因子变化下的ET_{0,ΔT}

Fig.5 ET_{0,ΔT} for changes in single meteorological factor

由1 163.68 mm减少到767.86 mm,呈负相关,其他气象因子对ET₀的敏感性由大到小为T_{max}、U₂、n、T_{min}、T_{ave},均呈正相关。

2.2 山西省干旱时间变化特征

2.2.1 不同时间尺度干旱规律分析

根据GB/T 20481—2017《气象干旱等级》中规定的划分标准,分别选用月、季、年时间尺度的PA、SPI和SPEI,比较分析山西省1971—2020年干旱的时间演变规律,如图6所示。

不同时间尺度下Pa、SPI和SPEI的敏感性随时间变化有显著差异,时间尺度越小,干旱指数变化越小。山西省自古就有“十年九旱”的说法,根据山西省古今气象灾害纵览^[27],1972、1978、1986、1991、1994、1995、1997、1999、2001、2005、2007、2013、2019年发生了极端干旱事件。Pa、SPI和SPEI在年尺度上趋势大体一致,在历史极端干旱年1972、1986、1991、1997、1999、2001年表现基本一致,在1994、1995、2005年表现较弱,在2007、2013年指数表现均较差,在1978、2019年的历史极端干旱中SPEI表现优于Pa、SPI。总体而言,SPEI表现效果最优。

2.2.2 不同时间尺度下SPEI指数干旱频率分析

运用月时间尺度SPEI(SPEI-1)对山西省干旱进行分析,由图7可知,山西省1971—2020年1—12月发生干旱月份频率分别为33.3%、33.4%、34.0%、33.9%、31.9%、31.9%、33.7%、32.5%、32.7%、33.2%、32.4%、31.8%;其中发生轻旱、中旱、重旱、特旱的平均频率分别为14.8%、10.6%、5.6%、1.9%;10月发生轻旱频率最高,为16.1%,

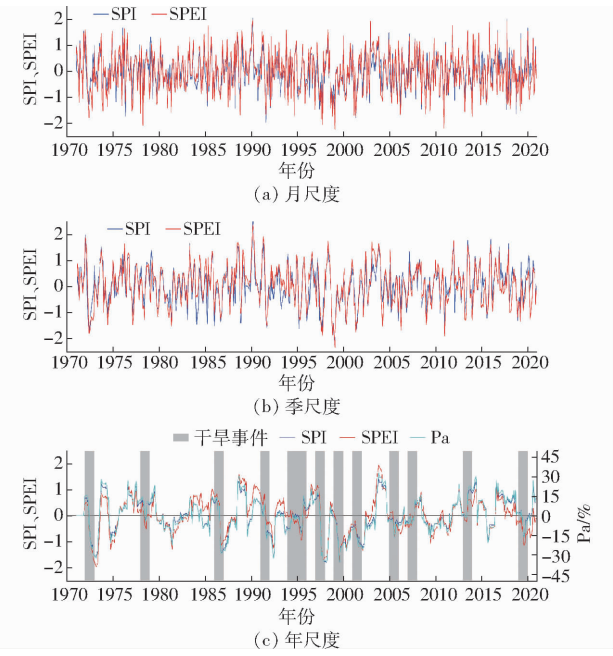


图6 1971—2020年山西省不同时间尺度Pa、SPI和SPEI变化曲线

Fig.6 Variation curves of Pa, SPI and SPEI at different time scales in Shanxi Province, 1971—2020

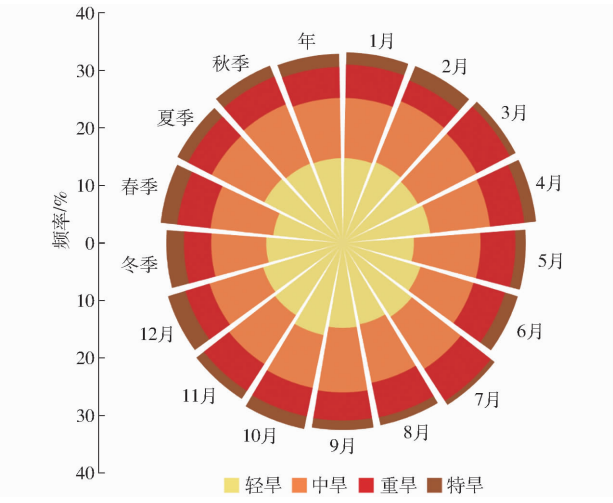


图7 1971—2020年山西省不同时间尺度SPEI不同等级干旱发生频率

Fig.7 Frequency of droughts of different classes in SPEI at different time scales in Shanxi Province, 1971—2020

4—7月发生中、重旱频率较高,其中,5月发生中旱频率最高,达12.5%,7月发生重旱频率最高,达7%,12月发生特旱频率最高,为3.3%。

运用季时间尺度SPEI(SPEI-3)对山西省1971—2020年春夏秋冬四季的干旱情况进行分析,结果表明,秋季、夏季、春季和冬季发生干旱的频率依次降低,分别为33.5%、32.5%、31.9%和31.4%。春季,轻、中、重、特旱概率分别为12.2%、11.0%、5.8%、2.9%;夏季,轻、中、重、特旱概率分别为15.4%、10.3%、4.7%、2.1%;秋季,轻、中、

重、特旱概率分别为 15.0%、11.2%、5.3%、2.1%；冬季，轻、中、重、特旱概率分别为 13.3%、9.6%、4.8%、3.1%。

运用年时间尺度 SPEI (SPEI-12) 对山西省 1971—2020 年的干旱情况进行分析,干旱发生频率为 33%,轻、中、重、特旱概率分别为 14.8%、10.5%、5.4%、2.3%。

2.3 山西省干旱空间变化特征

2.3.1 干旱空间分布规律

为探究山西省空间干旱变化特征,利用 ArcGIS 10.6 对不同时间尺度各站点干旱频率进行插值,如图 8 所示。SPEI-1 尺度下,轻旱在大同市中部、临汾市东部、吕梁市发生频率较高,达到 16% 以上;中旱在晋中南部、临汾北部发生频率较高,达到 12% 以上;重旱在大同市、太原市发生频率较高,达到 6.5% 以上;特旱在忻州西部发生频率最高,达到

3.2%。SPEI-3 尺度下,轻旱主要发生在忻州西部、晋中西部,达到 18% 以上;中旱主要发生在朔州市、晋中南部,达到 13% 以上;重旱在吕梁市和临汾市发生频率较高,达到 8% 以上;特旱在大同市、长治市发生频率最高,达到 4%。SPEI-12 尺度下,轻旱主要发生在朔州市和临汾市,达到 20% 以上;中旱主要发生在临汾市、晋中中部,达到 16%；重旱主要发生在晋中大部分地区、大同中部、朔州北部、临汾北部和太原南部,达到 8% 以上;特旱在大同东部、吕梁西部大部分地区、忻州中部、临汾东部、运城东部和晋城大部分地区发生频率最高,达到 4%；总体而言,时间尺度越大,同一干旱类型的全域干旱频率范围越大,SPEI-12 相较 SPEI-1 和 SPEI-3 识别重旱、特旱的站点更多,分别为 8、7 个,吕梁市干旱情况最为严重,晋中市、忻州市、大同市干旱也较为严重。

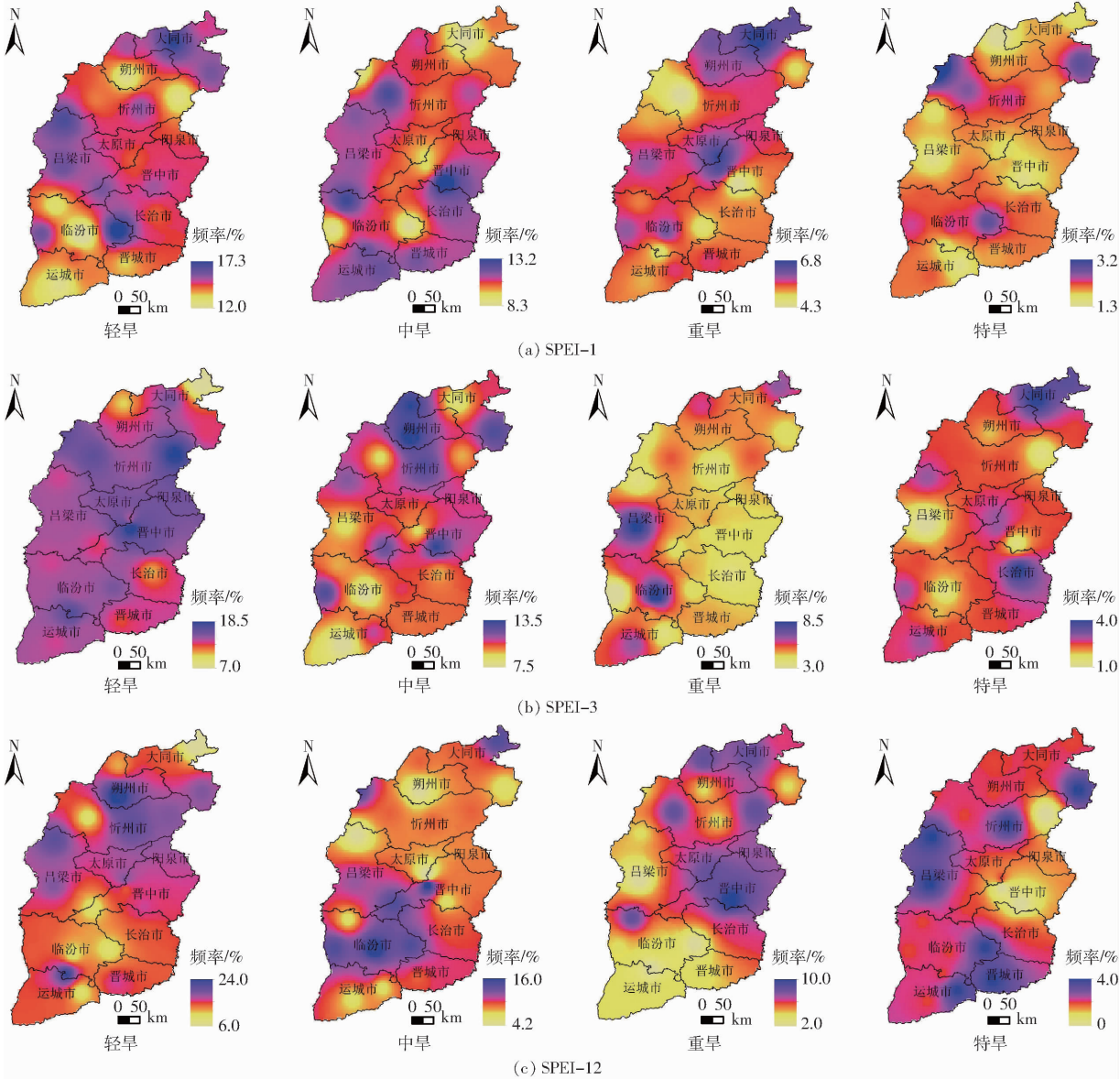


图 8 1971—2020 年山西省不同时间尺度 SPEI 干旱等级发生频率

Fig. 8 Frequency of occurrence of SPEI drought classes at different time scales in Shanxi Province, 1971—2020

2.3.2 不同时间尺度干旱特征变量空间分布

山西省 24 个站点不同时间尺度下干旱次数、历时、严重程度、峰值在空间分布上有较大差异,如图 9 所示。时间尺度越小,干旱次数越频繁,干旱历时越短,干旱严重程度越低,干旱峰值越大,全域干旱历时、严重程度差距越小,干旱峰值差距越大。不同时间尺度的干旱频次都呈由北向南递减,SPEI-1 尺度下,临汾市和晋城市 2 个站点干旱频次最大,为 80 次,在忻州市东部五台山地区达到最低值,为 52 次,SPEI-3 尺度下,运城干旱频次最大,为 47 次,在忻州市东部五台山地区达到最低值,为 26 次,SPEI-12 尺度下,晋城市干旱频次最大,为 17 次,在忻州市东部五台山地区达到最低值,为 3 次。SPEI-1 尺度下,晋城市干旱历时最长,达到 176 个

月;SPEI-3 与 SPEI-12 尺度下,干旱历时由东向西递减;SPEI-1 尺度下,有 8 个站点达到 190 个月以上,13 个站点达到 180 个月以上,主要分布在山西省南部和中部,低于 180 个月的在临汾市的 2 个站点和忻州市西部的 1 个站点;SPEI-3 尺度下,有 2 个站点达到 200 个月以上,在忻州东部和晋中市,低于 190 个月的站点在忻州市西部和临汾市北部;SPEI-12 尺度下,干旱严重程度在晋中市、长治市站点达到最高,由东向西减弱,在忻州市西部和大同东部达到最低。不同时间尺度下干旱峰值各有不同,SPEI-1 尺度下,干旱峰值在吕梁市和朔州市达到 4 以上;SPEI-3 尺度下,干旱峰值在忻州市和大同市达到 3.5 以上;SPEI-12 尺度下,运城市和大同市达到 3 以上。

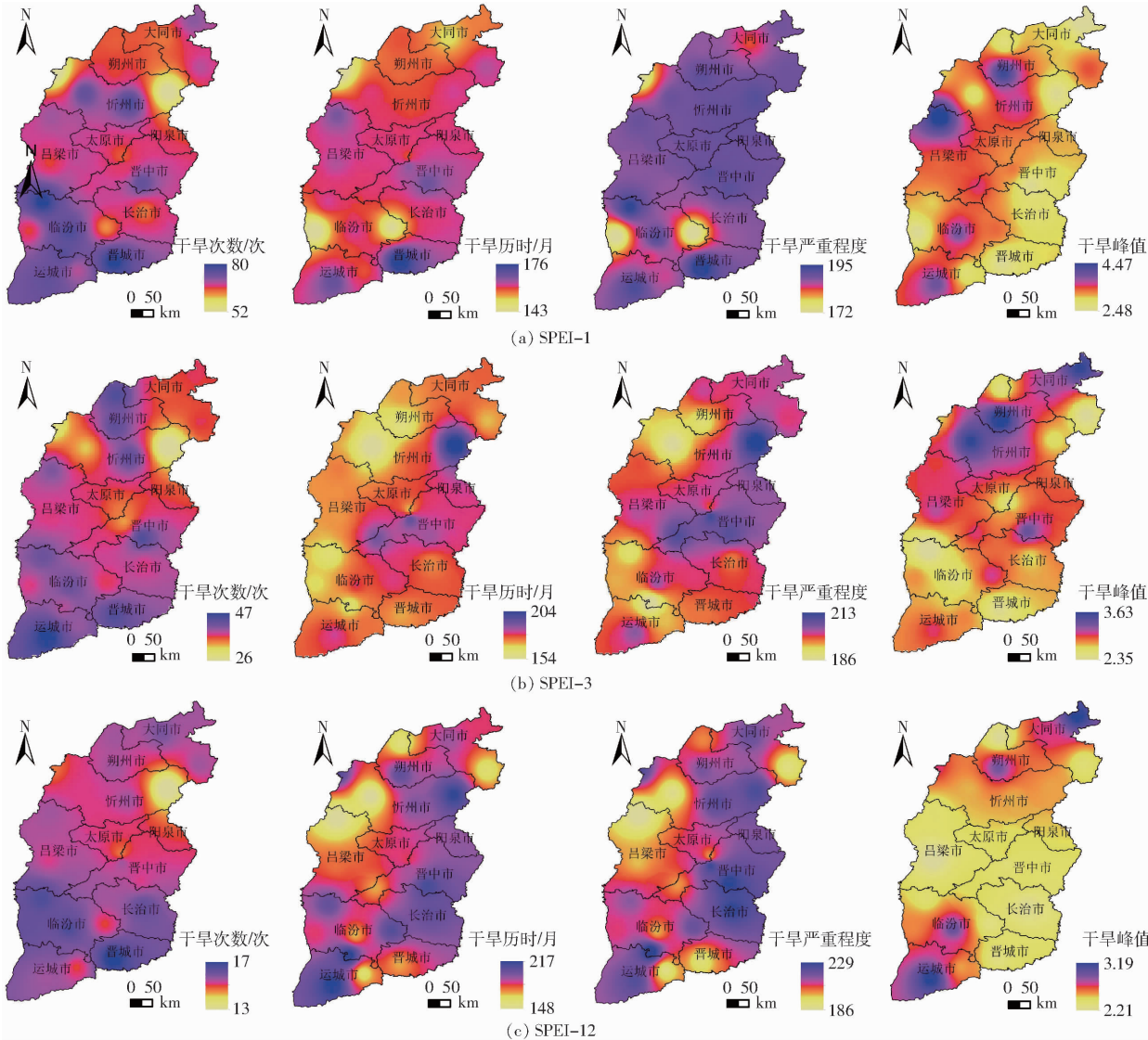


图 9 1971—2020 年山西省不同时间尺度干旱次数、历时、严重程度、峰值

Fig.9 Number, duration, severity, and peak value of droughts at different time scales of SPEI in Shanxi Province, 1971—2020

2.4 SPEI-12 尺度下 SPEI 变化点和趋势

从图 10a 可以看出,山西省 SPEI 的突变点发生在 1972 年,说明自 1972 年山西省趋于干旱化。由

于极端气候、全球气候增温等诸多因素的影响,干旱的影响范围和严重程度在未来可能呈逐步增加趋势。

图 10b 为山西省年尺度 SPEI 的趋势空间分布,

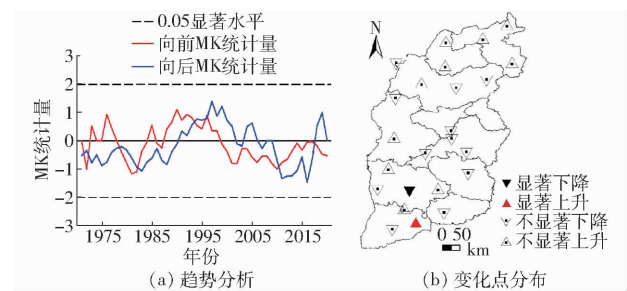


图 10 SPEI-12 尺度下 SPEI 的趋势和变化点分布

Fig. 10 Trend and change point distribution of SPEI at SPEI-12 scale

有 12 个站点 SPEI 有下降趋势,主要集中在山西中部地区(吕梁市、太原市、晋中市、长治市),12 个站点有上升趋势,山西南部、北部地区居多。

3 讨论

山西省 ET_0 的时空变化趋势是气象因子综合作用的结果。本文通过敏感性分析重新计算 ET_0 ,得出山西省气象因子对 ET_0 的敏感性由大到小依次为 R_H 、 T_{max} 、 U_2 、 n 、 T_{min} 、 T_{ave} ,对于山西省来说, R_H 是影响 ET_0 的主要气象因子,且呈负相关,其他气象因子均呈正相关,总体上, ET_0 呈上升趋势,这一结果可能是由于 n 的显著下降使 ET_0 下降,同时由于城市化的扩张^[28],引起 U_2 显著下降,使得水分子的运动速率降低,导致气动力对蒸散发的影响减弱,使 ET_0 下降^[29],然而 R_H 显著下降,蒸气压降低,植物之间的蒸气压差越大,气孔的水蒸气越容易向外扩散,使得 ET_0 增加^[30],同时 T_{max} 、 T_{min} 、 T_{ave} 显著上升使得 ET_0 增大,最终使得 ET_0 上升。LIU 等^[31] 在华北平原的研究中得出 R_H 是控制 ET_0 的最主要气象因子,KANG 等^[32] 发现 ET_0 的变化主要是由于在太行山 R_H 和 U_2 的改变,邢立文等^[33] 利用贡献率法得出山西省 $ET_{0,\Delta T}$ 随 R_H 的变化最为敏感,呈负相关,刘广东等^[34] 分析了山西省 5 个城市气象因子对 ET_0 的响应,与本文结果一致。此外,也有其他研究表明,海拔是影响 ET_0 的关键因素^[35-36]。

山西省降水量 P 、平均温度 T_{ave} 等气象因子和参考作物腾发量 ET_0 的变化,均会影响干旱指数 Pa、SPI 和 SPEI 的时空分布模式。当时间尺度从 1 个月提升到 12 个月时,干旱指数的波动越来越松散,并发现 SPI 和 SPEI 的变化趋势高度一致且相似,12 个月时间尺度上,Pa、SPI 和 SPEI 的预测结果与实际情况基本一致,但 SPEI 更精确地预测到 1978、2019 年的干旱事件,SPEI 指数监测效果更佳,能在多时间尺度上有效反映山西省干旱状况^[37]。在 SPEI-1 尺度上,干旱发生的频率由高到低分别为轻旱、中

旱、重旱、特旱,同时发现干旱发生频率与月份相关性较强,3 月干旱频率最大,4—7 月中旱、特旱频率最高,这与 CAI 等^[38] 在中国北部的研究结果基本一致,山西省南部干旱更为频繁,干旱峰值主要分布在西北部,全域干旱都较为严重;在 SPEI-3 尺度上,李丽红^[39] 研究结果与本文类似,秋季旱情最为严重、其次是夏季、然后是春季和冬季,东南部比西北部旱情更加严重,干旱峰值分布在西北地区。在 SPEI-12 尺度下,干旱类型以轻旱为主,南部干旱频发,东部旱情更为严重,峰值集中在南北两端,与 XU 等^[40] 认为山西省西北旱情更为严重的研究结果不符,可能由于其仅考虑了蒸发蒸腾 ET 和潜在蒸散量 PET,未考虑其他气象因素,因此具有一定局限性。

依据山西省多年气象因子和年尺度干旱指数的时空变化趋势,该省气候趋于暖干化,年均降水量波动减少,气温波动上升,使得整体旱灾次数大于涝灾,进入 21 世纪以来,气温持续升高,旱灾发生年份较多,干旱严重程度、持续时间和旱灾范围均有增加趋势,这一趋势与胡子瑛等^[41] 预测中国北方地区的趋势一致,根据山西省灾害记录,1972、1986、1997 年山西省均发生了全域性干旱,干旱影响范围的演变呈周期变化,未来仍有很大可能性发生全域性干旱。旱灾形成原因往往与多种因素有关,在任何情况下,每个干旱指数都有局限性,因此需要全面考虑更多因素对干旱的影响^[42-43]。

4 结论

(1)敏感性分析结果表明,山西省参考作物腾发量在 1971—2020 年表现为与 R_H 呈负相关,气象因子对 ET_0 的敏感性由大到小依次为 R_H 、 T_{max} 、 U_2 、 n 、 T_{min} 、 T_{ave} , ET_0 呈波动上升趋势。

(2)Pa 计算简便,结果直观,但该指标对降水量平均值有较大的依赖性,反映干旱的程度较弱;SPI 指数没有考虑温度变化对蒸散发的影响,相对于 SPEI 较差,基于降水和蒸散发的 SPEI 能够更灵活地反映 1、3、12 个月干旱变化特征,能够在多时间尺度上有效反映山西省干旱状况,是研究该地区干旱化较理想的工具。

(3)以 SPEI 监测情况为准,SPEI-1 尺度下,各干旱等级发生频率由大到小依次为轻旱(14.8%)、中旱(10.6%)、重旱(5.6%)、特旱(1.9%),3 月干旱发生率最高,为 34%,12 月发生率最低,为 31.8%,吕梁市、晋中市、大同市干旱情况较为严重;SPEI-3 尺度下,季节发生干旱频率由大到小依次为秋季(33.5%)、夏季(32.5%)、春季(31.9%)、冬

季(31.4%),大同市、长治市特旱发生频率最高,忻州市轻旱频率最高、朔州市中旱频率最高、吕梁市重旱频率最高;SPEI-12尺度下,各干旱等级发生频率由大到小依次为轻旱(14.8%)、中旱(10.5%)、重旱(5.4%)、特旱(2.3%),基于站点干旱频率和游程理论得出:山西省的气候趋于暖干化,南北地区旱情将有所加重,中部地区旱情有所减缓,全域性干旱仍有很大可能。

参 考 文 献

[1] KIKSTRA J S, NICHOLLS Z R J, SMITH C J, et al. The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures[J]. *Geoscientific Model Development*, 2022, 15(24): 9075–9109.

[2] SMITH W N, GRANT B B, DESJARDINS R L, et al. Assessing the effects of climate change on crop production and GHG emissions in Canada[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 179: 139–150.

[3] NEETI N, ARUN M C M, CHOWDARY V M, et al. Integrated meteorological drought monitoring framework using multi-sensor and multi-temporal earth observation datasets and machine learning algorithms: a case study of central India[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126638.

[4] 翁白莎, 严登华. 变化环境下我国干旱灾害的综合应对[J]. *中国水利*, 2010(7): 4–7, 3.
WENG Baisha, YAN Denghua. Reflections on integrated coping strategies for drought in China in changing environment[J]. *China Water*, 2010(7): 4–7, 3. (in Chinese)

[5] 《中国水旱灾害防御公报》编写组.《中国水旱灾害防御公报 2021》概要[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(9): 38–45.
Compilation Group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin. Summary of China flood and drought disaster prevention bulletin 2021[J]. *China Flood and Drought Management*, 2022, 32(9): 38–45. (in Chinese)

[6] 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 Yanling. Global research progress of drought indices[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2022, 33(5): 513–526. (in Chinese)

[7] 邵进, 李毅. 新疆地区不同时间尺度旱涝时空分布及其变化规律的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(1): 68–73.
SHAO Jin, LI Yi. Spatiotemporal distribution and variation of drought and waterlog at different time scales in Xinjiang[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(1): 68–73. (in Chinese)

[8] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696–1718.

[9] JHA S, SEHGAL V, RAGHAV A R. Spatio-temporal trends of standardized precipitation index for meteorological drought analysis across agroclimatic zones of India[J/OL]. *Nature Precedings*, 2011(6). <https://doi.org/10.1038/npre.2011.5922.1>.

[10] 熊光洁, 王式功, 李崇银, 等. 三种干旱指数对西南地区适用性分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(3): 686–697.
XIONG Guangjie, WANG Shigong, LI Chongyin, et al. Applicability of three drought indices to southwest China[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(3): 686–697. (in Chinese)

[11] 张翔, 孙雯. 2015—2017 年南非西开普省干旱事件的时空特征分析[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(5): 493–504.
ZHANG Xiang, SUN Wen. Spatial and temporal characteristics of the urban drought in Western Cape, South Africa, from 2015 to 2017[J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(5): 493–504. (in Chinese)

[12] LEE M H, IM E S, BAE D H. A comparative assessment of climate change impacts on drought over Korea based on multiple climate projections and multiple drought indices[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(1): 389–404.

[13] 李彦萌, 刘海鹏, 张冬峰, 等. 华北地区极端气候事件对农作物生长的影响研究[J]. *种子科技*, 2021, 39(5): 3–8.
LI Yanmeng, LIU Haipeng, ZHANG Dongfeng, et al. Effects of extreme climate events on crop growth in North China[J]. *Seed Science and Technology*, 2021, 39(5): 3–8. (in Chinese)

[14] 张亚峰, 李明. 基于 SPI 的山西省近 55 年旱涝灾害时空演变特征[J]. *山西师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 30(1): 109–116.
ZHANG Yafeng, LI Ming. Evolution of spatiotemporal characteristics of flood and drought in Shanxi Province for recent 50 years—an SPI-based analysis[J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 30(1): 109–116. (in Chinese)

[15] 张丽花, 延军平, 刘栎杉. 山西气候变化特征与旱涝灾害趋势判断[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(5): 120–125.
ZHANG Lihua, YAN Junping, LIU Lishan. Climate change and drought and flood disasters trend in Shanxi[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(5): 120–125. (in Chinese)

[16] 李智才, 阎冠华, 张瑞兰, 等. 山西夏季旱涝指数研究[J]. *山西气象*, 2004(1): 18–21.
LI Zhicai, YAN Guanhua, ZHANG Ruilan, et al. Research of drought and waterlogged index in summer of Shanxi[J]. *Shanxi Meteorological Quarterly*, 2004(1): 18–21. (in Chinese)

[17] 田新生, 高惠珍, 王晓宇. 山西省 1997 到 2001 年连续五年旱灾分析[J]. *山西水利科技*, 2002(2): 72–74.
TIAN Xinsheng, GAO Huizhen, WANG Xiaoyu. Analysis of continuous drought from 1997 to 2001 in Shanxi[J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 2002(2): 72–74. (in Chinese)

[18] 贺鹏, 徐立帅, 毕如田, 等. 山西春季旱情时空分布特征[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(29): 126–131.
HE Peng, XU Lishuai, BI Rutian, et al. Spatial and temporal characteristics of spring drought in Shanxi[J]. *China Agricultural Bulletin*, 2020, 36(29): 126–131. (in Chinese)

[19] 杨世刚, 杨德保, 赵桂香, 等. 三种干旱指数在山西省干旱分析中的比较[J]. *高原气象*, 2011, 30(5): 1406–1414.
YANG Shigang, YANG Debao, ZHAO Guixiang, et al. Comparison of three drought indices in drought of Shanxi Province[J].

- Highland Meteorology, 2011, 30(5): 1406 – 1414. (in Chinese)
- [20] 田国珍, 武永利, 梁亚春, 等. 基于蒸散发的干旱监测及时效性分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 721 – 729. TIAN Guozhen, WU Yongli, LIANG Yachun, et al. Drought monitoring and timeliness based on evapotranspiration model[J]. Geography of Arid Regions, 2016, 39(4): 721 – 729. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] HAMED K H, RAO A R. A modified Mann – Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1): 182 – 196.
- [23] YEVJEVICH V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts[J]. Journal of Hydrology, 1969, 7(3): 353.
- [24] MONTASERI M, AMIRATAEE B. Comprehensive stochastic assessment of meteorological drought indices[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(2): 998 – 1013.
- [25] YAO Ning, LI Linchao, FENG Puyu, et al. Projections of drought characteristics in China based on a standardized precipitation and evapotranspiration index and multiple GCMs[J]. Science of the Total Environment, 2020, 704(C): 135245.
- [26] 张卉, 程永明, 杨梅红. 五台山站气候资料均一性检验及气候变化趋势分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(7): 168 – 173. ZHANG Hui, CHENG Yongming, YANG Meihong. Homogeneity analysis of historical meteorological data and climate change tendency at Wutai Mountain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(7): 168 – 173. (in Chinese)
- [27] 刘庆桐. 山西古今气象灾害纵览(一)[J]. 沧桑, 2007(3): 41 – 42, 61.
- [28] LI Zhengquan, SONG Lili, MA Hao, et al. Observed surface wind speed declining induced by urbanization in East China[J]. Climate Dynamics, 2018, 50(3 – 4): 735 – 749.
- [29] TEH C B S. Introduction to mathematical modeling of crop growth: how the equations are derived and assembled into a computer program[M]. Boca Raton: BrownWalker Press, 2006.
- [30] MANFREDA S, PIZZOLLA T, CAYLOR K K. Modelling vegetation patterns in semiarid environments[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 19: 168 – 177.
- [31] LIU Yujie, CHEN Jie, PAN Tao. Analysis of changes in reference evapotranspiration, pan evaporation, and actual evapotranspiration and their influencing factors in the North China plain during 1998—2005[J]. Earth and Space Science, 2019, 6(8): 1366 – 1377.
- [32] KANG Tingting, LI Zeng, GAO Yunchun. Spatiotemporal variations of reference evapotranspiration and its determining climatic factors in the Taihang mountains, China[J]. Water, 2021, 13(21): 3145.
- [33] 邢立文, 崔宁博, 关静, 等. 1961—2018 年山西省潜在蒸散量变化特征及成因[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2): 18 – 21. XING Liwen, CUI Ningbo, GUAN Jing, et al. Variation characteristics and causes of potential evapotranspiration in Shanxi Province from 1961 to 2018[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(2): 18 – 21. (in Chinese)
- [34] 刘广东, 李艳, 刘海军, 等. 山西地区近 55 年参考作物蒸散量的变化特征及其主要影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(5): 26 – 30. LIU Guangdong, LI Yan, LIU Haijun, et al. Changing trend of reference crop evapotranspiration and its dominated meteorological variables in Shanxi Province in the past 55 years[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(5): 26 – 30. (in Chinese)
- [35] QI Peng, ZHANG Guangxin, WU Yanfeng, et al. Spatiotemporal changes of reference evapotranspiration in the highest-latitude region of China[J]. Water, 2017, 9(7): 493.
- [36] LIU Wei, YANG Linshan, ZHU Meng, et al. Effect of elevation on variation in reference evapotranspiration under climate change in Northwest China[J]. Sustainability, 2021, 13(18): 10151.
- [37] 王素萍, 王劲松, 张强, 等. 多种干旱指数在中国北方的适用性及其差异原因初探[J]. 高原气象, 2020, 39(3): 628 – 640. WANG Suping, WANG Jinsong, ZHANG Qiang, et al. Applicability evaluation of drought indices in Northern China and the reasons for their differences[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(3): 628 – 640. (in Chinese)
- [38] CAI Xiuhu, ZHANG Wenqian, FANG Xiaoyi, et al. Identification of regional drought processes in North China using MCI analysis[J]. Land, 2021, 10(12): 1390.
- [39] 李丽红. 山西省农业干旱时空演变规律遥感研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015. LI Lihong. Remote sensing research on spatial-temporal variations of agricultural drought in Shanxi[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [40] XU Yuanyuan, CHEN Yuxin, YANG Weilai, et al. Drought in Shanxi Province based on remote sensing drought index analysis of spatial and temporal variation characteristics[J]. Atmosphere, 2023, 14(5): 50799.
- [41] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1908 – 1919. HU Ziyang, ZHOU Junju, ZHANG Lili, et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1908 – 1919. (in Chinese)
- [42] 夏传花. 三种干旱指数在贵州省农业干旱时空分异研究中的适用性分析[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021. XIA Chuanhua. Three drought indices in Guizhou Province's agriculture applicability analysis in the study of drought spatio-temporal differentiation[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021. (in Chinese)
- [43] 郑健, 鲍婷婷, 王春霞, 等. 考虑气候分区的甘肃省干旱时空分布特征分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 311 – 320. ZHENG Jian, BAO Tingting, WANG Chunxia, et al. Spatial and temporal distribution characteristic of drought in Gansu Province considering climate zoning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 311 – 320. (in Chinese)