

基于 SPEI 的洮河流域气象干旱时空特征分析

瞿德业¹, 杨明月¹, 刘婷婷², 杨山泉¹, 湛越¹, 夏搏¹, 柴文博¹, 丁春伟²

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省临洮县气象局, 甘肃 临洮 730500)

摘要: 基于洮河流域 1976—2020 年逐月的气温和降水量资料, 计算了季尺度和年尺度的标准化降水蒸散指数 (SPEI), 采用时间序列平稳性检验法和干旱频率法定量分析了季尺度和年尺度不同等级气象干旱频率的变化规律及空间分布特征, 采用云模型分析了年尺度气象干旱时空分布的随机性与稳定性。结果表明: 在季尺度上, 四季的干旱频率都在 30% 左右, 干旱主要发生在春冬两季; 在年尺度上, 流域以轻旱、中旱为主, 轻旱、中旱发生频率高, 重旱、特旱发生频率偏低, 总体偏干旱; 在空间分布上, 干旱主要发生在流域的中下游区域; 1976—2020 年流域干旱化程度有所减弱, 干旱化趋势稳定, 干旱化程度波动较小。

关键词: 气象干旱; 时空特征; SPEI; 云模型; 洮河流域

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)05-0032-09

Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI//QU Deye¹, YANG Mingyue¹, LIU Tingting², YANG Shanquan¹, SHEN Yue¹, XIA Bo¹, CHAI Wenbo¹, DING Chunwei²
(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Lintao Meteorological Bureau of Gansu Province, Lintao 730500, China)

Abstract: Based on the monthly temperature and precipitation data from 1976 to 2020 in the Taohe River Basin, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) values at seasonal and annual scales were calculated. The time series stationariness test method and drought frequency method were used to quantitatively analyze the variation pattern and spatial distribution characteristics of different levels of meteorological drought frequency at seasonal and annual scales. The randomness and stability of the spatiotemporal distribution of meteorological drought at the annual scale were analyzed using the cloud model. The results show that the frequencies of drought in all four seasons are about 30%, with droughts mainly occurring in spring and winter. At the annual scale, the basin is dominated by mild and moderate droughts, which have a high occurrence frequency, while severe and extreme droughts occur less frequently, indicating an overall dry tendency. In terms of spatial distribution, droughts occur mainly in the middle and lower reaches of the basin. During the period from 1976 to 2020, the degree of drought in the basin weakened, with a stable trend and small fluctuations in drought severity.

Key words: meteorological drought; spatiotemporal characteristics; SPEI; cloud model; Taohe River Basin

由于全球气候变暖, 干旱已成为世界上最为频发的自然灾害之一。干旱在时空上具有持久、频发和广泛的特点, 对社会具有严重的负面影响^[1]。在自然界范围内, 把社会经济干旱、水文干旱、农业干旱和气象干旱统称为干旱^[2]。通常, 降水量的异常减少被视为气象干旱的一个重要表征。气象干旱通常最先出现, 而且会引起其他类型的干旱^[3-5]。气象干旱持续时间长、影响范围广, 造成了严重的生态、社会和经济影响。因此, 对于干旱区域的综合认识和把握具有重要意义。

干旱研究和监测的关键是干旱指数的应用和分

析。干旱指数具有严格的物理机制, 常被用于干旱特征的定量分析, 在气象干旱研究和干旱严重程度分类中发挥着关键作用^[6-8]。目前, 超过 150 种干旱指数被用于干旱评估、监测和量化^[9], 其中, 帕尔默干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI)、标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI) 和标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 的使用尤为普遍和深入。PDSI 只能在单一时间尺度上进行干旱测量, 缺乏在多时间尺度上分析干旱特性的能力, 在空间表征上也不够精细, 不能有效捕捉并描述大范围干旱

特征的变化^[10];SPI 仅以降水资料为基础,未能考虑蒸散量和气温对干旱的影响^[11];SPEI 能够在多个时间尺度和不同空间范围内进行分析和评估,从而全面反映降水和气温对干旱的综合影响,弥补了前两者的缺点。因此,采用 SPEI 更加恰当。王林等^[12]经过对历史干旱事件 SPEI 和 SPI 特征的分析,说明了 SPEI 在中国有普适性。国内研究者采用 SPEI 定量分析了不同区域季尺度和年尺度各个等级气象干旱频率的空间分布特征与年代变化规律。例如:门宝辉等^[13]在计算 SPEI 的基础上,剖析了潮白河流域气象干旱的时空变化特点,发现流域东部地区干旱风险增加并且以轻旱和中旱为主;张勃等^[14]通过 SPEI 了解了陇东地区的干旱趋势,并充分解释了 SPEI 在该地区的良好适用性;张敏等^[15]运用影响干旱的关键要素——蒸发和降水,通过 SPEI 定量分析了金沙江流域季尺度和年尺度不同等级气象干旱频率的年代变化规律及空间分布特征。可见,SPEI 在干旱特征研究方面具有较为理想的适用性。

SPEI 时空分析方法主要包括趋势分析法^[16]、相关分析法^[17-18]、经验正交函数法^[19]。这些方法虽能定量表达 SPEI 的时空分布规律,但难以定量描述 SPEI 时空分布的均匀性、稳定性等不确定因素^[20]。云模型能够很好地弥补这些方法的缺陷。目前云模型已在对时空特征分布的研究中取得了一定的成果。例如,殷长琛等^[21]利用云模型对甘肃省参考作物蒸散量的变化特征与影响因子进行了研究;程昌明等^[22]将云模型与 Z 指数相联系,对川中丘陵区 22 个气象站近半个世纪的干旱特点进行了分析;龙贻东等^[23]利用相对湿润度指标及云模型,对川中丘陵区 8 个气象站近半个世纪的干旱特点进行了分析。虽然云模型在理解和处理信息时,只能在一个简单的层面上进行来回转换和处理,但在计算过程中可以确保超熵的估计值不会小于 0,同时还具备较强的稳定性,云模型在干旱时空分布特性研究具有重要意义,因此,本文将云模型的特征值用于干旱的时空分布特性研究。

当前,关于洮河流域气候和干旱方面的研究已取得初步进展,如张济世等^[24]基于洮河流域 1950—2020 年水文实测资料分析得出,由于受气候变化及人类活动影响,流域内径流的减少和温度增加在 1950—2020 年有进一步加剧的趋势;王建兵^[25]利用洮河流域 7 个气象站 1971—2010 年的地面气象观测资料,对洮河流域气候干燥度变化进行了分析,结果表明洮河流域出现了明显的暖干化趋势。但对洮河流域气象干旱现象的研究仍显不足,

仍需进行更为深入和详尽的探讨。为此,本文采用时间序列平稳性检验法、SPEI、干旱频率法和云模型等方法,对洮河流域 1976—2020 年气象干旱时空演化特征进行分析,以期了解洮河流域气候变化。

1 数据与方法

1.1 研究区概况及数据来源

洮河为黄河水量较多的一级支流,全长 673 m,发源于西倾山的勒尔,向东流经碌曲、卓尼、岷县北、临洮至永靖矛龙峡,注入黄河^[24]。洮河流域位于青藏高原以东(北纬 34°05′~35°58′,东经 101°30′~104°20′),面积 25 527 km²,平均海拔 3 500 m 以上,年平均气温 5.9℃,多年平均降水量 502.9 mm,具有明显的高山气候垂直分布特征。为了对洮河流域各段的干旱程度变化进行分析,确定碌曲、临潭为上游区域,卓尼、岷县为中游区域,临洮、永靖为下游区域进行分析。本文所用的气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),碌曲、临潭、卓尼、岷县、临洮、永靖 6 个气象站 1976—2020 年的月降水量和月平均气温观测资料来自所在县气象局。图 1 为研究区概况及气象站分布。

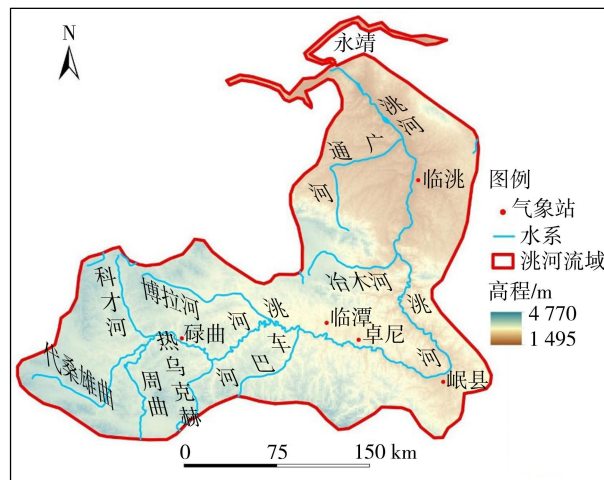


图 1 研究区概况及气象站分布

1.2 研究方法

1.2.1 时间序列平稳性检验法

时间序列的平稳性是时间序列分析的基础。因此,时间序列分析的关键是平稳性检验。单位根检验被广泛应用于时间序列^[26]的平稳性分析。本文利用 Eviews 统计软件对时间序列的平稳性进行单位根检验。

1.2.2 SPEI

SPEI 是 Vicente-Serrano 等^[27]在 SPI 的基础上进一步研究得来的,是通过计算降水量和潜在蒸散量之间的差值序列累计概率值进行正态标准化后的指数^[28]。SPEI 综合考虑了温度、湿度、降水、蒸散

等气象因素,并从多时空尺度稳定地评价干旱时空特征^[29-30]。

计算潜在蒸散量一般会运用 Thornthwaite 方法或 Penman-Monteith 蒸散计算模型^[29]。本文采用 Thornthwaite 方法,该方法不仅可以较好地反映地表潜在蒸散,而且计算简单快捷,适用于各种气候环境^[31]。

根据 GB/T 20481—2006《气象干旱等级》,由 SPEI 值确定干旱等级:无旱(>-0.5)、轻旱(>-1.0~-0.5)、中旱(>-1.5~-1.0)、重旱(-2.0~-1.5)、特旱(<-2.0)。

1.2.3 干旱频率法

干旱频率是指某个站点在实测年份内发生干旱频率的程度^[32],计算公式如下:

$$P = \frac{e}{E} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为站点的干旱频率; E 为测量气象数据的年数; e 为干旱发生的总年数。各等级的干旱频率根据各等级 SPEI 的干旱发生年份计算。

1.2.4 云模型

云模型是定性定量转换的不确定性模型,是用云的数字特征(期望、熵、超熵)表示语言值的数学性质。云模型分为正向云模型和逆向云模型,其中正向云模型算法是在基于已知概念的云参数生成 N 个云滴的基础上,多次模拟实现人们对这一参数的认知,形成云模型的过程^[33]。而逆向云模型使用 SBCT-1STM、SBCT-4STM 和 MBCT-SR 这 3 种算法。其中,MBCT-SR 算法相较于前两者更加可靠,在计算过程中可以确保超熵的估计值不小于 0,同时还具备较强的稳定性。基于此,本文采用基于 MBCT-SR 算法的逆向云发生器计算期望、熵和超熵,实现定量数值到定性概念的转化,具体计算过程可参见文献^[34]。

2 结果与分析

2.1 气象要素变化特征

2.1.1 平均气温及年降水量变化特征

洮河流域上游(碌曲、临潭)、中游(卓尼、岷县)和下游(临洮、永靖)6 个站点 1975—2020 年平均气温和降水量变化情况如图 2 所示。在此期间,上游站点的多年平均气温相对较低,基本保持在 3.4℃。1990 年之前,平均气温较低且波动性大。1995—2005 年,平均气温整体上升,尽管如此,仍低于长期平均值,总体上呈现以 0.048℃/a 的速率上升的趋势。中游岷县的多年平均气温在 5.8℃ 左右波动,1985 年以前气温相对稳定,在 4.7℃ 附近波动。1997 年后,气温明显升高,超过长期平均值。下游

临洮的年平均气温相对较高,主要在 8.5℃ 左右波动,大多数年份气温低于平均值,整体呈以 0.018℃/a 的速率缓慢上升的趋势。总体来看,洮河流域的上、中、下游 6 个站点的年平均气温在过去几十年呈现明显的上升趋势。

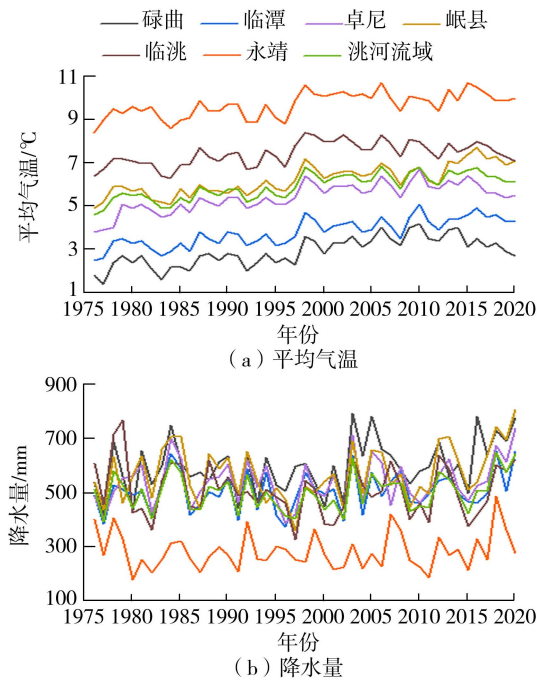


图 2 洮河流域及各站点 1975—2020 年平均气温和降水量变化

在降水量方面,洮河流域整体呈现逐年递减趋势。上游地区大部分年份的降水量低于平均值,尤其是在 20 世纪 90 年代降水量明显偏少。中游岷县的多年平均降水量保持在 550 mm 左右,1997 年降水量最低,但之后降水量呈上升趋势。下游地区的降水量相对较少,临洮在 1980 年后的波动幅度有所减弱,1990—2000 年的降水量相对最低,1997 年以后虽有轻微的增加趋势,但仍低于平均降水量。总体来看,洮河流域的年平均降水量呈现轻微的下陷趋势。

2.1.2 平均气温和降水量对 SPEI 的影响

本文采用相关性分析、线性回归等方法对气温、降水量与 SPEI 的相关性分别进行显著性检验,结果见表 1。由表 1 可知,气温与洮河流域各站点的 SPEI 呈负相关关系,上游临潭和中游卓尼的气温与 SPEI 的相关性均通过 0.05 水平的显著性检验,下游的临洮和永靖通过 0.01 水平的显著性检验,这主要是因为下游的气温较其他站点高,且降水量较其他站点少。流域降水量与 SPEI 均呈正相关关系,6 个站点均通过 0.01 水平的显著性检验。这与翟盘茂等^[35]对于 1951—2003 年中国气温和降水量变化及其对干旱的影响的研究结果一致。综上所述,

表 1 洮河流域及各站点平均气温、降水量与 SPEI 的相关系数

气象因子	洮河流域	碌曲	临潭	卓尼	岷县	临洮	永靖
平均气温	-0.449 **	-0.067	-0.365 *	-0.714 *	-0.537	-0.576 **	-0.638 **
降水量	0.504 **	0.563 **	0.474 **	0.571 **	0.628 **	0.671 **	0.514 **

注：* 表示在 0.05 水平相关性显著；** 表示在 0.01 水平相关性显著。

气温和降水量的变化会对 SPEI 产生较大影响。

2.2 时间序列平稳性检验

通过时间序列平稳性检验方法对各站点不同尺度的 SPEI 序列和降水量 P 进行了检验。平稳性测试结果显示,每个变量的 1%、5%和 10%临界值都大于这 5 个变量的单位根检验值。迁移概率 $p \leq 0.0002$ 也证明了这 5 个变量的平稳性结果在 0.05 的显著性水平上通过了检验。

2.3 干旱频率时间分布特征

SPEI 有多时间尺度的特点,本文经过计算得出洮河流域 6 个站点不同时间尺度的 SPEI 值。在分析干旱频率的过程中,主要选取年尺度与季尺度的 SPEI 值。3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季^[34]。洮河流域的年尺度和季尺度不同等级干旱频率时间分布见图 3。

由图 3 可知,洮河流域 1976—2020 年干旱频率表现出一致性,发生频次由高到低依次为:轻旱、中旱、重旱、特旱,表明该流域以轻旱和中旱为主,重旱和特旱发生的可能性较小。在夏季,除了特旱频率外,所有等级的干旱频率都在上升。随着年份的变化,春秋两季轻旱频率增加,中旱、重旱和特旱频率降低。冬季各等级干旱均呈下降趋势。

洮河流域年尺度和季尺度干旱频率时间分布特

征如表 2 所示,1976—1979 年,洮河流域年干旱频率为 19.8%,而后逐渐增大,2010—2020 年,干旱频率增大到 40.2%,为 1976—2020 年的最高值,这可能与 1990 年以后洮河河谷降水量减少以及 20 世纪 80 年代末至 90 年代河谷气温加速上升有关^[25]。1976—2020 年,春秋冬干旱频率总体呈增大趋势。年尺度和夏季的干旱频率有减小的趋势,气象干旱主要发生在春季和冬季。

表 2 年尺度和季尺度干旱频率时间分布

时间	干旱频率/%				
	年尺度	春季	夏季	秋季	冬季
1976—1979 年	19.8	76.4	23.6	25.0	66.7
1980—1989 年	20.1	13.3	23.9	27.8	35.6
1990—1999 年	36.9	28.9	26.1	52.8	27.2
2000—2009 年	38.1	36.1	41.7	27.8	30.0
2010—2020 年	40.2	35.9	35.4	26.8	23.7
1976—2020 年	31.0	38.1	30.1	32.0	36.6

2.4 干旱频率空间分布特征

2.4.1 年尺度干旱频率空间分布特征

在 ArcGIS 中采用空间差异中的反距离加权法对不同等级干旱频率的空间分布进行分析,结果见图 4。由图 4 可知,全年干旱频率在 30%~35%之间,卓尼和岷县地区尤为突出。为更全面地反映洮河流域干旱情况,本文采用 SPEI 等级划分标准对干旱进行分析,并将其分为 4 个不同等级进行研究。洮河流域轻旱年频率在 13%~30%之间,上游地区

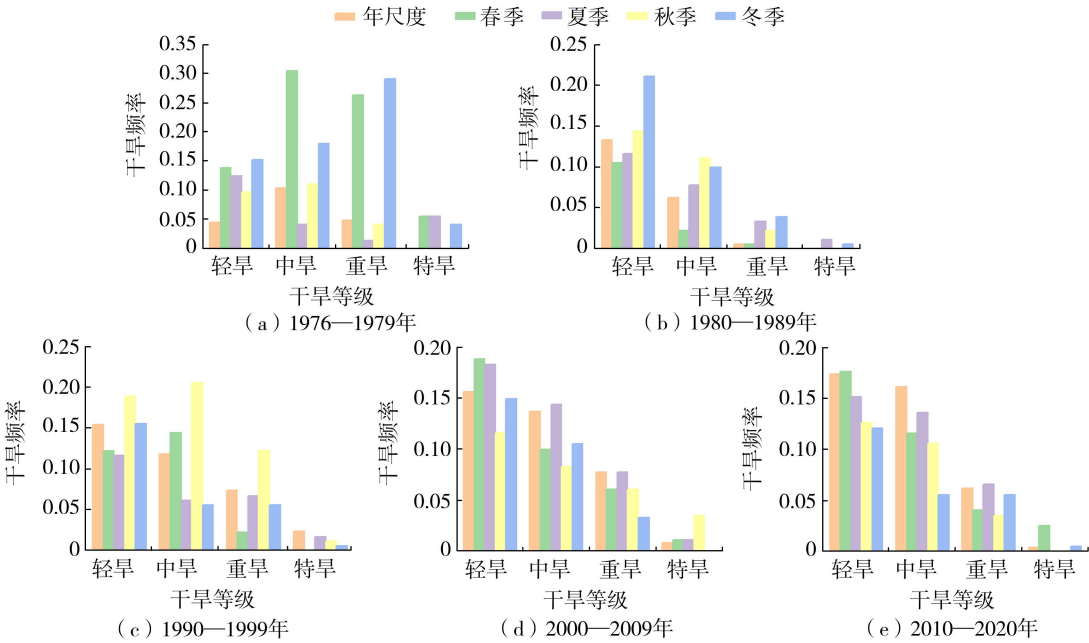


图 3 年尺度和季尺度不同等级干旱频率时间分布

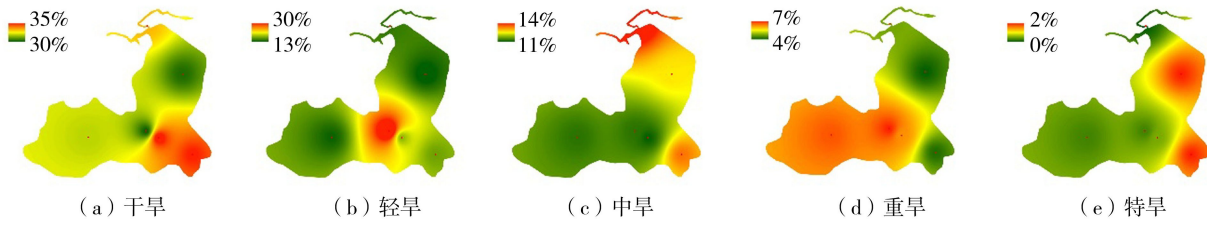


图4 年尺度不同等级干旱频率空间分布

和 中 游 卓 尼 轻 旱 较 为 明 显。中 旱 频 率 在 11%~14% 之 间,永 靖 和 岷 县 中 旱 频 率 较 高。重 旱 频 率 在 4%~7% 之 间,主 要 集 中 在 洮 河 流 域 中 上 游 地 区。特 旱 频 率 在 0%~2% 之 间,多 发 生 在 流 域 中 下 游 地 区。总 体 来 看,重 旱 和 特 旱 频 率 不 明 显,但 干 旱 频 率 较 高,呈 现 轻 旱、中 旱 频 率 较 高、重 旱 频 率 较 低 的 特 点。

2.4.2 季尺度干旱频率空间分布特征

图 5~8 为 季 尺 度 不 同 等 级 干 旱 频 率 空 间 分 布。相 比 其 他 季 节,春 季 干 旱 频 率 最 高,干 旱 频 率 介 于 31%~36% 之 间,平 均 干 旱 频 率 约 为 33.33%。春 季 该 流 域 以 轻 旱、中 旱 为 主,轻 旱 频 率 介 于 11%~18%

之 间,其 中,干 旱 程 度 最 高 的 地 区 在 洮 河 下 游 的 临 洮。上 游 临 潭、中 游 卓 尼 和 下 游 永 靖 的 中 旱 发 生 频 率 较 高,在 10%~13% 之 间。重 旱 的 频 率 在 4%~8% 之 间。春 季 特 旱 频 率 虽 低 于 其 他 季 节,但 仍 存 在 于 流 域 中 游 地 区。如 前 所 述,洮 河 流 域 以 轻 旱 为 主,中 旱 以 春 季 为 主,但 对 于 易 发 生 严 重 干 旱 和 特 旱 的 地 区,应 重 点 关 注。

夏 季 干 旱 频 率 在 30%~33% 之 间,其 中 中 下 游 地 区 干 旱 频 率 低 于 上 游 地 区。轻 旱 频 率 在 11%~16% 之 间,卓 尼 和 永 靖 轻 旱 频 率 最 低。整 体 上 来 说 下 游 中 旱 发 生 频 率 低 于 上 游,中 旱 频 率 在 1%~3%

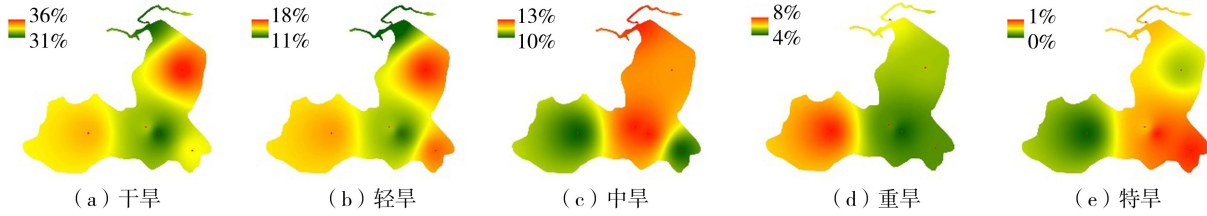


图5 春季不同等级干旱频率空间分布

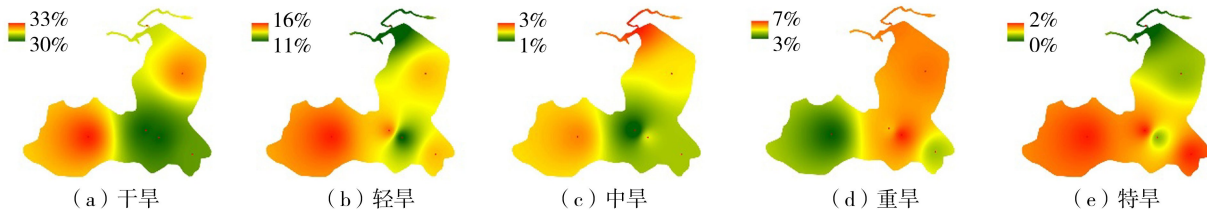


图6 夏季不同等级干旱频率空间分布

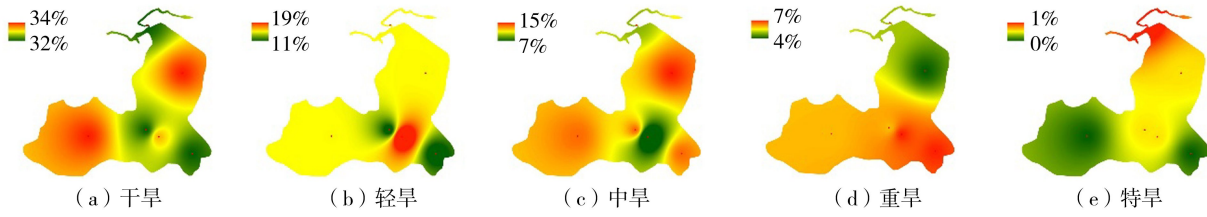


图7 秋季不同等级干旱频率空间分布

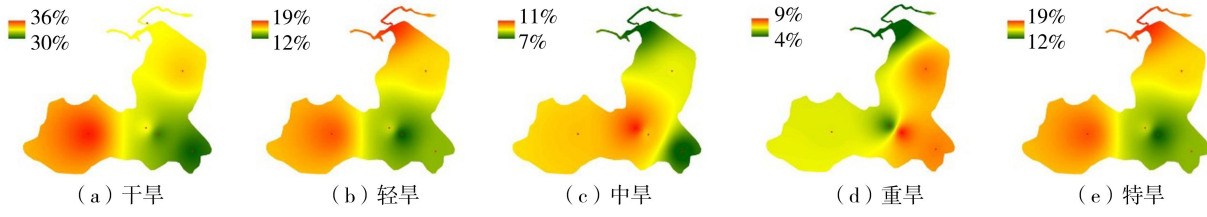


图8 冬季不同等级干旱频率空间分布

之间,重旱频率在 3%~7%之间,卓尼地区频率为最高。夏季特干旱频率在 0%~2%之间,中上游地区干旱频率较高。

秋季干旱频率介于 32%~34%之间,上、下游干旱频率高于中游。轻旱发生率介于 11%~19%之间,中旱频率介于 7%~15%之间,下游临洮中旱发生频率较高,达到 14.8%。秋季重旱介于 4%~7%之间,发生频率最高的地方为卓尼、岷县地区。特旱的发生频率在 0%~1%,其中,永靖发生特旱的频率最高。

冬季干旱频率介于 30%~36%之间,并且冬季的其他等级干旱均高于其他三季。轻旱从上游到下游呈现高、低、高的变化规律,频率介于 12%~19%之间。上、中游发生中旱的频率较高,介于 7%~11%之间。重旱和特旱的发生率分别为 4%~9%和 0%~3%。

2.5 基于云模型的干旱时空分布

2.5.1 时间分布特征

在云模型中,期望是指 SPEI 序列的平均值,其数值越小,说明干旱程度越严重。熵则表示 SPEI 相对均值的离散程度,其数值越大,表示干旱波动性越大,干旱程度的不均匀性越强。超熵用于衡量熵的离散程度,反映了干旱程度的不确定性。当超熵的值较大时,说明干旱程度的不均匀性越不稳定。朱丽等^[36]在研究洮河流域气候变化和干旱演变过程中得出:1979—2020 年洮河流域大多数年份无旱,仅个别年份出现干旱,且程度较轻,下游地区干旱相对较重。在此基础上,本文进一步选取了 6 个站点 1976—2020 年的 SPEI 值作为样本进行时间分布分析,并使用 MBCT-SR 算法计算云模型的特征值,结果见图 9。1976—2020 年的干旱程度增长速率以 0.003/a 的速度下降,说明洮河流域的干旱程度在增大。1976—2020 年熵呈上升趋势,表明站点间干旱程度差异变大。其中 1976 年值最大为 0.378,表明当年各站点间干旱程度差异大,2006 年值最小为 0.51,表明当年各站点间干旱程度差异最小。由图 9 可见,干旱程度在各站点间呈现逐渐稳定的趋

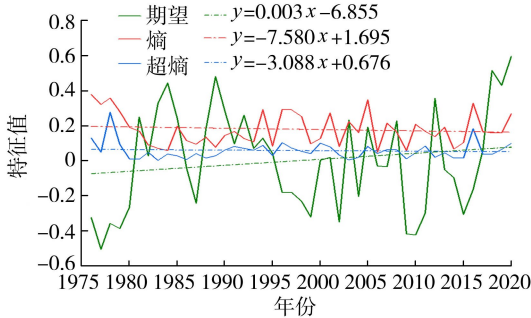


图 9 年尺度时间分布云模型特征值

势,但其不均匀性依然存在。其中,1978 年出现了最大值 0.278,离散程度最不稳定;而 1983 年的超熵值为 0.004,显示出离散程度最稳定。此外,随着年际变化,各站点的熵和超熵值有所减小,表明各站点间的干旱程度差异逐渐减小,但总体干旱程度却呈逐渐上升的趋势。

2.5.2 空间分布特征

以每个站点 1976—2020 年的 SPEI 值作为空间分布样本计算单个站点的云模型特征值,结果见表 3。除临洮外,各站点多年平均的期望值相似,多年平均干旱程度基本相当。在熵值空间分布上,碌曲和临洮的熵值分别为最大值和最小值,这表明碌曲 1976—2020 年的干旱程度相对多年平均干旱程度而言具有更大的年际间干旱波动程度,而临洮的干旱程度与多年平均干旱程度相比更为集中,年际间干旱波动程度较小。在超熵值的空间分布上,平均超熵值最小的站点为碌曲,表明该站点的空间分布不均匀程度较为稳定。而平均超熵值最大的为临洮,表明该站点在年际间空间分布不均程度稳定性较差。

表 3 年尺度各站点空间分布云模型特征值

站点	云模型参数		
	期望	熵	超熵
临潭	0.007	0.366	0.094
临洮	-0.020	0.304	0.117
碌曲	0.009	0.396	0.068
岷县	0.009	0.361	0.118
永靖	0.007	0.336	0.090
卓尼	0.005	0.355	0.107

云模型特征参数显示熵和超熵在空间上呈现相反分布特征,说明随着熵值的增大,超熵值减小,而期望越低的站点相对该站点多年平均干旱程度波动越大,说明其干旱程度的不均匀性越稳定。因此,本文选取碌曲和临洮两个站点作为典型进行空间分布分析,利用正向云算法绘制其云模型的隶属云图(图 10)。碌曲对论域有贡献的云滴集中在 $[-1.51, 1.53]$ 范围内。与碌曲的云模型隶属云图相比,临洮具有更大的随机性和离散程度,同时超熵值更小、云层厚度更大,云滴分布的范围更宽,表明临洮发生干旱的程度具有更大的波动性和离散度,但干旱程度不均匀性更稳定。因此,1976—2020 年临洮地区的干旱程度相对分散,但其干旱程度的不均匀性具有更强的稳定性。

2.5.3 SPEI 时空分布比较

由不同年代年尺度时间和空间分布云模型特征值可以发现,SPEI 的时间分布值均小于空间分布值,这意味着 SPEI 在时间分布上更集中,表现出的

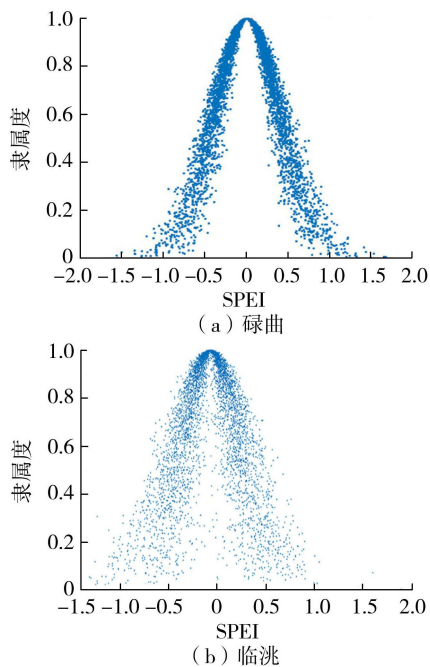


图 10 SPEI 典型站点云模型隶属云图

随机性更弱,不均匀性更为稳定。具体来看,1976—2020 年的多年观测中,空间分布的熵值和超熵值分别为 0.2980 和 0.0974,远远高于时间分布的云模型特征值。同时,结合时间与空间分布隶属云图(图 11)来看,空间分布的云滴分布较为分散,云层厚度较薄。这表明,年尺度 SPEI 的空间分布干湿状况较为分散,不均匀性的稳定性更差。但在总体时空分布上,SPEI 的期望值在 1976—1979 年呈上升趋势,表明该流域干旱化程度趋于减弱,而熵值和超熵值则逐渐降低,表明干旱化趋势稳定,干旱化程度波动较小。

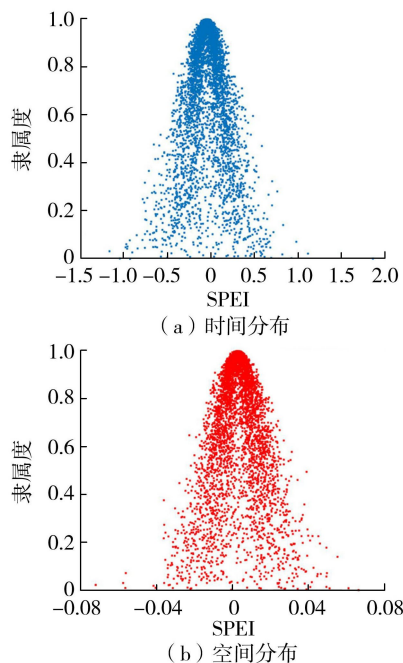


图 11 年尺度云模型时空分布隶属云图

3 结 论

a. 洮河流域在不同时间尺度上呈现出干旱化的趋势,大多以轻旱和中旱为主。在季尺度上,干旱经常发生在春季和冬季,并且春季、秋季和冬季干旱频率呈上升趋势。

b. 在空间上,SPEI 主要为轻旱和中旱。四季平均干旱频率分别为 33.33%、31.48%、32.96%和 32.59%,轻旱和中旱频率较高,重旱和特旱频率较低。与流域其他地区相比,中下游地区的干旱频率略高。

c. 在时间和空间分布上,SPEI 期望值在 1976—2020 年呈现持续上升趋势,说明洮河流域当前总体干旱化程度的减弱。此外,熵值和超熵值均呈逐渐减少的趋势,说明干旱程度波动幅度减小,干旱化趋势处于更加稳定的状态。

参考文献:

- [1] 王晨,黄馨,黄晓军.西北地区城市干旱脆弱性评价研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(1):114-121. (WANG Chen, HUANG Xin, HUANG Xiaojun. Assessment of urban drought vulnerability of Northwest China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2019,30(1):114-121. (in Chinese))
- [2] 李小涵,潘兴瑶,杨默远,等.基于多尺度 SPEI 指数的北京市干旱时空特征分析[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(11):50-63. (LI Xiaohan, PAN Xingyao, YANG Moyuan, et al. Spatial and temporal characteristics of drought in Beijing based on multiple scale SPEI index [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021,52(11):50-63. (in Chinese))
- [3] HE Hai, CAO Rui, WU Zhiyong, et al. Diagnosing anomalous characteristics of atmospheric water cycle structure during seasonal-scale drought events: a case study in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Water Science and Engineering,2022,15(2):103-113.
- [4] 石朋,唐汉,瞿思敏,等.西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征[J]. 水资源保护,2023,39(1):49-56. (SHI Peng, TANG Han, QU Simin, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):49-56. (in Chinese))
- [5] 薛联青,白青月,刘远洪.人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律[J]. 水资源保护, 2023,39(1):57-62. (XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):57-62. (in Chinese))

- [6] 李柏贞,周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34 (5): 1043-1052. (LI Bozhen, ZHOU Guangsheng. Advance in the study on drought index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (5): 1043-1052. (in Chinese))
- [7] 栗晓玲,梁晓萱,吴海江,等. 表征生态状况的综合干旱指数构建及干旱风险分析[J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 50-58. (SU Xiaoling, LIANG Xiaoxuan, WU Haijiang, et al. Construction of comprehensive drought index representing ecological condition and drought risk analysis[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 50-58. (in Chinese))
- [8] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (1): 1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (1): 1-9. (in Chinese))
- [9] LI Zeng, CHEN Taotao, WU Qi, et al. Application of penalized linear regression and ensemble methods for drought forecasting in Northeast China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2020, 132 (1): 113-130.
- [10] LIU Changhong, YANG Cuiping, YANG Qi, et al. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China [J]. Scientific Reports, 2021, 11 (1): 1280.
- [11] 李宝玉,朱晓萌,冯凯,等. 贵州省气象干旱特征时空演变规律及联合发生概率分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42 (6): 42-48. (LI Baoyu, ZHU Xiaomeng, FENG Kai, et al. Analysis on temporal and spatial evolution law and joint occurrence probability of meteorological drought characteristics in Guizhou Province [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42 (6): 42-48. (in Chinese))
- [12] 王林,陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析 [J]. 高原气象, 2014, 33 (2): 423-431. (WANG Lin, CHEN Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China [J]. Plateau Meteorology, 2014, 33 (2): 423-431. (in Chinese))
- [13] 门宝辉,蔡斌,田巍. 基于 SPEI 的潮白河流域气象干旱时空特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43 (2): 10-20. (MEN Baohui, CAI Bin, TIAN Wei. SPEI-based analysis of temporal and spatial characteristics of meteorological drought in the Chaobai River Basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43 (2): 10-20. (in Chinese))
- [14] 张勃,张耀宗,任培贵,等. 基于 SPEI 法的陇东地区近 50a 干旱化时空特征分析[J]. 地理科学, 2015, 35 (8): 999-1006. (ZHANG Bo, ZHANG Yaozong, REN Peigui, et al. Analysis of drought spatial-temporal characteristics based on SPEI in eastern region of Gansu in recent 50 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35 (8): 999-1006. (in Chinese))
- [15] 张敏,黄晓荣,任文辉. 基于 SPEI 指数的金沙江流域气象干旱时空特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2023 (1): 95-101. (ZHANG Min, HUANG Xiaorong, REN Wenhui. Spatial-temporal characteristics of meteorological drought in Jinsha River based on SPEI index [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023 (1): 95-101. (in Chinese))
- [16] 路金强,甘容,杨峰,等. 基于 SPEI 指数的河南省干旱特征及与环流指数的相关性分析[J]. 中国农村水利水电, 2022 (4): 17-24. (LU Jinqiang, GAN Rong, YANG Feng, et al. Drought characteristics and its correlation with circulation index in Henan Province based on SPEI index [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022 (4): 17-24. (in Chinese))
- [17] 谢坤,丁明军,张华敏,等. 基于 SPEI 指数的鄱阳湖流域近 60a 干旱时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30 (8): 2015-2027. (XIE Kun, DING Mingjun, ZHANG Huamin, et al. Spatiotemporal variation of drought in Poyang Lake Basin in recent sixty years based on SPEI [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30 (8): 2015-2027. (in Chinese))
- [18] 曹永强,李可欣,任博,等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (5): 28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (5): 28-36. (in Chinese))
- [19] 周凯,王义民. 基于 EOF 的渭河流域干旱时空分布特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48 (1): 146-154. (ZHOU Kai, WANG Yimin. Temporal and spatial distribution of drought in the Weihe River Basin based on EOF [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48 (1): 146-154. (in Chinese))
- [20] 刘静霞,蒙强,曹志翔,等. 基于云模型的西藏高原灌区参考作物蒸散量时间变化特征与影响因子研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40 (5): 135-144. (LIU Jingxia, MENG Qiang, CAO Zhixiang, et al. Using cloud model to analyze spatiotemporal variation of reference evapotranspiration and its determinants in tableland irrigation district in Tibet [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40 (5): 135-144. (in Chinese))
- [21] 殷长琛,齐广平,康燕霞. 基于云模型的甘肃省参考作

- 物蒸散量时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (8): 152-158. (YIN Changchen, QI Guangping, KANG Yanxia. Analysis on characteristics of temporal-spatial potential evapotranspiration distribution in Gansu based on cloud model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (8): 152-158. (in Chinese))
- [22] 程昌明,刘玉邦,向杰. 基于 Z 指数和云模型的川中丘陵陵区干旱分布研究[J]. 人民长江, 2015, 46(15): 1-5. (CHENG Changming, LIU Yubang, XIANG Jie. Analysis of distribution characteristic of drought in Sichuan hilly area based on drought index and cloud model[J]. Yangtze River, 2015, 46(15): 1-5. (in Chinese))
- [23] 龙贻东,梁川,景楠,等. 基于云模型和相对湿度指数的干旱时空分布特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34 (8): 67-71. (LONG Yidong, LIANG Chuan, JING Nan, et al. Analysis on characteristics of temporal-spatial drought distribution based on cloud model and relative moisture index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34 (8): 67-71. (in Chinese))
- [24] 张济世,康尔泗,蓝永超,等. 50a 来洮河流域降水径流变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25 (1): 77-82. (ZHANG Jishi, KANG Ersi, LAN Yongchao, et al. Trend analysis of the precipitation and runoff in the Taohe River Watershed during the past 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25 (1): 77-82. (in Chinese))
- [25] 王建兵. 近 40 年洮河流域干燥度变化趋势分析[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32 (5): 246-250. (WANG Jianbing. Trend analysis for the variety of arid index in Taohe River Basin in recent 40 years [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32 (5): 246-250. (in Chinese))
- [26] 李艺珍,岳春芳. 金沟河流域径流极值时间序列平稳性检验[J]. 水电能源科学, 2019, 37 (10): 21-24. (LI Yizhen, YUE Chunfang. Stability test of runoff extreme time series in Jingou River Basin [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(10): 21-24. (in Chinese))
- [27] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23 (7): 1696-1718.
- [28] 李峥嵘,彭涛,林青霞,等. 三峡水库影响下长江中下游水文干旱演变及对气象干旱的响应[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1683-1696. (LI Zhengrong, PENG Tao, LIN Qingxia, et al. Hydrological drought evolution and its response to meteorological drought in the Middle-Lower reach of the Yangtze River triggered by Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (5): 1683-1696. (in Chinese))
- [29] 周丹,张勃,沈彦俊. 潜在蒸散量估算方法对干旱侦测指数计算的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 258-267. (ZHOU Dan, ZHANG Bo, SHEN Yanjun. Effect of potential evapotranspiration estimation method on reconnaissance drought index (RDI) calculation [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35 (3): 258-267. (in Chinese))
- [30] WEI Jia, WANG Weiguang, HUANG Yin, et al. Drought variability and its connection with large-scale atmospheric circulations in Haihe River Basin [J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(1): 1-16.
- [31] 尹世燕,毛方杰,周国模,等. 中国亚热带干旱多尺度时空格局及演变趋势[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 242-253. (YIN Shiyen, MAO Fangjie, ZHOU Guomo, et al. Multi-scalar spatiotemporal pattern and evolution trend of drought in subtropical China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29 (6): 242-253. (in Chinese))
- [32] 曹博,张勃,马彬,等. 基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38 (17): 6258-6267. (CAO Bo, ZHANG Bo, MA Bin, et al. Spatial and temporal characteristics analysis of drought based on SPEI in the Middle and Lower Yangtze Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (17): 6258-6267. (in Chinese))
- [33] 李庆,董庆宽,赵蕾. 云模型中正向云算法的修正[J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40 (5): 169-174. (LI Qing, DONG Qingkuan, ZHAO Lei. Modified forward cloud generator in the cloud model [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(5): 169-174. (in Chinese))
- [34] 杨洁,王国胤,刘群,等. 正态云模型研究回顾与展望[J]. 计算机学报, 2018, 41(3): 724-744. (YANG Jie, WANG Guoyin, LIU Qun, et al. Retrospect and prospect of research of normal cloud model [J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(3): 724-744. (in Chinese))
- [35] 翟盘茂,邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18. (ZHAI Panmao, ZOU Xukai. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951-2003 [J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(1): 16-18. (in Chinese))
- [36] 朱丽,刘蓉,文军,等. 近 50a 来洮河流域气候变化和干旱演变过程[J]. 干旱气象, 2018, 36 (2): 234-242. (ZHU Li, LIU Rong, WEN Jun, et al. Climate change and drought evolution in the Tao River Basin in the past 50 years [J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(2): 234-242. (in Chinese))

(收稿日期: 2023 - 10 - 25 编辑: 俞云利)