

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.033

# 基于 SPI 和云模型的海河平原区干旱特征研究

张旭东<sup>1</sup> 石瑞强<sup>1</sup> 吴迪<sup>2</sup> 付玉娟<sup>1</sup> 石超强<sup>3</sup> 孙仕军<sup>1</sup>

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054;

3. 吕梁市水文水资源勘测站, 吕梁 033000)

**摘要:** 根据海河平原 20 个气象站 1955—2019 年逐日降水量计算了年尺度和季尺度的标准化降水指数(SPI), 对各尺度不同等级的干旱频率及其时空特征进行分析; 以年尺度 SPI 为样本, 采用正态云发生器算法和多步还原逆向云变换算法构建云模型, 分析了干旱的随机性和稳定性。结果表明, 海河平原区干旱频率主要分布区间为 [0.28, 0.31], 呈现轻旱高频、重旱低频的特点; 春旱发生频率最高, 冬旱频率最小, 夏季地区间及年际间差异最大。年际间 SPI 云模型的 3 个特征参数均呈减小趋势, 其中熵呈显著减小趋势, 且超熵与熵呈显著正相关, 即 SPI 分布的随机性和不均匀性变化趋势一致; 空间上各站点超熵和熵则呈极显著负相关, 随机性和不均匀性呈相反趋势; 云特征的年际差异大于站点间差异, 即云模型能够更好地反映区域年际间 SPI 在空间上的随机性和稳定性。海河平原整体上有趋于干旱的趋势, 各站点 SPI 的随机性显著减小, 且变化趋于稳定。

**关键词:** 海河平原; 干旱特征; SPI; 云模型

中图分类号: P49; S166

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)07-0313-09

OSID:



## Drought Characteristics of Haihe Plain Based on SPI and Cloud Model

ZHANG Xudong<sup>1</sup> SHI Ruiqiang<sup>1</sup> WU Di<sup>2</sup> FU Yujuan<sup>1</sup> SHI Chaoqiang<sup>3</sup> SUN Shijun<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China

3. Hydrology and Water Resources Survey Station of Luliang, Luliang 033000, China)

**Abstract:** According to the daily precipitation of 20 meteorological stations in Haihe Plain from 1955 to 2019, the standardized precipitation index (SPI) on annual scale and seasonal scale was calculated, and the drought frequency and spatial and temporal characteristics of different levels on each scale were analyzed. Taking annual scale SPI as the sample, the normal cloud generator algorithm and the multi-step restoring reverse cloud transformation algorithm were used to construct the cloud model to analyze the randomness and stability of drought. The results showed that the drought frequency in Haihe Plain was mainly between 0.28 and 0.31, with the characteristics of high frequency of light drought and low frequency of heavy drought. The frequency of spring drought was the highest and winter drought was the lowest. The differences between regions and between years were the greatest in summer. The three characteristic parameters of the interannual SPI cloud model were all showed decreasing trends, in which the entropy significantly was decreased and the superentropy was significantly and positively correlated with the entropy, that was, the randomness and inhomogeneity of the SPI distribution showed a consistent trend. In space, the superentropy and entropy of each station showed a very significant negative correlation, the randomness and inhomogeneity showed an opposite trend. The inter-annual differences of cloud characteristics were greater than the inter-site differences, that was, the cloud model can better reflect the randomness and stability of regional inter-annual SPI in space. Haihe Plain tended to be drier in general, and the randomness of SPI of each station was decreased significantly and tended to be stable and uniform.

**Key words:** Haihe Plain; drought characteristics; SPI; cloud model

收稿日期: 2020-09-08 修回日期: 2020-10-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405805-03)和国家自然科学基金项目(51609137)

作者简介: 张旭东(1979—),男,讲师,博士,主要从事节水灌溉与水资源高效利用研究, E-mail: zxxddd@syau.edu.cn

通信作者: 付玉娟(1980—),女,讲师,博士,主要从事水资源高效利用研究, E-mail: fyj0249@syau.edu.cn

## 0 引言

干旱是造成我国经济社会、农业生产损失最大的自然灾害之一。据统计,我国年均受旱面积约  $2.16 \times 10^7 \text{ km}^2$ ,干旱受灾面积占各种气象灾害面积的60%,每年因旱灾损失粮食约  $1.0 \times 10^{10} \text{ kg}$  [1-2]。由于干旱成因复杂、影响因素众多,因此干旱指数(指标)的选取多样。近年来,国内外学者提出通过一系列干旱指数对干旱程度进行评估,常用的干旱指数有降水量距平百分率(Precipitation anomaly, Pa)、标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)、降水Z指数、相对湿润度指数(Moisture index, MI)等。SPI是由MCKEE等[3]提出的一种气象干旱指标,该方法所需降雨资料易获取、计算简单,被国内外学者广泛应用于不同区域干旱事件分析[4-5]、适宜性评价[6]、干旱影响[7]、干旱风险[8-9]及干旱的时空变化特征[9-17]等研究中。

各站点不同年份的SPI是典型的随机变量,而云模型则可对随机变量的不确定性和稳定性进行评价。云模型是李德毅等[18-19]基于人为定义概念的不确定性(随机性和模糊性)提出的一种模型,即通过期望(Expected value, Ex)、熵(Entropy, En)、超熵(Hyper entropy, He)3个数字特征来定量描述一个不确定性概念的内涵。目前,云模型在随机变量的时空分布特征研究中得到广泛应用。殷长琛等[20]利用云模型分析了甘肃省参考作物蒸发蒸腾量的时空分布特征;程昌明等[21]使用Z指数与云模型相结合,对川中丘陵22个气象站60年的干旱特征进行了分析;龙贻东等[22]使用相对湿润度指数与云模型相结合,对川中丘陵8个气象站51年的干旱特征进行了分析;金菊良等[23]使用降水量距平百分率与云模型相结合,对安徽省14个气象站51年的干旱特征进行了分析。云模型特征值的空间特征分析,特别是干旱时空分布特征研究应用表明,该方法是研究干旱发生时空均匀性和稳定性的一种有效方法。

海河平原降水季节差异明显、年际变化较大,旱涝灾害问题突出。本文通过计算年、季尺度的SPI分析海河平原干旱的变化特征,并利用云模型对干旱强度的离散程度和稳定性的时空特征进行分析,为研究海河平原干旱发生规律、制定防灾减灾应急预案及有效应对干旱灾害风险提供决策依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

海河平原位于华北平原北部,南界黄河,北至燕山,西邻太行山,东濒渤海,是华北地区的主要农业

区,也是京津冀所在地区,地理位置十分重要,包括北京、天津、河北、山东、河南等省(直辖市),面积约  $12.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。地理位置介于  $112^\circ 30' \sim 119^\circ 30' \text{ E}$ ,  $34^\circ 46' \sim 40^\circ 25' \text{ N}$ 。海拔由石家庄市的100 m左右到渤海沿岸的3 m左右。海河平原属暖温带湿润或半湿润气候,春季干旱少雨,蒸发强烈,夏季高温多雨,冬季干燥寒冷,易引发干旱。多年平均降水量为560 mm,年降水量由南向北逐渐递减。降水量年内分配不均,5—10月降水量较多,占全年降水量的80%以上。

### 1.2 数据来源

本文的基础数据为海河平原20个基础气象站1955—2019年共65年的逐日降水数据,来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。日降水数据经一致性检验和缺失数据插补延长后作为SPI的计算依据。研究区范围及20个基础气象站的分布如图1所示。

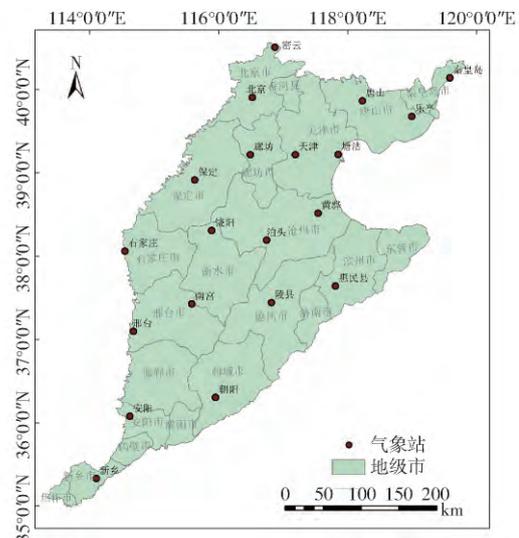


图1 海河平原位置和气象站点分布

Fig. 1 Location of Haihe Plain and distribution of weather stations

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 标准化降水指数和干旱等级

标准化降水指数(SPI)适合对不同时间尺度的干旱进行研究,其主要步骤是先将所研究时段内降水量进行统计,得到Γ概率分布,然后进行正态标准化[24],计算公式为

$$SPI = s \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \quad (1)$$

其中  $t = \sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}}$

式中  $x$ ——时段内降水量, mm

$G(x)$ ——对应  $x$  的累计概率

$s$ ——概率密度正负系数,当  $G(x) > 0.5$  时,  
 $s = 1$ , 当  $G(x) \leq 0.5$  时  $s = -1$

其中  $c_0 = 2.515\ 517$ ,  $c_1 = 0.802\ 853$ ,  $c_2 = 0.010\ 328$ ,  
 $d_1 = 1.432\ 788$ ,  $d_2 = 0.189\ 269$ ,  $d_3 = 0.001\ 308$ 。

根据文献 [24] 的规定, SPI 对应 5 个等级, 见表 1。

表 1 SPI 指数干旱等级划分

Tab. 1 Drought classification divided by SPI

干旱指数	干旱等级				
	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
SPI	(-0.5, +∞)	(-1.0, -0.5]	(-1.5, -1.0]	(-2.0, -1.5]	(-∞, -2.0]

海河平原为典型的季风气候区,为了分析不同季节的干旱特点,根据海河平原的实际情况进行了四季划分:3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月—次年 2 月为冬季,分别计算各季节的 SPI。

### 1.3.2 干旱频率和干旱面积

干旱频率是指某站点某种干旱等级发生的频繁程度,计算公式为

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

式中  $p_i$ ——干旱频率

$N$ ——计算总年数,取 65

$n_i$ ——海河平原 20 个气象站无旱、轻旱、中旱、重旱和特旱 5 种干旱等级发生的年数

本文计算了海河平原 20 个气象站 65 年不同时间尺度的 SPI,并计算了不同等级干旱发生的频率。

单站各级干旱频率确定后,采用反距离加权法 (Inverse distance weighted, IDW) 对干旱频率进行空间插值,得到不同时间尺度的干旱频率空间分布栅格图,然后统计对应频率的干旱面积。对同等级干旱频率区间进行等间距的 5 等分处理,取其中栅格数目较多的前 3 部分作为主要干旱频率,并统计其对应的面积比例。

### 1.3.3 云发生器算法

云模型是云理论的具体实现方法,是云的运算、推理和控制的基础。云模型包括正态云发生器算法和逆向云发生器算法,正态云发生器算法是从概念的内涵向其外延进行转化;而逆向云发生器算法是从概念的外延向其内涵进行转化。

逆向云发生器算法的作用是从一些给定的云滴中,求出正向云发生器的 3 个特征值  $E_x$ 、 $E_n$  和  $H_e$  [25]。在使用逆向云发生器算法时  $H_e$  有可能为虚数,因此许昌林等 [25] 进一步提出了多步还原逆向

云变换算法,对逆向云变换算法的  $H_e$  和  $E_n$  计算步骤进行了完善,在中间计算时增加了多次对原始样本的随机抽样分组。正态云发生器算法能够进行定性定量的不确定性转换,该算法通过输入云的 3 个数字特征即  $E_x$ 、 $E_n$ 、 $H_e$ ,以及云滴数  $n$  (本文取  $n = 1000$ ) 从而输出每个云滴的定量值及其确定度,根据得出的云滴绘制隶属云图进行直观分析 [26]。云模型的具体计算步骤及其公式见文献 [25 - 26]。本文计算过程中,随机取 20 组样本,每组 4 个。该过程循环到 1000 次时,其计算结果的中位数达到稳定,取其作为最终的  $H_e$  和  $E_n$ 。

本文利用云模型对海河平原的 SPI 指数进行分析,明确该区域干旱发生的均匀性及稳定性。其中:  $E_x$  反映的是云模型图中云滴的重心,其值是 SPI 样本的期望。 $E_x$  越小,表明该地区干旱程度越强。 $E_n$  是 SPI 相对平均偏差的可能取值范围,是定性概念模糊性和随机性的体现,反映离散程度 [19]。 $E_n$  越大,表示某定性概念的模糊性及随机性越大,确定性越难以度量,即云滴分布越不均匀,干旱强度越不均匀,即干旱在该维度上分布越分散。 $H_e$  是熵不确定性的度量,即熵的熵 [19],是干旱指数 SPI 偏离中心值  $E_x$  的程度,反映了不确定度的凝聚性和隶属度的稳定程度。 $H_e$  越大,云厚度越大,表示干旱越不稳定。本文采用多步还原逆向云变换算法对海河平原 20 个气象站年尺度 SPI 的云模型特征参数进行量化,分别分析不同年各站点间云特征参数的相关性,按照参数差异较大的原则选取 3 个典型年和典型站点分析海河平原干旱的随机性和稳定性规律。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱概率分布特征分析

#### 2.1.1 年尺度干旱特征

利用 1955—2019 年各站点降水资料,根据式 (1) 计算各站点每年的 SPI; 根据式 (2) 计算不同等级干旱发生的频率,分析干旱频率区间。在 ArcGIS 软件中对干旱频率使用反距离加权法进行空间插值,得到各等级干旱频率的空间分布如图 2 所示,并利用前述方法分析不同等级干旱的主要频率及所占面积比例。

从干旱频率的空间分布特征来看,干旱发生的高频率区主要在海河平原的中北部和南部区域,轻旱的高频率地区与干旱的高频率地区基本一致;中旱在西北部地区发生的频率较高,东南大部分地区较低;重旱在东半部发生频率较高;特旱频率空间分布差异不明显。不同干旱等级在空间分布上,重旱和中旱的高频率地区呈现互补关系,重旱和

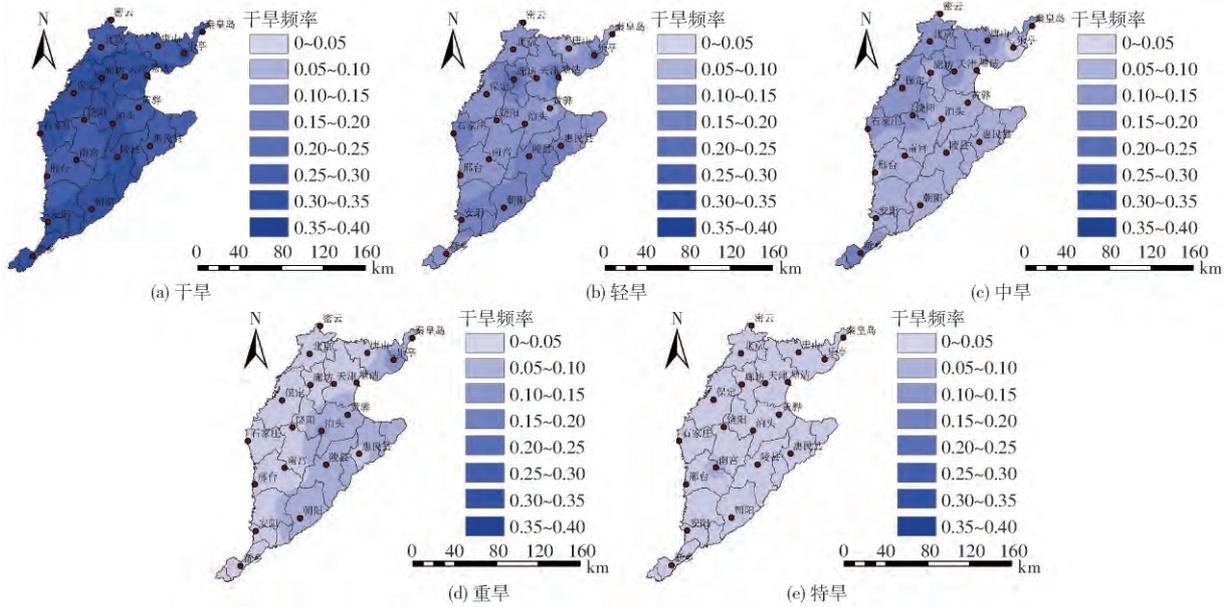


图2 年尺度下各类干旱频率空间分布

Fig.2 Spatial distribution maps of drought frequency on annual scale

中旱两者共同的高频率地区和轻旱的高频率地区基本一致。

对各站点来说,廊坊站的干旱频率最大为0.38,而黄骅站、南宫站和邢台站较小,其中南宫站最小,为0.25。从区域来看,主要干旱频率分布的区间为[0.28,0.31],占研究区总面积的63.32%,且干旱频率从西北向东南逐渐减小。分析不同等级干旱频率的分布面积发现,轻旱主要频率区间为[0.11,0.16],占总面积的77.00%;中旱主要频率为[0.05,0.13],占总面积的87.77%;重旱频率主要集中在[0.01,0.07],占总面积的92.90%;特旱频率主要集中在[0,0.04],占总面积的95.11%。研究区内各级干旱频率由

大到小依次为轻旱、中旱、重旱、特旱,各自对应的频率区间为:轻旱[0.08,0.26]、中旱[0.02,0.16]、重旱[0.02,0.13]、特旱[0,0.07]。由此可知,海河平原整体呈现轻旱高发、重旱低发的特点。随着干旱等级的增加,干旱频率大幅减小;干旱程度越严重,其频率越小,但严重干旱一旦发生,涉及的面却比较大。从轻旱、中旱、重旱到特旱,各站点最大干旱频率和最小干旱频率之间的波动范围越来越小,地区间差异随之减小。

2.1.2 不同季节干旱特征

干旱受季风气候影响明显,为分析海河平原不同季节的干旱频率特征,分别计算各站点不同季节各等级干旱的频率区间及均值,结果见表2。

表2 各气象站四季的各级干旱频率区间及均值

Tab.2 Frequency intervals and averages of drought at all levels of meteorological stations in four seasons

参数	季节	干旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
频率区间	春	[0.26, 0.38]	[0.08, 0.23]	[0.05, 0.14]	[0, 0.08]	[0, 0.03]
	夏	[0.19, 0.40]	[0.02, 0.22]	[0.06, 0.14]	[0, 0.10]	[0, 0.07]
	秋	[0.18, 0.35]	[0.06, 0.25]	[0.03, 0.13]	[0, 0.09]	[0, 0.05]
	冬	[0.16, 0.33]	[0.05, 0.18]	[0.03, 0.15]	[0, 0.11]	[0, 0.05]
频率均值	春	0.3146	0.1573	0.0937	0.0462	0.0196
	夏	0.3065	0.1408	0.0956	0.0457	0.0245
	秋	0.2893	0.1416	0.0817	0.0384	0.0276
	冬	0.2653	0.1126	0.0866	0.0430	0.0231

由表2可知,春季干旱频率区间的下限值和均值都最大,即研究区春旱容易发生,但以轻旱为主,重旱和特旱的频率小于其他季节。夏季干旱频率上限值最大,其区间范围也最宽,且特旱频率高于其他季节,这与夏季气候多变,降雨量年际间差异大有直

接关系。秋季和冬季干旱频率区间和频率均值依次减小。由此可以得出各个季节的干旱频率由大到小依次为春、夏、秋、冬。

利用研究区20个气象站四季SPI计算得到的干旱频率,采用反距离权重法得到不同季节的干

旱频率的空间分布,如图 3 所示。由图可知,各季节干旱的空间分布呈现不同的特征,其中春旱频率呈现中部高而南北相对较低的特点,天津站周边和海河平原南部频率较小,最大干旱频率发生在夏季的惠民县、陵县和泊头 3 个站点。夏旱频率区间范围明显增大,西北部 and 东部惠民县站周

边频率较高,其中惠民县站的干旱频率是研究区 4 个季节中最大的,达到了 0.40。秋季干旱发生频率表现为南部严重,北部次之,中部最轻的特点。冬季大部分地区干旱频率差异较小,最北部和中部部分地区相对严重,天津、泊头、廊坊和朝阳冬旱频率较低。

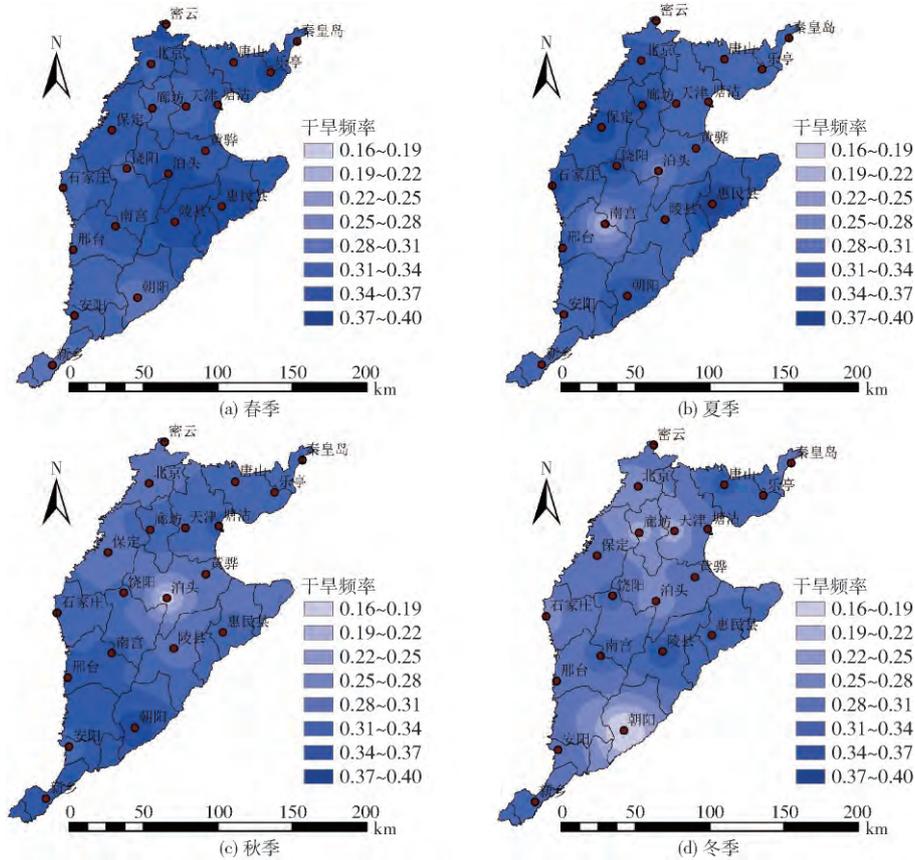


图 3 季节干旱频率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution maps of drought frequency in seasons

2.2 SPI 的云特性分析

以 20 个站点每年的年尺度 SPI 为样本,根据多步还原逆向云变换算法计算年 SPI 的云模型数字特征值,绘制 65 年间  $Ex$ 、 $En$  和  $He$  的变化过程线并进行趋势分析,如图 4 所示。

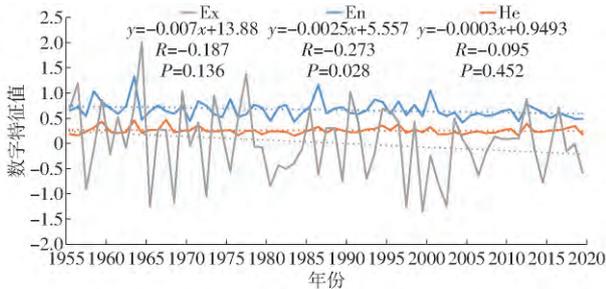


图 4 1955—2019 年 SPI 云特征值及其变化趋势

Fig. 4 SPI cloud eigenvalues and their variation trend in different stations from 1955 to 2019

图 4 中各年  $Ex$  的变幅比较大,这与水文年的丰枯变化直接相关, $En$  的变幅次之, $He$  的变幅最小。

图中 3 个特征值都存在减小趋势,其中  $En$  的减小达到 0.05 的显著水平 ( $R_{64(0.05)} = 0.242 < 0.273, P = 0.028$ )。因此从年际间的变化来看,研究区总体趋于干旱,各站点 SPI 的差异有显著减小的趋势,即各站点 SPI 的随机性有显著降低趋势,稳定性随之增强。

65 年中各气象站 3 个特征值之间的相关性如图 5 所示。图中  $Ex$  和  $En$  呈正线性相关关系但不显著,而  $He$  和  $En$  则呈现极显著的正线性相关关系 ( $R_{64(0.05)} = 0.242 < 0.5965, P = 1.57 \times 10^{-7}$ ),说明随着不同年份各站点 SPI 期望的增加,对应的随机性和不稳定性随之增加。即干旱年的 SPI 确定性和稳定性较强,而湿润年份的确定性和稳定性较差,且随机性和离散性越强的年份其均匀性越差。

以每个站点 65 年的 SPI 作为样本计算单站点云模型特征值,采用 IDW 进行空间插值,得到云模型特征值的空间分布,如图 6 所示。

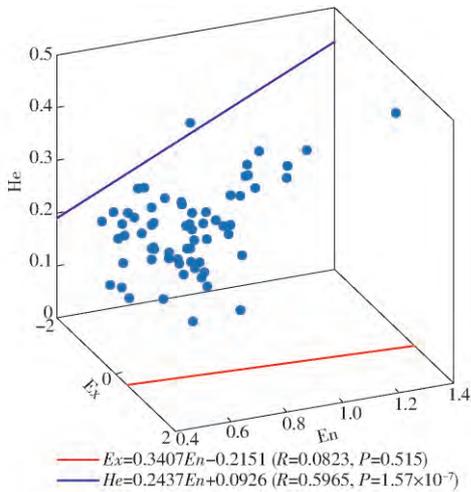


图5 海河平原各年云特征值相关性

Fig. 5 Correlations of cloud eigenvalues in different years in Haihe Plain

由图6可知,各站点SPI期望在空间上表现为西部小于东部,北部小于南部,西北区域平均干旱程度最高,其中北京和廊坊两站最为严重,而中部的南宫站和泊头站SPI期望最大,即干旱程度最低。图中朝阳站的En最大,说明朝阳站SPI年际分布的随机性最强,确定性最弱;邢台、黄骅两站的En较小,即其SPI的确定性较强。He空间分布中,邢台站He最大,说明该站SPI年际间的均匀性最差;而朝阳站最小,则说明其SPI在年际间最为均匀。对比3个特征值的空间分布可知,Ex和En的空间分布趋势有一定的一致性,而En和He的空间分布则呈现相反的趋势。综上,海河平原各年SPI期望表现出西北部最低,向东向南都有增加的趋势;且期望越高站点的SPI年际间分布越不确定,但越均匀。

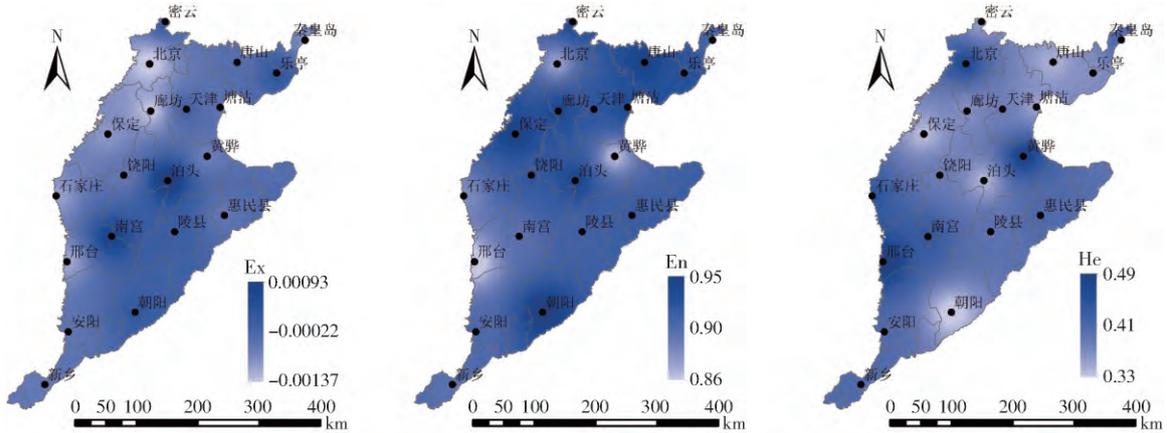


图6 各站点SPI云特征值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of SPI cloud eigenvalues of each station

20个站点3个特征值之间的关系见图7。图中Ex和En呈现0.1水平的正线性相关( $R_{19(0.1)} = 0.369 < 0.4071, P = 0.0748$ ),但是He和En却呈现0.01水平的显著负相关( $R_{19(0.01)} = 0.549 < 0.9840, P = 6.19 \times 10^{-15}$ )。由此可以得出干旱程度越高的站点各年间干旱的确定性越强,均匀性却越低。以北京站为例,该站SPI的Ex较小,说明常年平均意义下干旱程度较高;对应的En较小,说明干旱的确定性较强,随机性减弱,SPI的变化范围较窄;但He却较大,说明其年际间干旱强度的不均匀程度高。这与图6分析得出的规律一致。

选取熵En和超熵He差异较大的年份(1963、1975、1983年)作为典型年,利用正态云发生器绘制SPI云图,见图8a~8c。其中图8a的特征值在3个图中都最大,图中云滴的分布较为散乱,这是因为在1963年20个站点降水量均值较大,为700.4mm,同时各站间的SPI差异也大,最大达到3.46,最小为-1.46,因此站点之间干旱分布的随机性和离散性

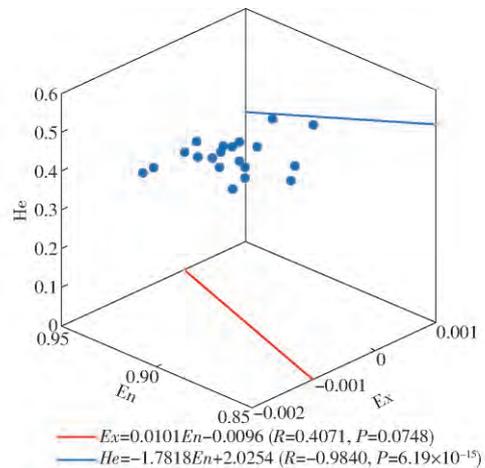


图7 各站点SPI云特征值相关性

Fig. 7 Correlations of SPI cloud eigenvalues of each station

最大,稳定性也差。而1983年平均降水量为482.2mm,SPI的区间为[-1.27,0.39],是整体干旱的年份,云层薄,云滴分布非常凝聚,SPI在各站点之间分布的确定性和稳定性最好。1975年平均降水量为468.0mm,比1983年更少,但SPI的区间

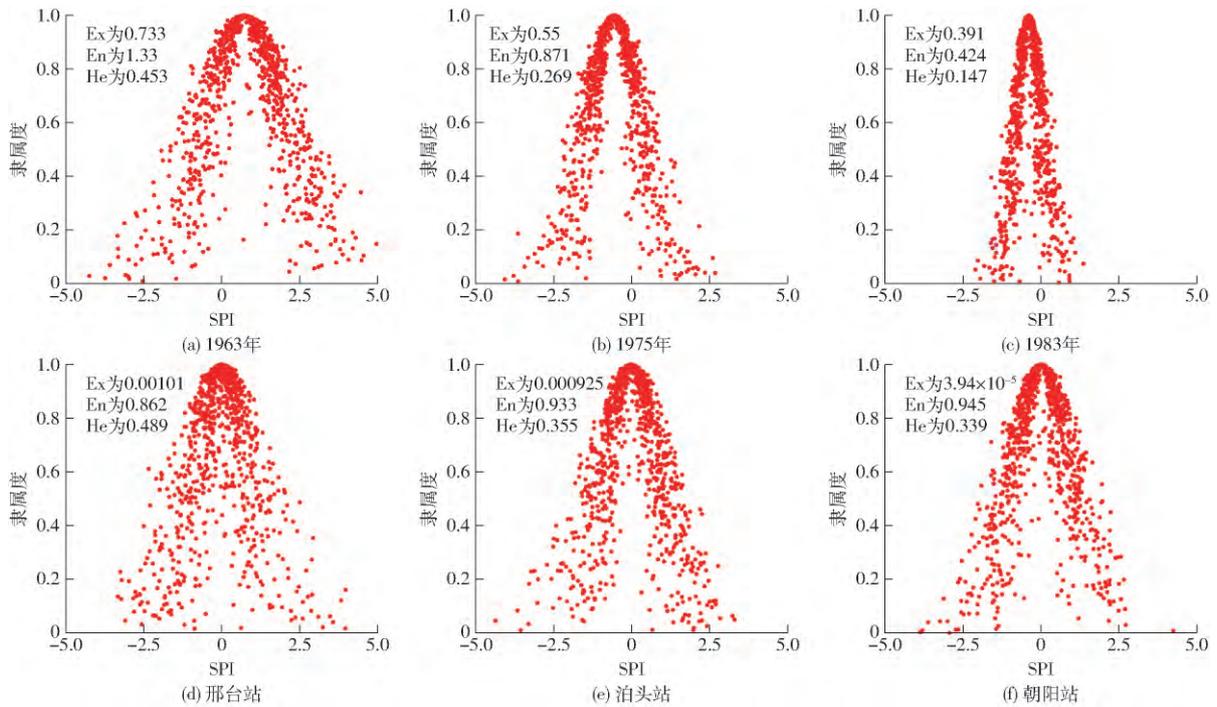


图 8 典型 SPI 隶属度云图

Fig. 8 Typical SPI membership clouds

为  $[-2.17, 0.77]$ , 因此 SPI 云图云滴的分布范围和凝聚性则居中。

采用同样方法选取邢台、泊头和朝阳 3 个典型站绘制各站点不同年份 SPI 的云图(图 8d ~ 8f)。3 个典型站的 SPI 隶属度云图区别相对较小, 是因为云模型的 3 个参数差别不大, 各站的 Ex 均接近于 0, En 和 He 相对都较大。3 个典型站点中, 邢台站的 En 最小, 因此云滴分布范围最窄, He 最大即云滴凝聚性最差, 说明 SPI 的随机性和离散性强, 稳定性差。朝阳站 SPI 的 En 最大而 He 最小, SPI 分布的随机性和离散性较大, 但稳定性是 3 个典型站中最高的。

对比典型年和典型站云模型的特征值发现, 典型年特征值的变化范围大于典型站。通过云滴的分布也可以看出, 不论是云图中心位置、分布范围还是凝聚性, 典型年间的变化幅度较大, 而典型站间却较小; 典型站中云图中的“云滴”更为离散, 稳定性和均匀性更差。分析其原因, 这主要是因为不同年份降水量差异较大, 而海河平原同一年各站点降水量差异相对较小; 同时也可能与 SPI 是由同一站点的年降水序列计算出的相对值, 在计算过程中损失了一些原始数据的随机性和稳定性信息有关。

### 3 讨论

海河平原是华北平原的一部分, 是华北地区主要农业区, 也是我国近年来缺水最严重的区域。诸多学者对海河流域的干旱进行了研究, 其中范倩倩

等<sup>[27]</sup>根据海河流域月降水量、气温数据计算了标准化降水蒸发指数, 分析了海河流域干旱时空特征, 分析结果中海河流域各级干旱发生的频率稍低于本研究海河平原的干旱频率, 这与海河平原位于海河流域北部且其干旱程度更为严重的事实相符; 另外该研究中也表明各季节中海河流域春旱频率最高, 夏季次之, 这与本研究结论一致。宗燕等<sup>[28]</sup>利用 SPI 分析了海河流域干旱时空分布特征, 结果中不同程度干旱发生的概率范围与本研究得到的结论基本一致。严登华等<sup>[29]</sup>利用相对湿润度指数与模糊集对评价法相结合的方法, 明确了海河流域不同干旱等级发生面积及年际变化, 本研究仅分析了各级干旱发生主要概率区间及面积, 二者结论趋势相同。王文静等<sup>[30]</sup>使用综合气象干旱指数, 揭示了海河流域干旱的时空分布特征, 发现海河流域干旱程度呈现出高频低强度、低频高强度的空间分布特征, 这与本研究的分析结果一致, 但该研究指出流域内冬旱最为严重, 夏旱严重程度较低的结论与本研究有偏差。本文与已有研究的大部分结论一致, 个别存在差异性的原因可能在于所选用的干旱指标不同, 研究时段和研究区域也不完全重合。

本文利用云模型分析了海河平原 SPI 时间尺度和空间尺度的均匀性和稳定性, 并且进一步分析了 SPI 云模型特征值之间的相关性, 这是对前期干旱研究的深化和补充。在云模型的算法方面, 本文将多步还原逆向云变换算法中求 En 和 He 时取多次循环结果的平均值改进为中位数, 大大降低了计算

结果出现虚数的几率和量化结果的稳定性。由于SPI是由同一站点降水量进行标准化计算的相对值,因此将典型站的SPI云图与原始降水量的云图对比发现,各站点SPI隶属度云图差异小于降水量隶属度云图,这也印证了SPI的计算过程中损失了一些降水量的随机性和稳定性信息。

#### 4 结论

(1) 在年尺度上,海河平原干旱程度呈现西部高于东部、北部高于南部、西北区域最为严重的空间趋势。各站点中北京和廊坊两站最为严重,中部的南宫站和泊头站干旱程度最小。轻旱发生频率最高,随着干旱级别的增加,干旱频率明显降低,即轻

旱高频、重旱低频,且重旱发生后影响面积更大。在季节尺度上,春旱频率最高,夏季次之,但其频率区间最宽,地区间及年际间差异最大,冬季干旱发生最少。

(2) 以年尺度SPI为样本的云模型分析表明,65年来海河平原各站点整体趋于干旱,但不显著。各站点SPI随机性显著减小,且趋于稳定和均匀;干旱年份各站点SPI的确定性和稳定性较强,湿润年份的随机性和不稳定性较强。在空间上,干旱程度越高的站点年际间SPI的随机性越弱,但稳定性越强。另外,SPI云模型特征值的年际差异大于各站点间的差异,SPI年际间的随机性和不均匀程度更高。

#### 参 考 文 献

- [1] WILHITE D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In drought: a global assessment [M]. Abingdon: Routledge, 2000.
- [2] 赵映慧,郭晶鹏,毛克彪,等. 1949—2015年中国典型自然灾害及粮食灾损特征[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1261—1276. ZHAO Yinghui, GUO Jingpeng, MAO Kebiao, et al. Spatio-temporal distribution of typical natural disasters and grain disaster losses in China from 1949 to 2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1261—1276. (in Chinese)
- [3] MCKEE B, DOESKENN J, KLEIST J. Drought monitoring with multiple time scales [C] // 9th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, 1995: 233—236.
- [4] BUTTAFUOCO G, CALOIERO T, COSCARELLI R. Analyses of drought events in Calabria (Southern Italy) using standardized precipitation index [J]. Water Resources Management, 2015, 29(2): 557—573.
- [5] 张利利,周俊菊,张恒玮,等. 基于SPI的羊羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 996—1007. ZHANG Lili, ZHOU Junju, ZHANG Hengwei, et al. Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on standard precipitation index in Shiyang River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 996—1007. (in Chinese)
- [6] 王作亮,文军,李振朝,等. 典型干旱指数在黄河源区的适宜性评估[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 186—195. WANG Zuoliang, WEN Jun, LI Zhenchao, et al. Evaluation of suitability using typical drought index in source region of the Yellow River [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 186—195. (in Chinese)
- [7] 刘维,李祎君,何亮,等. 基于SPI判定的东北春玉米生长季干旱对产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 121—127. LIU Wei, LI Yijun, HE Liang, et al. Effect of growing season drought on spring maize yields in Northeast China based on standardized precipitation index [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 121—127. (in Chinese)
- [8] ROUSTA I, OLAFSSON H, MONIRUZZAMAN M, et al. The 2000—2017 drought risk assessment of the western and southwestern basins in Iran [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2020, 6(3): 1201—1221.
- [9] 冯波,章光新,李峰平. 松花江流域季节性气象干旱特征及风险区划研究[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 466—474. FENG Bo, ZHANG Guangxin, LI Fengping. Characteristics of seasonal meteorological drought and risk regionalization in Songhua River Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(3): 466—474. (in Chinese)
- [10] 吴霞,王培娟,公衍铎,等. 1961—2015年黄淮海平原夏玉米干旱识别及时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 189—199. WU Xia, WANG Peijuan, GONG Yanduo, et al. Analysis of drought identification and spatio-temporal characteristics for summer corn in Huang-Huai-Hai Plain in year of 1961—2015 [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 189—199. (in Chinese)
- [11] 于家瑞,艾萍,袁定波,等. 基于SPI的黑龙江省干旱时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1059—1068. YU Jiarui, AI Ping, YUAN Dingbo, et al. Spatiotemporal characteristics of drought in Heilongjiang Province based on standardized precipitation index [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 1059—1068. (in Chinese)
- [12] 王江涛. 基于华北地区气象指数SPI干旱时空分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 203—207. WANG Jiangtao. Analysis on spatiotemporal pattern of SPI drought based on meteorological index in North China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 203—207. (in Chinese)
- [13] 林慧,王景才,黄金柏,等. 基于SPI和SPEI的淮河中上游流域气象干旱时空分布特征对比研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 59—67. LIN Hui, WANG Jingcai, HUANG Jinbai, et al. Comparative study on spatial and temporal distribution characteristics of meteorological drought in the upper and middle reaches of Huai River Basin based on SPI and SPEI [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(6): 59—67. (in Chinese)

- [14] 孙秋慧,徐国宾,马超,等. 基于SPI干旱指数的海口市干旱变化特征研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 58-65. SUN Qiuhui, XU Guobin, MA Chao, et al. Study on the characteristics of drought in Haikou City based on standardized precipitation index [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 58-65. (in Chinese)
- [15] 朱玲玲,张竟竟,李治国,等. 基于SPI的河南省冬小麦生育期干旱时空变化特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 51-58. ZHU Lingling, ZHANG Jingjing, LI Zhiguo, et al. Analysing spatiotemporal variation of the occurrence of drought within the growth season of winter wheat in Henan Province based on the standardized precipitation index [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 51-58. (in Chinese)
- [16] NARESH M, MURTHY C S, SESHU M V R, et al. On the use of standardized precipitation index (SPI) for drought intensity assessment [J]. Meteorological Applications, 2009, 16(3): 381-389.
- [17] 李玖颖,王欣亮,王忠波,等. 黑龙江省近50年大豆需水量与干旱时空分布特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 223-237. LI Jiuying, WANG Xinliang, WANG Zhongbo, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of soybean crop water requirement and drought in Heilongjiang Province in recent 50 years [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 223-237. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200825&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200825&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.025. (in Chinese)
- [18] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995(6): 15-20. LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Computer R & D, 1995(6): 15-20. (in Chinese)
- [19] 刘常昱,李德毅,杜鹤,等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005(2): 236-239. LIU Changyu, LI Deyi, DU Yi, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model [J]. Information and Control, 2005(2): 236-239. (in Chinese)
- [20] 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 mode [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 152-158. (in Chinese)
- [21] 程昌明,刘玉邦,向杰. 基于Z指数和云模型的川中丘陵区干旱分布研究[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)
- [22] 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)
- [23] 金菊良,李辉,李靖,等. 基于云模型的安徽省干旱时空分布特征分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(4): 1-5. JIN Juliang, LI Hui, LI Jing, et al. Analysis of characteristics of temporal-spatial drought distribution in Anhui Province based on cloud model [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(4): 1-5. (in Chinese)
- [24] GB/T 20481—2017 气象干旱等级[S]. 2017.
- [25] 许昌林,王国胤. 实现稳定双向认知映射的逆向云变换算法[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(7): 634-642. XU Changlin, WANG Guoyin. Backward cloud transformation algorithm for realizing stability bidirectional cognitive mapping [J]. PR & AI, 2013, 26(7): 634-642. (in Chinese)
- [26] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004(8): 28-34. LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science, 2004(8): 28-34. (in Chinese)
- [27] 范倩倩,赵安周,张安兵,等. 1965—2015年海河流域干旱时空变化特征分析[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(3): 507-517. FAN Qianqian, ZHAO Anzhou, ZHANG Anbing, et al. Characteristics of spatiotemporal variation of drought in the Haihe River Basin from 1965 to 2015 [J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(3): 507-517. (in Chinese)
- [28] 宗燕,王艳君,翟建青. 海河流域气象干旱时空特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 198-202. ZONG Yan, WANG Yanjun, ZHAI Jianqing. Spatial and temporal characteristics of meteorological drought in the Haihe River Basin based on standardized precipitation index [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(12): 198-202. (in Chinese)
- [29] 严登华,袁喆,杨志勇,等. 1961年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 34-41. YAN Denghua, YUAN Zhe, YANG Zhiyong, et al. Spatial and temporal changes in drought since 1961 in Haihe River Basin [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 34-41. (in Chinese)
- [30] 王文静,延军平,刘永林,等. 基于综合气象干旱指数的海河流域干旱特征分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 336-344. WANG Wenjing, YAN Junping, LIU Yonglin, et al. Characteristics of droughts in the Haihe Basin based on meteorological drought composite index [J]. Arid Land Geography, 2016, 39(2): 336-344. (in Chinese)