

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.019.

颜雅琼¹, 岳元², 唐舟¹, 唐雪娇¹, 沈伟¹, 王文清¹, 孟韩春¹, 姚海涛¹.

YAN Yaqiong, YUE Yuan, TANG Zhou, et al. Characteristics of Drought Evolution in the Huaihe River Basin Under the Background of Climate Change[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 336-344.

气候变化背景下淮河流域干旱演变特征

颜雅琼¹, 岳元², 唐舟¹, 唐雪娇¹, 沈伟¹, 王文清¹, 孟韩春¹, 姚海涛¹

(1.宿迁市气象局, 江苏 宿迁 223800; 2.吉林省气象台, 长春 130062)

摘要: [目的]淮河流域是我国主要的粮食生产基地,明晰流域内干旱演变特征及其极端性对科学开展旱灾防御治理具有重要作用。[方法]基于淮河流域 1971—2015 年降水数据,计算 3 个月时间尺度的标准化降水指数(SPI),结合反距离权重空间插值法、气候倾向率、游程理论对干旱时空演变特征及其特征变量进行了分析。[结果](1)四季中,春、秋季呈干旱化发展趋势,且秋季速率明显大于春季,夏、冬季呈湿润化趋势,夏季速率大于冬季。(2)全区各季平均干旱频率均在 30%左右。空间上,春季流域北部湿润化,南部干旱化;夏季流域北部干旱化,南部湿润化;秋季大部分地区气候倾向率为负值,正值区仅在江苏北部出现;冬季大部分地区呈湿润化趋势。(3)干旱特征变量中,干旱历时与干旱次数的空间分布特征相反;烈度峰值高值区与干旱历时、干旱烈度在流域东北部空间分布较为一致;流域东南部烈度峰值高值区较干旱历时和干旱烈度向东南部略有偏移。[结论]流域内秋季干旱化趋势明显,冬季呈湿润化发展,春夏季干旱演变存在地区差异,区域内干旱呈现极端化发展趋势。

关键词: 标准化降水指数 SPI; 淮河流域; 游程理论

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0336-09

Characteristics of Drought Evolution in the Huaihe River Basin Under the Background of Climate Change

YAN Yaqiong¹, YUE Yuan², TANG Zhou¹, TANG Xuejiao¹, SHEN Wei¹,

WANG Wenqing¹, MENG Hanchun¹, YAO Haitao¹

(1. Suqian Meteorological Bureau, Suqian, Jiangsu 223800, China;

2. Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun 130062, China)

Abstract: [Objective] The Huaihe River basin is a main grain production base in China. It is important to understand the characteristics and extremes of drought evolution in the basin for scientific drought prevention and control. [Methods] Based on the precipitation data of the Huaihe River Basin from 1971 to 2015, the standardized precipitation index (SPI) of 3-month time scale was calculated, and the spatial and temporal evolution characteristics of drought and its characteristic variables were analyzed by combining the inverse distance weight spatial interpolation method, climatic tendency rate and theory of run. [Results] (1) In different seasons, spring and autumn showed a trend of arid development, and the rate of autumn was significantly higher than that of spring. Summer and winter showed a trend of wetting, and the rate of summer was higher than that of winter. (2) The average frequency of drought in all seasons was about 30%. In terms of spatial distribution, the northern part of the basin was humidified and the southern part was arid in spring, the northern part of the basin was dry and the southern part was humidified in summer, the climatic tendency rate in autumn was negative in most areas, and the positive area only appeared in northern Jiangsu.

收稿日期: 2021-06-15

修回日期: 2021-08-12

资助项目: 江苏省气象局青年基金项目(KQ202016); 江苏省气象局青年基金项目(KQ202015); 江苏省气象局面上项目(KM202011); 江苏省气象局青年基金项目(KQ202330)

第一作者: 颜雅琼(1992—), 女, 江苏宿迁人, 硕士, 主要从事气候变化和生态环境气象方面研究。E-mail: 1309260193@qq.com

通信作者: 沈伟(1985—), 男, 江苏宿迁人, 硕士, 高工, 主要从事气候变化和生态环境气象方面研究。E-mail: 270113234@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

In winter most areas showed a trend of humidification. (3) Among the drought characteristic variables, the spatial distribution characteristics of drought duration and drought frequency were opposite, the spatial distribution of peak intensity was consistent with drought duration and drought intensity in the northeast of the basin, compared with the drought duration and drought intensity, the high value of the peak intensity in the southeastern part of the basin shifted slightly to the southeast. [Conclusion] There was an obvious trend of dryness in autumn and wetness in winter and regional differences in the evolution of drought in spring and summer, and drought showed an extreme development trend in Huaihe River basin.

Keywords: standardized precipitation index (SPI); Huaihe River Basin; theory of run

全球气候变暖背景下,区域干旱发生的频率和范围呈明显增加趋势^[1-2]。干旱是一种范围广、持续时间长、发生频率高且不易察觉的自然灾害,它的发生会给区域内的农业和社会经济发展带来巨大的挑战^[3-4]。近年来许多学者通过各种指数^[5-8]对干旱的分布特征、影响因素等进行分析,例如陶然等^[9]基于帕默尔干旱指数(PDSI)对中国干旱的时空变化进行分析发现我国干旱频次、历时和烈度呈上升趋势,且半湿润、半干旱区干旱形势越来越严峻。郭梦等^[10]基于 SPEI 指数对陕西省的干旱时空分布进行分析发现,陕西省呈干旱化发展,且干旱影响范围呈显著扩大化趋势。李雪纯等^[11]基于降水距平百分率研究安徽省的干旱时空分布发现安徽省秋旱发生频率最高、强度最大、范围最广。

对于干旱而言,长时间降水持续偏少是其发生的最主要原因^[12],标准化降水指数(SPI)基于长期降水序列,是用以表征某时段降水量出现概率多少的指标,具有计算简单的特点,可以有效表征不同时间尺度干旱的演变特征,广泛应用于干旱的监测评估中^[13-15]。淮河流域地处黄河以南、长江以北,地理位置和气候因素决定了该区域是我国重要的工农业生产基地,干旱频发会导致区域的工农业生产发展受到限制^[16]。近年来,许多学者对淮河流域的干旱状况进行了研究。夏敏等^[17]通过研究发现,在当前全球气候变暖大背景下,淮河流域总体呈干旱化趋势,且下半年的干旱情况较上半年更为严峻。姚蕊等^[18]通过对近年来淮河流域干旱重心转移轨迹的研究发现,干旱重心从淮河流域中心向四周扩散,且 2013 年以后随着干旱面积的增大,干旱重心由四周向中心移动。杨娜等^[19]通过对淮河流域气象干旱风险特征分析发现,河南、山东遭遇重旱的风险较高,安徽、江苏遭遇极旱的风险较高。

在以往对于淮河流域干旱的研究中,多数学者侧重于对干旱某一特征的研究,且在研究过程中干旱事件识别的精度较低^[20],因此,本文基于淮河流域 1971—2015 年逐日气象观测资料,分析季节时间尺度下近 45 年淮

河流域干旱的时空分布特征及其演变趋势,同时运用游程理论识别干旱事件并对干旱事件的干旱特征(干旱频率、干旱历时、干旱烈度等)进行具体分析,以期提高流域抗旱能力,推动区域农业和社会经济发展。

1 研究区概况

淮河流域位于 111°55′—121°25′E, 30°55′—36°36′N, 总面积 27 万 km², 主要包括安徽、河南、湖北、江苏及山东的部分区域(本文将山东省考虑在内)。淮河流域位于中国南北气候过渡带,区域内四季分明,属亚热带季风气候,冬春季干燥少雨,夏秋季闷热多雨,优越的地理和气候条件决定了淮河流域是我国重要的工农业基地。

2 数据和方法

2.1 数据资料来源

数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)提供的 1971—2015 年淮河流域各气象站逐日观测的降水资料,将其中位置变动较大的站点剔除,缺测数据以年平均替代,经过处理后的 68 个气象站数据具有较好的连续性。具体站点分布见图 1。

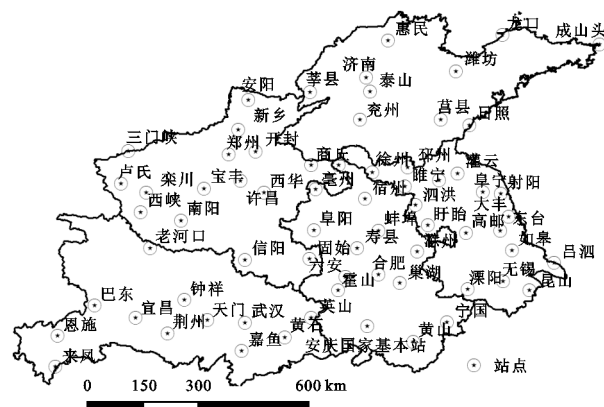


图1 淮河流域68个气象站分布

2.2 标准化降水指数(SPI)

McKee 等^[21]提出的标准化降水指数(SPI)是用来表征某时段降水量出现概率的指标,它可以对不同

时间尺度的干旱事件和干旱类型进行识别分析,因此广泛应用于气象、农业等各项研究。

标准化降水指数(SPI)的计算^[22],基于降水量数据的偏态分布,同时采用 Γ 概率分布函数来描述降水量的变化。SPI指数假设某时段降水量为随机变量 $x(\text{mm})$,则其概率密度函数为:

$$g_{(x)} = \frac{1}{\beta\gamma\Gamma_\gamma} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \quad (x>0) \quad (1)$$

式中: β 为尺度参数($\beta>0$); γ 为形状参数($\gamma>0$),通过极大似然估计法求解 β 和 γ ;

$$\begin{cases} \hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}}{4A} \\ \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\gamma}} \\ A = \lg \bar{x} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg x_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\hat{\beta}$ 和 $\hat{\gamma}$ 分别为 β 和 γ 的极大似然估计值; A 为中间变量; x_i 为降水量(mm); \bar{x} 为降水量的气候平均值(mm)。

表1 基于SPI的干旱等级划分

干旱等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
SPI值	$(-0.5, +\infty)$	$(-1.0, -0.5]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-2.0, -1.5]$	$(-\infty, -2.0]$

2.3 气候倾向率

气候倾向率^[23]表征的是气象要素的多年变化趋势,即气象要素随时间变化的一元线性方程拟合:

$$y_j = at_j + b \quad (7)$$

式中: y_j 表示气象要素拟合值; t_j 表示 y_j 对应的时间; a 为回归系数, $a \times 10$ 为气候倾向率,表示气象要素平均每10a的变化率。

2.4 Mann-kendall 趋势检验

M-K是一种非参数统计检验方法^[24],假设时间序列变量为 x_1, x_2, \dots, x_N , N 为时间序列的长度,则统计量 U 为:

$$U = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \text{sgn}(x_k - x_l) \quad (8)$$

其中,

$$\text{sgn}(x_k - x_l) = \begin{cases} +1 & (x_k > x_l) \\ 0 & (x_k = x_l) \\ -1 & (x_k < x_l) \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_l, x_k 分别是 l, k 年的对应要素值($k>l$)。

$$Z = \begin{cases} \frac{U-1}{\sqrt{v(U)}} & U>0 \\ 0 & U=0 \\ \frac{U+1}{\sqrt{v(U)}} & S<0 \end{cases} \quad (10)$$

因此,对于某年的降水量 x_0 ($x_0 \neq 0$),其随机变量 $x < x_0$ 事件的概率为:

$$G_{(x < x_0)} = \int_0^{x_0} g(x) dx \quad (3)$$

当 $x=0$ 时,其概率为:

$$G_{(x=0)} = M/N \quad (4)$$

式中: M 为 $x=0$ 的样本数, N 是样本总数。

将式(3)、(4)求得的概率值代入服从 Γ 分布的概率密度函数进行正态标准化处理可得:

$$G_{(x < x_0)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} e^{-\text{SPI}^2/2} dx \quad (5)$$

对(5)式近似求解可得:

$$\text{SPI} = S \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1.0} \quad (6)$$

式中: $t = \sqrt{\ln \frac{1}{F^2}}$, F 为(3)、(4)式求得的降水概率; S 为概率密度系数;SPI为标准化降水指数,当 $G>0.5$ 时, $S=1$,当 $G \leq 0.5$ 时, $S=-1$; $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

干旱等级划分具体见表1^[22]。

式中: Z 为正态分布统计量; $v(U)$ 为方差。在给定的 α 置信水平上, $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 即表示在 α 置信水平上,时间序列变量存在显著的上升和下降趋势。

2.5 干旱频率

干旱频率指某气象站发生干旱的年份数量与研究时段内总年份数量的比值,用来表征干旱发生的频繁程度:

$$T_m = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (11)$$

式中: n 表示某气象站发生干旱的年份数量; N 表示研究时段内总年份数量($N=45$); m 表示不同气象站。

2.6 游程理论中干旱事件的识别

游程理论^[25-28]能够有效识别干旱事件,同时获取干旱事件的特征变量(干旱历时、干旱烈度、烈度峰值等),干旱事件的识别主要包括以下几个方面:

(1) 若干旱历时只有一个月,且 $-1.5 \leq \text{SPI} < -0.5$,则认为此次干旱为一次小干旱事件,可忽略不计;若 $\text{SPI} < -1.5$,则确定为一次干旱事件。

(2) 若两次干旱事件的时间间隔为一个月,且该月 $-0.5 < \text{SPI} < 0.5$,则可将这两次干旱合并为一次干旱事件。

(3) 干旱历时(D)指的是一次干旱事件的持续

时间,干旱烈度 (S)、平均干旱烈度 (\bar{S})、平均干旱历时 \bar{D} 和烈度峰值 S_{\max} 的计算公式如下:

$$S=-\sum_{p=1}^D \text{SPI}_p$$

(12)

$$\bar{S}=\frac{\sum_{p=1}^T S_p}{T}$$

(13)

$$\bar{D}=\frac{\sum_{p=1}^T D_p}{T}$$

(14)

$$S_{\max}=\max_{(0<p\leq T)} S_p$$

(15)

式中: T 为干旱次数。

2.7 反距离权重插值法 (IDW)

反距离权重插值法主要使用反距离的幂值,幂参数基于距输出点的距离来控制已知点对内插值的影响,是一种反距离函数。该函数假定每点都有着局部影响,这种影响随着距离的增加而减弱。各点权重的计算方法为:

$$P_s=\frac{\frac{1}{L_s}}{\sum_{s=1}^f \frac{1}{L_s}}$$

(16)

$$Z=\sum_{s=1}^f P_s Z_s$$

(17)

式中: f 表示离散点总数; P_s 表示每个点的权重系数; Z_s 表示样点的实测值; L_s 表示未知点到各点距离。

3 结果与分析

为了进一步分析淮河流域不同季节干旱的时空分布特征和干湿演变趋势,根据气候学定义,将 3—5 月定义为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月到次年 2 月为冬季。

3.1 淮河流域季节干旱的年际变化特征

分析 1971—2015 年淮河流域不同季节 SPI 的年际变化(图 2)发现,淮河流域近 45 年共出现 35 次干旱,其中冬季干旱次数最多,共 12 次,均为轻旱,但不同季节干旱出现时段有所差异。从 SPI 的变化趋势来看,春季和秋季 SPI 呈下降趋势,表明春、秋季淮河流域呈干旱化趋势,且秋季(−0.062/10 a)干旱化趋势明显强于春季(−0.034/10 a);夏季和冬季 SPI 指数呈不同程度上升趋势,表明夏、冬季干旱缓解呈湿润化趋势,其中变化趋势夏季(0.034/10 a) > 冬季(0.032/10 a),但各季节 SPI 的变化趋势均未通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验。

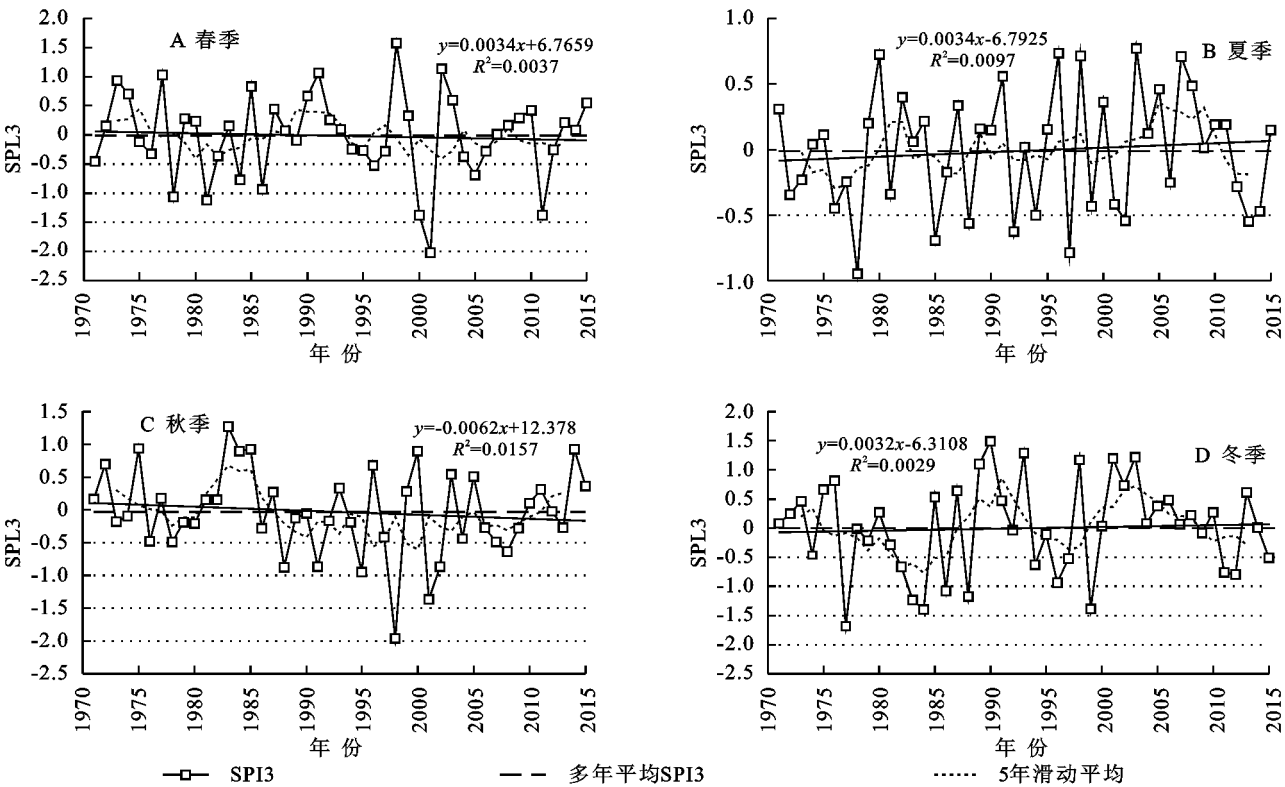


图 2 不同季节 SPI 年际分布

分析春季 SPI 值演变形式(图 2A)可以发现,45 年间淮河流域 SPI 值的波动范围在 −2.022~1.574,最高值出现在 1998 年,最低值出现在 2001 年,平均值为 −0.014,干旱时段集中在 70 年代后期到 80 年代

后期、00 年代初,此外 21 世纪 10 年代也出现 1 次中旱。结合 5 a 滑动平均曲线和逐年 SPI 值可以看出,90 年代中期以前,滑动平均曲线呈“降—升—降”变化,最低值出现在 1980 年,此期间出现 1 次中旱;到

80年代后期,滑动平均曲线呈上升趋势,出现3次干旱,但干旱程度有所缓解;到90年代中期,滑动平均曲线呈下降趋势,区域呈干旱化,但 $SPI > -0.5$,此期间无干旱发生;90年代后期至今,滑动平均曲线呈波动变化,干旱次数明显增多,共出现1次轻旱、2次中旱、1次特旱。

夏季淮河流域SPI值的波动范围为 $-0.947 \sim 0.774$,最高值出现在2003年,最低值出现在1978年,平均值为 -0.012 。分析近45年淮河流域夏季SPI值的演变形式发现(图2B),夏季淮河流域干旱多发于80、90年代,其余各年代分别出现一次。结合5a滑动平均曲线和逐年SPI值发现,70年代中期到80年代初,滑动平均曲线“先降后升”,谷值出现在1976年,此期间出现1次轻旱;80年代初到90年代末,滑动平均曲线在 $SPI=0$ 等值线上下波动,干旱频繁发生;90年代末到00年代中期,滑动平均曲线呈上升趋势,干旱有所缓解;00年代中期以后,滑动平均曲线呈下降趋势,区域干旱化显著。

秋季淮河流域SPI值的波动范围为 $-1.955 \sim 1.266$,最高值出现在1983年,最低值出现在1998年,平均值为 -0.034 ,其序列变化形式(图2C)的研究结果表明,秋季淮河流域干旱主要出现在80年代末到00年代初,以轻旱为主。结合5a滑动平均曲线和逐年SPI值发现,90年代以前,滑动平均曲线呈“降—升—降”变化,谷值出现在1978年,峰值出现在1983年,此期间区域呈“干旱化—湿润化—干旱化”发展,无干旱发生;1990年之后,淮河流域滑动平均曲线呈波动上升趋势,干旱发生次数明显增多,共6次干旱,其中重旱1次、中旱1次,其余为轻旱。

冬季淮河流域SPI值的波动范围为 $-1.685 \sim 1.486$,最高值出现在1990年,最低值出现在1977年,平均值为 -0.002 。除了00年代,其余时段干旱均有发生。从5a滑动平均曲线和逐年SPI值可以看出,1971—2015年滑动平均曲线呈“三降两升”变化,80年代中期以前,滑动平均曲线呈下降趋势,区域向干旱化发展,共出现3次干旱,且均为中旱及以上干旱;80年代中期到90年代初,滑动平均曲线呈上升趋势,区域干旱缓解,仅在前期出现2次中旱;90年代前期到90年代末,滑动平均曲线呈下降趋势,SPI值波动减小,出现3次轻旱;90年代末到00年代中期,滑动平均曲线呈上升趋势,仅1999年出现一次中旱;00年代中期以后,区域呈干旱化发展。

3.2 淮河流域四季干旱的空间分布特征和变化趋势

分析淮河流域不同季节多年平均SPI值空间分

布特征显示(图3),淮河流域各季节SPI值均在 -0.5 以上,表明就多年平均而言,淮河流域整体气候条件对区域农业发展较为有利,但不同季节SPI值的空间分布也存在差异。淮河流域春季SPI的多年平均值(图3A)在 $-0.163 \sim 0.042$,最大值出现在泰山,最小值出现在嘉鱼,全区平均SPI为 -0.014 , $SPI > 0$ 站次比^[13]为38.24%;夏季SPI的多年平均值(图3B)在 $-0.073 \sim 0.038$,最大值出现在徐州,最小值出现在安阳,全区平均SPI在 -0.012 ,相较春季而言,夏季 $SPI > 0$ 的台站比例明显大于春季,且 $SPI > 0$ 区域基本沿淮河干流分布,这与淮河流域的季风气候有关;秋季SPI的多年平均值(图3C)在 $-0.098 \sim 0.024$,最大值出现在新乡,最小值出现在如皋,全区平均SPI在 -0.034 , $SPI > 0$ 站次比为17.65%,正值区主要分布在湖北中西部、河南北部和山东北部;冬季SPI的多年平均值(图3D)在 $-0.006 \sim 0.017$,最大值出现在商丘,最小值出现在老河口,全区平均SPI在0.002, $SPI > 0$ 站次比为61.76%,负值区面积为各季节最小,负值区主要分布在江苏中部、湖北中部和西部、河南西部。

3.2.1 春季干旱的空间分布特征及其发展趋势 分析淮河流域春季干旱发生频率空间分布图(图4A)发现,春季淮河流域轻旱以上干旱的平均发生频率为30.46%,其中干旱发生频率最高值在山东龙口为37.78%,最低出现在山东成山头22.22%,其中淮河流域中部春旱频率低于全区平均值。

结合春季淮河流域SPI的气候倾向率(图5A)可以看出,春季淮河流域气候倾向率在 $-0.22 \sim 0.27/10\text{a}$,空间上呈由南向北递增的变化趋势,最大值出现在山东济南,最小值出现在安徽宁国。气候倾向率正值区主要分布在山东的大部分地区、河南东部及湖北的部分地区,区域内近45年SPI值呈递增变化,干旱状况将有所缓解,呈湿润化趋势;负值区主要分布在山东南部、江苏、安徽、湖北的大部分地区,表明区域干旱有所加强,呈干旱化趋势。

淮河流域是我国重要的农业生产基地,春旱的发生会对淮河流域的农业发展产生较为严重的影响。春季气温回升,土壤蒸发加快,此时正值冬小麦返青拔节期,干旱的发生会对冬小麦的光合作用产生影响,从而影响其生长发育,同时春旱也会对春播产生影响,造成种子萌发困难,甚至缺苗断垄。因此在春播时可以挑选抗旱品种,调整作物播种期,适当喷洒抗旱药物,同时制定合理灌溉制度,以减轻干旱带来的损失。

3.2.2 夏季干旱空间分布特征及其发展趋势 夏季

淮河流域轻旱以上干旱频率的空间分布图(图 4B)显示,夏季淮河流域干旱频率在 24.44%~42.22%,干旱频率最高值出现在河南三门峡,最低值出现在安徽安庆,平

均干旱频率为 32.35%,明显大于春季。干旱发生频率低值区主要分布在河南北部、安徽中部和南部,干旱频率基本在 30%以下,其他地区干旱频率高于 30%。

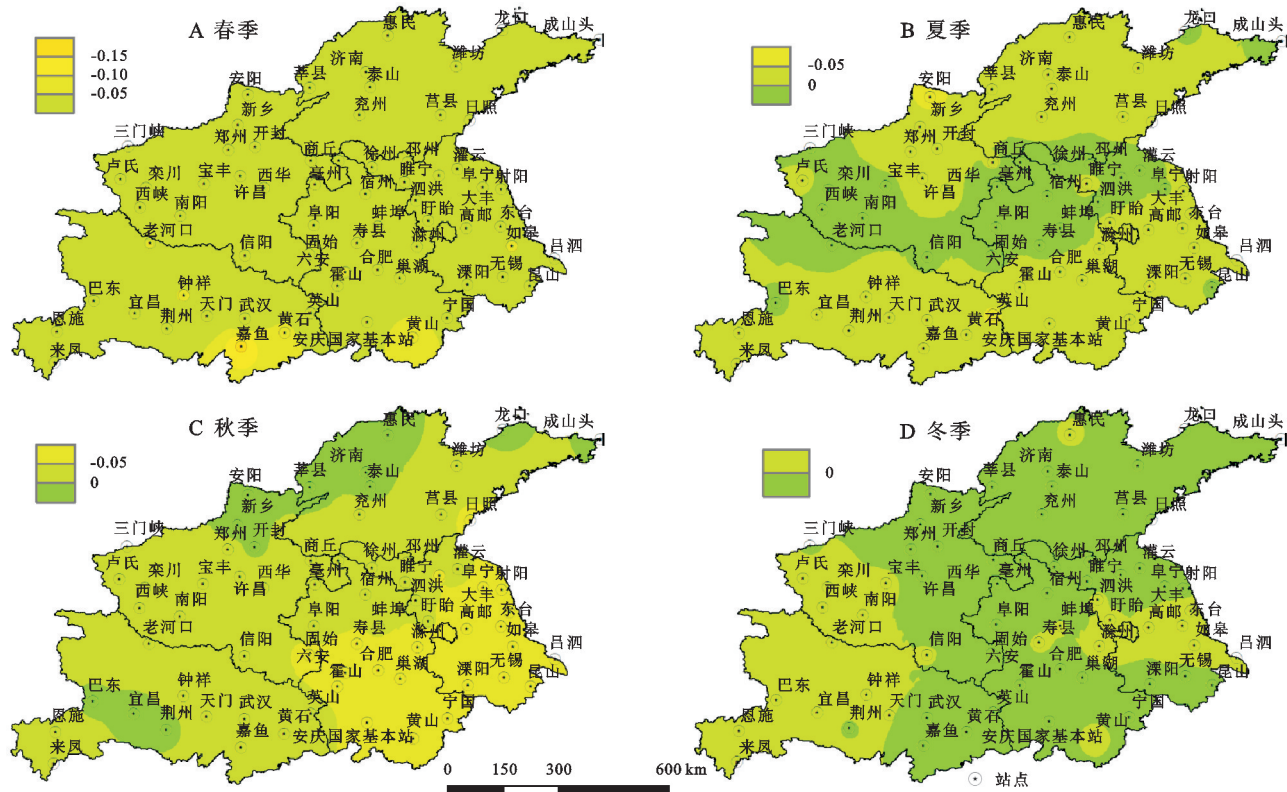


图 3 淮河流域不同季节多年平均 SPI 空间分布特征

分析夏季 SPI 值气候倾向率的空间分布(图 5B)发现,夏季 SPI 值气候倾向率在 $-0.161\sim0.241/10\text{ a}$,最大值出现在江苏无锡,最小值出现在河南三门峡。呈湿润化变化趋势站点的占比为 66.18%,相较春季而言,夏季湿润化站点数量明显高于春季,且夏季气候倾向率与春季具有相反的空间分布特征,气候倾向率值呈明显的由南向北递减分布。湿润化区域主要出现在苏南、安徽、湖北东部和河南南部,表明上述区域干旱出现不同程度缓解,其中江苏无锡和湖北武汉的湿润化趋势最为明显;干旱化区域主要分布在淮河流域北部,包括江苏北部、山东、河南北部和湖北的东部,上述区域 SPI 值呈减小趋势,表明干旱出现不同程度增强。

夏季干旱对农作物的危害一般比春季大。对于淮河流域而言,夏季是玉米和水稻的主要生长期,此期间玉米茎叶生长迅速,对水分的需求较高,干旱的发生会导致其发育期缩短,阻碍雌雄穗分化,造成玉米穗小、稀粒、秃顶甚至空杆而最终导致玉米严重减产。对于水稻,夏季干旱的发生会导致其植株发育迟缓,甚至影响正常授粉,从而对其产量产生影响。应对夏季干旱,政府部门应加强干旱监测,抓住有利气

象条件,适时进行人工增雨,以缓解干旱带来的不利影响;农民可以通过加强田间管理、叶面喷施抗旱剂、适时灌溉等措施缓解干旱带来的影响。

3.2.3 秋季干旱空间分布特征及其发展趋势 秋季淮河流域干旱频率在 22.22%~40.00%(图 4C),干旱频率最高出现在巢湖,最低出现在盱眙,平均干旱频率为 31.50%,低值区主要分布在河南中部、湖北中部,其余零散分布于山东中部、安徽东部以及江苏西部,区域内干旱频率均在 30%以下,其余地区干旱频率高于 30%。

淮河流域秋季 SPI 的气候倾向率在 $-0.25\sim0.13/10\text{ a}$,气候倾向率的最大值出现在江苏泗洪,最小值出现在湖北钟祥。从气候倾向率的空间分布(图 5C)可以看出,秋季大部分地区气候倾向率为负值,表明淮河流域秋季大部分地区呈不同程度干旱化趋势,其中仅在河南(南阳、新乡)、江苏北部气候倾向率为正值,呈弱湿润化趋势。

秋季是晚熟春播作物的成熟期,此时干旱发生会影响作物正常灌浆成熟,对于淮河流域而言,秋季干旱还会延误秋播作物的播种和出苗,造成农作物植株小、根系弱、叶面积小,生物产量大幅度减少,直接影

响经济产量。对于秋旱,可以通过以下措施应对:一、加强监测预警。二、饱灌抽雄灌浆水。三、根外喷洒水抗旱剂。

3.2.4 冬季干旱空间分布特征及其发展趋势 冬季淮河流域轻旱及以上干旱的发生频率在 20.00%~

40.00%(图 4D),全区平均干旱频率为 31.27%。干旱频率高值区分别以湖北恩施、来凤、江苏盱眙、大丰和安徽黄山为中心向周围递减,低值区主要包括山东的大部分地区、河南东部、江苏西北部和安徽西北部,且低值区以山东兖州为中心向周围递增。

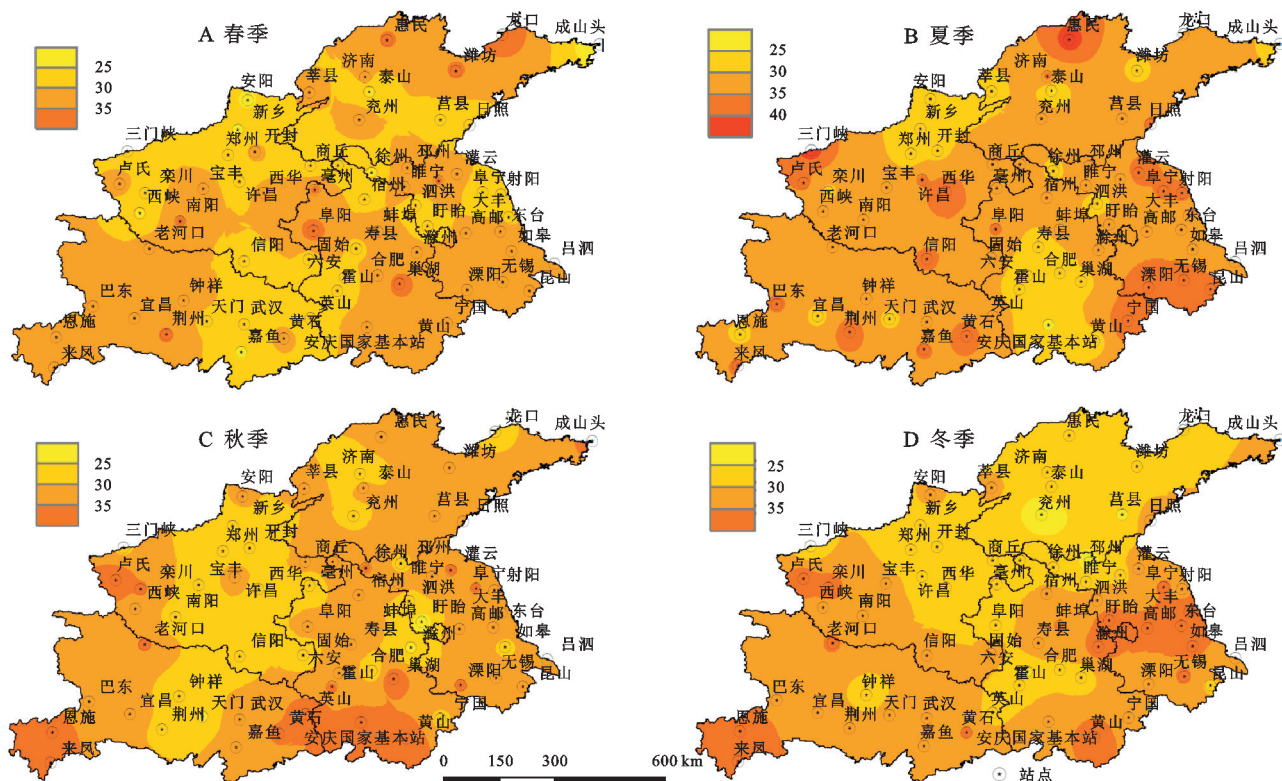


图 4 不同季节淮河流域干旱的发生频率

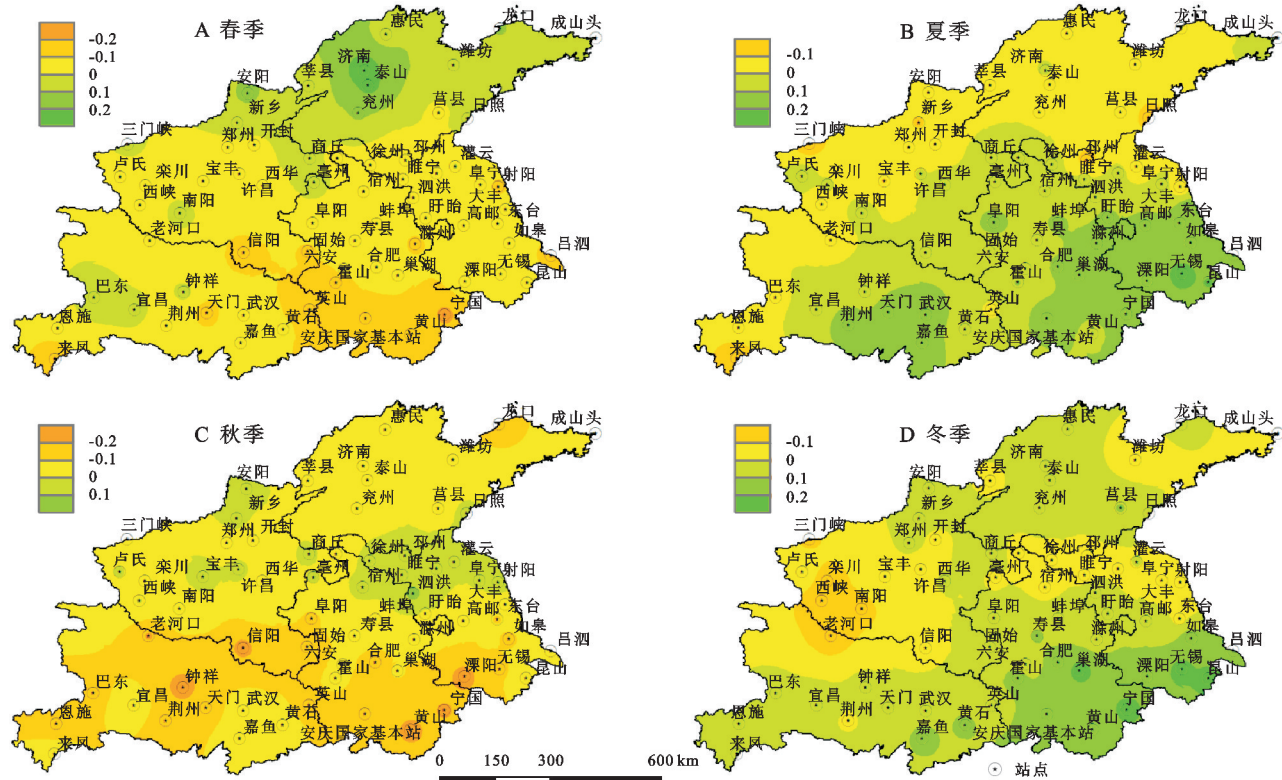


图 5 不同季节淮河流域 SPI 的气候倾向率

从 SPI 值气候倾向率空间分布(图 5D)来看,冬季淮河流域 SPI 值气候倾向率在 $-0.17 \sim 0.25/10\text{ a}$,最大值出现在安徽巢湖,最小值出现在湖北老河口,全区平均值为 $0.03/10\text{ a}$,湿润化站点的占比为 63.23% 。冬季大部分地区气候倾向率为正值,呈不同程度湿润化趋势,负值区主要分布在以湖北老河口为中心的湖北北部、河南西部,其余零散分布于安徽北部、江苏北部和山东东部,呈不同程度干旱化趋势。

淮河流域是冬小麦、油菜等越冬作物的主要种植区,越冬前期干旱会使小麦、油菜分蘖(或分枝)、盘墩

和根系发育受到阻碍,在田间表土层昼夜温差大的情况下,还可能出现死苗现象。应对冬季干旱的措施主要包括:一、抗旱保墒,浇水保苗。二、分类管理,促弱控旺。三、镇压划锄,提墒保墒。

3.3 基于游程理论的干旱因子特征变量的空间演变特征

根据游程理论获取淮河流域 1971—2015 年各气象站干旱事件的干旱次数、干旱历时、干旱烈度和烈度峰值,结合 ArcGIS 反权重空间插值法(IDW)对淮河流域上述要素的空间分布特征进行分析(图 6)。

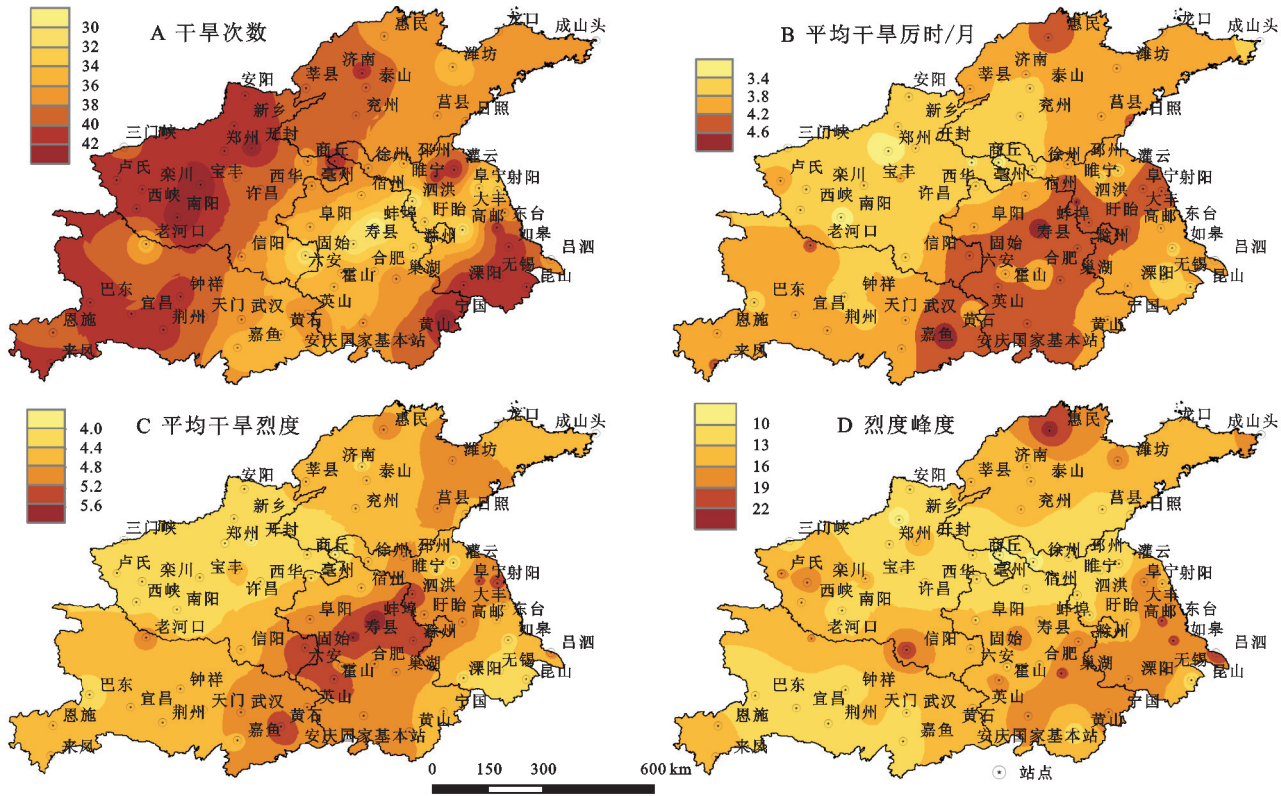


图 6 干旱次数、平均干旱历时、平均干旱烈度和烈度峰值的空间格局

分析干旱事件的发生次数发现(图 6A),淮河流域干旱次数在 $20 \sim 44$ 次,相较而言,淮河流域东南部(包括江苏南部、安徽东南部)、西部(湖北西部、河南中部和西部)、北部(山东西部)为干旱事件多发区,而流域的中南部(包括安徽的大部分地区、湖北东部、河南东南部)、东北部(江苏的大部分地区和山东大部分地区)的干旱事件发生次数相对较少。

与干旱事件发生次数相比,平均干旱历时与干旱次数具有相反的空间分布。从淮河流域平均干旱历时的空间分布可以看出(图 6B),平均干旱历时在 $3.05 \sim 4.83$ 个月,长时间历时的区域主要分布在淮河流域中下游,包括湖北东部、安徽大部 and 江苏东部。平均干旱烈度的空间分布(图 6C)与干旱历时较为相似,表明上述区域干旱历时长,对应的干旱烈度也较强,存在

明显的极端性,此种情况一般对应季节连旱,对区域内经济作物的影响十分严重^[25]。

分析淮河流域烈度峰值的空间分布(图 6D)发现,淮河流域不同区域的烈度峰值在 $8.31 \sim 22.93$,流域内东北部的烈度峰值高值区与干旱历时和干旱烈度较为一致;流域东南部的烈度峰值高值区较平均干旱历时和平均干旱烈度向东南部有所偏移。

4 结论

(1) 从淮河流域不同季节 SPI 的年际变化来看,春、秋季 SPI 呈减小趋势,且变化速率秋季大于春季,夏、冬季 SPI 呈增加趋势,变化速率夏季大于冬季;干旱次数总体呈夏旱最少、冬旱最多。

(2) 全区各季平均干旱频率相近,在 30% 左右。

从气候倾向率的空间分布来看,春季气候倾向率呈由南向北递增,北部呈湿润化趋势,南部呈干旱化趋势;夏季呈由南向北递减,北部呈干旱化趋势,南部呈湿润化趋势;秋季大部分地区气候倾向率为负值,正值区仅在江苏北部出现。冬季大部分地区气候倾向率为正值,呈湿润化趋势。

(3) 就干旱特征变量而言,淮河流域干旱次数在20~44次,平均干旱历时在3.05~4.83个月,烈度峰值在8.31~22.93,平均干旱历时与干旱次数具有相反的空间分布特征,长时间历时的区域主要分布在淮河流域中下游,包括湖北东部、安徽大部和江苏东部。流域东北部的烈度峰值高值区与干旱历时、干旱烈度的空间分布较为一致;流域东南部的烈度峰值高值区较干旱历时和干旱烈度向东南部有所偏移。

参考文献:

- [1] Aiguo Dai. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. *Nature Climate Change*, 2013,3(1):52-58.
- [2] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[R]. Uk:Cambridge University, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012.
- [3] 薛昌颖,张永涛,刘伟昌.1971—2016年河南省夏玉米生长季极端干旱时空特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2020,38(2):258-266.
- [4] 史尚渝,王飞,金凯,等.基于 SPEI 的 1981—2017 年中国北方地区干旱时空分布特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2019,37(4):215-222.
- [5] 马彬,张勃,周丹,等.基于标准化降水蒸散指数的中国东部季风区干旱特征分析[J]. *自然资源学报*, 2016,31(7):1185-1197.
- [6] 张璐,朱仲元,王慧敏,等.基于 SPEI 的锡林河流域气象干旱风险分析[J]. *水土保持研究*, 2020,27(2):220-226.
- [7] 咎大为.黑河流域 1967—2009 年气象干旱时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2019,30(3):92-99.
- [8] 颜雅琼,申双和,岳元,等.多时间尺度下黑龙江省 1980—2014 年干湿演变特征及主导因子分析[J]. *气象科学*, 2020,40(2):200-208.
- [9] 陶然,张珂.基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析[J]. *水资源保护*, 2020,36(5):50-56.
- [10] 郭梦,张奇莹,钱会,等.基于 SPEI 干旱指数的陕西省干旱时空分布特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2019,30(3):127-132.
- [11] 李雪纯,赵君,徐进超.基于降水距平百分率的安徽省近 50 年干旱时空分布特征分析[J]. *中国农村水利水电*, 2018,431(9):138-141,148.
- [12] 叶正伟.基于 SPI 的江苏沿海开发地区旱涝演变特征分析以盐城市为例[J]. *地理科学*, 2014,34(4):479-487.
- [13] 岳元,申双和,王琪.基于标准化降水指数的近 45 年吉林省干旱特征分析[J]. *中国农村水利水电*, 2017(7):166-172.
- [14] Hu Y, Wu S. Spatial-temporal patterns of droughts based on standard precipitation index(SPI) during past fifty years in Huai River basin[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2020,9(4):363-372.
- [15] 杨国庆,王佳真,孙萌萌.基于标准化降水指数的沧州干旱时空特征[J]. *干旱气象*, 2019,37(2):218-225.
- [16] 陈小凤,王再明,胡军,等.淮河流域近 60 年来干旱灾害特征分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013,011(6):20-24.
- [17] 夏敏,孙鹏,张强,等.基于 SPEI 指数的淮河流域干旱时空演变特征及影响研究[J]. *生态学报*, 2019,39(10):3643-3654.
- [18] 姚蕊,夏敏,孙鹏,等.淮河流域干旱时空演变特征及成因[J]. *生态学报*, 2021,41(1):333-347.
- [19] 杨娜,段凯,刘梅,等.淮河流域气象干旱风险的区域特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017,31(11):188-193.
- [20] 王晓峰,张园,冯晓明,等.基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. *农业工程学报*, 2017,33(10):206-214.
- [21] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to times scales[C]// *Proceedings of the 8 Th Conference on Applied Climatology American Meteorological Society*, 1993.
- [22] 张存杰,刘海波,宋艳玲,等.气象干旱等级(GB/T20481-2017)[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [23] 王占彪,王猛,尹小刚,等.气候变化背景下华北平原夏玉米各生育期水热时空变化特征[J]. *中国生态农业学报*, 2015,23(4):473-481.
- [24] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[S].北京:气象出版社,1999.
- [25] 李明,柴旭荣,王贵文,等.长江中下游地区气象干旱特征[J]. *自然资源学报*, 2019,34(2):374-384.
- [26] 李明,胡炜霞,王贵文,等.基于 Copula 函数的中国东部季风区干旱风险研究[J]. *地理科学*, 2019,39(3):506-515.
- [27] 周帅,王义民,畅建霞,等.黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. *水利学报*, 2019,50(10):1231-1241.
- [28] Herbst P H, Bredenkamp D B, Barker H M G. A technique for the evaluation of drought from rainfall data[J]. *Journal of Hydrology*, 1966,4(66):264-272.