

基于标准化降水指数的山东省近 45 年旱涝演变特征

任建成, 张婷婷

(滨州市气象局, 山东 滨州 256612)

摘 要:为探究山东省旱涝的演变特征,使用山东省 25 个国家气象观测站近 45 年的逐月降水资料,计算了月、季节和年尺度标准化降水指数(SPI),用旱涝频率、旱涝站次比、旱涝强度等指标分析了山东省旱涝的时空特征。结果表明:(1) 山东省多年平均雨涝频率高于干旱频率,但不同地区、不同等级的旱涝频率差异较大,旱涝事件呈常态化发展趋势。(2) 山东省旱涝影响范围大致相当。20 世纪 70 年代的秋季旱涝状态以正常为主,其他时段各季节旱涝状态以交替出现为主。各季节多年平均雨涝频率均高于干旱频率,但多年和各季节的平均干旱强度均高于平均雨涝强度。(3) 山东省受干旱的影响总体上大于雨涝,但 20 世纪 70 年代雨涝的强度和范围均明显大于干旱。20 世纪 80 年代的秋季干旱影响范围最大,20 世纪 80 年代的冬季雨涝影响范围最大。山东省旱涝的时空差异较大,全省受干旱的影响总体上大于雨涝,旱涝事件为常态化事件。

关键词:旱涝; 标准化降水指数(SPI); 山东省

中图分类号:P426.616

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0149-06

Evolution Characteristics of Drought and Flood in Shandong Province in Recent 45 Years Based on Standardized Precipitation Index

REN Jiancheng, ZHANG Tingting

(Binzhou Meteorological Bureau, Binzhou, Shandong 256612, China)

Abstract:In order to explore the evolution characteristics of drought and flood in Shandong Province, the monthly precipitation data of 25 national meteorological stations in Shandong Province in recent 45 years were used to calculate the standardized precipitation index (SPI) at monthly, seasonal and annual scales, the spatial and temporal characteristics of drought and flood in Shandong Province were analyzed by using drought flood frequency, ratio of drought/flood stations and drought/flood intensity. The results showed that: (1) the average frequency of rainfall and waterlogging in Shandong Province was higher than that of drought, but the frequency of drought and flood varied greatly in different regions and grades, and the drought and flood events were normal development trend; (2) the influence range of drought and flood in Shandong Province was roughly the same; in the 1970s, the drought and flood state in autumn was mainly normal, and in other periods, the drought and flood state in each season appeared alternately; the annual average frequency of rainfall and waterlogging in each season was higher than that of drought, but the average drought intensities of many years and each season were higher than the average rainfall and waterlogging intensities; (3) in general, the impact of drought was greater than that of rainfall in Shandong Province, but the intensity and range of rainfall and waterlogging in 1970s were obviously greater than that of drought; the influence range of autumn drought in 1980s was the largest, and that of winter waterlogging in 1980s was the largest. The spatial and temporal differences of drought and flood in Shandong Province are large. The impact of drought on the whole province is greater than that of rainfall and flood.

Keywords:drought and flood; standardized precipitation index; Shandong Province

收稿日期:2020-04-28

修回日期:2020-05-09

资助项目:中国教师发展基金会校本科专项基金“全国教育科学“十三五”教育部规划课题《基础教育课业改革与小研究生创新学习试验》”(FHB160516)

第一作者:任建成(1984—),男,山东潍坊人,工程师,硕士,主要从事气候评价、旱涝评估研究。E-mail:19129512@qq.com

通信作者:张婷婷(1990—),女,山东滨州人,工程师,大学本科,主要从事中短期天气预报研究。E-mail:bxzhangtingting@qq.com

旱涝灾害是普遍性的自然灾害,不仅会使农业受灾,严重的旱涝灾害甚至还会破坏生态环境。据统计,旱涝灾害自新中国成立以来一直是对我国农业生产影响最大的灾种,造成了巨大的粮食损失,占我国粮食生产总损失的 80%以上^[1]。

山东省东临太平洋,西接欧亚大陆,自然地理环境非常复杂,饱受陆地和海洋等多种自然灾害频繁袭击^[2],其中旱灾和水灾也是对山东省影响最大的灾种^[3]。因此,研究山东省旱涝的演变特征,为山东省旱涝评估、防灾减灾提供气象学依据和支撑,具有重要的现实意义。

目前,已有的研究主要使用降水 Z 指数以及降水量距平百分率等探讨山东省的旱涝特征。如楚鹏等^[4]基于降水 Z 指数开展山东省旱涝特征研究,发现鲁西南、鲁东南及山东半岛易发生等级较高的旱涝灾害;费艳琴等^[5]以降水量距平百分率分析了山东省夏季降水的时空分布特征,发现山东夏季降水的时空分布极不均匀。随着全球气候变暖,山东省的极端天气事件频发,表现出干旱频发、旱涝急转等特征,因此,有必要结合干旱与雨涝特点,进一步对山东省旱涝年际及季节变化特征进行更加深入的分析。

降水是影响旱涝最直接的指标之一,1993 年 McKee 等^[6]提出标准化降水指数(SPI, Standardized Precipitation Index)的概念,该指数可以在不同时间尺度上客观反映研究区的旱涝变化特征,在国内外得到了广泛应用^[7-11],鉴于此,本文选用标准化降水指数来分析山东省的旱涝演变特征。

1 研究区概况

山东省地处中国东部、黄河下游,大致介于北纬 $34^{\circ}22.9'—38^{\circ}24.01'$,东经 $114^{\circ}47.5'—122^{\circ}42.3'$,是我国 10 个沿海省市之一。山东省属于暖温带季风气候,气候比较温和,雨量集中,四季分明。全省年平均气温大致遵循由西南向东北递减的规律,但各地平均气温多数都在 13°C 左右,地区差别不大。山东省降水量分布南多北少,大部分地区年平均降水量介于 $600\sim 750\text{ mm}$,降水季节分布很不均衡,夏季降水量可以占到全年降水量的 $60\%\sim 70\%$,易形成涝灾,冬、春及晚秋则降水偏少,容易发生旱灾,对农业生产的影响最大。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

降水数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括山东省 29 个国家气象站点 1971—2015 年的逐月降水数据,经质量控制,选用其中 25 个气象站点的降水资料。

2.2 标准化降水指数

标准化降水指数的计算涉及到较复杂的 Γ 分布函数,在此不作具体讨论,具体计算过程可参考文献^[12-13],把旱涝分成不同的严重程度等级,具体等级划分见表 1^[14]。

表 1 SPI 旱涝等级分类

SPI	旱涝等级
$\text{SPI}\geq 2.00$	特涝
$1.50\leq \text{SPI}<2.00$	重涝
$1.00\leq \text{SPI}<1.50$	中涝
$0.50\leq \text{SPI}<1.00$	轻涝
$-0.50<\text{SPI}<0.50$	正常
$-1.00<\text{SPI}\leq -0.50$	轻旱
$-1.50<\text{SPI}\leq -1.00$	中旱
$-2.00<\text{SPI}\leq -1.50$	重旱
$\text{SPI}\leq -2.00$	特旱

2.3 旱涝评估指标

本文选用旱涝指标包括旱涝发生频率、站次比和强度^[15]。

(1) 旱涝频率。旱涝频率(P_i)可按不同程度旱涝发生的年数计算相应程度干旱频率,计算公式为:

$$P_i=(n/N)\times 100\% \tag{1}$$

式中: n 为某站点发生旱涝事件的年数; N 为研究期总年数; i 为某站点。

(2) 旱涝站次比。旱涝站次比(P_j)为研究区域旱涝事件发生站点数与总站点数的百分比,计算公式为:

$$P_j=(m/M)\times 100\% \tag{2}$$

式中: m 为发生旱涝事件的站点数; M 为总站点数; j 为某年份。

P_j 表示研究区域旱涝事件发生的范围,可间接反映旱涝事件影响的严重程度。 $P_j<10\%$,无干旱或无雨涝; $10\%\leq P_j<25\%$,局域性干旱或雨涝; $25\%\leq P_j<33\%$,部分区域性干旱或雨涝; $33\%\leq P_j<50\%$,区域性干旱或雨涝; $50\%\leq P_j$,全域性干旱或雨涝。

(3) 旱涝强度。旱涝强度(S_{ij})用来评价旱涝严重程度,表示某站在某一时间段内的旱涝强度,通常由 SPI 值反映, SPI 的绝对值越大,表示旱涝强度越严重。计算公式为:

$$S_{ij}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m|\text{SPI}_i| \tag{3}$$

式中: m 为发生旱涝事件的气象站数; i 为某站点; j 为某年份; $|\text{SPI}_i|$ 为站点 i 的 SPI 绝对值。根据 25 个气象站点的降水数据,分别求出 1971—2015 年山

东省逐月平均降水量,计算出的 SPI_{12} 的绝对值即山东省当年发生的旱涝强度值。

3 结果与分析

3.1 山东省旱涝发生频率

$SPI(12\text{个月})$ 可以反映旱涝的年际变化规律^[16]。山东省多年平均干旱频率为24.4%,雨涝频率为31.1%,雨涝频率高于干旱频率。使用ArcGIS软件对全省旱涝频率进行反距离插值(图1)。

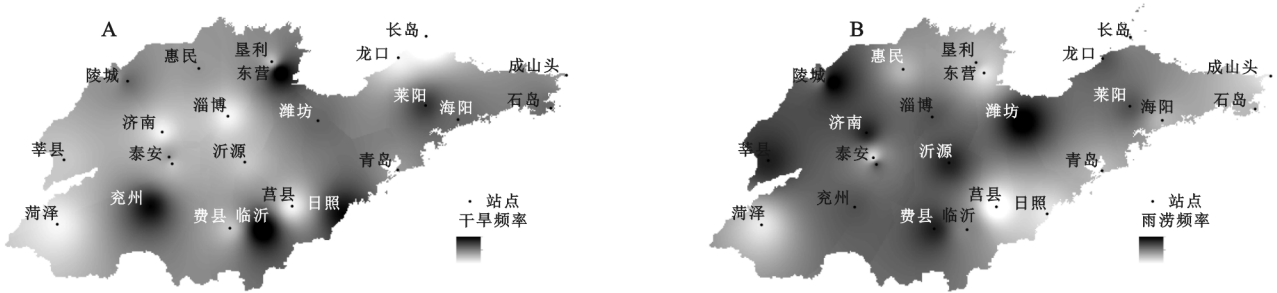


图1 山东省多年旱涝频率分布

表2 山东省不同月、季的旱涝发生频率

类型	12月	1月	2月	冬季	3月	4月	5月	春季	6月	7月	8月	夏季	9月	10月	11月	秋季
特涝	2.2	4.4	4.4	0.0	4.4	0.0	0.0	0.0	2.2	2.2	0.0	2.2	2.2	2.2	4.4	2.2
重涝	4.4	6.7	2.2	6.7	0.0	6.7	4.4	4.4	2.2	2.2	4.4	2.2	0.0	4.4	2.2	4.4
中涝	13.3	6.7	2.2	13.3	11.1	11.1	11.1	13.3	15.6	8.9	8.9	4.4	8.9	15.6	4.4	6.7
轻涝	15.6	6.7	24.4	11.1	20.0	20.0	17.8	17.8	13.3	17.8	20.0	22.2	24.4	11.1	20.0	22.2
正常	26.7	42.2	35.6	46.7	35.6	31.1	40.0	37.8	37.8	37.8	33.3	42.2	31.1	31.1	37.8	37.8
轻旱	22.2	26.7	15.6	6.7	13.3	13.3	8.9	13.3	13.3	11.1	13.3	11.1	15.6	20.0	13.3	8.9
中旱	4.4	0.0	11.1	6.7	6.7	8.9	8.9	4.4	4.4	13.3	13.3	2.2	8.9	8.9	8.9	4.4
重旱	11.1	6.7	4.4	4.4	8.9	6.7	2.2	4.4	8.9	4.4	6.7	11.1	4.4	4.4	8.9	8.9
特旱	0.0	0.0	0.0	4.4	0.0	2.2	6.7	4.4	2.2	2.2	0.0	2.2	4.4	2.2	0.0	4.4

3.2 山东省旱涝发生范围

3.2.1 山东省年际旱涝发生范围 山东省近45 a旱涝站次比变化特征见图2。全省干旱站次比在0~96%波动,1977年、1981年、1983年、1986年、1988年、1989年、1992年、1997年、1999年、2002年、2006年、2014年干旱站次比均大于50%,发生了全域性干旱。45 a间,无干旱、局域性干旱、部分区域性干旱、区域性干旱发生的年数分别为:12,15,2,4 a。全省雨涝站次比在也是在0~96%波动,其中1971年、1973年、1974年、1985年、1990年、1993年、1998年、2003年、2004年、2005年、2007年雨涝站次比大于50%,发生了全域性雨涝。45 a间,无雨涝、局域性雨涝、部分区域性雨涝、区域性雨涝发生的年数分别为:12,9,8,5 a。总体来看,全省旱涝影响范围大致相当,全域性干旱发生的概率略高于全域性雨涝发生的概率。20世纪80,90年代发生全域性干旱最多,而21世纪10年代发生全域性雨涝最多。

可以看出,全省旱涝频率地区不均,鲁西北东部、鲁西南东部、鲁中东部、鲁东南及半岛南部地区干旱发生频率较高。鲁西北中西部、鲁中大部及鲁南地区为雨涝高发区。全省多年不同旱涝等级发生频率差异较大(表2)。对比不同等级季节干旱的发生频率得到:春、夏、秋季干旱发生频率大体一致,冬季发生干旱的频率略低,夏、秋季易发生重旱以上干旱。春季和秋季发生雨涝的频率最高,冬季和秋季易发生重涝以上雨涝。

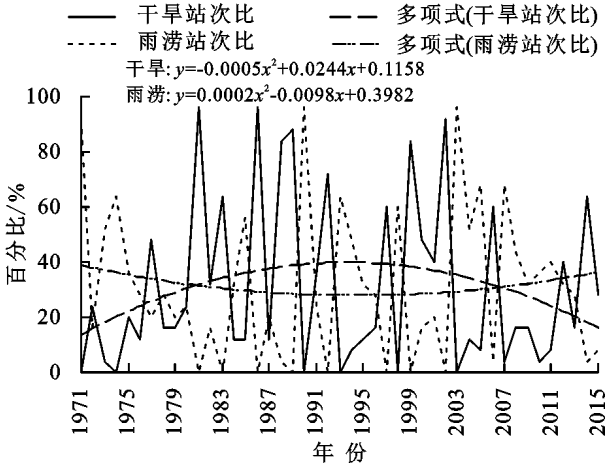


图2 1971—2015年山东省旱涝站次比变化特征

3.2.2 山东省季节旱涝发生范围 研究表明^[16],可以使用3个月时间尺度的 SPI 进行季节干旱特征分析。基于山东省气候特点,分别用3—5月、6—8月、9—11月、12月—次年2月的 SPI 值,代表春夏秋冬四季的 SPI 值(图3)。

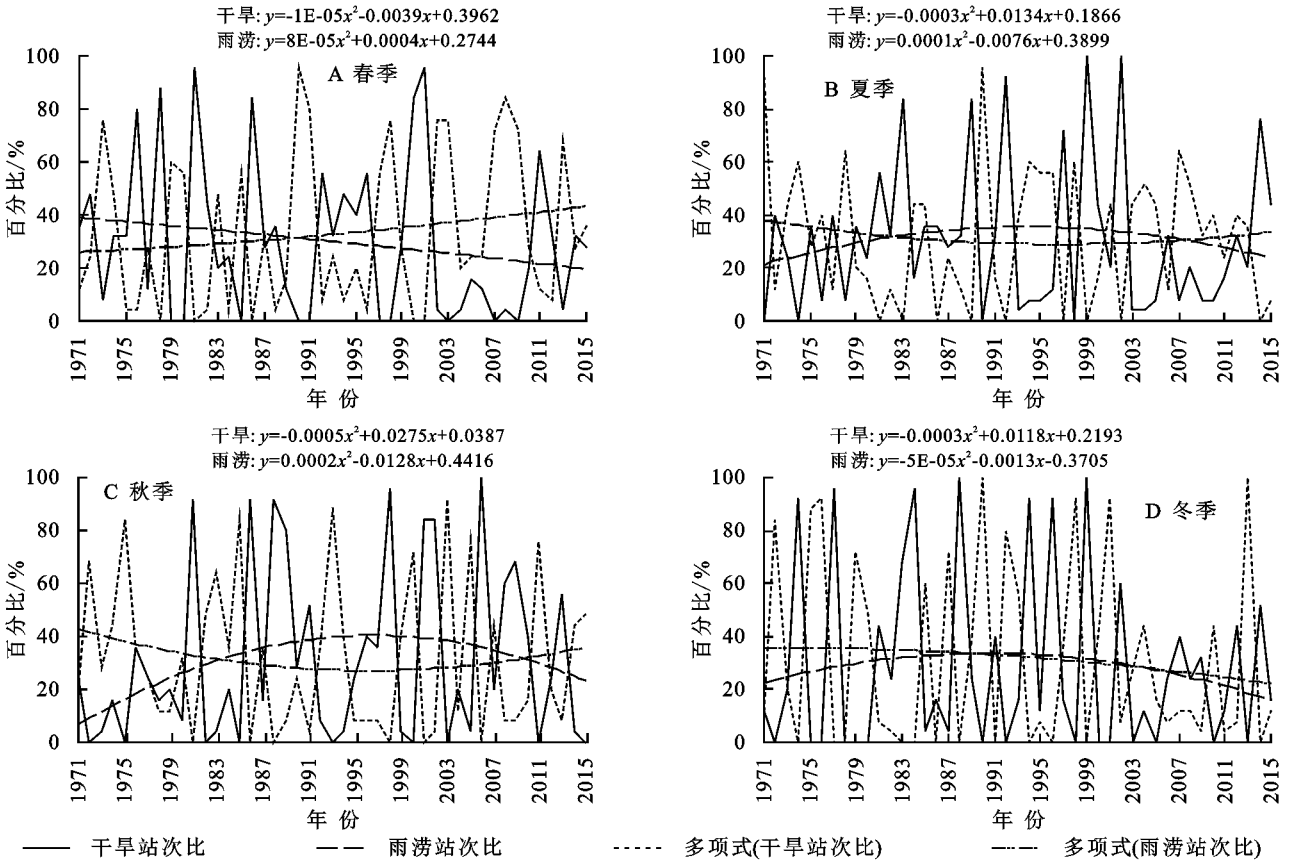


图 3 1971—2015 年山东省不同季节旱涝站次比变化特征

(1) 春季(图 3A)。山东省春季雨涝的影响范围略高于干旱,全域性雨涝的影响范围明显高于全域性干旱的范围。1971—2015 年春季,山东省发生全域性、区域性、部分区域性、局域性干旱事件的年数分别为 9,6,8,7 a;全域性、区域性、部分区域性、局域性雨涝事件发生的年数分别为:14,3,5,9 a。20 世纪 80 年代后,山东省春季雨涝影响范围呈现逐步扩大的态势,而干旱影响范围呈现逐步减少的趋势。

(2) 夏季(图 3B)。山东省夏季雨涝的影响范围明显高于干旱。45 a 间夏季,山东省发生全域性、区域性、部分区域性、局域性干旱的年数分别为 8,8,6,8 a;全域性、区域性、部分区域性、局域性雨涝发生的年数分别为:11,11,2,11 a。从趋势线变化来看,夏季干旱趋势线波动起伏较大,雨涝趋势线相对比较平缓,这与山东省气候雨热同期,降水主要集中在夏季的气候特点是一致的。

(3) 秋季(图 3C)。山东省秋季雨涝的影响范围略高于干旱,全域性雨涝的影响范围低于全域性干旱。45 a 间秋季,山东省发生全域性、区域性、部分区域性、局域性干旱的年数分别为 12,4,1,11 a;全域性、区域性、部分区域性、局域性雨涝发生的年数分别为:9,11,2,8 a。从变化趋势来看,进入 21 世纪,雨

涝影响范围呈现缓慢扩大的趋势,而干旱的影响范围则呈现缓慢减少的趋势。

(4) 冬季(图 3D)。山东省冬季干旱的影响范围高于雨涝,全域性干旱发生年数略低于全域性雨涝的发生年数。冬季发生全域性、区域性、部分区域性、局域性干旱的年数分别为 10,4,1,13 a;全域性、区域性、部分区域性、局域性雨涝发生的年数分别为:12,6,1,6 a。从发展趋势来看,雨涝影响范围呈缓慢减少的趋势,干旱影响范围呈现先缓慢上升后缓慢减少的趋势。

3.3 山东省旱涝发生强度

3.3.1 山东省年际旱涝发生强度 由图 4 可以看出,山东省近 45 a 的 SPI 值在 $-2.2 \sim 2.29$ 变化。特旱、重旱、中旱发生年数分别为 1,3,7 a,特涝、重涝、中涝发生年数分别为 1,2,2 a。可以看出,山东省雨涝以轻涝为主,中涝以上雨涝远少于中旱以上干旱发生的年数。45 a 间,山东省平均干旱强度为 -1.44 ,为中旱级别,接近重旱级别;平均雨涝强度为 1.04 ,达到中涝级别,略高于轻涝级别。山东省 45 a 间正常年份为 20 a,每年发生旱涝事件的概率约为 56%。从发展趋势来看,进入 21 世纪,趋势线缓慢上升,说明近年来山东省气候有缓慢变湿的趋势。

3.3.2 山东省季节旱涝发生强度 (1) 春季(图

5A)。山东省春季旱涝呈交替出现的特点。SPI 值为-2.69~1.82。45 a 间,山东省春季发生雨涝的年数多于发生干旱的年数,但旱涝级别差异明显。45 a 间春季发生特旱、重旱和中旱各 2 a,发生重涝和轻涝的年数分别为 2,6 a,没有特涝发生。春季 SPI 值总体上呈缓慢上升趋势,干旱强度大于雨涝强度。

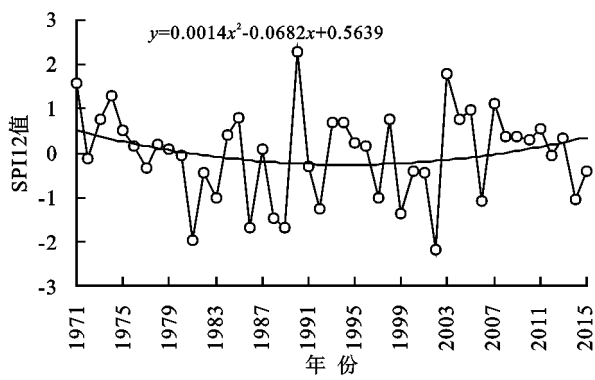
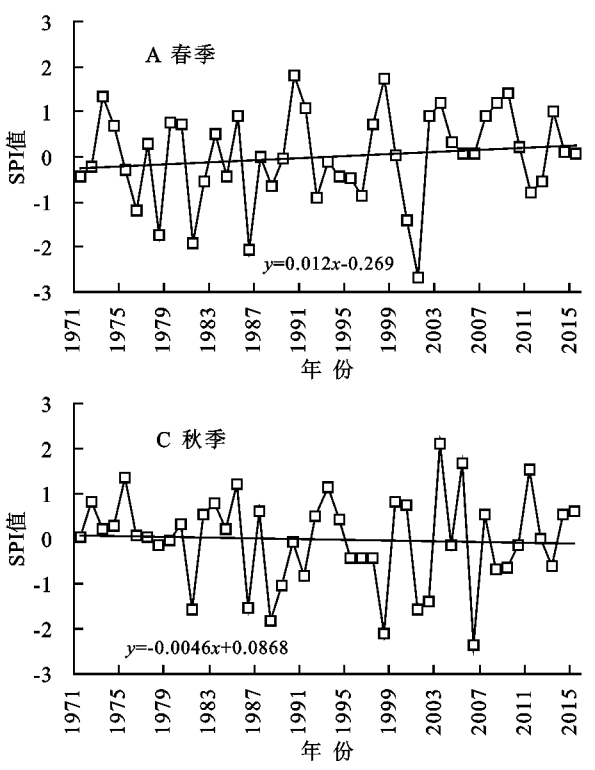


图 4 1971—2015 年山东省旱涝强度(SPI₁₂)变化特征

(2) 夏季(图 5B)。山东省夏季旱涝呈现交替出现趋势。SPI 值为-2.42~2.06。夏季发生雨涝的年



数略多于发生干旱的年数,夏季发生特旱和特涝各 1 a,发生中旱和中涝各 1 a,发生重旱年数为 5 a,远多于发生重涝的年数 1 a。夏季 SPI 值总体上呈缓慢下降趋势,干旱强度大于雨涝强度。

(3) 秋季(图 5C)。山东省秋季在 20 世纪 70 年代旱涝状态以正常为主,而后呈现旱涝交替出现的特点。SPI 值为-2.36~2.09,秋季发生雨涝的年数多于发生干旱的年数,旱涝级别差异明显。秋季发生特旱、重旱、重旱的年数分别为 2,4,2 a,发生特涝、重涝、中涝的年数分别为 1,2,3 a,重旱以上旱情发生的年数远高于重涝以上涝情发生的年数。秋季 SPI 值呈缓慢下降趋势,干旱强度大于雨涝强度。

(4) 冬季(图 5D)。山东省冬季旱涝呈现交替出现趋势。SPI 值为-2.31~1.77。冬季发生雨涝的年数多于发生干旱的年数,旱涝级别差异明显。45 a 中山东省冬季发生特旱和重旱各 2 a,中旱的发生年数为 3 a,重涝和中涝发生年数分别为 3,6 a,没有特涝发生。冬季 SPI 值变化不明显,干旱强度大于雨涝强度。

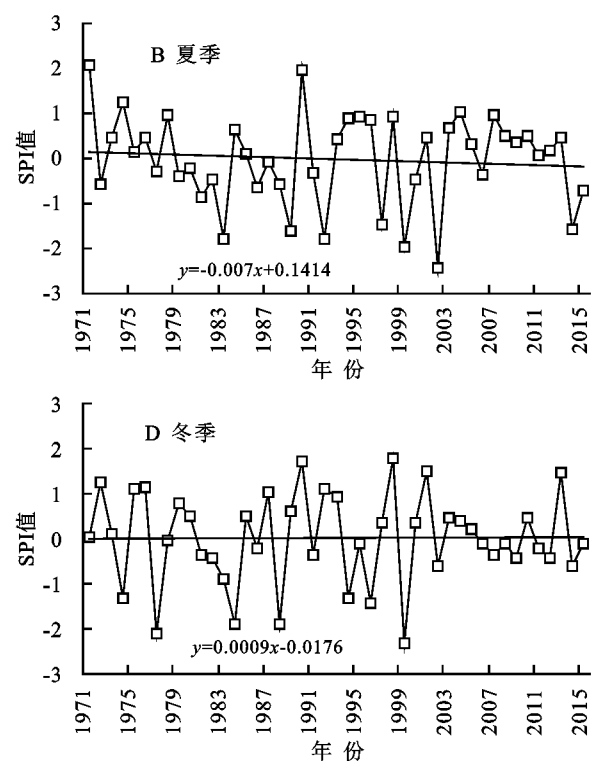


图 5 1971—2015 年山东省不同季节 SPI 值变化趋势

3.4 山东省旱涝年代际变化

由于计算标准化降水指数需对降水数据进行均化,可能导致部分季节、年际旱涝强度值不存在。为了进一步研究山东省旱涝长期演变特征,需对各年代际不同季节的旱涝影响范围及强度进行分析(图 6)。

分析山东省各年代旱涝影响范围及强度可以看出:总体来说,山东省受干旱的影响大于雨涝,但 20

世纪 70 年代雨涝的强度和范围均明显大于干旱,21 世纪 10 年代干旱的影响范围小于雨涝。干旱的影响范围在 20 世纪 80 年代最大,平均干旱站次比达到 55.1%,同时也是干旱强度最大值出现的年代,达到 1.65,雨涝的影响范围在 21 世纪 10 年代最大,平均雨涝站次比达到 52%,雨涝强度最大值出现在 20 世纪 80 年代,达到 1.55。

从年代际季节旱涝特征来看,20 世纪 80 年代的秋季干旱影响范围最大,平均干旱站次比达到了 60%,20 世纪 70,80,90 年代的冬季、20 世纪 90 年代的夏季及 21 世纪 10 年代的秋季,平均干旱站次比均高于 50%;20 世纪 80 年代的冬季雨涝影响范围最大,平均雨涝站次比达到 68%,20 世纪 70 年代的冬季、90 年代的秋季和冬季、21 世纪 10 年代的春季,2011—

2015 年期间的冬季,平均雨涝站次比高于 50%。21 世纪 10 年代的春季干旱强度最大,平均干旱强度值达到 2.7,其次为 20 世纪 10 年代的夏季,平均干旱强度值达到 2.4,20 世纪 70 年代、80 年代和 90 年代的冬季、20 世纪 90 年代的夏季,平均干旱强度均大于 1.5;21 世纪 10 年代的冬季雨涝强度最大,平均雨涝强度达到 1.51,其他年代各季节平均雨涝强度均低于 1.5。

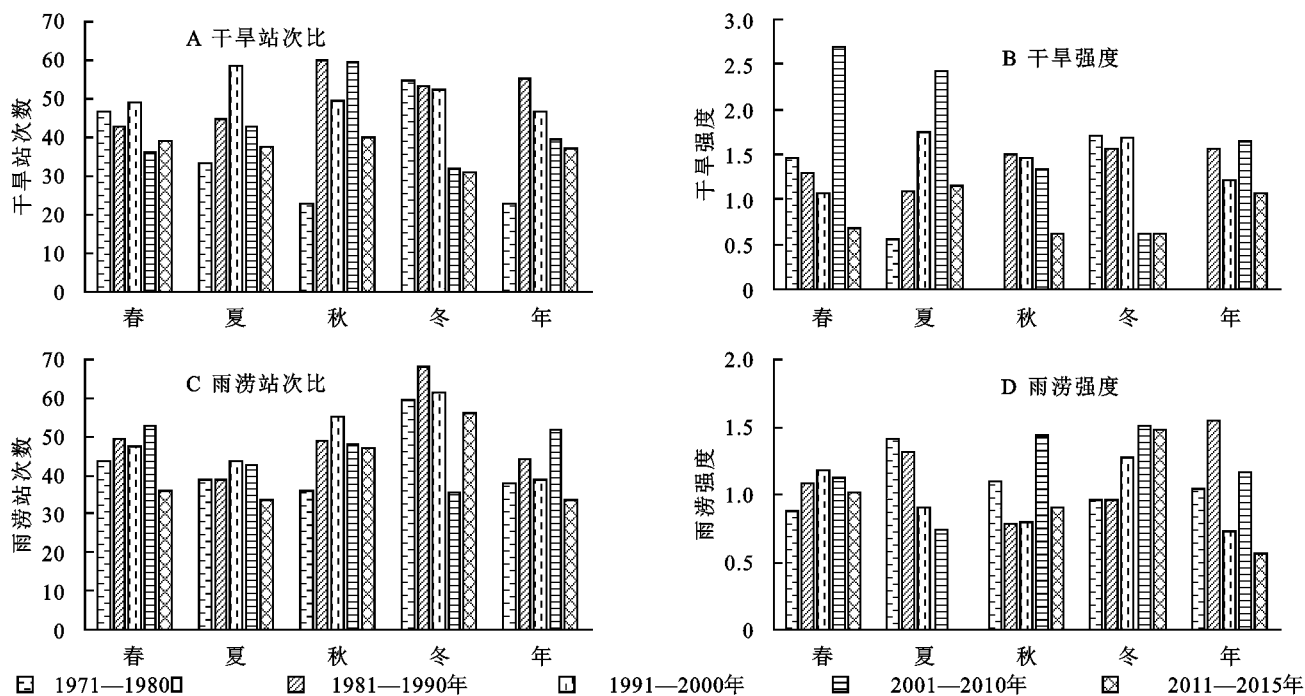


图 6 山东省各年代旱涝站次比、旱涝强度

4 结论与讨论

(1) 山东省多年平均雨涝频率高于干旱频率,但不同旱涝等级、不同地区的旱涝发生频率差异较大。春、夏、秋季干旱发生频率大体一致,冬季发生干旱的频率略低,夏、秋季易发生重旱以上干旱。春季和秋季发生雨涝的频率最高,冬季和秋季易发生重涝以上雨涝。总体上山东省旱涝事件呈常态化发展趋势,从月份、季节及年际上发生旱涝事件的可能性均较大。

(2) 山东省旱涝影响范围大致相当,全域性干旱发生概率略高于全域性雨涝发生概率。各季节旱涝状态以交替出现为主,但 20 世纪 70 年代的秋季旱涝状态以正常为主。各季节发生雨涝年数均高于发生干旱的年数,但多年和各季节的平均干旱强度均高于平均雨涝强度。

(3) 从年代际旱涝特征来看,山东省受干旱的影响总体上大于雨涝,但 20 世纪 70 年代雨涝的强度和范围均明显大于干旱,21 世纪 10 年代干旱的影响范围小于雨涝。20 世纪 80 年代的秋季干旱影响范围最大,20 世纪 80 年代的冬季雨涝影响范围最大。

本文结合山东省的气候特点,基于标准化降水指数,从整体上对山东省旱涝年际及季节变化特征进行了比较深入的分析,以为山东省旱涝评估、防灾减灾提供气象学依据和支撑。但标准化降水指数仅使用了降水因素,计算方法存在一定的不足之处;且山东省自然地理环境非常复杂,受陆地和海洋气候的共同影响,不同地域间旱涝特征差异较大。因此,下一步还需结合温度等其他旱涝指标,因地制宜的探讨山东省不同地域的旱涝特征。

参考文献:

- [1] 刘玲,沙奕卓,白月明.中国主要农业气象灾害区域分布与减灾对策[J].自然灾害学报,2003,12(2):92-97.
- [2] 李福夺.山东省自然灾害时空分布规律与防灾减灾对策[J].湖北农业科学,2016,55(3):796-802,809.
- [3] 马培源,冯国红.山东省旱涝灾害情况及减灾措施[J].中国减灾,1996,6(3):32-34.
- [4] 楚鹏,马丽,李霏.基于降水 Z 指数的山东省近 60 年旱涝变化特征[J].青海气象,2019(3):71-77.
- [5] 费艳琴,张民凯,郑美琴.山东夏季及夏季各月降水的时空分布特征[J].中国农学通报,2013,29(32):330-336.

北江输沙率变化不大,高要站输沙率在 2001 年开始出现下降趋势,东江博罗站自 1987 年前后开始下降。

(3) 珠江流域西、北、东江输沙率年内分配极不均匀,输沙率的年内集中程度为西江高于北江高于东江,西江高要站年内输沙率主要集中在 7 月份,北江石角站输沙率集中期在 5 月、6 月份交替出现,东江博罗站输沙率集中期在 6 月、7 月份交替出现。

(4) 近几十年人类活动在珠江流域输沙率变化方面起着很大的作用,主要表现在流域大坝、水库的修建与由于政策与经济原因导致的水土流失的程度差异。

参考文献:

- [1] 刘胜勇.黄河入海水沙通量变化规律与三角洲演变关系[D].上海:华东师范大学,2006.
- [2] 赵荻能.珠江河口三角洲近 165 年演变及对人类活动相应研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [3] Milliman J D. Delivery and fate of fluvial water and sediment to the sea: A marine geologist's view of European rivers[J]. *Scientia Marine*, 2001,65(2):121-132.
- [4] Meade R H, Moody J A. Causes for the decline of suspended-sediment discharge in the Mississippi River System, 1940—2007[J]. *Hydrological Processes*, 2010,24(1):35-49.
- [5] Loisel H, Mangin A, Vantrepotte V, et al. Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014,150:218-230.
- [6] 刘成,王兆印,隋觉义.我国主要入海河流水沙变化分析[J].*水利学报*, 2007,38(12):1444-1452.
- [7] 彭涛,田慧,秦振雄,等.气候变化和人类活动对长江径流泥沙的影响研究[J].*泥沙研究*, 2018,43(6):54-60.
- [8] 府仁寿,虞志英,金镠,等.长江水沙变化发展趋势[J].*水利学报*, 2003(11):21-29.
- [9] 张金萍,张鑫,肖宏林.潼关水文站 1919—2015 年水沙演化特征研究[J].*水电能源科学*, 2018,36(11):112-115.
- [10] 文聘,沈冰,黄领梅.西安市降水变化趋势及 R/S 分析[J].*黑龙江大学工程学报*, 2011,2(4):21-26.
- [11] 肖洋,张汶海,张颖.赣江中下游近 60 年水沙时空分布特征[J].*水文*, 2014,34(6):86-92.
- [12] 刘剑宇,张强,邓晓宇,等.气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析[J].*湖泊科学*, 2016,28(2):432-443.
- [13] 穆兴民,李靖,王飞,等.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].*干旱区资源与环境*, 2003,17(2):1-5.
- [14] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等.基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J].*地理科学*, 2007,27(6):791-795.
- [15] 薛天翼,武旭同,朱晨怡,等.红水河流域输沙量变化及其影响因素[J].*地理科学进展*, 2009,38(5):772-782.
- [16] 许景锋,尹开霞,易灵,等.近 60 年来西江流域年输沙量变化特征分析[J].*人民珠江*, 2019,40(2):96-100.
- [17] 杨远东,王永红,蔡斯龙,等.1960—2017 年珠江流域下游径流年际与年内变化特征[J].*水土保持通报*, 2019,39(5):23-31.
- [18] Liu F, Hu S, Guo X J, et al. Recent changes in the sediment regime of the Pearl River (South China): Causes and implications for the Pearl River Delta[J]. *Hydrological Processes*, 2018,32(12):1771-1785.
- [6] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. California, USA: American Meteorological Society, 1993.
- [7] 薛德强,王建国.山东省的干旱化特征分析[J].*自然灾害学报*, 2007,16(3):60-65.
- [8] 张磊,潘婕,陶生才,等.基于标准化降水指数的近 51 a 山东省临沂市旱涝时空特征[J].*干旱气象*, 2013,31(4):695-701.
- [9] 高西宁,徐庆喆,丛俊霞,等.基于标准化降水指数的辽宁省近 54 年干旱时空规律分析[J].*生态环境学报*, 2015,24(11):1851-1857.
- [10] 王媛媛,张勃.基于标准化降水指数的近 40 a 陇东地区旱涝时空特征[J].*水土保持研究*, 2013,27(12):2135-2144.
- [11] 李伟光,陈汇林,朱乃海,等.标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J].*中国生态农业学报*, 2009,17(1):178-182.
- [12] 袁文平,周广胜.标准化降水指标和 Z 指数在我国应用的对比分析[J].*植物生态学报*, 2004,28(4):523-529.
- [13] 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.
- [14] 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/T20481—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [15] 杨晓静,左德鹏,徐宗学.基于标准化降水指数的云南省近 55 年旱涝演变特征[J].*资源科学*, 2014,36(3):473-480.
- [16] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J].*农业工程学报*, 2010,26(7):50-59.

(上接第 154 页)