

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180268

# 青岛市气象和水文干旱变化特征分析

罗志文<sup>1,2</sup>, 王小军<sup>2,3</sup>, 尹义星<sup>1</sup>, 柯杭<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 江苏 南京 210044;

2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:**利用青岛市气象和天然径流资料,借助极端降水指数、气象和水文干旱指数,采用回归分析、相关分析和 ARCGIS 空间分析等方法对该市气象和水文干旱的变化特征进行分析。主要结论为:(1)青岛市无雨日数明显增多,降水量则呈减少的趋势;最大连续无雨日数(pxcd)和平均干旱期长度(pdsav)的上升在西部地区大于东部地区,而降水量(preptot)的下降在东部地区大于西部地区。(2)气象干旱指数 SPI 和水文干旱指数 SSI 均表明青岛市干旱呈加剧特征;SSI 所反映的旱涝发生频次少于 SPI,但持续时间大于 SPI,尤以 1 个月和 3 个月尺度更明显。(3)干旱指数与历史旱灾面积的相关性较好,其中水文干旱指数与成灾面积的相关性更强,而气象干旱指数与受灾面积的相关性更强。此外,由于干旱的累积效应,在降水并不十分稀缺的年份,造成的局部旱情亦十分严重。

**关键词:**降水指数;干旱指数;干旱;时空变化;青岛

**中图分类号:**P457.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2019)05-0084-07

近年来,极端干旱事件频发,造成的社会危害不断加大。IPCC 发布的评估报告指出,全球范围内干旱事件的影响范围将进一步扩大<sup>[1]</sup>。通常,干旱主要分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱。气象干旱是指某时间段内,因蒸发量和降水量收支不平衡而造成水分短缺现象;水文干旱则是指天然降水、河川径流或地下水平衡所造成的水分短缺现象。气象干旱指数 SPI 和水文干旱指数 SSI 简便易行,又能很好的反映区域的干旱状况及发展趋势,因此在国内外应用广泛。周扬等<sup>[2]</sup>采用标准化降水指数(SPI)作为干旱指标,分析了内蒙古地区年度和四季干旱发生的频率、干旱强度和站次比的演变特点。蒋忆文等<sup>[3]</sup>研究表明,SPI 和水文干湿指数都对干旱反应灵敏,均能较准确的发现和评价干旱。Liu 等<sup>[4]</sup>利用标准化降水指数(SPI)、帕尔默干旱指数(PDSI)和标准化径流指数(SSI)对俄克拉荷马州的蓝河盆地进行干旱预测。Hayes 等<sup>[5]</sup>利用 SPI 和 PDSI 对美国南方平原和西南部 1996 年的干旱

进行监测,发现 SPI 比 PDSI 至少提前一个月监测到干旱的发生。

青岛市是山东省经济中心,近年来该市连续发生的极端干旱事件引发社会广泛关注。以往大多研究侧重于干旱指数的分析,较少结合极端降水指数进行研究;同时,与实际干旱灾情的对比和分析也较少。基于此,本文借助“STARDEX”项目中的极端降水指数、气象干旱指数 SPI 和水文干旱指数 SSI,采用 ARCGIS 空间分析、相关和回归分析等方法讨论青岛市极端降水指数和干旱变化的时空特征,进一步与该市历年干旱受灾和成灾面积进行对比,讨论不同干旱指数在当地的适用情况,进而为水资源管理与配置提供参考。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

本文选取青岛市 7 个气象站点和 2 个主要水文

收稿日期:2018-07-22

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0403506);国家“万人计划”青年拔尖人才支持计划;中国工程院重大咨询项目专题(2016-ZD-08-05-02);中央财政水资源节约、管理与保护项目(126302001000150001;126302001000150005)

作者简介:罗志文(1994-),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事水文气象方面的研究。E-mail: luozhiwen567@163.com

通讯作者:尹义星(1974-),男,安徽马鞍山人,博士,副教授,研究方向为水文气象学。E-mail: yxyxrosby@126.com

控制站点的资料,站点分布见图1。气象数据为国家气象信息中心提供的逐日降水资料,序列长度为1961~2015年。水文数据为逐月天然径流数据,序列长度为1961~2000年。

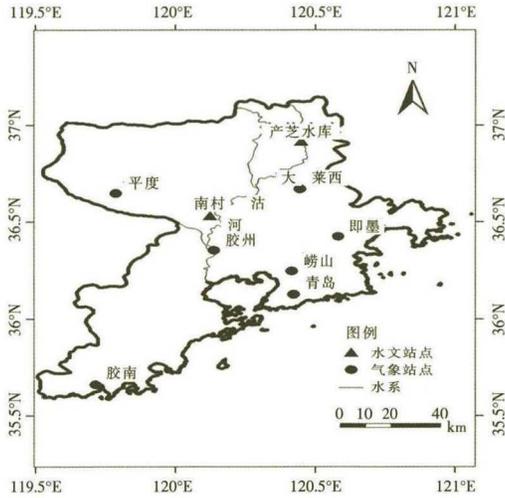


图1 青岛市气象站和水文站分布图

Fig.1 The distribution of the meteorology and hydrometry stations in Qingdao City

## 1.2 方法

### 1.2.1 极端降水指数

“STARDEX”项目全名 Statistical and Regional Dynamical Downscaling of Extremes,专门用于研究极端气候事件变化特征,该项目基于日降水和气温数据提出了57个极端气候指数,可用于极端高温、低温和干旱、极端降水等方面的研究。本文借助该项目中的pxcdd(最大连续无雨日数)和pdsav(平均干旱期长度)指数来分析干旱的特征。pxcdd是指降水量小于或等于某个降水阈值的最大连续日数,本文定义阈值为0mm。pdsav是指某时段干旱期(即无雨日)长度的平均值。此外,本研究中增加preptot指数(总降水量),与pxcdd、pdsav进行对比分析。

### 1.2.2 气象干旱指数SPI和水文干旱指数SSI

无雨日数(包括pxcdd和pdsav指数)可以在一定程度上反映干旱,而水文干旱与气象干旱有很大的联系。因此,在无雨日变化特征分析的基础上,本文还对气象干旱指数SPI和水文干旱指数SSI进行分析,计算方法详细见文献[6]。本文涉及的SPI-3(SI-3)和SPI-12(SI-12)是对连续3个月和12个月的数据滑动计算该时段水分的亏缺状况,进而得到干旱指数。对SPI和SSI采用相同的干旱分级,见表1。

表1 SPI和SSI的干旱等级

Table1 The drought classification of the SPI and SSI

	特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱
SPI(SI)	<-2	<-1.5	<-1	<-0.5	≥-0.5

## 2 结果与分析

### 2.1 降水指数变化的时间特征

青岛市降水指数时间变化见图2。可以看出,pxcdd和pdsav都呈上升趋势,其中pxcdd的线性倾向率为 $0.68d \cdot 10a^{-1}$ ,1988年为最大值,为60.4d,最小值出现在1974年,为18.0d;pdsav的线性倾向率为 $0.17d \cdot 10a^{-1}$ ,在0.05显著性水平下存在显著趋势。其最大值为1988年的8.9d,最小值为1964年的5.1d。preptot的年际变化有下降,线性倾向率为 $-21.3mm \cdot 10a^{-1}$ 。其最大值为1340.4mm,出现在1964年;最小值为313.8mm,出现在1981年。可见,无雨日数较大值的年份通常是降水量较小值的年份,因此容易发生干旱。

从年代平均值变化可知,pxcdd和pdsav的变化类似,大致都呈上升-下降-上升的变化,pdsav在1980年代达到最大值,pxcdd在1990年代达到最大值。preptot呈下降-上升-下降的变化。preptot在1980年

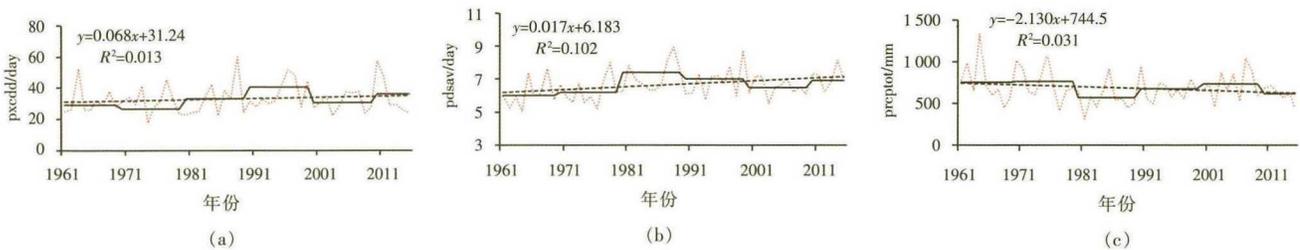


图2 青岛市极端降水指数的时间变化

Fig.2 The temporal changes of the extreme precipitation indices in Qingdao City

代最小,降水量仅 563.4mm。

### 2.2 降水指数变化的空间特征

计算各站点降水指数的线性趋势,采用 ARCGIS 空间分析方法,得到 pxcdd、pdsav、prcptot 线性趋势的空间分布图,如图 3(a)、(b)、(c)所示。

图 3 (a) 中,pxcdd 年序列除胶州站有下降趋势外,其他站点均为上升趋势。总体上看,上升程度西部大于东部。在季节分布上,除青岛站春季有下降趋势外,各站点春季、夏季和秋季均有上升趋势,上升程度西部大于东部。图 3(b)中,各站点 pdsav 的年序列均有上升趋势,上升程度西南大于东北。季节上各站点春季、夏季和秋季均为上升趋势。图 3(c)中,prcptot 指数年序列所有站点都呈下降趋势,下降程度东部大于西部。季节上,除即墨站的春季和平度、莱西站的冬季呈下降趋势外,其他站点春季和冬季均为上升趋势,但不明显。除胶南站秋季外,各站点夏季、秋季均呈下降,且比较明显。

### 2.3 气象和水文干旱指数变化特征

#### 2.3.1 气象干旱指数 SPI 变化特征

利用青岛市气象站点逐月降水资料,计算各站点逐年和逐季的 SPI 值,进行 SPI 变化分析。本节中,年

SPI 采用 1~12 月的 SPI-12,春季、夏季、秋季和冬季的 SPI 分别采用 3~5 月、6~8 月、9~11 月、12~次年 2 月的 SPI-3。下文中年和季节 SSI 的计算方法与此相同。

图 4 为青岛市平均年气象干旱指数的变化。可见,SPI 有下降,其线性倾向率为 $-0.09 \cdot 10a^{-1}$ 。1961~2015 年不少年份出现干旱,其中 1968、1977、1983、1988、2002 和 2015 年达到中旱等级,1981 年达到特旱等级,没有出现重旱情况。

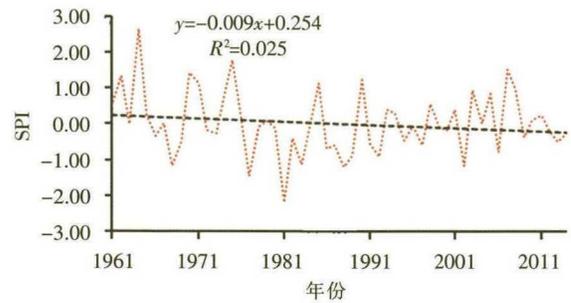


图 4 青岛市平均年气象干旱指数 SPI 的变化

Fig.4 The variation of the average annual meteorological drought indices SPI in Qingdao City

图 5 为青岛市 SPI 的季节特征。可知,春季和冬季有上升趋势(向涝发展),夏季和秋季有下降趋势(向

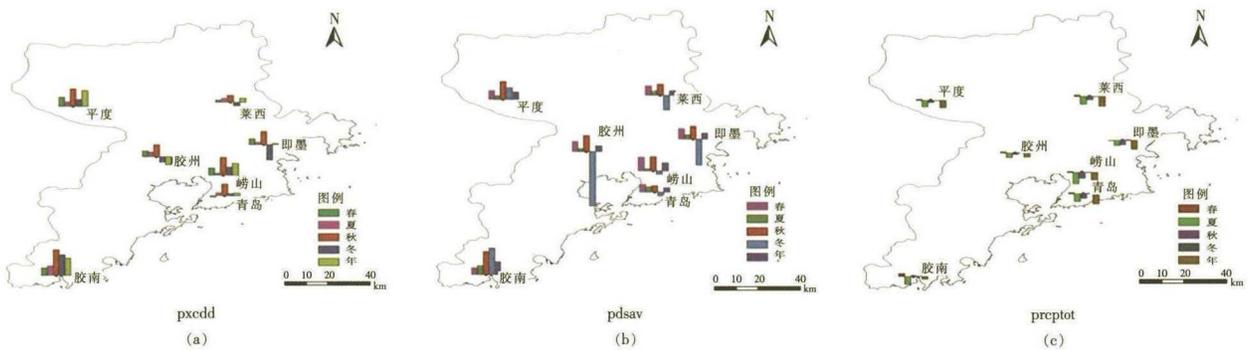


图 3 青岛市极端降水指数的趋势空间分布图

Fig.3 The spatial distribution of the trend of the extreme precipitation indices in Qingdao City

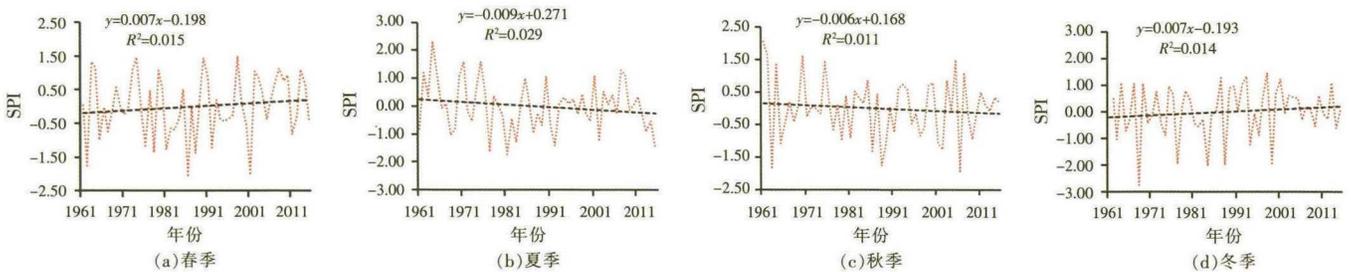


图 5 青岛市平均季节气象干旱指数 SPI 的季节特征

Fig.5 The seasonal variation of the average meteorological drought indices SPI in Qingdao City

干旱发展);中旱以上的频次,四季发生相似,均介于7~9次。对重旱等级,春季和冬季发生1次,夏季和秋季发生3次;对特旱等级,冬季发生次数最多,发生了4次。

### 2.3.2 水文干旱指数 SSI 变化特征

图6为青岛市1961~2000年平均年水文干旱指数的变化。可见,两个站点的SSI均有下降趋势(产芝水库站在0.05显著性水平下存在显著趋势,南村站不显著),表明干旱状况在加剧。从年变化来看,产芝水库站有7a达到了中旱,1968年达到了特旱,没有重旱;南村站则有4a到达了中旱,其中有2a为重旱,1968年达到了特旱。

图7为南村站四季SSI的变化图(产芝水库站图略)。结果表明,南村站和产芝水库站的夏、秋、冬季SSI均为下降趋势(即向旱发展),均在0.01显著性水平下存在显著趋势。在春季,两站SSI的下降和上升均非常微弱。从干旱的发生频率来看,1961~2000年,各季节的中旱发生次数约4~7次;重旱等级,南村站春季发生4次,其他季节发生约0~2次;特旱等级,产芝水库站春季发生2次、南村站冬季未发生,而其他季节

均为1次。

### 2.3.3 气象和水文干旱指数的关系

以青岛气象站和南村水文站为例,对比SPI和SSI在不同时间尺度下的变化特征,如图8所示。可见,SSI所反映的旱涝发生频次少于SPI,但持续时间大于SPI,该现象在1个月和3个月尺度上十分明显,这可能是由降水和径流数据的特性差异引起。由于流域具有一定的调蓄功能,基于径流数据计算的SSI指数,受流域调蓄、前期径流特征的影响较大。另一方面,1个月、3个月和12个月尺度下SSI在1960年代和1970年代初期所反映的旱涝均比SPI严重,后期则不明显。这可能是因为青岛市从1960年代开始逐渐建设一些大中型水库,初期水库调节能力不足,但随着更多大中型水库的运行,基于SSI计算的旱涝状况得到一定程度的缓解。

针对青岛市各气象站点年SPI和水文站点年SSI(下同),计算其相关系数,结果见表2。可见,SPI与SSI的相关系数均大于0.50,均在0.01显著性水平下存在显著趋势,即各气象站点SPI和水文站点SSI有很好的相关性。

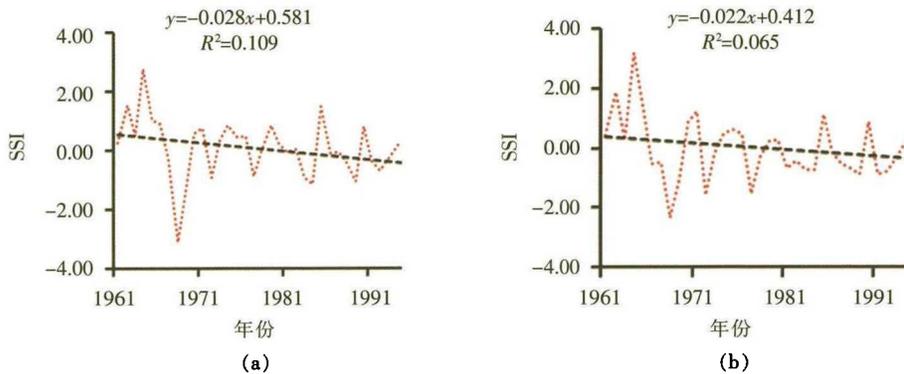


图6 青岛市平均年水文干旱指数的变化 (a)产芝水库站;(b)南村站

Fig.6 The variation of the average annual hydrological drought indices SSI at the Chanzhi reservoir station and Nancun station in Qingdao City

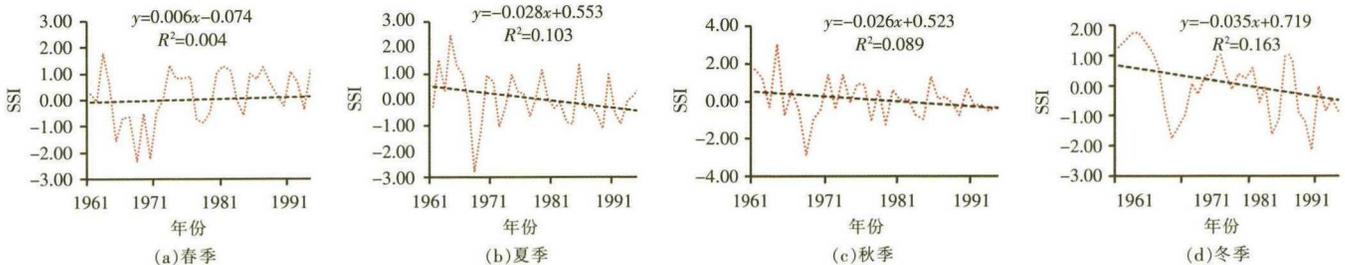


图7 青岛市南村站水文干旱指数的季节特征

Fig.7 The seasonal variation of the hydrological drought indices SSI at the Nancun station in Qingdao City

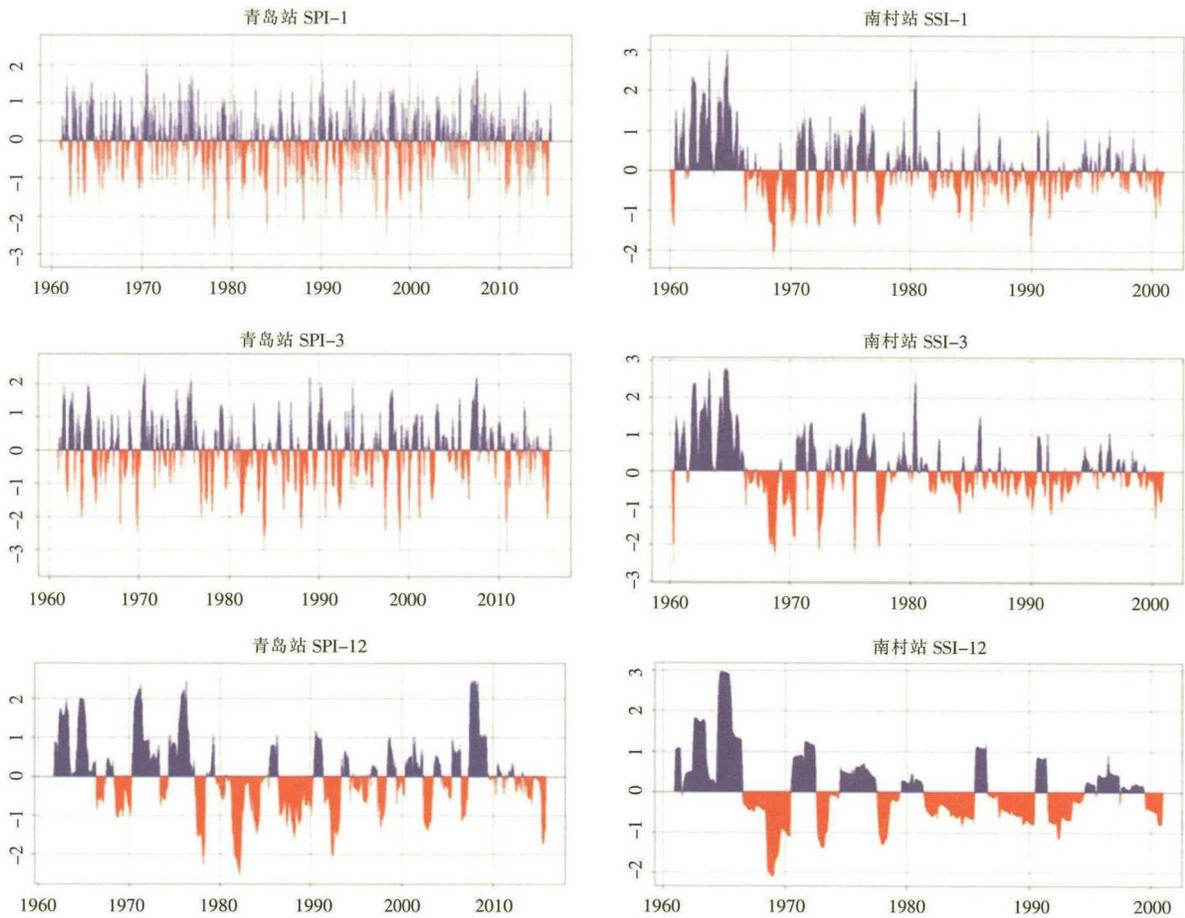


图8 不同时间尺度的青岛站 SPI 指数和南村站 SSI 指数

Fig.8 The SPI and SSI at the Qingdao and Nancun stations respectively at the different time scales

表2 青岛市各气象站点SPI与水文站点SSI的相关系数

Table2 The correlation coefficients between SPI at the meteorological stations and SSI at the hydrological stations in Qingdao City

站点	平度站	胶州站	莱西站	崂山站	即墨站	青岛站	胶南站
产芝水库站	0.69	0.57	0.69	0.56	0.58	0.51	0.50
南村站	0.80	0.74	0.81	0.69	0.73	0.67	0.68

类似地，分别对青岛市各气象站点 SPI 和水文站点 SSI 进行线性拟合，其中 SPI 为自变量, SSI 为因变量。以青岛站为例, 线性拟合见图 9。可见, SPI 与 SSI 的散点分布比较集中, 其判决系数分别达到 0.26 和 0.45。另外, 莱西站 SPI 和南村站 SSI 的拟合优度最大, 其判决系数达到了 0.67, 胶南站 SPI 和产芝水库站 SSI 拟合优度最小, 但判决系数仍达 0.25, 因此, 各气象站点 SPI 和水文站点 SSI 拟合程度较好, 表明青岛市 SPI 与 SSI 存在较好的线性相关。

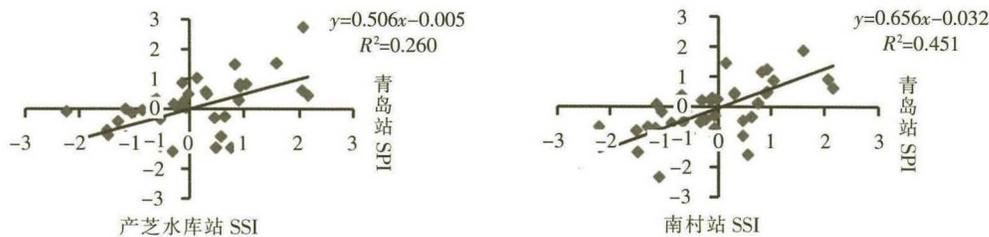


图9 青岛站 SPI 与水文站 SSI 的线性拟合图

Fig.9 The linear fitting of SPI at the Qingdao station and SSI at the hydrometry stations

2.4 历史干旱与干旱指数的相关分析

根据青岛市 1961~1990 年的旱灾受灾面积和成灾面积变化<sup>[4]</sup>(见图 10),分析其与 SPI 和 SSI 的关系。可以看出,1968、1981、1982、1983 和 1988 年的旱灾灾情最严重。

表 3 为青岛市旱灾面积与各干旱指数的相关系数。可见,SSI 和 SPI 与旱灾面积均有较显著的负相关,均在 0.01 显著性水平下存在显著趋势。同时,SSI 与成灾面积的相关性强于与受灾面积的相关性,SPI 与受灾面积的相关性强于与成灾面积的相关性。即水文干旱指数与成灾面积的相关性更强,气象干旱指数与受灾面积的相关性更强。分析其原因,可能是因为

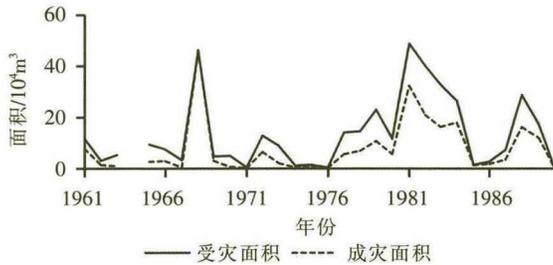


图 10 青岛市 1961~1990 年旱灾受灾面积和成灾面积变化

Fig.10 The changes of the drought disaster area and disaster-stricken area in Qingdao City during 1961-1990

降水短缺造成农作物受灾,但是否成灾,还与区域水资源条件及河湖、水库的蓄水特征有关,如果河湖、水库蓄水较丰富,水资源条件良好,则成灾面积并不一定很大。

根据旱灾受灾面积和成灾面积情况,选取干旱最严重的五年,与相应年份的干旱指数进行对比,结果见表 4。可见,各站 SSI 和 SPI 基本均达到干旱级别,轻旱、中旱、重旱和特旱各出现 10 次、12 次、7 次、6 次。因此,SSI 和 SPI 与干旱受灾面积具有很好的对应关系。产芝水库站 SSI 指数的表征能力较弱,可能与该站位于上游地区有关。1982 和 1983 年的情况比较特殊,1982 年的受灾面积在历年排第三位,但两个水文站的 SSI 指数均未反映出干旱,5 个气象站的 SPI 指数也未反映出干旱;1983 年的受灾面积排在第四位,其 SSI 和 SPI 指数反映的干旱也不甚显著。其原因可能与干旱的累积效应有关,由于 1981 年干旱特别严重,河湖与水库等的蓄水十分短缺,因而在 1982 和 1983 年降水并不特别稀缺的情况下,造成的旱情亦十分严重。

3 结论

(1)降水指数。年际特征上看,青岛市的无雨日数

表3 青岛市旱灾面积与干旱指数的相关系数

Table3 The correlation coefficients between the drought disaster area and the drought indices in Qingdao City

旱灾面积	SSI					SPI			
	产芝水库站	□南村站	□平度站	□胶州站	□莱西站	崂山站	即墨站	青岛站	胶南站
受灾面积	-0.58	-0.58	-0.72	-0.55	-0.67	-0.60	-0.66	-0.62	-0.65
成灾面积	-0.68	-0.61	-0.66	-0.56	-0.61	-0.52	-0.57	-0.55	-0.56

表4 青岛市典型干旱年份的气象和水文干旱指数

Table4 The SPI and SSI of Qingdao City in typical drought years

年份	SSI					SPI			
	产芝水库站	□南村站	□平度站	□胶州站	□莱西站	崂山站	即墨站	青岛站	胶南站
1968	-3.12***	-2.35***	-1.30*	-1.74**	-1.25*	-0.91+	-1.09*	-1.10*	-0.93+
1981	-0.07	-0.68+	-2.66***	-1.98**	-1.90**	-2.34***	-2.60***	-2.23***	-1.78**
1982	0.02	-0.41	-0.48	0.20	-1.00*	-0.53+	-0.40	-0.22	-0.48
1983	-0.92+	-0.72+	-1.46*	-0.26	-0.99+	-1.13*	-1.34*	-1.17*	-1.56**
1988	-0.41	-0.69+	-1.58**	-1.10*	-0.88+	-0.77+	-1.16*	-1.30*	-1.64**

注:“+”为轻旱;“\*”为中旱;“\*\*”为重旱;“\*\*\*”为特旱。

呈较明显上升,而降水量却有下降。空间变化上看,pxcdd和pdsav在西部地区的增加大于东部地区,而prcptot在东部地区的下降大于西部地区。

(2)气象和水文干旱指数。年际特征上,青岛市气象干旱指数SPI和水文干旱指数SSI均有下降趋势。SSI所反映的旱涝事件在发生频次上低于SPI,但是其持续时间大于SPI,其中以1个月和3个月尺度更显著。SSI与旱灾成灾面积的相关性更强,SPI则与干旱受灾面积的相关性更强;此外,由于干旱的累积效应,在降水并不特别稀缺的年份,造成的干旱受灾和成灾面积也可能十分严重。

#### 参考文献:

- [1] 水利部应对气候变化研究中心. 气候变化权威报告—IPCC报告[J]. 中国水利, 2008,(2):38-40. (Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources. Authoritative report on climate change: IPCC report [J]. China Water Resources, 2008,(2):38-40. (in Chinese))
- [2] 周扬,李宁,吉中会,等. 基于SPI指数的1981~2010年内蒙古地区干旱时空分布特征[J]. 自然资源学报, 2013,28(10):1694-1706. (ZHOU Yang, LI Ning, JI Zhonghui, et al. Temporal and spatial patterns of droughts based on standard precipitation index (SPI) in Inner Mongolia during 1981-2010 [J]. Journal of Natural Resource, 2013,28(10):1694-1706. (in Chinese))
- [3] 蒋忆文,张喜凤,杨礼箫,等. 黑河上游气象与水文干旱指数时空变化特征对比分析[J]. 资源科学, 2014,36(9):1842-1851. (JIANG Yiwen, ZHANG Xifeng, YANG Lixiao, et al. Analysis and comparison of spatial and temporal patterns of meteorological and hydrological drought indices in the upper reach of the Heihe river watershed, northwest China [J]. Resources Science, 2014,36(9):1842-1851. (in Chinese))
- [4] Liu L, Hong Y, Bednarczyk C N, et al. Hydro-climatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: a case study in blue river basin, Oklahoma [J]. Water Resources Management, 2012,26(10):2761-2779.
- [5] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999,80(80):429-438.
- [6] 袁旭琦,赵雪花. 基于年径流的水文干旱指标研究[J]. 中国农村水利水电, 2014,(9):115-117. (YUAN Xuqi, ZHAO Xuehua. Hydrological drought index based on annual runoff [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014,(9):115-117.(in Chinese))
- [7] 山东省水利厅水旱灾害编委会. 山东水旱灾害[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. (Flood and Drought Disaster Compilation Committee of Shandong Water Resources Department. Floods and Droughts in Shandong Province [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1996. (in Chinese))

## Characteristics of Meteorological and Hydrological Drought Change in Qingdao City

LUO Zhiwen<sup>1,2</sup>, WANG Xiaojun<sup>2,3</sup>, YIN Yixing<sup>1</sup>, KE Hang<sup>1,2</sup>

(1. School of Hydrology and Water Resources Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Based on the daily precipitation data, the monthly natural runoff data, the extreme precipitation index and the meteorological and hydrological drought indexes, this paper analyzed the change characteristics of the meteorological and hydrological drought in Qingdao City by applying the regression analysis, correlation analysis and ARCGIS spatial analysis methods. The results indicate that (1) The rainless days in Qingdao City have increased significantly, and the rainfall has a decreasing trend; The maximum consecutive drought days (pxcdd) and the mean length of drought period (pdsav) increase faster in the west than that in the east, while the total precipitation (prcptot) decrease faster in the east than that in the west. (2) The meteorological drought index (SPI) and the hydrological drought index (SSI) both indicate that the drought is intensifying; The occurrence frequency of flood and drought reflected by SSI was less than SPI, but the duration was longer than SPI, especially at the scale of 1 and 3 months. (3) The drought index has a good correlation with the historical drought area, among which the hydrological drought index has a stronger correlation with the drought-stricken area, while the meteorological drought index has a stronger correlation with the drought disaster area. In addition, due to the cumulative effects of drought, the drought situation can also be very severe when precipitation is not so scarce.

**Key words:** precipitation index; drought index; drought; temporal and spatial change; Qingdao City