

山东降水时空分布变化及其影响因素

徐泽华, 韩美, 张广彩, 姜小翠

(山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250000)

摘要:基于山东省 18 个气象台站 1981—2010 年 30 年逐日降水资料,利用反距离加权、Mann-Kendall 非参数检验法、皮尔逊相关系数和小波分析等方法,综合起来对 30 a 来山东地区降水的时空分布特征及其影响进行了研究。结果表明:空间分布上,泰山、日照和石岛地区为多雨区,年降水量达 740 mm 以上;莘县、惠民县和东营等地为少雨区,年降水量 500~550 mm。降水量沿海大于内陆,山区大于平原。时间分布上,年降水量呈现上升趋势,沿海地区降水上升幅度普遍大于内陆地区,其中威海上升幅度最大,高达 9.71 mm/a。分季节来看,春夏季和全年保持一致,降水呈上升趋势,秋冬季部分站点呈现下降趋势,其中秋季最为明显,东南沿海和鲁南地区出现大面积负值区。突变检验可以看出,在 1997 年左右山东年降水量有一次显著的突然上升的过程。分析表明,山东地区降水变化与南方涛动和东亚夏季风之间有相似的震荡周期,在空间上存在一定的响应关系,但存在明显的区域差异。

关键词:山东省;趋势分析;突变检验;小波分析

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0272-07

Spatiotemporal Distribution of the Precipitation and Its Impact Factors in Shandong Province

XU Zehua, HAN Mei, ZHANG Guangcai, JIANG Xiaocui

(School of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250000, China)

Abstract:Based on the daily precipitation data of 18 meteorological stations in Shandong Province from 1981 to 2010, Inverse Distance Weighted (IDW), Mann-Kendall nonparametric test method, Pearson correlation coefficient and wavelet analysis were used to comprehensive study the temporal and spatial distribution characteristics of precipitation in recent 30 years in Shandong. The results show that, with respect to spatial distribution, Taishan, Rizhao and Shidao region are the rainy areas, the annual rainfall is 740 mm or more; Shenxian, Huimin County and Dongying and other places are the less rainy areas, the annual rainfall in the 500~550 mm or so. Precipitation is greater in the coastal areas than that in the inland, it is greater in mountain than the plain. In the time distribution, the annual precipitation showed the upward trend, and the increase of precipitation in coastal areas was generally greater than that in inland areas, of which the largest increase was observed in Weihai, up to 9.71 mm/year. With respect to the seasons, the spring and summer are consistent with the whole year, the precipitation presented the rising trend, and the precipitation in some parts in the autumn and winter showed the downward trend, which was most obvious in autumn, a large negative value was found in the southeast coast and southern Shandong. The mutation test showed that there was the sudden increase in annual precipitation in Shandong in 1997. The analysis showed that the precipitation change in Shandong had the similar oscillation cycle with the southern oscillation and east Asian summer monsoon, and there was certain response in space, but there was an obvious regional difference.

Keywords:Shandong Province; trend analysis; mutation test; wavelet analysis

降水不仅是全球水循环中最重要因子之一,而且是一种能量的载体,通过潜热释放为驱动全球大气环流提供了3/4的能量。降水通过改变大气中水、热量再分布,对区域和全球的天气和气候产生重要的影响。因此,研究降水的空间分布和时间变化特征对全球水循环和大气环流具有重要的科学意义^[1]。在全球变暖的背景下,我国各区域降水变化存在明显的地域差异,东北北部、长江中下游的东南部地区和西部广大地区降水增加,而华北地区以及东北南部和西北东部地区降水明显减少,而减少最明显的区域是环渤海地带^[2]。近十几年来,夏季降水明显增加,尤其是长江中下游地区、华南地区和西北西部地区。而华北地区夏季降水减少趋势明显。段丽瑶等根据1961—2008年降水资料,利用EOF和REOF方法得到环渤海地区夏季降水存在明显的区域一致性^[3]以及年际和年代际变化特征,降水总体呈下降趋势。王绍武^[4]等利用重建的1880年以来中国东部35个站的四季降水量资料,研究了19世纪80年代到20世纪90年代中国年降水量的十年际变化特征。Ding et al^[5]用同样的资料研究了一百多年来中国东部不同地区华北、长江淮河流域以及华南夏季降水的年代变化特征及其与东亚夏季风的关系。陈隆勋等^[6]研究了近80年来中国气温和降水的年代际变化特征。我们过去的研究表明近一百多年中国东部不同区域降水发生年代际跃变的时期有所不同。徐宗学等^[7]利用M-K法分析了山东14个气象站1958—2008年气温和降水的变化,表明除济南降水量呈略微上升趋势外,其余地区的降水倾向率均为负值。杨士恩等^[8]应用1961—1998年的山东省40个代表站夏季降水资料,分析了山东夏季降水特征,得出山东夏季降水呈现出整体一致性,即降水的同多(同少)型。在总体一致的趋势下还有明显的东、西差异和南、北差异,存在3.8年震荡周期,并且在1978年出现了一次降水突变。迟竹萍^[9]利用1961—2005年山东省26个气象站逐日降水资料,分析了山东夏季降水量、雨日和暴雨日数特征,表明,山东夏季降水大部分地区为减少趋势,暴雨日降雨强度的变化与夏季降水量的减少关系更为密切;夏季降水量、暴雨日降雨强度和旱涝年有明显的年代际变化特征。

山东省位于中国东部地区,年内降水时空分布受海陆位置及区域内地形地貌特征的影响而差异明显。山东主要的自然灾害是旱涝灾害,在60年代,山东省发生了很多洪灾,80年代降雨量偏少,发生了严重干旱灾害,1990年代则旱涝灾害交替出现,21世纪以来,不断出现洪涝等自然灾害。当地人民的生命财产

安全、地方经济受到旱涝灾害的严重影响。为减少损失,我们要进一步研究旱涝等自然灾害产生和加重的原因,降水量年内的不均匀性分配是产生旱涝灾害事件的重要原因之一。以前学者对山东降水特征的研究多集中于降水日数和降水量的时空变化特征上,很少有关于降水量年内非均匀性分配特征方面的分析,所以,从定量角度分析某个地区降水事件的不均匀性特征有着深远意义。

1 研究区概况

山东省位于我国东部、黄渤海之间,泉城济南是其省会。面积15.7万 km^2 ,南北最长距离大约420 km,东西最宽700余 km。地域东面紧邻黄渤海,西面连接内陆。水平地域由半岛和内陆两大块组成,东部的半岛位于黄海、渤海之间,与辽东半岛隔着一个渤海海峡,西面内陆地区与河北、河南、安徽、江苏4省自北向南依次接壤,是中国重要的农产区。平原、洼地约占全省面积的65%,山地、丘陵约占35%。平原有鲁西、北平原和胶莱平原,山地丘陵包括鲁中南低山丘陵和胶东低山丘陵两部分。山东生物资源种类多、数量大,以北温带针、阔叶树种为主。山东省属暖温带季风气候,降水集中,雨热同季,容易发生洪涝灾害且年降水量主要集中在夏季;春季、秋季和冬季节是少雨季节,春季降水特别稀少,旱灾频发^[10]。

2 数据与方法

2.1 数据及来源

本研究气象数据来自各省、市、自治区气候资料处理部门逐月上报的《地面气象记录月报表》的信息化资料。资料数据集全称为中国地面气候资料日值数据集。从此数据集中选用1981—2010年山东省18个地面气象观测站的逐日降水量的实测资料。

南方涛动指数来源于中国气象局国家气候中心,东亚夏季风指数来源于李建平研究员的主页,资料序列均为1981—2010年,其中,东亚夏季风指数选用6—8月均值,指数越大,夏季风越强;反之,夏季风越弱。南方涛动指数选用相应月均值对应不同的季节,指数出现持续正值,该年有拉尼娜现象;反之,该年有厄尔尼诺现象^[11]。

2.2 研究方法

首先,采用Mann-Kendall方法对山东降水进行趋势分析,Mann-Kendall检验中样本不需要遵循一定的分布,也不会受到极少数异常值的影响,在水文、气象等非正态分布的数据中有很大的适用性,具有计算方便等特点。

在 Mann-Kendall 检验中,原假设 H_0 为时间序列数据 (X_1, \dots, X_n) , 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本;备择假设 H_1 是双边检验,对于所有的 $k, j \leq n$, 且 $k \neq j$, X_k 和 X_j 的分布是不一样的,检验的统计量 S 计算如下式:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(X_j - X_k) \quad (1)$$

$$\text{Sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} +1 & (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & (X_j - X_k) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

S 为正态分布,其均值为 0,方差 $\text{var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。当 $n > 10$ 时,标准的正态系统变量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

双边的趋势检验中,在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设是不可接受的,即在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计量 Z ,大于 0 时是上升趋势;小于 0 时是下降趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时,分别表示通过了信度 90%, 95%, 99% 的显著性检验。

为了检验序列的趋势,需要计算单调趋势的大小-Kendall 倾斜度,即单位时间内的变化量,以此来量化单调趋势^[12],其计算公式:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{X_i - X_j}{i - j}\right), V_j < i \quad (4)$$

式中: $1 \leq j < i \leq n$, 当 β 值为正时表示上升趋势,当 β 为负时,表示下降趋势。

然后采用 Mann-Kendall 方法对山东降水进行突变检验,当 Mann-Kendall 检验用于检验序列突变时,通过构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^{i-1} a_{ij} \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (5)$$

$$\text{其中: } a_{ij} = \begin{cases} 1 & X_i > X_j \\ 0 & X_i < X_j \end{cases} \quad 1 \leq j \leq i \quad (6)$$

定义统计变量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

$$E(S_k) = k(K+1)/4; \text{var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (8)$$

UF_k 为标准正态分布,给定显著性水平 α ,若 $|UF_k| > U_\alpha/2$, 则表明序列的趋势变化很明显,我们可以将时间序列 x 按逆序排列,再按照(4)式计算,与此同时令

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

我们可以通过研究统计序列 UF_k 和 UB_k 进一步分析序列 x 的趋势变化,从而明确突变的时间,指出突变的区域位置。若 UF 值大于 0, 则表明序列呈上升趋势;若 UF 值小于 0, 则说明呈下降趋势;当它们超过临界直线时,说明上升或下降趋势很明显。如果 UF_k 和 UB_k 这两条曲线出现交叉点,且交点在临界直线之间,那么交点出现的时刻就是突变开始的时刻。

最后采用 Morlet 小波变换方法对山东降水和大尺度气候因子进行周期分析,对于给定的能量有限信号 $f(t) \in L^2(R)$, 其连续小波变换为^[13]:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (10)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为一个信号或平方可积函数; a 为伸缩尺度; b 平移参数; $\bar{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 的复共轭函数。地学中观测到的时间序列数据大多是离散的,设函数 $f(k\Delta t)$, $(k=1, 2, \dots, N)$; Δt 为取样间隔,则式(16)的离散小波变换形式为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (11)$$

通过增加或减小伸缩尺度 a 来得到信号的低频或高频信息,然后分析信号的概貌或细节,实现对信号不同时间尺度和空间局部特征的分析。本文研究中,由小波变换方程得到小波系数,然后通过这些系数来分析山东降水时间序列的时频变化特征。

3 结果与分析

3.1 降水空间分析

从图 1 可以看出,山东省降水量在空间分布上有以下几个特点:(1) 自东南向西北递减。泰山、日照和石岛地区为多雨区,年降水量达 740 mm 以上;莘县、惠民县和东营等地为少雨区,年降水量在 500~550 mm 左右。(2) 沿海多于内陆。沿海一带与其他地区相比,降水明显偏多,这主要是因为该区距离海洋较近,来自海上的东南气流受山列抬升,容易产生降水。因此,年降水量要多于内陆。(3) 山地多于平原。例如,鲁中南低山地区降水量要比鲁西北平原地区高出 100 mm 左右。

3.2 年降水序列趋势分析

山东多年降水量变化倾向率空间差异明显(图 2),全省降水都呈现上升趋势,平均上升幅度为 5.67 mm/a,济南、莒县、威海和青岛为降水上升中心,上升幅度都达到 8 mm/a 以上,潍坊、惠民、东营、泰山

和莘县为相对低值区,但降水上升幅度也可达到 2 mm/a。沿海地区降水上升幅度普遍大于内陆地区,其中威海上升幅度最大,高达 9.71 mm/a。

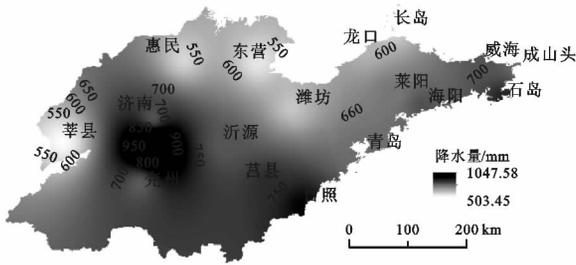


图 1 山东 30 a 平均降水量

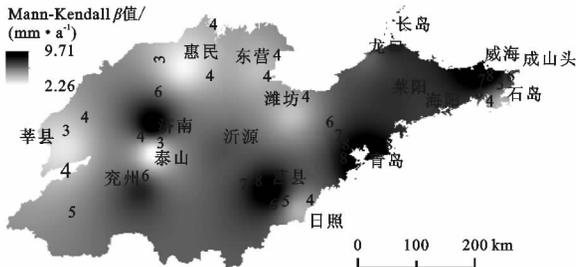


图 2 年降水量 Kendall 倾向率

山东 1981—2010 年降水量呈上升趋势(图 3), 1990 年年降水量出现最大值,为 997.6 mm。1981 年出现最小值,为 446.4 mm,极差为 551.2 mm,可见区域年际变化差异比较明显。研究区年降水量在 1995 年前基本为负距平,1995 年以后以正距平为主,表明自 1995 年以来降水量呈现明显上升趋势。

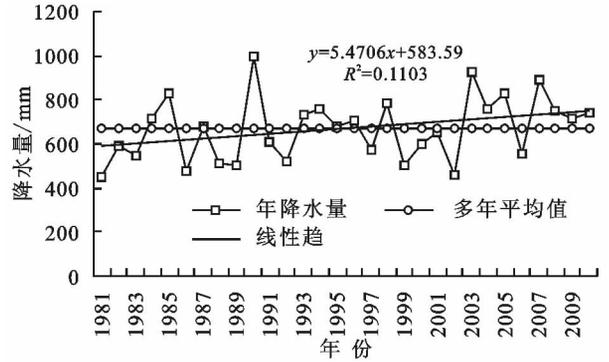


图 3 山东省 1981—2010 年降水变化

3.3 季降水序列趋势分析

从降水量变化倾向率的季节空间分布来看,各季节均存在明显的空间差异(图 4),春季,全省降水都呈现上升趋势,其中济南上升趋势最为明显,除济南外,降水上升幅度自东南沿海向西北内陆逐渐变小。夏季,全省降水都呈现上升趋势,平均上升幅度为 3.59 mm/a,莒县上升幅度最为明显。秋季,大部分站点呈现下降趋势,东南沿海一带及鲁南地区呈现大面积负值区,其中兖州下降幅度最大,为 1.65 mm/a,鲁中和鲁北地区呈现微弱上升趋势。冬季,潍坊、海阳、成山头、龙口和泰山表现出轻微下降趋势,其他地区呈现上升趋势,其中莒县上升趋势较为明显。总体上,除秋季外,其他季节山东降水量表现出上升趋势,以夏季上升趋势最为显著。

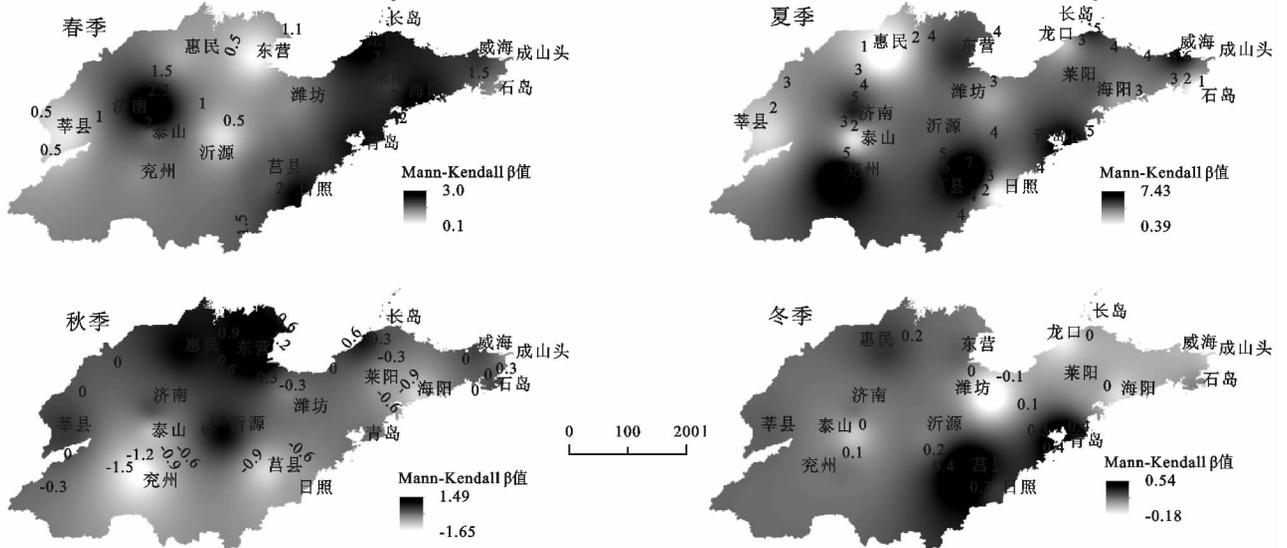


图 4 降水量 KENDALL 倾向率

3.4 突变检验

从图 5 年降水量的 Mann-Kendall 突变检验可以看出,在 1997 年山东年降水量有一次显著的突然上升的过程。运用 Mann-Kendall 突变检验对山东地区 18 个站点各个季节降水进行统计分析,可以看出山东地区 18 个站点降水变化过程中均存在突变现

象,但少数站点的某个季节没有发生突变现象,突变年份集中在 80,90 年代,少数站点在 21 世纪后发生突变(表 1)。分季节来看,春季除石岛和威海站没有发生突变外,其他站点都发生了突变,多数站点突变后呈现上升趋势,约占总站数的 56%,少数站点突变后呈现下降趋势,约占总站数的 33%。夏季各个站

点都发生了突变,大部分站点突变后呈现上升趋势。秋季除济南外,其他站点都发生了突变,相比于春夏季突变后呈现上升趋势的站点有所下降。冬季除莱阳、沂源、兖州、莒县和石岛外,其他站点都发生了突变,突变后以上升趋势为主。

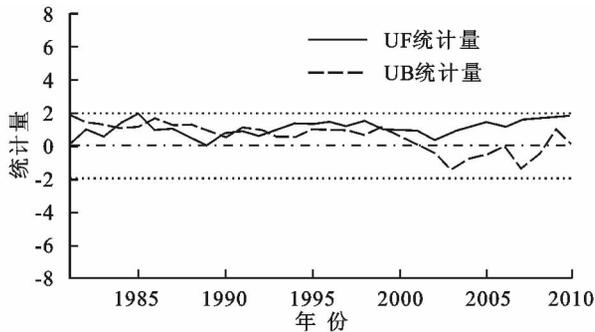


图 5 山东省年降水量 Mann-Kendall 突变检验

3.5 降水量与大气环流的相关性分析

3.5.1 降水量与南方涛动指数的相关性分析 近

30 a 降水量与同期南方涛动指数的相关系数(图 6)发现,各季节降水量与同期南方涛动指数的相关性存在明显的空间差异。春季除东营、龙口和青岛等少数沿海地区外,山东其他地区的降水量与同期南方涛动指数存在负相关,表明拉尼娜年山东大部分地区降水易偏少。夏季山东各个地区降水量都与同期南方涛动指数存在正相关,东南沿海、鲁西北平原和鲁西南地区这种正相关关系比较明显,鲁中山地地区相关性较弱,这可能与地形条件有关。秋季除东南沿海一侧,山东大部分地区降水量与同期南方涛动指数存在负相关,这可能与海陆位置有一定的关系。冬季山东各个地区降水量都与同期南方涛动指数存在负相关,从西南内陆到东北沿海负相关性有逐渐加大的趋势,其中潍坊地区与同期南方涛动指数存在明显的负相关,通过了 95% 的显著性检验,说明南方涛动指数的显著变化对该地区降水有明显影响。

表 1 山东省 18 个气象站四季降水突变检验

站点	春	突变年	趋势	夏	突变年	趋势	秋	突变年	趋势	冬	突变年	趋势
济南		2001	上升		1989	上升		无			2005	下降
青岛		2006	上升		1997	上升		1985	下降		1984	上升
潍坊		1991	下降		1984	上升		1989	上升		2007	下降
海阳		1993	下降		2001	上升		1994	下降		2008	下降
莱阳		1988	上升		1992	上升		1994	下降		无	
成山头		1988	上升		2004	上升		1993	下降		2006	下降
长岛		2004	上升		1985	下降		2007	下降		1998	下降
日照		1988	上升		1986	下降		1984	下降		1985	上升
沂源		1996	上升		2002	上升		1992	上升		无	
兖州		2001	上升		2005	上升		2003	上升		无	
东营		1991	下降		1989	上升		1991	上升		1989	上升
莒县		2001	上升		1989	上升		1987	下降		无	
石岛		无			1990	下降		2007	下降		无	
龙口		1990	下降		1985	下降		1989	上升		1988	上升
泰山		2001	上升		1996	下降		1987	下降		1988	上升
惠民县		1992	下降		1989	上升		1998	上升		1997	上升
威海		无			2003	上升		1993	下降		1989	上升
莘县		1991	下降		1986	上升		1985	下降		1999	上升

3.5.2 降水量与东亚夏季风指数的相关性分析 近 30 a 夏季和秋季降水量与东亚夏季风指数的相关系数(图 7)发现,东亚夏季风指数对同期夏季和后期秋季山东降水的影响在区域响应上存在明显差异,夏季除鲁中山地外,大部分地区与同期东亚季风指数存在负相关,而秋季除鲁西和东南沿海一侧,大部分地区与前期东亚夏季风存在正相关,不过相比夏季,秋季降水量对东亚夏季风指数变化的响应很弱,基本不存在滞后效应。

3.5.3 基于 Morlet 小波的降水量和气候因子的振荡特征 对山东省降水事件(区域平均值)和 2 个大

尺度气候因子(南方涛动和东亚夏季风)的时间序列进行 Morlet 小波分析,可以看出山东省降水量和 2 大尺度气候因子在不同时间段呈现出各种振荡周期。山东省年降水量存在 4 a、7 a 和 14 a 的变化周期,4 a 震荡周期在 30 a 中始终存在,7 a 震荡周期在 90 年代后期和 21 世纪 10 年代前期比较显著,14 a 震荡周期表现最为显著且振幅最强。南方涛动存在 6~7 a 和 7~8 a 的变化周期,6~7 a 震荡周期在 80 年代和 90 年代后期比较明显,7~8 a 震荡周期在 90 年代前期比较明显。山东夏季降水量在 80、90 年代存在较为显著的 4

a 震荡周期,7 a 震荡周期在 80,90 年代初期比较显著,14 a 震荡周期表现最为显著,贯穿整个时段。比较年、夏季降水量周期可见,两者高度相性,这亦与年降水量主要集中在夏季(汛期)有关^[44]。山东秋季降水量的 3 a 震荡周期在 80 年代和 21 世纪 10 年代中期比较显著,8 a 震荡周期在 80 年代后期和 90 年代初期以及 21 世纪 10 年代后期比较显著,11~12 a 震荡周期在

80 年代比较显著,15 a 震荡周期在 90 年代后期以来比较显著。东亚夏季风存在 4 a、7 a 和 12 a 的变化周期,4 a 震荡周期几乎存在整个时段,7 a 震荡周期在 80 年代和 90 年代前期较为显著,12 a 震荡周期在 90 年代后期和 21 世纪 10 年代前期较为显著。结果表明:山东降水量与大尺度的气候因子在一定的时段存在相似的振荡周期变化。

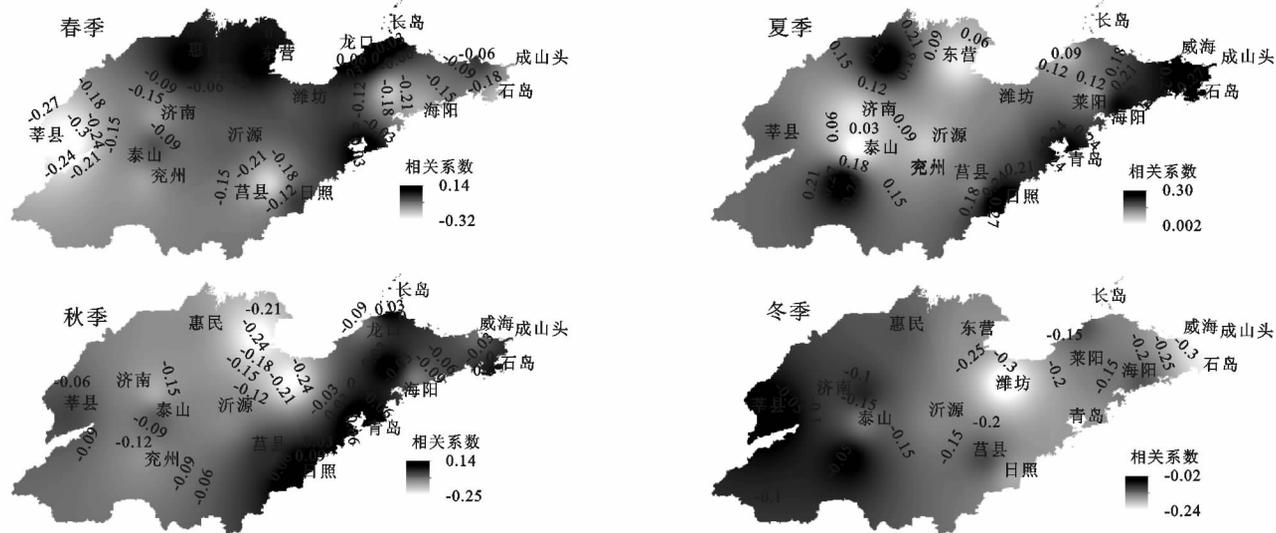


图6 山东省春季降水量、夏季降水量、秋季降水量、冬季降水量与同期南方涛动指数的相关系数

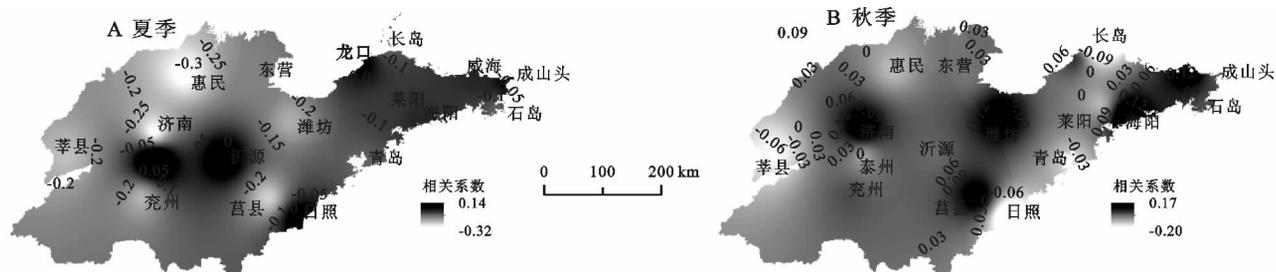


图7 山东省夏季降水量(A)和秋季降水量(B)与东亚夏季风指数的相关系数

4 结论与讨论

(1) 空间分布上,泰山、日照和石岛地区为多雨区,年降水量达 740 mm 以上;莘县、惠民县和东营等地为少雨区,年降水量在 500~550 mm 左右。泰山的年平均降水量达到了 1 046.5 mm,是全省降水最丰富的地方。受海陆位置和地形条件影响,降水量沿海大于内陆,山区大于平原。

(2) 近 30 a 年来,全省降水都呈现上升趋势,平均上升幅度为 5.9 mm/a,济南、莒县、威海和青岛为降水上升中心,潍坊、惠民、泰山、莘县和石岛为相对低值区,沿海地区降水上升幅度普遍大于内陆地区,其中威海上升幅度最大。分季节来看,春夏季和全年保持一致,降水呈上升趋势,秋冬季部分站点呈现下降趋势,其中秋季最为明显,东南沿海和鲁南地区出现大面积负值区。

(3) 在 1997 年左右山东年降水量有一次显著的突然上升的过程。山东地区 18 个站点降水变化过程中均存在突变现象,但少数站点的某个季节没有发生突变现象,突变年份集中在 80,90 年代,少数站点在 21 世纪后发生突变。不同站点不同季节突变现象呈现不同的特点。

(4) 近 30 a 年来,山东各季节降水量与同期南方涛动指数的相关性存在明显的空间差异,拉尼娜年,山东夏季降水易偏多,而冬季易偏少。近 30 a 年来,除鲁中山地外山东其他地区夏季降水量与东亚夏季风指数存在负相关,山东大部分地区秋季降水量则与东亚夏季风存在正相关。降水量序列 Morlet 小波分析发现山东省存在 4 a 和 7 a 的年际振荡周期特征,呈现了同大尺度气候因子相似的变化特征。

(5) 受气候背景、下垫面等因素的影响,不同区域降水时空变化区域差异明显,本文研究表明,近 30 a 山东省年降水量呈上升的趋势,但上升趋势不显著。山东

省全年降水量主要集中在夏季,春季和秋季为少雨季节,冬季则呈现干旱少雨的趋势。在区域分布上,沿海地区的降水量明显高于内陆地区。南方涛动和东亚夏季风通过影响东亚季风环流和太平洋副热带高压,对中国从沿海到内陆的气候产生不同程度的影响,对我国不同区域影响的程度、方式和结果也有较大差异^[15]。对山东降水作用的机理还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 杜振彩,黄荣辉,黄刚,等. 亚洲季风区积云降水和层云降水时空分布特征及其可能成因分析[J]. 大气科学, 2011,35(6):993-1008.
- [2] 任国玉,郭军,徐铭志,等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报,2005,63(6):942-956.
- [3] 段丽瑶,杨艳娟,李明财. 近 50 年环渤海地区夏季降水时空变化特征[J]. 高原气象,2013,32(1):243-249.
- [4] 王绍武,蔡静宁,朱锦红,等. 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国年降水量的年代际变化[J]. 气象学报, 2002,60(5):637-639.
- [5] Ding Y, Wang Z, Sun Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences[J]. International Journal of Climatology, 2008,28(9):1139-1161.
- [6] 陈隆勋,周秀骥,李维亮,等. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制[J]. 气象学报,2004,62(5):634-646.
- [7] 徐宗学,孟翠玲,赵芳芳,等. 山东省近 40 a 来的气温和降水变化趋势分析[J]. 气象科学,2007,27(4):387-393.
- [8] 杨士恩,王启, YANG Shi-en,等. 山东夏季降水的气候特征及其成因[J]. 热带气象学报,2007,23(1):65-71.
- [9] 迟竹萍. 近 45 年山东夏季降水时空分布及变化趋势分析[J]. 高原气象,2009,28(1):220-226.
- [10] 姜德娟,李志,王昆. 1961—2008 年山东省极端降水事件的变化趋势分析[J]. 地理科学,2011,31(9):1118-1124.
- [11] 王庆,马倩倩,夏艳玲,等. 最近 50 年来山东地区夏季降水的时空变化及其影响因素研究[J]. 地理科学, 2014,34(2):220-228.
- [12] 宋令勇,宋进喜,张文静. 西安地区降水时空分布及变化规律分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(1):85-89.
- [13] 桑燕芳,王中根,刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展,2013,32(9): 1413-1422.
- [14] 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.
- [15] 李芬,张建新,郝智文,等. 山西降水与 ENSO 的相关性研究[J]. 地理学报,2015,70(3):420-430.
- [19] 王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态经济系统耦合过程分析[J]. 应用生态学报,2009(11):2723-2729.
- [20] 欧阳志云,郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生态学报,2009,29(11):6183-6188.
- [21] 曹明宏,雷书彦,姜学民. 论生态经济良性耦合与湖北农业运作机制创新[J]. 湖北农业科学,2000(6):7-9.
- [22] Maslow A. Motivation and personality [M]. China Social Sciences Publishing House, 1999.
- [23] 王继军. 论水土保持中的几个经济问题[J]. 水土保持研究,1996,3(2):125-128.
- [24] 王继军. “退耕还林还草”的生态经济学基础[J]. 农业经济问题,2003,24(8):21-25.
- [25] 王全新,王千梅,时正新,等. 生态经济学原理[M]. 郑州:河南人民出版社,1988.
- [26] 李芬. 黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态安全评估[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [27] 王继军. 纸坊沟流域农业生态经济系统建设及其投入问题分析[J]. 世界科技研究与发展,2001,23(3):56-58.
- [28] 郭满才,王继军,彭珂珊,等. 纸坊沟流域生态经济系统演变阶段及驱动力初探[J]. 水土保持研究,2005,12(4):245-246.
- [29] 王继军,姜志德,连坡,等. 70 年来陕西省纸坊沟流域农业生态经济系统耦合态势[J]. 生态学报,2009,29(9):5130-5137.
- [30] 程序,刘国彬,陈佑启,等. 黄土高原小流域生态—经济重建模式的尺度概念和方法[J]. 应用生态学报,2004, 15(6):1051-1055.

(上接第 271 页)