

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.01.006

黄河三角洲地区降水时序变化特征研究

刘 健^{1 2} 林 琳^{1 2} 陈学群^{1 2} 管清花^{1 2}

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 2. 山东省水资源与水环境重点实验室, 山东 济南 250013)

摘要 : 基于黄河三角洲内 5 个气象站 1961—2007 年逐日降水资料, 采用 Mann-Kendal 非参数检验、小波分析等方法, 对近 50 年来黄河三角洲地区降水量时序变化特征进行研究。结果表明, 黄河三角洲地区近 50 年来, 年际和年内不同季节降水量均呈逐步下降趋势, 并在 1976 年左右发生突变, 之后降水量下降显著。年际降水存在约 8~9 年的主变化周期, 而春夏秋冬四季降水存在约 16~17 年的主变化周期。根据周期变化特征, 预测 2012—2014 年黄河三角洲地区将处于多水期, 其中秋季和冬季降水较多, 而春季和夏季降水较少。

关键词 : 黄河三角洲; 降水时序; 变化特征; 小波分析; Mann-Kendall 法

中图分类号 : P457.6 **文献标识码** : A **文章编号** : 1004-6933(2012)01-0022-07

Characteristics of variation of precipitation time series in Yellow River Delta

LIU Jian^{1 2}, LIN Lin^{1 2}, CHEN Xue-qun^{1 2}, GUAN Qing-hua^{1 2}

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Jinan 250013, China)

Abstract : Based on daily precipitation data measured at five meteorological stations in the Yellow River Delta from 1961 to 2007, the Mann-Kendall nonparametric test and wavelet analysis methods were used to analyze the characteristics of variation of the precipitation time series in the Yellow River Delta over the last 50 years. The results show that the inter-annual and seasonal precipitation in the area had a decreasing trend during the study period and changed abruptly around 1976, when the precipitation began to decrease significantly. The inter-annual precipitation had an eight to nine-year dominant cycle and the four seasonal precipitations had 16 to 17-year dominant cycles. According to the cycle characteristics, it can be predicted that there will be a period of abundant precipitation from 2012 to 2014 in the Yellow River Delta, and there will be more precipitation in autumn and winter and less precipitation in spring and summer.

Key words : Yellow River Delta; precipitation time series; variation characteristics; wavelet analysis; Mann-Kendall method

地理学上, 黄河三角洲是指 1855 年黄河改道后冲积的以利津县为顶点、北至徒骇河口、南至小清河口, 主体在东营市境内的呈扇状三角形的地区, 其面积约 5 450 km², 是我国最大的三角洲。黄河三角洲位于沿海开放地带, 经济发达, 人口密集, 是我国重要的石油生产基地, 也是我国具有战略发展意义的黄河三角洲高效生态经济区的重要组成部分, 经济地位特殊而重要^[1]。

黄河三角洲淡水资源短缺, 这是阻碍和制约当地经济社会发展的“瓶颈”。降水和黄河客水是黄河三角洲区域重要的淡水水源。在当前我国全面实行最严格水资源管理制度的大背景下, 黄河来水不稳定, 以及当地降水的变化, 对黄河三角洲地区经济社会的发展将产生重要的影响^[2]。国内外学者对黄河三角洲地区展开了一些研究工作。盖世民等^[3]和刘晋秀等^[4]利用 20 世纪 60—90 年代资料对黄河三

角洲地区的气候变化趋势和年际、夏季的降水变化特征进行了分析,但资料的时间序列较老。近年来,对降水的研究主要集中在对区域浅层地下水 and 气候生产力的影响方面^[2,5],而专门系统地针对黄河三角洲地区降水序列变化特征的研究较少。笔者以黄河三角洲区域内 5 个气象站 1961—2007 年逐日实测降水资料为基础,运用气象科学常用的计算和分析方法,分析近 50 年来黄河三角洲降水序列年际、年内变化特征。研究结果不仅有助于更好地了解区域对全球气候变化的响应过程,而且对区域水利工程建设规划、水资源季节调蓄,乃至对保障区域经济持续稳定发展和提高人民生活水平都具有重要的意义。

1 数据选择与研究方法

1.1 数据选择

本研究数据由中国气象局国家气候信息中心气候资料室提供,数据包括黄河三角洲地区 5 个气象站 1961—2007 年逐日降水资料。5 个气象站包括 1 个国家级气象站(东营站)、4 个省级气象站(广饶站、利津站、垦利站和河口站)。各气象站空间位置见图 1。

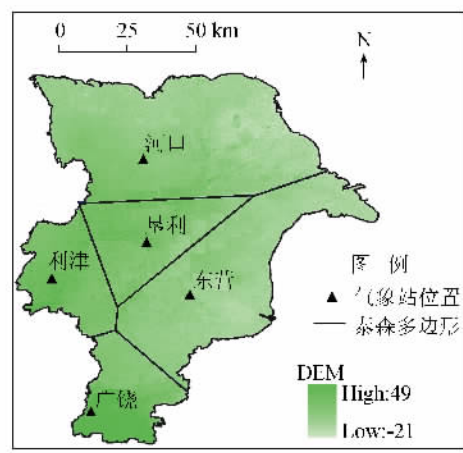


图 1 黄河三角洲 DEM 高程及气象站位置

5 个气象站逐日降水资料缺失率均在 0.87% 以下。对缺失的资料采用时间插值和空间插值两种方法进行插补处理^[6]。5 个气象站的逐日实测降水资料均采用 Von Neumann ration、Cumulative deviations 和 Bayesian procedures 3 种统计量方法进行均一性检验,结果表明均通过 95% 的置信度检验^[7-8]。

采用泰森多边形法(Thiessen method)对黄河三角洲地区 5 个气象站逐日面降水量数据进行处理,泰森多边形的划分见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 趋势与突变研究方法

本次研究对降水变化趋势和突变研究采用气象

计算中常用的曼-肯德尔法(Mann-Kendall,以下简称 MK 法)。MK 法通过构造正序列(UF)和逆序列(UB)进行计算,根据正逆序列统计量的曲线判断气象要素的变化趋势和突变特征。当正序列(UF)的值为正,表示序列呈上升趋势;当正序列(UF)的值为负,表示序列呈下降趋势。当正、逆序列统计量的曲线超过临界直线时,表示序列上升或下降趋势显著。如果正序列(UF)和逆序列(UB)两曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。MK 法是一种非参数统计检验方法,不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,比较适用于类型变量和顺序变量^[9-10]。

1.2.2 周期研究方法

对周期变化特征的研究采用小波分析法。小波分析法(wavelet analysis method)是一种信号处理方法,是傅里叶(Fourier)思想的延伸和拓展,其核心是小波变换。基于放射群的不变性,小波变换把一个时间序列分解为时间和频率两部分,从而分辨时间序列在不同尺度上的演变特征^[11-12]。小波分析的关键和难点是选择合适的基小波。与实型小波相比,复数小波更能真实反映时间序列各尺度周期性大小及其在时域中的分布,因此,本文选择比较常用的复 Morlet 小波作为基小波^[13]。复 Morlet 小波变换的实部和模是两个重要的变量,实部表示不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相信息,模表示特征时间尺度信号的强弱^[14-15]。

通过小波变换得到一个尺度-时间函数,若要从准确判断哪个尺度的周期对降水序列的变化起主要作用,需要借助小波方差来进行小波分析检验^[15]。

对于长度为 n 的离散时间序列,小波方差的计算公式为

$$V(a) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W^2(a, x_j) \quad (1)$$

式中: a 为尺度; x_j 为时间; $V(a)$ 为尺度 a 、时间 x_j 处的小波系数平方 $W^2(a, x_j)$ 的均值。

对于复小波系数, $W^2(a, x_j)$ 则为系数模的平方,小波方差的各个峰值分别对应显著周期^[16]。当小波系数达到最大值时,小波系数的尺度与序列周期吻合最好。

本研究周期变化特征采用数据为月时间尺度,为消除降水序列中季节变化及短期误差的干扰,需要对序列进行标准化处理:

$$R'_{ij} = \frac{(R_{ij} - \bar{R}_j)}{\sigma_j} \quad (2)$$

式中: R'_{ij} 为第 i 年 第 j 月的标准降水量; R_{ij} 为实测

第*i*年第*j*月的月平均降水量; $\bar{R}_j$ 、 σ_j 分别为第*j*月月降水量的均值和均方差^[14]。

2 降水年变化特征

根据气象站实测数据,黄河三角洲多年(1961—2007年)平均降水量为621.1 mm,且其降水量年际变化悬殊,年降水量的最大值与最小值的比值约为4.5。黄河三角洲地区1961—2007年年均降水量年代距平见表1。由表1可见,20世纪60年代和70年代黄河三角洲地区的降水量距平为正,说明该段时期内降水量偏多,而进入80年代以后,降水量距平为负,说明该段时间降水量偏少。其中80年代降水量最少,其距平百分比达-31.93%。进入90年代和21世纪,降水量距平虽然仍为负值,但与80年代相比,降水量距平在逐步增加。

表 1 黄河三角洲 1961—2007 年年均降水量年代距平		
年代	降水量距平/mm	降水量距平百分比/%
1960 s	192.1	22.44
1970 s	139.2	17.33
1980 s	-160.7	-31.93
1990 s	-117.3	-21.45
2000 s	-76.1	-12.94

图2是1961—2007年黄河三角洲年际降水量线性变化趋势图。从图2可以看出,自1961年以来,黄河三角洲降水呈现逐步下降趋势,下降率为99.3 mm/10 a。采用MK法对年降水量进行突变检验(图3)结果显示,在1977年左右降水量出现突变,之后下降迅速,下降趋势通过99%的置信度检验。

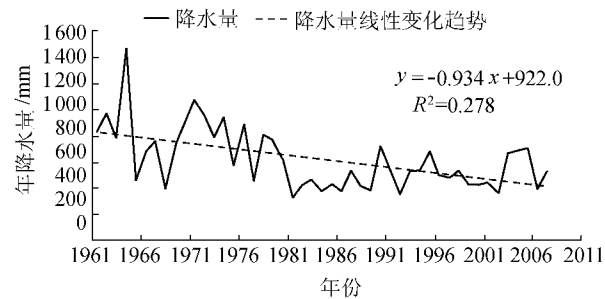


图2 1961—2007年黄河三角洲年际降水量线性变化趋势

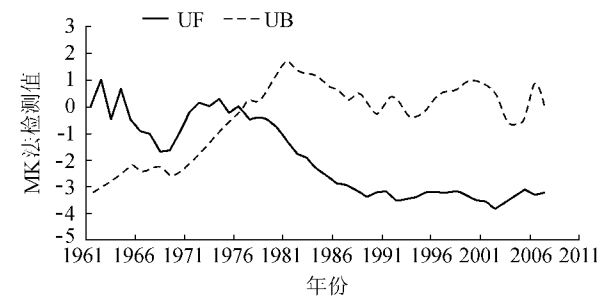
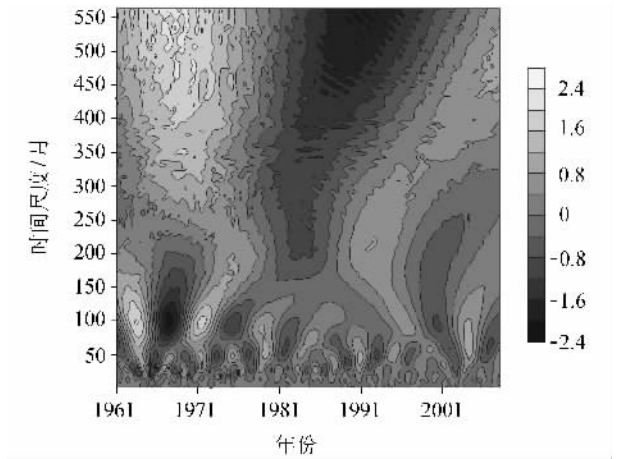


图3 1961—2007年黄河三角洲降水量MK法突变检验

图4为月标准降水序列复Morlet小波变换系数实部时频图,表明了降水在不同时间尺度上的周期震荡。图4显示,黄河三角洲在大于564个月、100~150个月、小于50个月尺度上存在震荡变化。由于序列最大为564个月,本研究不考虑大于564个月的周期变化。因此,黄河三角洲地区降水可能存在100~150个月的周期变化,也可能存在低于50个月的周期变化。



采用小波方差对准确的变化周期进行检验(图5),发现降水序列小波方差出现约3个峰值,其中最高峰出现在尺度98处,表明该尺度下周期震荡最强,说明黄河三角洲年降水存在98个月(约8~9 a)的第一主周期,同时还存在51个月(约4~5 a)和31个月(2~3 a)的次周期。

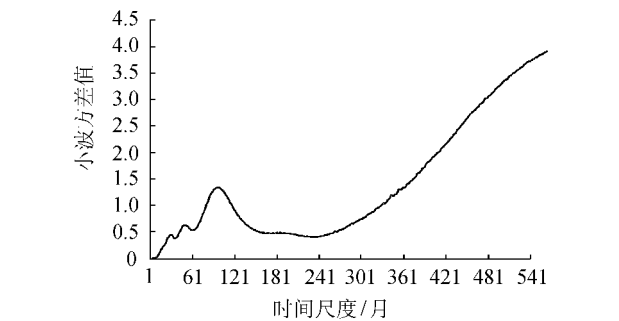


图5 月降水序列小波方差

不同时间尺度对应的降水结构不同,小尺度的变化多嵌套在较大尺度内。在8~9 a的主变化周期下(图6),黄河三角洲降水量经历了5.5个周期的循环交替,其中,1961—1986年周期变化特征明显,经历了丰→枯→丰→枯→丰→枯的变化;1986—1995年周期变化特征则不明显,进入1996年后周期变化特征明显,在2007年左右达到了枯水期的低谷。根据其8~9 a的主变化周期,可预测当前2011年及未来至2014年,黄河三角洲地区降水将会处于比较丰沛的时期。

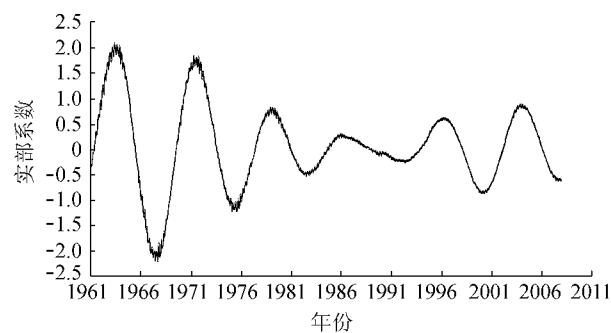


图6 黄河三角洲8~9a尺度下降水量震荡变化周期

3 降水季节变化特征

为了全面分析黄河三角洲降水量的年内变化,本文对春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—2月)降水量的趋势、突变、周期等变化特征进行研究。

3.1 春季降水变化特征

黄河三角洲地区1961—2007年春季降水量年代际距平见表2。20世纪60年代和70年代春季降水量距平为正值,说明该时段降水量偏多;进入80年代,降水量距平转为负值,说明该时段开始降水量偏少,90年代的降水量距平百分比为-38.10%,说明90年代比80年代降水量要小得多。进入21世纪,降水量距平虽然仍为负值,但是降水量有所回升,降水量距平百分比为-9.05%。

从长时间尺度上看,春季降水总体上呈现减少趋势(图7),减少速率为17.6 mm/10 a。采用MK法进行突变检验,发现春季降水在1976年左右发生突变,在1976年后,春季降水下降趋势明显,下降趋势通过99%的置信度检验。

图8(a)为黄河三角洲地区春季降水标准序列复Morlet小波变换系数实时时频图。从图8(a)可见,春季降水在40~60个月和低于30个月的尺度上存在震荡变化,说明春季降水可能存在40~60个月和低于30个月的变化周期。通过小波方差,可准确地判断出春季降水在48个月(约16a)尺度上震荡最明显,其次为24个月(约8a)尺度,说明春季降水存在约16a左右的主变化周期,同时还存在8a

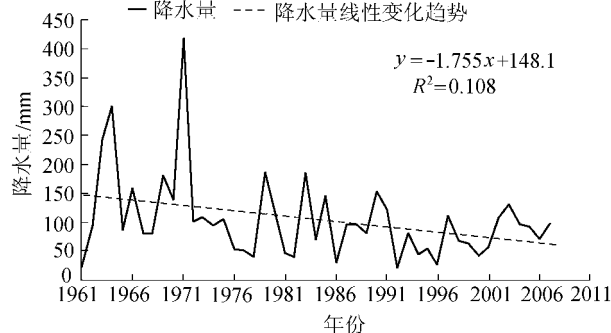


图7 黄河三角洲春季(3—5月)降水量年际变化趋势左右的次变化周期。

在16a的主变化周期上,黄河三角洲地区春季降水经历3.5个周期丰枯变化,其中1961—1967年、1976—1983年、1992—1996年、2001—2007年为多水期,1968—1975年、1984—1991年、1997—2000年为少水期。根据春季降水16a的主周期变化特征,可预测当前2011年及未来至2016年春季降水均处于少水期。

3.2 夏季降水变化特征

黄河三角洲地区1961—2007年年代际夏季降水量距平见表2。20世纪60年代和70年代夏季降水量距平为正值,说明该时段降水量偏多;在80年代和90年代,降水量距平为负值,甚至80年代的降水量距平百分比为-20.48%,说明该时段开始降水量偏少。进入21世纪,降水量距平已为正值,说明夏季降水相比于20世纪80年代和90年代已经开始回升。

从年代际变化看,黄河三角洲地区夏季降水总体上也呈现减少趋势(图9),降水量减少速率为21.5 mm/10 a。采用MK法对长时间序列突变进行检验,发现夏季降水量在1965年左右发生突变,1965—1975年夏季降水量较前期下降明显,但1976年后下降速度较1965—1975年更明显,下降趋势通过99%的置信度检验。

图8(b)为黄河三角洲地区夏季标准降水序列复Morlet小波变换系数实时时频图。从图8(b)可见,夏季降水在40~60个月和低于40个月的尺度上存在周期震荡变化。说明夏季降水可能存在40~60个月和低于40个月的变化周期。通过小波

表2 黄河三角洲1961—2007年不同季节平均降水量年代距平

年代	春季		夏季		秋季		冬季	
	降水量距平/mm	降水量距平百分比/%	降水量距平/mm	降水量距平百分比/%	降水量距平/mm	降水量距平百分比/%	降水量距平/mm	降水量距平百分比/%
1960s	33.1	31.17	53.6	14.14	39.1	33.87	67.6	81.48
1970s	23.5	22.19	49.3	13.01	15.6	13.51	98.1	118.17
1980s	-9.5	-8.93	-77.6	-20.48	-37.8	-32.77	-62.6	-75.47
1990s	-40.4	-38.10	-26.2	-6.91	-4.2	-3.67	-61.8	-74.46
2000s	-9.6	-9.05	1.2	0.32	-18.1	-15.64	-58.9	-71.02

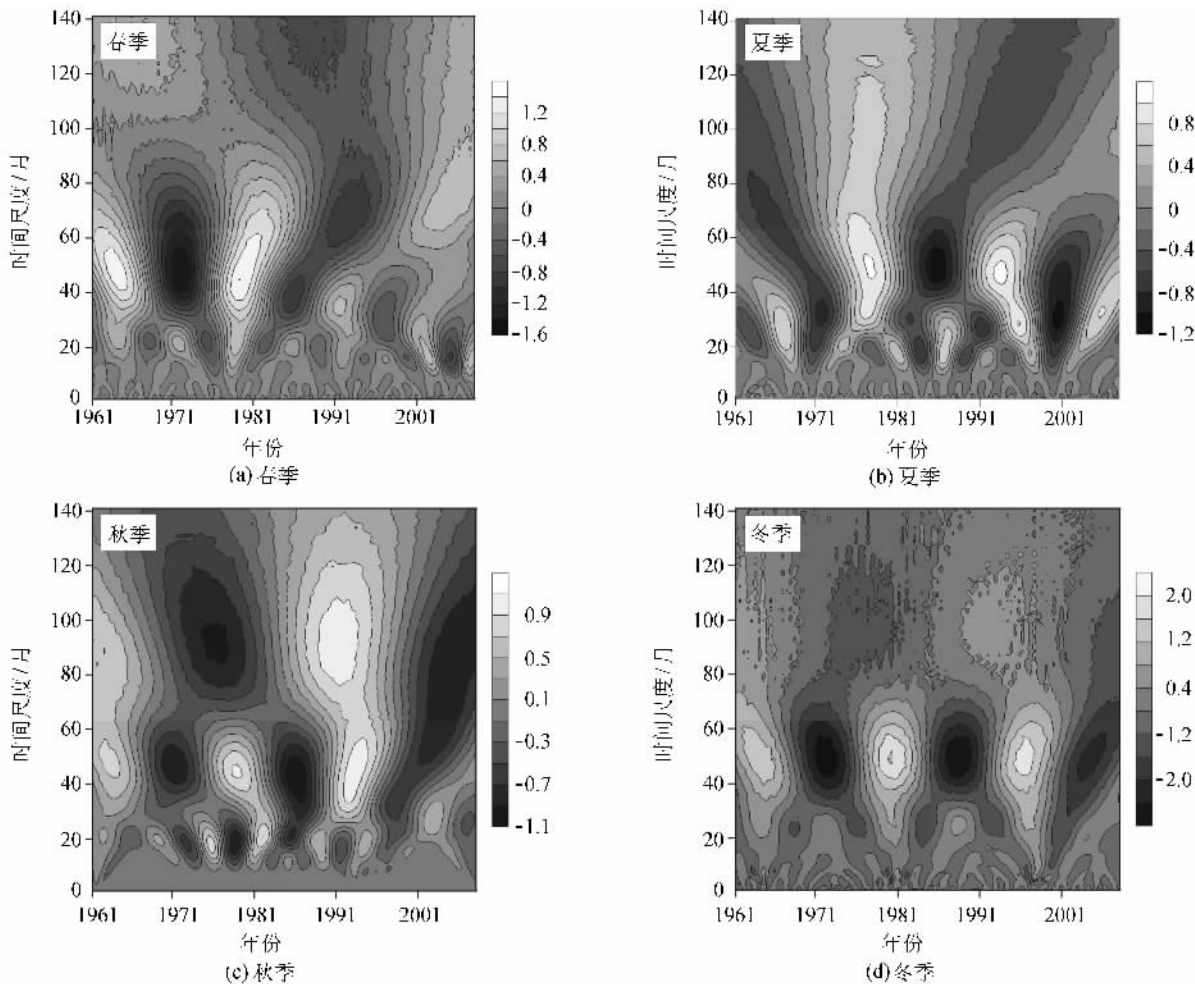


图 8 不同季节标准降水序列复 Morlet 小波变换系数实部时频

方差,可准确地判断出夏季降水在 49 个月(约 16 ~ 17 a)尺度上震荡最明显,其次为 31 个月(约 10 ~ 11 a)尺度。说明夏季降水存在约 16 ~ 17 a 左右的主变化周期,同时还存在 10 ~ 11 a 左右的次变化周期。

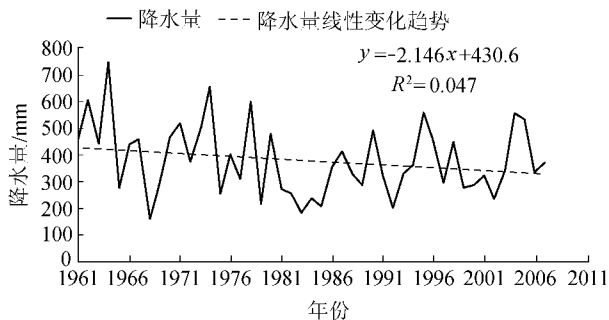


图 9 黄河三角洲夏季(6—8 月)降水量年际变化趋势

在 16 ~ 17 a 的主变化周期上,黄河三角洲地区夏季降水经历 3.5 个周期丰枯变化。其中 1961—1964 年、1973—1981 年、1990—1997 年、2005—2007 年为多水期,1965—1972 年、1982—1989 年、1998—2004 年为少水期。根据夏季降水 16 ~ 17 a 的主周期变化特征,可预测当前 2011 年夏季处于多水期,进入 2012 年将进入下一个少水周期。

3.3 秋季降水变化特征

秋季降水量年代际距平见表 2。20 世纪 60 年代和 70 年代秋季降水量距平为正值,说明该时段降水量偏多;在 80 年代和 90 年代,降水量距平为负值,甚至 80 年代的降水量距平百分比为 -32.77%,说明该时段开始降水量偏少。进入 21 世纪,降水量距平百分比又降至 -15.64%,说明该段时间秋季降水又减少。

从年代际降水量变化来看,黄河三角洲地区秋季降水总体上也呈现减少趋势(图 10),降水量减少率为 17.2 mm/10 a。采用 MK 法对长时间序列突变进行检验,发现秋季降水同样在 1965 年左右发生突

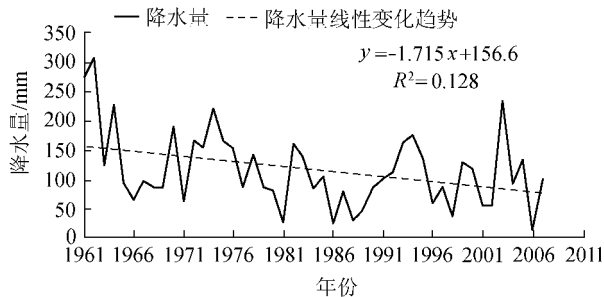


图 10 黄河三角洲秋季(9—11 月)降水量年际变化趋势

变,1965—1975 年秋季降水较前期下降明显,但 1976 年后下降速度较 1965—1975 年更明显,下降趋势同样通过 99% 置信度检验。

图 8(c)为黄河三角洲地区秋季标准降水序列复 Morlet 小波变换系数实部时频图。从图 8(c)可见,秋季降水在 80~120 个月、40~60 个月和低于 30 个月的尺度上存在周期震荡变化,说明秋季降水可能存在 80~120 个月、40~60 个月和低于 30 个月的变化周期。通过小波方差,可准确地判断出秋季降水在 48 个月(约 16a)尺度上震荡最明显,其次为 92 个月(约 30~31a)尺度和 21 个月(约 7a)。说明秋季降水存在约 16a 左右的主变化周期,同时还存在约 30~31a 和 7a 左右的次变化周期。

在 16a 的主变化周期上,黄河三角洲地区秋季降水经历 3.5 个周期丰枯变化,其中 1961—1967 年、1975—1982 年、1990—1997 年、2007 年为多水期,1968—1974 年、1983—1989 年、1998—2006 年为少水期。根据秋季降水 16a 的主周期变化特征,可预测当前 2011 年及未来至 2015 年秋季处于多水期。

3.4 冬季降水变化特征

冬季降水量年代际距平见表 2。从表 2 可见,黄河三角洲不同年代冬季降水相差悬殊。20 世纪 60 年代和 70 年代秋季降水量距平为正值,说明该时段降水量偏多,但 60 年代和 70 年代的降水量距平百分比分别达到 81.48%和 118.17%,80 年代、90 年代及 21 世纪的初始几年,降水量距平均为负值,说明该段时期冬季降水偏少,其降水量距平百分比均在 -70%以上。

从降水年代际变化看,黄河三角洲地区冬季降水总体上也呈现减少趋势(图 11),降水量减少率为 43.2 mm/10 a。采用 MK 法对长时间序列突变进行检验,发现冬季降水同样在 1976 年左右发生突变,之后降水量下降较前期明显,下降趋势通过 99% 置信度检验。

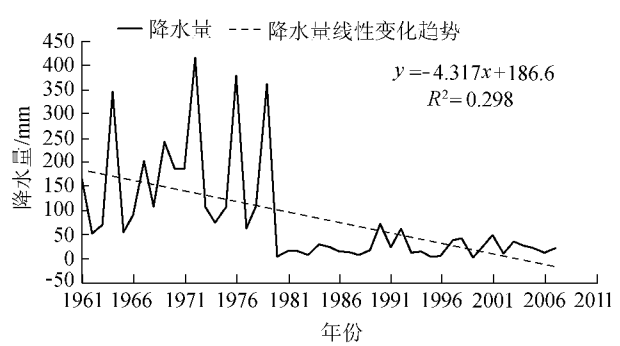


图 11 黄河三角洲冬季(12—2 月)降水量年际变化趋势

图 8(d)为黄河三角洲地区冬季标准降水序列复 Morlet 小波变换系数实部时频图。从图 8(d)可

见,冬季降水在 40~60 个月尺度上存在周期震荡变化。说明冬季降水可能存在 40~60 个月的变化周期。通过小波方差,可准确地判断出冬季降水在 51 个月(约 16~17a)尺度上震荡最明显,说明冬季降水存在约 16~17a 左右的主变化周期。

在 16~17a 的主变化周期上,黄河三角洲地区冬季降水经历 3.5 个周期丰枯变化,其中 1961—1967 年、1976—1984 年、1993—2000 年为多水期,1968—1975 年、1985—1992 年、2001—2007 年为少水期。根据冬季降水 16~17a 的主周期变化特征,可预测当前 2011 年及未来至 2016 年冬季处于多水期。

4 结论与讨论

采用 MK 非参数检验、小波分析等方法,对黄河三角洲近 50 年来实测降水量的年际和不同季节的变化特征进行分析,得出主要结论如下:

a. 1961—2007 年黄河三角洲多年平均降水量为 621.1 mm。自 1961 年以来降水量呈现显著下降趋势,下降速率为 99.3 mm/10 a。其中 20 世纪 60 年代和 70 年代,降水量距平为正值,进入 80 年代后,降水量距平为负值,表明降水减少。经 MK 法突变检测,发现在 1977 年左右发生降水突变,之后降水减少明显。小波分析结果表明,年降水序列存在约 8~9a 的变化周期,并且基于该变化周期预测在 2011—2014 年,区域会处于降水比较丰沛的时期。

b. 黄河三角洲春季、夏季、秋季和冬季四季的长时间降水序列均呈现下降趋势,春、秋、夏季降水下降速率均在 20 mm/10 a 左右,而冬季降水下降率达 43 mm/10 a。在 20 世纪 60 年代和 70 年代,四季降水量距平均为正值,表明降水较丰富,而自 80 年代后,降水量减少,降水量距平大部分为负值。就突变特征而言,春季、冬季降水突变发生在 1976 年左右,与年降水突变点接近;夏季和秋季降水突变发生在 1965 年左右,但是 1976 年后降水下降速率明显加大,与春、冬两季降水具有较好对应关系。

c. 通过小波分析,四季均存在约 16~17a 的降水主变化周期,自 1961—2007 年经历了约 3.5 个降水丰枯周期变化。根据各个季节的降水主周期变化特征,可以预测春季和夏季在 2012—2016 年降水处于较少的时期,而秋季和冬季在 2012—2016 年会处于降水较多的时期。并可推断,2012—2014 年,由于秋季、冬季降水的增加量弥补了春季和夏季降水的减少量,从而全年降水量增加,而 2015 和 2016 年秋季和冬季降水的增加量不能弥补春季和夏季降水的减少量,从而全年降水量开始减少。

致谢:本研究得到了中国气象局国家气象信息

中心气候资料室、国家气候中心姜彤研究员、苏布达副研究员的帮助,在此一并致谢!

参考文献:

[1] 百度百科. 黄河三角洲[EB/OL].[2011-08-16]. <http://baike.baidu.com/view/145124.htm>.

[2] 袁瑞强,刘贵群,宋献方.现代黄河三角洲浅层地下水对降水的响应[J].资源科学,2009,31(9):1514-1521.

[3] 盖世民,徐启春,许乃猷.黄河三角洲近四十年的气候变化特征[J].海洋湖沼通报,1998(2):1-5.

[4] 刘晋秀,江崇波,范学炜.黄河三角洲近40年来气候变化特征及异常特征[J].海洋预报,2002,19(2):31-35.

[5] 宋春英,延军平,刘路花.黄河三角洲地区气候变化特征及其对气候生产力的影响[J].干旱区资源与环境,2011,25(7):106-111.

[6] 徐宗学,和宛琳.黄河流域近40年蒸发皿蒸发量变化趋势研究[J].水文,2005,25(6):6-11.

[7] BUI SHAND T A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records[J]. Journal of Hydrology,1982,58:11-27.

[8] MANIAK U. Hydrologie und wasserwirtschaft[M]. Berlin:

Springer(in German),1997.

[9] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版,北京:气象出版社,2007.

[10] 刘健,曹升乐,翟建青,等.近50年山东省蒸发皿蒸发量变化趋势及影响因素分析[J].山东大学学报:工学版,2010,40(6):129-133.

[11] 邵晓梅,许月卿,严昌荣.黄河流域降水序列变化的小波分析[J].北京大学学报:自然科学版,2006,42(4):503-509.

[12] 陈志悦,陈皓锐,熊孟琴.沧州南部地区1970年以来气候变化特征分析[J].水资源保护,2011,27(4):42-47.

[13] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.

[14] 刘俊萍,田峰巍,黄强,等.基于小波分析的黄河河川径流律研究[J].自然科学进展,2003,13(4):383-387.

[15] 李海娟,夏自强,章洁,等.额尔齐斯河流域年降水量时间序列分析[J].水资源保护,2010,26(5):29-32.

[16] BRADSHAW G A, SPIES T A. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis[J]. Journal of Ecology,1992,80:205-215.

(收稿日期:2011-10-17 编辑:彭桃英)

(上接第8页)

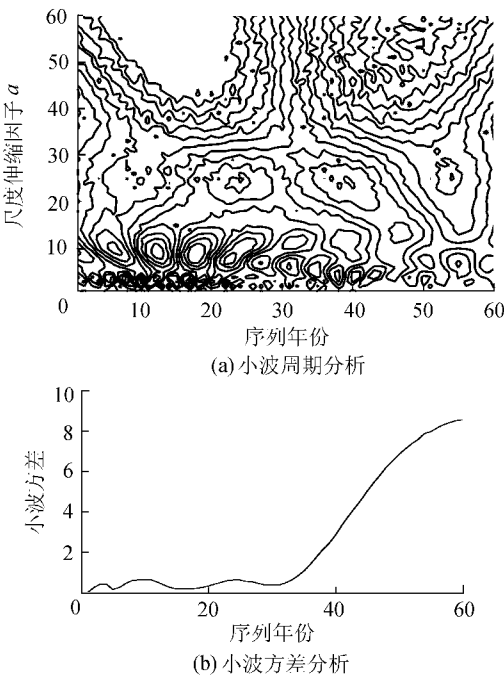


图7 年均输沙量的小波周期分析和小波方差过程

5 结 论

通过多种方法综合分析1950—2009年黄河入海水沙通量的不同尺度的变化趋势、变点及周期等三方面的变化特征,并对黄河入海通量水沙通量变化特征形成原因进行了分析,不同方法识别结果显示:①采用MK、SP两种方法识别的黄河入海水沙通量的不同时间尺度的变化趋势均呈现显著下降;

②采用小波重构与分解法和有序聚类方法识别水沙通量的主要变点为1985年,次变点为2002年;不同时间尺度变点识别结果有所不同,但差别不大,两种方法识别结果有所不同,同样差别不大;③采用小波分析法(小波方差法)识别水沙通量的不同时间尺度的变化周期,年均、汛期径流量的第一主周期为8a,第二主周期为22a,非汛期径流周期有所不同,第一主周期为6a,第二主周期为17a,年均、汛期输沙量的第一主周期为3a或者9a,第二主周期为24a或者25a,非汛期输沙量第一主周期为8a,第二主周期为18a。

参考文献:

[1] 丁艳峰,潘少明.近50年黄河入海径流变化特征及影响因素分析[J].第四纪研究,2007,27(5):709-716.

[2] 侯志军,由宝宏,茹玉英.黄河入海口水沙通量变化规律[J].泥沙研究,2007(5):60-67.

[3] 樊辉,刘艳霞,黄海军.1950-2007年黄河入海水沙通量变化趋势及突变特征[J].泥沙研究,2009(5):9-16.

[4] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica,1945,13:245-259.

[5] 仕玉治.气候变化及人类活动对流域水资源的影响及实例研究[D].大连:大连理工大学,2011.

[6] 熊立华,周芬,肖义,等.水文时间序列变点分析的贝叶斯方法[J].水电能源科学,2003,21(4):39-41.

[7] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change point problem[J]. Applied Statistics,1979,28(2):126-135.

[8] 桑燕芳,王栋.水文序列小波分析中小波函数选择方法[J].水利学报,2008,39(3):295-306.

(收稿日期:2011-11-10 编辑:高渭文)