



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.011

刘鹏, 赵瑞霞, 林超, 等. 邯郸平原区降水丰枯多时间尺度特性[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 60-66.  
LIU Peng, ZHAO Ruixia, LIN Chao, et al. Multi time scale analysis of high/low precipitation characteristics in Handan Plain area[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 60-66. (in Chinese)

## 邯郸平原区降水丰枯多时间尺度特性

刘鹏<sup>1</sup>, 赵瑞霞<sup>2</sup>, 林超<sup>2</sup>, 王晓琳<sup>3</sup>, 吕海涛<sup>3</sup>

(1. 海河水利委员会 海河下游管理局, 天津 300061; 2. 海河水利委员会 漳河上游管理局, 邯郸 056006;  
3. 河北工程大学 水电学院, 邯郸 056021)

**摘要:** 降水丰枯特性如何是分析降水过程的重要内容。以邯郸平原水资源分区为基本研究单元, 运用小波分析法, 就各分区降水丰枯特性进行了多时间尺度分析, 结果表明: 邯郸市各平原分区降水过程都存在 5 a、9 a 左右为变化的主要周期, 除了滏西平原外, 其他平原区降水均还存在 2 a 和 13 a 的主周期变化, 且漳卫河和黑龙港两平原区降水 21 a 左右变化的主周期也较为明显; 各分区降水在 5 a 和 9 a 主周期尺度上, 均有明显的丰枯交替过程; 不同分区降水在不同周期尺度的丰枯响应上存在一定的异质性并表现出不同的丰枯特性和演变趋势。上述成果可为区域旱涝预警和水资源管理提供可靠依据。

**关键词:** 丰枯特性; 周期性; 多尺度变化; 小波分析; 多分辨分析; 水资源分区

**中图分类号:** TV 125; P333      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0060-07

### Multi-time scale analysis of high/low precipitation characteristics in Handan Plain area

LIU Peng<sup>1</sup>, ZHAO Ruixia<sup>2</sup>, LIN Chao<sup>2</sup>, WANG Xiaolin<sup>3</sup>, LYU Haitao<sup>3</sup>

(1. Management Bureau of Lower Reaches of Haihe River, Haihe River Water Conservancy Commission, Tianjin 300061, China; 2. Management Bureau of Upper Reaches of Zhanghe River, Haihe River Water Conservancy Commission, Handan 056006, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China)

**Abstract:** High/low precipitation characteristics are important content of precipitation process research. We conducted multi time scale analysis on the high/low precipitation characteristics of each water resource zone on the Handan Plain using wavelet analysis. The research results showed that: (1) There is a 5 years' or 9 years' periodicity in the precipitation processes of all zones on the plain. There is also a 2 years' or 13 years' periodicity in the precipitation processes of all zones except for Fuxi Plain. A 21 years' periodicity is also prominent in the precipitation processes of Zhangweihe and Heilonggang Plains. (2) The high/low precipitation alternation is prominent in all zones on the 5 year and 9 year scales. (3) The high/low precipitation responses of different zones vary on different time scales, and show varied high/low characteristics and evolution trend. The results can provide reference for the local water management and early warning of regional droughts and floods.

**Key words:** high/low precipitation characteristics; periodicity; multi scale change; wavelet analysis; multi resolution analysis; water resources zones

收稿日期: 2016-01-16      修回日期: 2016-07-29      网络出版时间: 2017-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1114.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51279207); 河北省教育厅科学研究计划重点项目(ZD2014020; ZD 201443)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51279207); Key Project of Scientific Research Program of Hebei Provincial Department of Education(ZD2014020; ZD 201443)

作者简介: 刘鹏(1982-), 男, 河北邯郸人, 助理工程师, 主要从事水利工程管理方面研究。E-mail: 114009472@qq.com

通讯作者: 王晓琳(1980-), 女, 河北邯郸人, 讲师, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: 7990610@qq.com

旱涝是降水严重不足或过量的一种极端现象, 辨析降水过程的丰枯特性及其周期变化是分析区域旱涝演变特性的基础, 也是区域旱涝长期预警的依据。目前, 我国旱涝极端事件频发, 正是降水过程非平稳性和复杂性异常显著的一种体现。为了更准确判定非平稳水文过程的一系列特性, 需要一种具有多尺度分辨其时域和频域信息的方法<sup>[12]</sup>。小波变换(Wavelet Transform, WT)和小波分析(Wavelet Analysis, WA)在时域上可以精细识别过程的多层次时间结构, 在频域上又可识别其局部化细微特性<sup>[3]</sup>, 因此被引入到水文学科中<sup>[4-5]</sup>用以揭示水文过程的内在隐形规律<sup>[2, 6]</sup>。目前, 国内运用WA分析水文过程特性的在点上多以测站分析为主<sup>[7-11]</sup>, 在面上的分析又以某个子流域<sup>[12-16]</sup>或整个行政区域<sup>[17-21]</sup>的居多, 鲜有涉及水资源分区<sup>[22-24]</sup>的。本文在选用适宜的WA方法基础上, 选择研究单元时考虑了水资源分区能够将流域与行政区域有机结合的优点, 对邯郸东部平原各水资源分区近45年的降水过程进行了区域降水的丰枯特性分析对比, 研究成

果更便于区域的水资源规划以及区域旱涝科学管理的借鉴。

## 1 研究方法

WA涉及小波、小波系数、小波变换、小波方差等一系列概念。通过WT, 可以求解区域降水过程的小波系数, 它是反映水文过程时-频域特征的关键变量。通过分析小波系数模数平方分布可以解析能量中心在小波时频域上的分布情况及其相应能量梯度变化, 这些信息都能反映降雨过程中周期成分等相关信息; 若降水序列选择多年距平序列, 则小波系数的实部在小波域中就会呈现正、负相位表示了降水的丰、枯特性, 通过解析不同尺度下小波实部过程线就可分析相应尺度下降水过程的丰枯特性。而小波函数种类繁多, 函数选择是否合适至关重要, 由于本文选择Morlet小波并设定了其相关参数, 使得时间尺度 $a$ 与周期 $T$ 在数值上相等。如是, 可通过小波方差在时间因子的强弱体现, 来得到降水过程的主周期。上述各公式、概念及相关注释见表1<sup>[2, 5, 23]</sup>。

表1 小波分析涉及相关要素概念、定义及注释

Tab. 1 The concepts, definitions, and annotations of the related factors of WA

| 名称               | 定义及特性   | 公式   | 注释   |
|------------------|---|--|--|
| 小波 $\Psi(t)$     | 指满足 $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0$ 的一类函数; 具有振荡性且能够迅速衰减到零的特性。  | $\Psi_{a,b}(t) =  a ^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ , $a, b \in R, a \neq 0$   | $\Psi(t)$ 为母小波; $\Psi_{a,b}(t)$ 为子小波, 简称子波; $a$ 为尺度(伸缩)因子; $b$ 为时间(平移)因子   |
| 小波系数 $W_f(a, b)$ | 由于波通过WT得到, 是WA的关键变量, 可反映水文序列的时频和局部变化特征。                                 | $W_f(a, b) =  a ^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$  | $f(t)$ 在此是指水文序列; $\Psi(t)$ 表示 $\Psi(t)$ 的复共轭   |
| 小波方差 $Var(a)$    | 表示了水文序列 $f(t)$ 在不同尺度 $a$ 下小波波动的强弱                                       | $Var(a) = \int_{-\infty}^{\infty}  W_f(a, b) ^2 db$  | 由小波系数在时间域上尺度 $a$ 的所有平方积分得到   |
| Morlet 小波及其周期    | Morlet 小波是高斯包络下的单频率复正弦函数, 是常用的复数小波; Morlet 小波具有良好的时、频域局部性, 适宜多时间尺度特性分析。 | $\Psi(t) = \exp(i\omega_0 t - 0.5t^2)$ ;<br>$T = \left( \frac{4\pi}{\omega_0 + \sqrt{\omega_0^2 + \omega_0^2}} \right) \times a$ | $i$ 表示虚数, $\omega_0$ 为常数且当 $\omega_0 \geq 5$ 时, Morlet 小波近似满足允许性条件; $T$ 表示虚数, 当 $\omega_0 = 6.2$ 时, $T \approx a$ ; 在此, Morlet 小波函数的 $\omega_0$ 取 6.2, 以便于水文过程的周期分析。 |

## 2 研究区域概况

邯郸市位于河北省南端, 与晋、鲁、豫三省接壤, 地势西高东低; 其中平原面积 7 580 km<sup>2</sup>, 占总面积的 62.9%。该区域属北温带大陆性季风气候, 四季分明, 同期昼夜温差大。降水主要受太平洋东南季风影响, 整体偏少, 年平均值在 480~700 mm, 一般集中在 6月-9月; 中部年降水量较少, 形成春旱秋涝的特点。境内水系比较发达, 除马颊河之外, 均属海河流域南系的漳卫河和子牙河水系。根据地形、河流及行政区分布, 邯郸东部平原分为漳卫河平原、子牙河平原(即滏西平原)、黑龙港平原和徒骇马颊河平原(简称马颊河平原)4个分区。区域行政分

区、水系及水资源分区的具体情况见图1<sup>[23]</sup>。

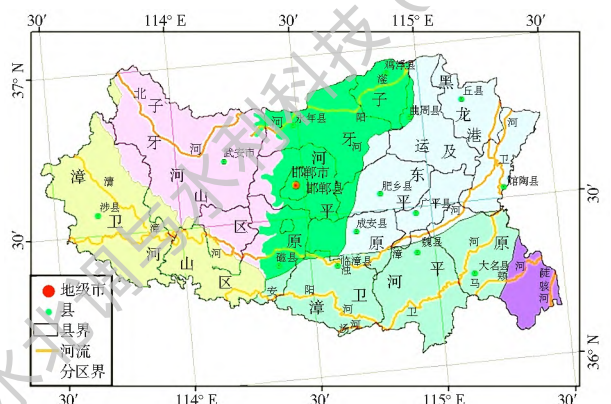


图1 邯郸地区行政区、水系及水资源分区

Fig. 1 Administrative regions, water systems and water resources zones of Handan

### 3 数据来源及特征

此次研究中,邯郸市各平原区近 45 年(1956 年-2000 年)逐年降水过程为区域的面降水过程(以下简称降水过程),该数据依据河北省市级水资源评价细则以及邯郸市第二次水资源评价成果得出。统计各分区逐年降水数据可知,近 45 年邯郸平原区平均降水量在 520~550 mm 左右,其中滏西平原的均值最

小为 524.34 mm,漳卫河平原的均值最大为 548.45 mm;就年最大降水量而言,滏西平原的值最大 1 162.72 mm 并且超过了 1 000 mm,马颊河的值相对较小仅有 787 mm,不足 800 mm,除了马颊河平原的年最大降水量出现在 1956 年外,其他三个平原的年最大降水量均发生在 1963 年;就年最小降水量而言,各平原的值差异不大,在 230~275 mm 之间,但发生时间各有不同。各平原区上述特征的具体信息见表 2。

表 2 邯郸各平原区降水过程特征值

Tab. 2 The characteristic values of precipitation processes on different plains of Handan

| 平原区名称 | 均值/mm(1956 年-2000 年) | 最大值/最大距平/mm      | 发生年份   | 最小值/最小距平/mm      | 发生年份   |
|-------|----------------------|------------------|--------|------------------|--------|
| 滏西    | 524.34               | 1162.72 / 638.38 | 1963 年 | 255.96 / -268.38 | 1986 年 |
| 黑龙港   | 535.40               | 942.77 / 407.37  | 1963 年 | 236.69 / -298.71 | 1992 年 |
| 漳卫河   | 548.45               | 993.78 / 445.33  | 1963 年 | 272.04 / -276.41 | 1965 年 |
| 马颊河   | 547.74               | 787.27 / 239.53  | 1956 年 | 246.43 / -301.31 | 1978 年 |

若以多年降水平均值作为平水年量值,将逐年降水量与之相减便得到逐年降水距平系列,距平的正负分别表明了降水的丰枯;本研究选取降水距平过程进行分析,该过程隐含了区域相应的旱涝变化信息,通过小波变换后的序列可以反映了降水在各分区多时间尺度丰枯变化特性。各分区降雨距平过程见图 2。

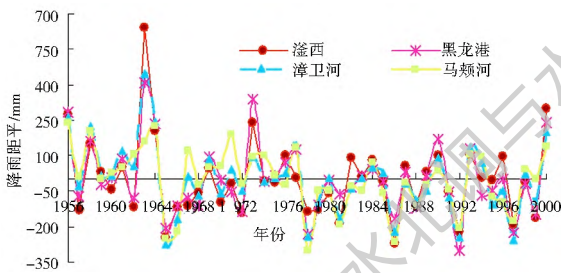


图 2 邯郸各平原分区降雨距平过程(1956 年-2000 年)  
Fig. 2 Precipitation anomaly in different plain zones(1956-2000)

### 4 结果分析

#### 4.1 丰枯变化的时频分析

根据表 1 所示的有关公式,通过 WT 求出邯郸市各平原分区近 45 年(1956 年-2000 年)降水序列的小波模平方系数,且绘制其等值线并投影到小波(a-b)时频域上即得图 3,代表了相应区域降水丰枯在小波域的能量特性和波动特性。从图 3 可以看出,各分区降水在 1~20 a 尺度范围内波动明显,各区域小波振荡中心集中。其中滏西平原降水存在 2 a 左右、5 a 左右、9 a 左右为尺度中心的小波振荡,振荡中心显著的有 2 个,由于中心小波能量高连为一体,振荡中心的时频域坐标分别为(1963, 2)和(1964, 5);另外,还存在若干振荡中心,其中 2 个较为明显且集中,中心坐标分别为(1989, 5)以及(1969, 9);值得说明的是,尽管 9 年尺度的振荡能量不高,但几乎影响了整个时段。

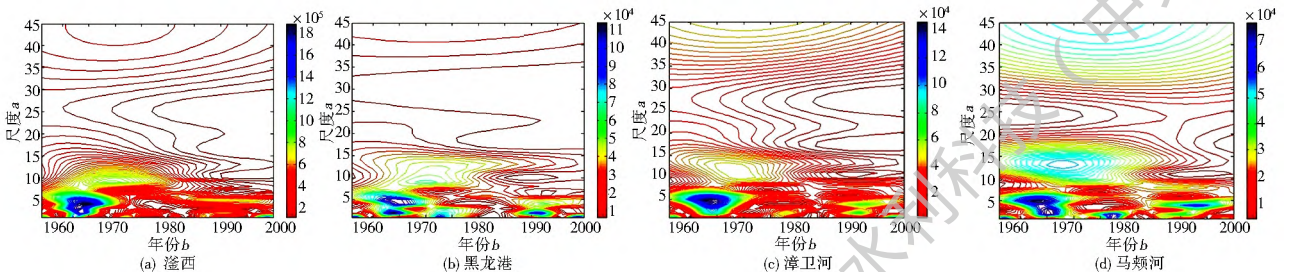


图 3 平原分区年降雨过程小波变换模平方等值线(a=1~45)

Fig. 3 The contours of wavelet spectrum in different plain zones(a=1~45)

由图 3(b)可以看出,黑龙港平原降水存在 2 a 左右、5 a 左右、9 a 左右为尺度中心的小波振荡,振荡中心明显的有 4 个,能量较高,中心坐标依次分别为(1964, 2)、(1964, 5)、(1969, 9)和(1992, 2);另外,

以坐标(1992, 5)为中心的小波振荡也较为明显。

由图 3(c)可以看出,漳卫河平原降水存在 2 a 左右、5 a 左右、9 a 左右以及 13 a 左右为尺度中心的小波振荡,振荡中心能量高且显著的只有 1 个,中心坐标为(1964, 5);其次在时域分布上,存在 4 个较

为明显的振荡中心,其坐标依次为(1978, 2)、(1991, 2)、(1988, 5)和(1992, 9);另外以坐标(1968, 13)为中心的振荡,能量尽管不高,但振荡梯度缓慢,影响到了整个时域。

由图 3(d)可以看出,黑龙港平原降水存在 2 a 左右、5 a 左右、9 a 左右以及 13 a 左右为尺度中心的小波振荡。与其他平原区不同,整体而言,该平原降水显现的振荡都较为明显,最为显著的振荡中心分别为(1964, 2)和(1963, 5),且两振荡连成了一体;其次坐标分别为(1977, 2)、(1993, 5)以及(1988, 9)的振荡中心也较为明显,且后两个振荡亦连为一体;另外以坐标为(1968, 13)的振荡中心能量相对较弱,但影响时域最广,45 年都有波及。

综上,各平原区均有以 2 a 左右、5 a 左右、9 a 左右为尺度中心的小波振荡,漳卫河平原和马颊河平原还存在以 13 a 左右为尺度中心的小波振荡。由表 1 可知,尺度  $a$  与周期  $T$  相等,这些振荡或波动说明了在各平原区小波时频域中存在着相应尺度下的周期变化。为对比方便,将邯郸各平原区年降水小波振荡主要的中心点及影响时频范围总结并列入表 3。

表 3 各分区年降水小波主要波动影响时频范围及中心

Tab. 3 The wavelet vibration centers and influential time ranges of precipitation in each zone

| 尺度中心(周期) | 振荡时段/时段中心                            | 分区名称 |
|----------|--------------------------------------|------|
| 2 a      | 1957- 1967 / 1963                    | 滏西   |
|          | 1960- 1967 / 1964, 1985- 1995 / 1992 | 黑龙港  |
|          | 1975- 1981 / 1978, 1985- 1996 / 1991 | 漳卫河  |
|          | 1960- 1970 / 1966, 1970- 1980 / 1977 | 马颊河  |
| 5 a      | 1956- 1973 / 1964, 1985- 2000 / 1989 | 滏西   |
|          | 1956- 1974 / 1964, 1987- 2000 / 1992 | 黑龙港  |
|          | 1956- 1980 / 1964, 1985- 2000 / 1988 | 漳卫河  |
|          | 1956- 1974 / 1963, 1984- 2000 / 1993 | 马颊河  |
| 9 a      | 1956- 1985 / 1969                    | 滏西   |
|          | 1956- 1985 / 1970                    | 黑龙港  |
|          | 1985- 2000 / 1990                    | 漳卫河  |
|          | 1980- 2000 / 1988                    | 马颊河  |
| 13 a     | 1956- 1998 / 1968                    | 漳卫河  |
|          | 1956- 2000 / 1968                    | 马颊河  |

## 4.2 丰枯变化的主周期分析

将已经计算出的不同尺度下的小波系数代入表 1 所示的相关公式,可得到不同水资源分区年降雨过程的小波方差图(图 4)。可知,在 2 a 尺度下,黑龙港平原、漳卫河平原和马颊河平原降雨的小波方差极值明显;在 5 a 尺度下各平原分区降雨的小波方差

极值表现都最为显著,其极值也最高;9 a 尺度下,滏西平原区、漳卫河平原区、黑龙港平原区的降水小波方差极值表现明显,黑龙港平原区的降水小波方差有所表现;在 13 a 尺度下,黑龙港平原、漳卫河平原和马颊河平原降雨的小波方差极值尽管值不是很高,但表现明显;在 22 a 尺度下,漳卫河平原和黑龙港平原降雨小波方差极值虽然很小,但有所体现。

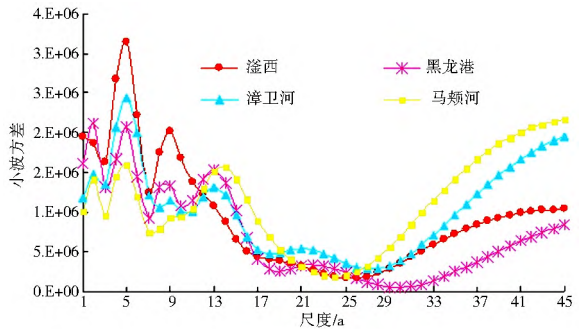


图 4 平原区年降水过程小波方差

Fig. 4 Wavelet variance of precipitation processes on Handan Plain

根据小波方差相关理论<sup>[2,5]</sup>,对比上述相关结果可知,滏西平原降雨过程主要存在以 5 a、9 a 左右变化的主要周期;漳卫河平原和黑龙港平原降雨过程都存在以 2 a、5 a、9 a、13 a 和 21 a 左右变化的主要周期;马颊河平原降雨过程存在以 2 a、5 a、9 a 和 13 a 左右变化的主要周期。综上,邯郸市 4 个平原区降水过程共同存在以 5 a 和 9 a 左右变化的主要周期。由于降水是造成区域旱涝变化的关键因子,降水的周期性必然影响到区域旱涝变化的周期性,以上区域降水主周期的判定为邯郸地区旱涝变化的主要周期判定提供了重要依据和参考。

## 4.3 丰枯变化的交替规律和趋势性分析

根据小波变换的计算公式(表 1)计算并绘制各平原区 45 年(1956 年-2000 年)逐年降水距平序列小波系数实部等值线图(图 5)。由图 5 可以看出在整个小波时域范围内,区域各平原分区降水过程在 1~5 a 尺度范围内,波动变化频率快,且波动极值点分布比较散乱,说明区域年降水小尺度波动频繁,振荡行为明显,其中 5 a 左右尺度的正、负相位在整个时域内交替变化的结构相对而言比较清晰。

以 9 a 尺度来看,各平原分区降水过程的小波波动都有所体现,其中滏西平原降水过程在 1980 年以前正、负相位交替变化结构明显,其他平原降水过程在整个时域范围内都比较明显,且在 1980 年-2000 年范围内正、负相位呈均匀交替。以 13 a 尺度来看,仅黑龙港平原、漳卫河平原和马颊河平原降水过程小波波动的正、负交替结构清晰(图 5(b)和图 5

(c), 且在整个时域范围内均匀交替。从整个尺度范围来看, 邯郸市各平原区降水过程存在以大尺度 ( $a > 45$ ) 为中心的正、负结构, 但由于资料的有限性, 具体尺度不能给出。

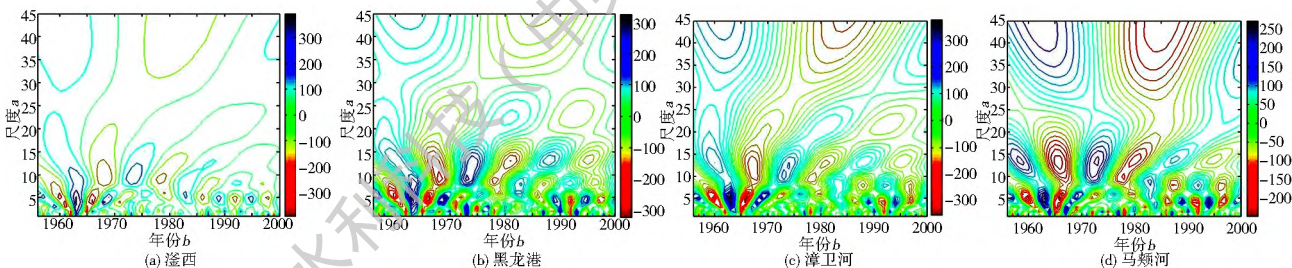


图 5 各平原区年降水过程小波变换实部等值线 ( $a = 1 \sim 45$ )

Fig. 5 The contours of real parts of annual precipitation wavelet transformation in each zone ( $a = 1 \sim 45$ )

为了进一步说明邯郸平原各分区年降水在一定周期下丰、枯交替变化的波动特性在图 5 上以不同的尺度  $a$  ( $a = 9, a = 5$ ) 值, 做平行于  $b$  轴的切割线, 得到小波系数  $W_f = (a, b)$  的实部随时移  $b$  变化的过程线, 见图 6。从中可以看出各平原分区年降水丰枯变化比较剧烈, 具有良好的波动性, 不同时域强弱明显不同, 存在一定的局部性差异。

由图 6 ( $a = 9$ ) 可知, 在整个时域范围内, 各分区降水 45 年过程均呈现 4 个完整的丰枯交替波动, 进

入 21 世纪后, 各平原区均进入丰水期。就波幅大小而言, 滏西平原和黑龙港平原降水过程的小波波幅在 1980 前较大, 在 1980 年后波幅有所降低; 相对而言, 漳卫河平原和马颊河平原降水过程的小波波幅在整个时域内都比较均匀。这与滏西平原和黑龙港平原降水小波模平方等值线图 (图 3(a)、图 3(b)) 中以 9 a 为尺度中心波动的能量衰减范围和时域振荡中心 (表 3) 有关, 在 1956 年- 1980 时域范围内小波能量波动明显, 则振幅相应较大。

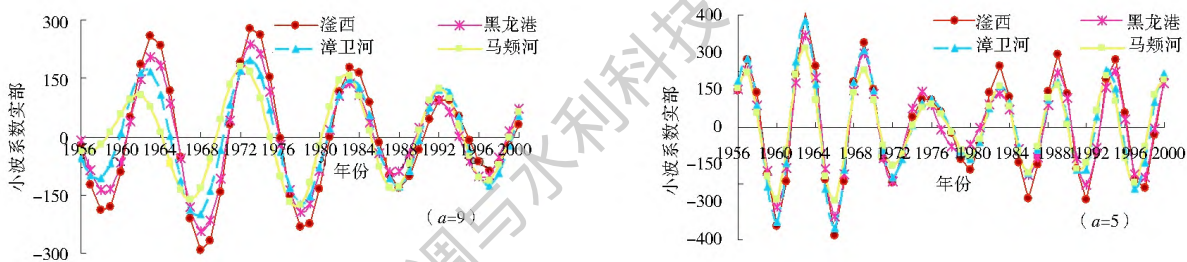


图 6 各平原区年降水过程不同尺度下丰枯波动情况 ( $a = 9, a = 5$ )

Fig. 6 High/low fluctuations of annual precipitation process on different time scales in each zone ( $a = 9, a = 5$ )

由图 6 ( $a = 5$ ) 可知, 在整个时域范围内, 各分区降水 45 年过程均呈现 7 个完整的丰枯交替波动, 进入 21 世纪后, 各平原区同样都进入丰水期。就波幅大小而言, 各平原降水过程的小波振荡情况明显的分为两个部分, 1975 前有一次振幅较均匀的振荡过程, 而在 1980 年后有一次波幅幅度保持均匀的振荡过程, 且前一次振动振幅较后面的要大。这与以 5 年为中心的小波波能量情况 (表 3 以及图 3) 非常吻合, 前一次振荡时域范围内小波波动中心能量较高, 因此振幅较大; 而后一次小波波动中心能量较低, 小波波动的振幅较小。

对比不同尺度下平原区降水的丰枯特性差异, 以 5 a 尺度来看, 其小波波动的振幅平均而言较 9 a 尺度下的振幅要大, 这也与图 3 所体现的小波能量大小及衰减等特性有关。从 2000 年后的趋势而言, 9 a 尺度下, 邯郸平原各分区的降水量趋于峰值的上升期, 而

尺度为 5 a 时, 各分区降水量已经跃过峰值并有下降趋势。为比较研究方便, 将各平原区年降水 9 a 和 5 a 尺度下的丰、枯变化列入表 4 中, 不同周期尺度下各区丰水段和枯水段时间可直接查出。

### 5 结论

本文运用小波分析法对邯郸平原各水资源分区的年降水 45 年 (1956 年- 2000 年) 序列进行了多尺度下的周期性、丰枯特性分析。结论如下。

邯郸市滏西平原旱涝演变过程主要存在以 5 a、9 a 左右变化的主要周期; 漳卫河平原和黑龙港平原旱涝演变过程都存在以 2 a、5 a、9 a、13 a 和 21 a 左右变化的主要周期; 马颊河平原旱涝演变过程存在以 2 a、5 a、9 a 和 13 a 左右变化的主要周期。4 个平原区旱涝演变过程共同存在以 5 a 和 9 a 左右变化的主要周期。

表4 邯郸平原区年降水不同周期下的丰枯时段变化

Tab.4 High periods and low periods of annual precipitation on different time scales on Handan Plain

| 平原区名称 | 9 a 尺度                 |                        | 5 a 尺度                 |                        |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|       | 丰水                     | 枯水                     | 丰水                     | 枯水                     |
| 滏西    | 1961- 1965, 1971- 1975 | 1956- 1960, 1966- 1970 | 1956- 1958, 1962- 1964 | 1959- 1961, 1965- 1967 |
|       | 1982- 1985, 1991- 1994 | 1976- 1981, 1986- 1990 | 1968- 1970, 1974- 1977 | 1971- 1973, 1978- 1981 |
|       |                        | 1995- 1999             | 1982- 1984, 1988- 1990 | 1985- 1987, 1991- 1993 |
|       |                        |                        | 1994- 1996             | 1997- 1999             |
| 黑龙江港  | 1961- 1965, 1971- 1975 | 1956- 1960, 1966- 1970 | 1956- 1958, 1962- 1964 | 1959- 1961, 1965- 1967 |
|       | 1981- 1985, 1990- 1994 | 1976- 1980, 1986- 1989 | 1968- 1970, 1974- 1976 | 1971- 1973, 1977- 1980 |
|       | 1999- 2000             | 1995- 1999             | 1981- 1984, 1988- 1990 | 1985- 1987, 1991- 1993 |
|       |                        |                        | 1994- 1996             | 1997- 1999             |
| 漳卫河   | 1960- 1965, 1971- 1975 | 1956- 1959, 1966- 1970 | 1956- 1958, 1962- 1964 | 1959- 1961, 1965- 1967 |
|       | 1981- 1985, 1991- 1994 | 1976- 1980, 1986- 1990 | 1968- 1970, 1974- 1977 | 1971- 1973, 1978- 1981 |
|       |                        | 1995- 1999             | 1982- 1984, 1988- 1990 | 1985- 1987, 1991- 1992 |
|       |                        |                        | 1993- 1995, 1999- 2000 | 1996- 1998             |
| 马颊河   | 1959- 1964, 1970- 1974 | 1956- 1958, 1965- 1969 | 1956- 1958, 1962- 1964 | 1959- 1961, 1965- 1967 |
|       | 1981- 1985, 1990- 1994 | 1975- 1980, 1986- 1989 | 1968- 1970, 1974- 1977 | 1971- 1973, 1978- 1981 |
|       |                        | 1995- 1999             | 1982- 1984, 1988- 1990 | 1985- 1987, 1991- 1992 |
|       |                        |                        | 1993- 1995, 1999- 2000 | 1996- 1998             |

各平原区降水在 9 a 和 5 a 周期下, 都有明显的丰枯交替; 在同一周期下, 不同分区降水的丰枯交替在幅度及时域上都具有较好的一致性; 同一分区的降水在不同周期下的丰枯交替在振幅和时域分布上存在较大的局部差异。

无论哪个尺度, 其丰枯交替波幅的大小与分布都与小波能量中心的时域影响范围及能量大小有关, 表明了不同尺度下区域降水的周期性和丰枯性变化的内在联系, 也相互印证了各平原区降水的周期性及丰枯变化特性及其演变趋势的客观性。上述分析结果为推断邯郸地区各平原区旱涝演变的特征及演变趋势提供了有力依据, 同时为区域极端条件下水资源的调度配置提供了技术支撑。

参考文献(References):

[1] 丁晶, 刘授权. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. (DING Jing, LIU Shouquan. Stochastic Hydrology[M]. Beijing: China water conservancy and hydropower press, 1997. (in Chinese))

[2] 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. (WANG Wen sheng, DING Jing, LI Yue qing. Wavelet analysis of hydrology[M]. Beijing: chemical industry press, 2005. (in Chinese))

[3] Morlet J, Arens G, Farge E, et al. Wave propagation and sampling theory—Part II: Sampling theory and complex waves [J]. Geophysics, 1982, 47(2): 222-236.

[4] Kumar P & Foufoula Georgiou E. A multi-component decomposition of spatial rainfall fields: 1. segregation of Large and Small Scale features using Wavelet transform [J]. Water Resources Research, 1993, 29(8): 2515-2532.

[5] Venugopal V, Foufoula Georgiou E. Energy decomposition of rainfall in the time frequency scale domain using wavelet packets [J]. Journal of Hydrology, 1996, 187: 3-27.

[6] 张少文. 黄河流域天然年径流变化特性分析及其预测[D]. 成都: 四川大学, 2005. (ZHANG Shaowen. Yellow River annual runoff analysis and its forecast [D]. Chengdu: Sichuan university, 2005. (in Chinese))

[7] Smith L C, Turcotte D L, Isacks B L. Stream flow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform [J]. Hydrological Process, 1998, (12): 233-249.

[8] 祁顺杰, 陈皓锐. Morlet 小波在降雨的多时间尺度分析中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 9(3): 79-82. (QI Shun jie, CHEN Haorui. Multiple time scale analysis on yearly rainfall with morlet wavelet analysis [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 9(3): 79-82. (in Chinese))

[9] 衡彤, 王文圣, 丁晶. 降水时间序列的小波特征[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 19(6): 466-470. (HENG Tong, WANG Wen sheng, DING Jing. Wavelet characteristics of the change in precipitation time series [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2001, 19(6): 466-470. (in Chinese))

[10] 李响, 邹宁, 吕孙云. 丹江口水库天然入库径流演变规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 206-210. (LI Xiang, ZOU Ning, LYU Sunyun. Variation of natural inflow runoff in the Danjiangkou Reservoir [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 206-210 (in Chinese))

[11] 张玉江. 塔里木河源流区径流量年内变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 124-128. (ZHANG Yurjiang. Intra-annual variation analysis of runoff in the headstream area of Tarim River basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 124-128. (in Chinese))

- [12] 刘丹丹, 吴现兵, 程伍群等. 白洋淀流域降水特性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 113-117. (LIU Dandan, WU Xiabing, CHENG Wujun, et al. Analysis of Characteristics of precipitation in Baiyangdian basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 113-117. (in Chinese))
- [13] 张仙娥, 刘妞, 仇亚琴等. 沂沭泗流域年降水和年地表水资源量演变趋势[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 24-28. (ZHANG Xiame, LIU Niu, QIU Yaqin, et al. Variation trend analysis of annual precipitation and surface water resources in the Yi-Shu-Si Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 24-28. (in Chinese))
- [14] 黄胜. 长江上游干流区径流变化规律及预测研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. (HUANG Sheng. The research of runoff change and prediction in the upper Yangtze River area[D]. Chengdu: Sichuan university, 2006. (in Chinese))
- [15] Yuan J, Luan Q H, Ma Z Z, et al. Periodicity and trend analysis of hydrologic series in multi time scale in Liru Kuang zone of Handan, China[C]. 3rd International Symposium on Electronic Commerce and Security (ISECS). USA: IEEE Computer Society, 2010, 372-376.
- [16] 张仲荣. 太阳黑子和 SOI 对黄河上游径流的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2008. (ZHANG Zhongrong. Impact of the sunspot and SOI on the Upper Yellow River Runoff[D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2008. (in Chinese))
- [17] 潘杰. 常州地区 1978 年 2012 年降水量时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 14(2): 245-248. (PAN Jie, Spatial and temporal characteristics of precipitation in Changzhou Area from 1978 to 2012[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 14(2): 245-248. (in Chinese))
- [18] 刘妞, 张仙娥, 仇亚琴, 等. 莆田市降水量时空演变规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 842-846, 852. (LIU Niu, ZHANG Xiame, QIU Yaqin, et al. Spatial and temporal variations of precipitation in Putian City[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 842-846, 852. (in Chinese))
- [19] 项洋旭, 娄华君, 张征, 等. 马海盆地近 40 年以来气温、降水演变规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1-5. (XIANG Yangxu, LOU Huajun, ZHANG Zheng, et al. Variations of annual average temperature and precipitation in the Mahai Basin in recent 40 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1-5. (in Chinese))
- [20] 纪忠萍, 谷德军, 谢炯光. 广州近百年来气候变化的多时间尺度分析[J]. 热带气象学报, 1999, 15(1): 81-93. (JI Zhongping, GU Dejun, XIE Jiongguang. Multiple time scales analysis of climate variation in Guangzhou during the last 100 years[J]. Journal of Tropical meteorology, 1999, 15(1): 81-93. (in Chinese))
- [21] 熊秋芬, 张利平. “98·7” 武汉、黄石特大暴雨过程的小波分析[J]. 武汉水利电力大学学报: 自然科学版, 2000, 33(1): 53-58. (XIONG Qiufen, ZHANG Liping. Wavelet analysis of extreme rain in Wuhan and Huangshi stations in July 1998[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering: Natural science edition, 2000, 33(1): 53-58. (in Chinese))
- [22] Luan Q H, Yuan J, Guo Z H, et al. Analyzing the periodicity and trend of precipitation with multi resolution analysis in mountain regions of Handan, China[C]. 2nd Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS). USA: IEEE Computer Society, 2010, (3): 85-88.
- [23] 王晓琳. 基于小波分析的邯郸山区水文特性分析与预测[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012. (WANG Xiaolin. The analysis and prediction of hydrological characteristics based on wavelet analysis in Handan mountain area[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2012. (in Chinese))
- [24] 雷廷, 张兆吉, 费宇红, 等. 海河平原 1956 年-2011 年降水特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 32-36, 41. (LEI Ting, ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, et al. Analysis of precipitation characteristics in the Haihe River Plain from 1956 to 2011[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 32-36, 41. (in Chinese))

(上接第 19 页)

- [25] 王立林, 王鸿艳, 齐德海, 等. 引滦入津工程水资源现状分析及解决措施[J]. 海河水利, 2008(5): 9-11. (WANG Lili, WANG Hongyan, QI Dehai et al. Water resources present situation analysis and solutions of water diversion from Luan River to Tianjin[J]. Haihe Water Resources, 2008(5): 9-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2008.05.004
- [26] 张利平, 李凌程, 夏军, 等. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 664-672. (ZHANG Liping, LI Lingcheng, XIA Jun et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff change in the Luanhe River Catchment[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(4): 664-672. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.04.012