



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.007

章数语, 王建华, 翟家齐, 等. 海河北系 1956 年-2012 年降水时序演变特征[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 36-42. ZHANG Shu yu, WANG Jian hua, ZHAI Jia qi, et al. Characteristics analysis of time serial of rainfall in the northern part of Haihe River Basin from 1956 to 2012[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 36-42. (in Chinese)

# 海河北系 1956 年-2012 年降水时序演变特征

章数语, 王建华, 翟家齐, 李海红, 赵 勇, 王庆明, 张 伟

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 采用海河流域北系 20 个气象站 1956 年-2012 年降水时间序列, 从趋势、周期、突变和空间差异四个方面分析了该地区降水时空变化特征。结果显示: 海河北系年降水以 14.9 mm/(10a) 的速度减少; 降水具有多时间尺度下的显著差异特征: 月尺度较平稳, 仅 10 月、11 月发生显著下降, 5 月、6 月发生显著增加; 季尺度上, 春、秋季较平稳, 夏、冬季呈现下降趋势; 年降雨呈现 28 年显著周期, 并且在 20 世纪 80 年代前后转入枯水期。地区差异上, 山区较平原区降水变化幅度更大, 但周期平稳, 突变时间更早。

**关键词:** 海河北系; 降水; 时间序列; 多尺度; 时空变化;

**中图分类号:** P468 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0036-07

## Characteristics analysis of time serial of rainfall in the northern part of Haihe River Basin from 1956 to 2012

ZHANG Shu yu, WANG Jian hua, ZHAI Jia qi, LI Hai hong, ZHAO Yong, WANG Qing ming, ZHANG Wei

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The annual precipitation time series of 20 climate stations in the northern part of Haihe River Basin from 1956 to 2012 were analyzed in this paper. The spatial and multi-temporal characteristics of the rainfall were analyzed from the aspects of trend test, period analysis, breakpoint detection and spatial heterogeneity analysis. The results showed that: (1) the rainfall of the northern part of Haihe River Basin decreased by 14.9mm per ten years; (2) rainfall of different time scales had significantly different characters: the monthly rainfall was steady, with rainfall in October and November decreasing significantly and that in May and June increasing significantly; the rainfall in spring and autumn were relatively stable and the decline in summer and winter were of significance; the annual rainfall were of 28 years period and switched from wet season to dry season in around 1980s. (3) annual rainfall in mountain areas reduced at a rate twice as quick as that in plain areas, but had more solid period and earlier breakpoint.

**Key words:** the northern part of Haihe River Basin; rainfall; time series; multi scale; temporal-spatial variation

海河北系地处北京、天津的上游地区, 其水资源系统变化, 尤其是降水时空变化直接影响着首都城

市圈水资源与生态安全。自 1999 年以来, 海河北系降水整体偏枯, 干旱问题突出, 水资源量持续衰减且

收稿日期: 2015-12-03 修回日期: 2016-03-21 网络出版时间: 2016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1056.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309249; 51379216); 水利部公益行业科研专项(201401041); 国家重点基础研究发展计划(2010CB951100); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAC19B03)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51309249; 51379216); Special Fund for scientific Research in Public Welfare Industry from Ministry of Water Resources (201401041); National Basic Research Program of China(2010CB951100); National Key Sci Tech Support Plan during the Twelfth Five year Plan Period(2012BAC19B03)

作者简介: 章数语(1992-), 女, 四川泸州人, 主要从事水文过程非一致性变化方面研究。Email: zhangshuyu1992@163.com

通讯作者: 翟家齐(1984-), 男, 河南信阳人, 博士, 主要从事流域水循环与物质循环模型、区域干旱评估方面研究。Email: jiaqizhai@163.com

空间差异显著, 区域水资源短缺形势严峻<sup>[1]</sup>。目前, 有关海河流域<sup>[2-4]</sup>、北京及天津<sup>[5-7]</sup>的降水、气温、径流等变化特征以及极端事件的分析已经取得了较多成果: 陈鸣等<sup>[8]</sup>绘制了海河流域降雨等值线图, 划分暴雨落区, 统计发现暴雨中心多发生在滦河水系, 引起流域区域性暴雨的主要是气旋系统。于赢东等<sup>[9]</sup>对海河流域降雨演变研究进行总结, 1980 年- 2000 年流域降雨较 1956 年- 1979 年减少 11%, 同年地表水资源量减少了 40%。王志良等<sup>[10]</sup>对滦河上游与南水北调中线水源地之间降水丰枯遭遇进行分析, 发现滦河流域与中线水源地之间丰枯异步性较好, 在合理调蓄下基本能够保障天津市供水。尽管有诸多研究证明海河流域、京津地区降水减少、水资源短缺状况严重的现状, 但仍缺乏对京津地区与周边地区降水之间时空关联与差异的研究, 以流域为研究尺度忽略了中小尺度地形、植被等因素的影响, 以城市为尺度, 则不能妥善考虑区域尺度气候的影响。本文以海河北系作为整体研究对象, 针对京津地区与上游山区降水之间的差异与联系进行研究, 结合海河北系的区域特征, 对 20 个气象站点 1956 年- 2012 年的日降水时间序列进行分析, 对其时间空间两方面变化特征进行特征描述: 从多时间尺度(月、季、年)分析降雨随时间变化的趋势特征、变化幅度以及可能存在的跳跃点, 识别年降水多尺度周期特征; 对比分析海河北系降水的地区空间差异, 为降水预报以及京津地区降水变化归因研究等提供基础与依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区域与数据资料

海河北系流域面积 8 34 万 km<sup>2</sup>, 其中山区占 62.5%, 平原占 37.5%, 属温带东亚季风气候, 区域气候受西伯利亚气团和海洋气团双重影响, 多年平均降水约 490 mm。本文采用中国气象科学数据共享服务网发布的海河北系域内及其周边 20 个气象站 1956 年- 2012 年降水序列资料, 来分析其时空变化特征, 气象站点及分布见图 1。基于泰森多边形法, 根据区域内与周边站点的控制面积计算出各站控制权重, 由此计算出区域平均年降水量、季降水量以及月降水量。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 M-K 非参数检验

本文通过 Mar Kendall 非参数检验法对降水序列进行趋势检验, 计算降水时间序列变化显著水平, 判定原时间序列是否存在显著的趋势成分<sup>[11]</sup>。国

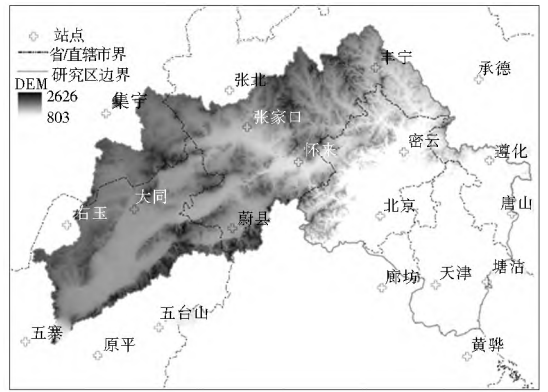


图 1 海河北系及气象站点分布

Fig. 1 Location of the northern part of Haihe River Basin and distribution of selected meteorological stations

内外应用 M-K 检验进行趋势分析的应用研究已非常成熟<sup>[12-14]</sup>。计算步骤如下:

首先按照式(1)确定所有对偶组合的大小关系, 计算出序列的总秩 S。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i);$$

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & x_i - x_j > 0 \\ -1, & x_i - x_j < 0 \\ 0, & x_i - x_j = 0 \end{cases} \quad (1)$$

统计量 S 期望 E(S), 方差 Var(T) 如下:

$$E(S) = 0$$

$$\text{Var}(T) = \frac{n(n-1)(2n+S) - \sum_{i=1}^{n-1} ti(i-1)(2i-S)}{18} \quad (2)$$

随着 n 的增大, U 逐渐收敛于正态分布。对其构建标准统计量 Z:

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

根据式 4, 计算原序列的各对元素离差, 并进行排序, 取中位数, 即可得到 Kendall 倾斜度 β, 当 β > 0 时, 表示序列有上升趋势, 反之呈下降趋势, β 值表示变化速度(式 1)。

$$\beta = \text{Median} \left[ \frac{x_i - x_j}{i - j} \right] \quad \forall i > j \quad (4)$$

#### 1.2.2 小波分析

小波分析是通过一簇小波函数逼近对象信号, 以多种尺度对信号进行放大, 将原始信号中的规律性更加清晰地呈现出来<sup>[15]</sup>的方法。水文上通常采用复小波进行信号扩大。复小波实部与虚部相差的 π/2 可以消除实小波变换以变换系数作为判断依据所产生的虚假振荡, 提高结果准确度。将小波变换参数的平方进行积分得到小波方差<sup>[16]</sup>, 能够反映信

号能量随尺度的分布, 方差值越大表示当前尺度下信号扰动强度越高。以尺度为自变量绘制小波方差曲线可用于确定信号在不同尺度下振荡的相对强度<sup>[17]</sup>。第一扰动周期, 第二扰动周期, 第三扰动周期...第  $n$  扰动周期, 即为曲线最大值、次最大值等极值点对应横坐标。

### 1.2.3 Pettitt 检验

Pettitt 于 1979 年提出基于非参数检验水文序列突变点的方法, 计算简便且可得到发生变异的时间点<sup>[18]</sup>。其前提是原序列存在趋势变化, 核心在于通过检验时间序列均值发生变化的时间, 从而确定序列突变时刻<sup>[19]</sup>。通过构建 Mann-Whitney 统计量  $U_{i,N}$ , 检验同一总体中的两个样本

$$U_{i,N} = U_{i-1,N} + \sum_{j=i}^N \text{sgn}(x_i - x_j), i = 2, \dots, N \quad (5)$$

式中:  $x_j$  为假设检验的随机变量;  $t$  表示时间序列中某一样本序列;  $N$  表示序列长度,  $U_{i,N}$  表示第二个序列超过第一个序列次数所组成的新序列。零假设 ( $H_0$ ) 为序列不存在突变点, 若成立, 则无趋势变化,  $\text{sgn} = 0$ ,  $U_{i,N}$  符合高斯分布, 反之则不符合。根据式 (6) 选出  $U$  序列绝对值最大值, 按照式 (7) 计算  $P$  值, 若  $P \leq 0.5$ , 则认为该点为统计意义上的显著变异点, 否则不显著。

$$K_r = \text{Max} |U_{i,N}| \quad (6)$$

$$P = 2 \exp[-6K_r^2 / (N^3 + N^2)] \quad (7)$$

Pettitt 检验一次只识别唯一最显著突变点, 以变异点为界多次进行检验: 以上一次变异点为界, 对变点前后序列再分别进行 Pettitt 检验, 以此方式产生多级变异点<sup>[19]</sup>。

## 2 降水多尺度时间变化特征

### 2.1 月降水变化特征分析

利用 M-K 检验, 对各站月降水 1956 年-2012 年

的年降水趋势特征进行分析可知见图 2: 10 月、11 月降水下降趋势具全域性, 变化幅度分别在  $-1.73 \sim -0.02 \text{ mm}$ ,  $-2.06 \sim -0.11 \text{ mm}$  之间, 其中有 4 个站点 10 月降水下降趋势达到 95% 置信水平, 而 11 月有 11 个站点达到 95% 置信水平, 是变化幅度最显著的月份; 2 月、8 月降水呈现较为显著的增加趋势, 变化幅度分别在  $-0.50 \sim 0.25 \text{ mm}$ ,  $-0.19 \sim 0.54 \text{ mm}$  之间, 分别有 1、4 个站点发生 95% 置信水平的增加趋势; 其余月份降水序列较为平稳。从整体变化显著程度看, 95% 置信水平的演变主要发生在 8 月、10 月与 11 月。从变化率看, 变化幅度在  $-12.3\% \sim 3.4\%$  间, 从图 2 看, 3 月-7 月降水较平稳, 8 月至次年 2 月降雨呈现增加-减少-增加的波动。

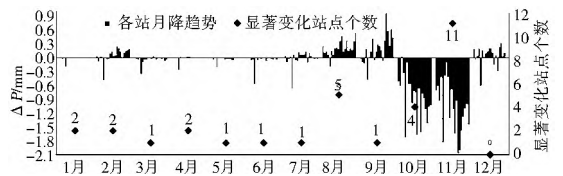


图 2 各站月降水趋势变化及显著站点数量

Fig. 2 Trend test results of monthly rainfall of stations and the number of stations that have changed significantly

对海河北系流域 20 个气象站点 1956 年-2012 年多年平均月降水量进行泰森多边形平均处理, 发现地区多年月平均降水量变化特征为: 7 月多年平均降水为  $148.41 \text{ mm}$ , 占年降水量的 28.88%, 是多年平均最大降水量月份; 1 月多年平均降水量为  $2.93 \text{ mm}$ , 占多年平均降水量的 0.57%, 是多年平均年降水量最小月份。1 月-7 月降水量逐月增加, 8 月-12 月降水量逐月减少; 6 月-9 月降水占多年平均降水量的 75% 以上。从变化趋势上看, 多年平均 7 月、8 月降水量呈现显著减少趋势, 5 月、6 月降水量呈现显著增加趋势, 其余月份呈现轻微波动, 并未出现显著变化。具体变化量见表 1。

表 1 区域平均月降水变化趋势

Tab. 1 Regional average monthly rainfall trend test results

|              | 1 月   | 2 月   | 3 月   | 4 月   | 5 月   | 6 月   | 7 月    | 8 月    | 9 月   | 10 月  | 11 月  | 12 月 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|------|
| 多年平均/mm      | 2.93  | 5.08  | 10.07 | 21.86 | 35.55 | 73.50 | 148.41 | 126.37 | 53.38 | 24.15 | 9.43  | 3.17 |
| 变化量/mm       | -0.02 | -0.03 | -0.04 | 0.04  | 0.26  | 0.28  | -0.95  | -1.13  | 0.09  | 0.07  | -0.02 | 0.00 |
| 置信率 $\alpha$ | 0.96  | 0.84  | 0.74  | 0.32  | 0.01* | 0.02* | 0.99*  | 0.99*  | 0.28  | 0.19  | 0.71  | 0.53 |

注: \* 表示检验显著。

### 2.2 季节降水变化特征

将各季降水变化规律作图(见图 3): 图中黑色柱体上界表示时段起始降水量, 下界表示时段末降水量, 白色柱体则相反, 即, 黑色柱体表示时段内降水减少, 白色柱体表示时段内降水增加; 线段上端表

示时段最大降水量, 下端表示时段最小降水量。

由图可以看出, 春季降水较平稳(图 3(a)), 呈现减-增-减的趋势, 1956 年-1960 年间降水减少, 其后 30 年均有增加, 20 世纪 80 年代末出现最大降水( $119.9 \text{ mm}$ ), 其后逐渐下降, 20 世纪 90 年

代中出现最小降水量( 34.4 mm), 21 世纪后逐步回升; 夏季降水总体呈现减少趋势(图 3(b)), 最大降水量( 523.9 mm) 出现在 1956 年- 1960 年间, 20 世纪 60 年代、70 年代降水波动较大, 20 世纪 80 年代稍有反弹, 20 世纪 90 年代出现最小降水量( 213.2 mm), 进入 21 世纪后略有增加; 秋季降水总体呈现增- 减- 增的趋势, 与春季降水相反(图 3(c)), 20 世纪 60 年代前降雨增加, 其后 20 年连续下降, 在 20 世纪 60 年代出现最小降水量( 43.2 mm), 进入 20 世纪 80 年代后, 秋季降水开始波动上升, 最大、最小降水差距持续增加, 在 21 世纪后达到最大, 并

出现最大降水量( 146.3 mm); 冬季降水整体上稳中有降(图 3(d)), 1956 年- 1970 年降水量呈现波动下降, 20 世纪 70 年代最大、最小降水差最大, 出现最大降水量( 26.7 mm), 其后 20 年有轻微增加趋势, 但在 20 世纪 90 年代中期降至最小( 2.9 mm), 21 世纪后继续减少, 但波动逐渐平稳。从总体年内分配上看, 海河北系流域春、秋降水较为平稳, 夏、冬波动较大; 从时间序列上看, 20 世纪 70 年代、80 年代是季节降水的分水岭, 之前季节降水呈下降趋势, 之后逐步回升, 但降水平均水平仍然低于最初时段, 即 20 世纪 60 年代以前。

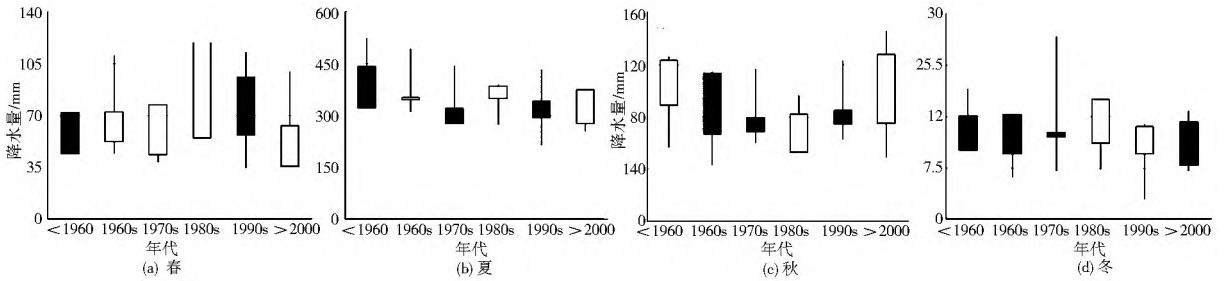


图 3 季降水代际变化

Fig. 3 The box-plot of four seasonal rainfall change(a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

### 2.3 年降水变化特征

据统计, 海河北系 20 个气象站点的年降水量均呈下降趋势(表 2), 降幅在 1.4~ 72 mm/( 10a) 之间, 平均 14.9 mm/( 10a)。其中, 五台山、丰宁、怀来 3 站降水下降最显著: 五台山降水自 20 世纪 80 年代末起持续衰减, 1956 年- 1990 年平均降水量 880 mm, 而 1990 年- 2012 年降至 630 mm, 减少了 250 mm, 降幅达 28%; 丰宁站降水从 20 世纪 70 年代中期、20 世纪 90 年代末开始出现两次显著衰减期, 年均降水量分别为 433 mm、417 mm, 较多年平均减少 10%, 尤其是 1998 年以来的降幅达 40.7 mm/( 10a); 怀来年降水自 20 世纪 70 年代中期开始下降, 1956 年- 1975 年平均

降水量为 417.1 mm, 2001 年- 2012 年平均年降水量 365.3 mm, 降幅达 13%。

海河北系年降水呈现多尺度周期变化(表 2), 其中 28 a 左右的周期特征最为显著: 站点年降水第一主周期在 27~ 32 a 之间; 第二主周期主要在 13~ 18 a 之间; 第三主周期主要在 4~ 10 a 间。从图 4 中可以看出, 面平均年降水在 50~ 55 a 大尺度上经历了由丰转枯的振荡过程, 到 2012 年等值线仍未闭合, 表明枯水期仍将持续; 在 20~ 30 a 尺度上呈现丰→枯→丰→枯的交替变化特征; 在 2000 年前降水序列表现出明显的 15 a 振荡特征, 其后却不显著, 说明 2000 年后区域降水发生了变化。

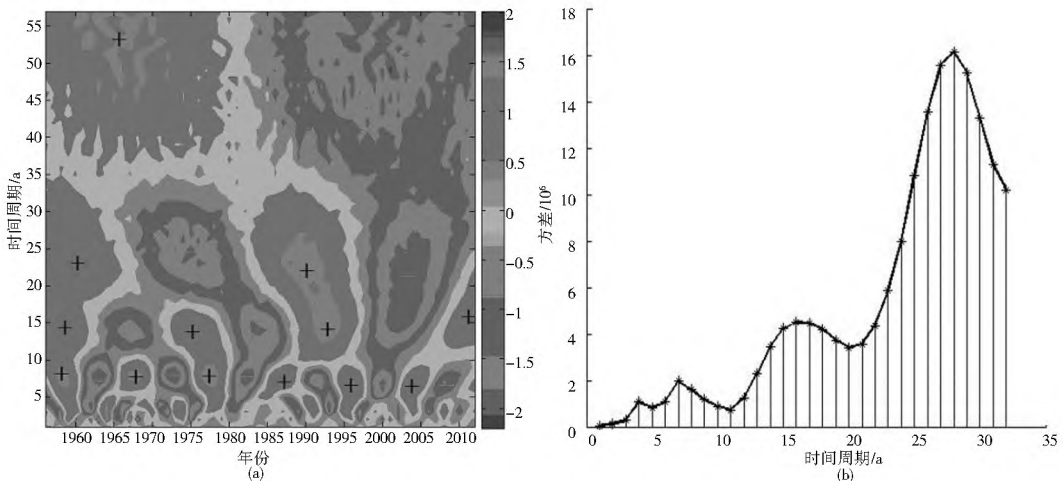


图 4 区域年降水 Morlet 小波实部等值线及小波方差

Fig. 4 Contours(a) and variances(b) of the regional rainfall wavelet transform coefficient

从表 2 可看出: 1956 年- 2012 年间, 五台山、丰宁、怀来等 8 站出现了显著的一级突变点, 集中在 1974 年- 1998 年间。在此基础上对降水序列进行二级突变检验, 结果发现, 密云和北京站分别在 2003 年、2007 年出现二级突变点, 其他站点未检验

出显著的二级突变点。从面平均看, 年降水在 1996 年发生显著性突变, 并在 2003 年、2007 年- 2008 年出现二级突变点。这一结果与海河北系在 20 世纪 90 年代中后期降水进入枯水期、存在小尺度的周期变化特征相吻合。

表 2 20 个气象站年降水系列检验分析结果

Tab. 2 The test and analysis results of the annual rainfall time series of the selected 20 meteorological stations

| 编号   | 站名  | Man-Kendall 检验 |        | 小波分析 |        |      | Petitt 检验 |       |       |
|------|-----|----------------|--------|------|--------|------|-----------|-------|-------|
|      |     | β 倾斜度          | 置信水平   | 第一周期 | 第二周期   | 第三周期 | U         | 一级变异点 | 二级变异点 |
| 1    | 张北  | - 0.536        | 0.765  | 28   | 16, 17 | 8    | 0.832     |       |       |
| 2    | 右玉  | - 0.611        | 0.739  | 28   | 18     | 4    | 0.958     |       |       |
| 3    | 集宁  | - 1.013        | 0.838  | 29   | 18     | 7    | 1.245     |       |       |
| 4    | 大同  | - 0.465        | 0.668  | 28   | 18     | 4    | 1.226     |       |       |
| 5    | 五台山 | - 7.203        | 0.999* | 32   | 18     | 10   | 0.001*    | 1988  |       |
| 6    | 蔚县  | - 0.503        | 0.622  | 28   | 18     | 4    | 1.129     |       |       |
| 7    | 五寨  | - 0.149        | 0.568  | 28   | 16     | 7    | 0.940     |       |       |
| 8    | 原平  | - 0.676        | 0.616  | 28   | 15     | 10   | 1.015     |       |       |
| 9    | 丰宁  | - 1.877        | 0.977* | 28   | 17     | 7    | 0.350*    | 1974  |       |
| 10   | 张家口 | - 0.936        | 0.805  | 28   | 18     | 9    | 0.532     |       |       |
| 11   | 怀来  | - 1.638        | 0.983* | 28   | 7      |      | 0.171*    | 1979  |       |
| 12   | 密云  | - 1.058        | 0.863  | 28   | 15     | 7    | 0.350*    | 1995  | 2003  |
| 13   | 承德  | - 1.239        | 0.816  | 28   | 18     | 8    | 0.746     |       |       |
| 14   | 遵化  | - 3.361        | 0.968  | 28   | 16     | 9    | 0.229*    | 1996  |       |
| 15   | 北京  | - 1.891        | 0.834  | 28   | 13     | 8    | 0.371*    | 1998  | 2007  |
| 16   | 廊坊  | - 0.392        | 0.728  | 28   | 7, 5   |      | 0.350*    | 1978  |       |
| 17   | 天津  | - 0.867        | 0.695  | 28   | 15     | 6    | 0.931     |       |       |
| 18   | 唐山  | - 0.310        | 0.663  | 32   | 15     | 4    | 0.329*    | 1990  |       |
| 19   | 塘沽  | - 0.144        | 0.508  | 32   | 15     | 4    | 1.091     |       |       |
| 20   | 黄骅  | - 1.140        | 0.765  | 27   | 13     | 4    | 0.603     |       |       |
| 区域平均 |     |                |        |      |        |      |           |       | 2003  |
|      |     |                |        |      |        |      |           |       | 2007  |
|      |     |                |        |      |        |      |           |       | 2008  |

注: \* 表示检验显著。

### 3 降水空间差异

海河北系东西跨度逾 500 km, 从东南平原地区到西部、北部山区, 降水总体呈减少趋势, 降水空间差异性十分显著。从图 5 可以看出, 五台山-怀来-丰宁一线是海河北系降水衰减的分水岭, 以西北山区降水衰减幅度普遍强于东南部平原地区: 13 个山区气象站的降水量平均降幅 15.19 mm/(10a), 尤以五台山下最剧烈, 降幅达 72.03 mm/(10a) (99% 置信水平), 而平原区(7 个气象站)降水量平均降幅 7.91 mm/(10a), 约为山区降幅的一半, 差异十分显著。

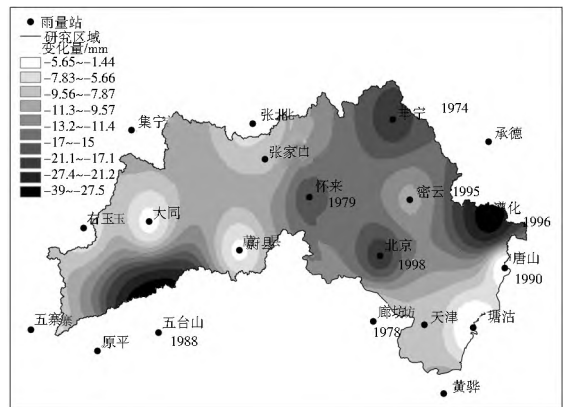


图 5 降雨变化地区分布

Fig. 5 The distribution of the significantly changed stations of the annual rainfall

从丰枯变化特征看,山区转枯时间普遍较平原地区早。对站点年降水的分析结果显示:山区站点自 20 世纪 70 年代起开始转枯,而平原地区则从 20 世纪 80 年代开始陆续进入枯水期,明显滞后于山区。此外,平原地区第三主周期较山区更短,塘沽、唐山、黄骅等临海站点降水在小尺度上丰枯交替更频繁。

从降水的突变特征看,发生显著突变的站点主要集中在平原城市区和太行山东南山前地区。山区站点的突变出现于 20 世纪 70 年代中后期,平原地区则在 20 世纪 90 年代发生突变,并且山区气象站点突变时间早于平原地区。另外,北京、密云两站的二次突变均在 21 世纪初,与一级突变点相差不过十年,表明山区年降水时序统计规律较一致,而平原地区年降水序列紊动相对剧烈。

总体上,海河北系年降水具有显著的空间差异性:太行山东南山前地区(以丰宁、怀来、五台山等站为代表)降水变化活跃,下降幅度大且趋势显著,周期平稳,突变发生时间较早。平原城市地区(以北京、密云、天津等站为代表)降水变化幅度小、趋势不显著,主周期平稳、次周期短,突变发生时间靠后。相比之下,太行山腹地山区(以集宁、张北、五寨等站为代表)降水序列前后一致性较好,大尺度周期稳定,短周期波动较弱,在近 57 年来没有发生显著突变现象。

## 4 结论

通过对海河北系 1956 年-2012 年降水系列时空演变特征进行统计分析,发现海河北系下游京津地区降水变化与上游太行山区之间的时间前后联系以及整个区域降水变化特征的空间分布情况:(1)海河北系近 50 年来年降水量总体呈现减少趋势,尤其是 20 世纪 90 年代后衰减趋势更加显著。(2)降水序列在多时间尺度呈现显著特征:月尺度上,7 月、8 月降水量下降显著,且下降幅度较大,5 月、6 月降水量呈显著增加;季尺度上,春、秋季降水偏丰,趋势稳定,夏、冬两季降水均呈现下降趋势,其中夏季变化较大,冬季相对平稳;年尺度上,总体呈现下降趋势,降幅达  $14.9 \text{ mm}/(10\text{a})$ ,周期平稳,呈现以 28 年为显著周期的多尺度周期振荡。(3)20 世纪 70 年代-90 年代,海河北系降水转入枯水期,突变点集中在 1974 年-1998 年区间内。(4)空间上,年降水差异显著:山区降水衰减速度是平原区的 2 倍;平原地区丰枯交替更频繁,低尺度周期更活跃;山区降水进入枯水期时间比平原区早 5~10 a;山区年降水突变集中

在 20 世纪 70 年代后期,而平原区突变时间集中在 20 世纪 90 年代。

## 参考文献(References):

- [1] 任宪绍.海河流域水资源评价[Z].北京:中国水利水电出版社,2007.(REN Xiānshào. The Water resources assessment of Haihe river basin[Z]. Beijing: China Water Power Press, 2007 (in Chinese))
- [2] 关铁生,姚惠明,吴永祥,等.海河流域极端暴雨特征及其天气成因[J].水文,2012,32(1):80-83.(GUAN Tiēshēng, YAO Huīmíng, WU Yǒngxiāng, et al. Characteristics and weather cause of extreme rainstorms in Haihe river basin[J]. Hydrology, 2012, 32(1): 80-83. (in Chinese))
- [3] 王哲,只德国,李涛涛,等.海河流域降雨时间序列小波分析[J].海河水利,2012(03):30-32.(WANG Zhē, ZHǐ Déguó, Lǐ Tāotāo, et al. Wavelet analysis of Haihe river basin rainfall time series[J]. Haihe Water Resources, 2012(03): 30-32. (in Chinese))
- [4] 朱玲,柳艳香,左洪超,等.海河流域水汽输送及其变化特征分析[J].气候变化研究进展,2011(03):184-188.(ZHŪ Lín, LIŪ Yànyāng, ZUŌ Hōngchāo, et al. Water vapor transport characteristics over the Haihe river basin[J]. Advances in Climate Change Research, 2011(03): 184-188. (in Chinese))
- [5] 廖晓农,张琳娜,何娜,等.2012年3月17日北京降水相态转变的机制讨论[J].气象,2013(01):28-38.(LIÀO Xiǎonóng, ZHANG Lǐnà, HÉ Nà, et al. Discussion of Beijing precipitation phase transformation mechanism on March 17, 2012[J]. Meteorology, 2013(01): 28-38. (in Chinese))
- [6] 王佳丽,张人禾,王迎春.北京降水特征及北京市观象台降水资料代表性[J].应用气象学报,2012(03):265-273.(WANG Jiālì, ZHANG Rénhè, WANG Yìngchūn. Beijing observatory precipitation and precipitation characteristics of data representation[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012(03): 265-273. (in Chinese))
- [7] 王秀荣,王维国,刘还珠,等.北京降水特征与西太副高关系的若干统计[J].高原气象,2008(04):822-829.(WANG Xiùróng, WANG Wéiguo, LIŪ Huánzhū, et al. Beijing precipitation characteristics and the western pacific subtropical high relationship of statistics[J]. Plateau Meteorology, 2008(04): 822-829. (in Chinese))
- [8] 陈鸣,吴永祥,王高旭,等.不同天气系统下海河流域汛期暴雨落区及时程分布规律[J].河海大学学报:自然科学版,2011(03):237-241.(CHEN Míng, WU Yǒngxiāng, WANG Gāoxù, et al. Distribution of the Haihe river basin flood rainstorm areas away in time under different weather systems[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011(03): 237-241. (in Chinese))
- [9] 于赢东,杨志勇,刘永攀,等.变化环境下海河流域降水演变研究综述[J].水文,2010(04):32-35.(YŪ Yíngdōng, YÁNG Zhìyǒng, LIŪ Yǒngpān, et al. Review of study on precipitation of Haihe river basin under changing environment[J]. Hydrology, 2010(04): 32-35. (in Chinese))

- [10] 王志良, 杨弘. 天津市水源地降水丰枯遭遇性分析[J]. 海河水利, 2004(06): 15-18. (WANG Zhiliang, YANG Hong. Tianjin water sources suffered the precipitation analysis[J]. Haihe Water Resources, 2004(06): 15-18. (in Chinese))
- [11] 周芬. Kendall 检验在水文序列趋势分析中的比较研究[J]. 人民珠江, 2005(2): 35-37. (ZHOU Fen. Kendall test in the analysis of hydrological sequence trend in comparative study[J]. Pearl River, 2005(2): 35-37. (in Chinese))
- [12] 罗蔚, 张翔, 邓志民, 等. 1956-2008 年鄱阳湖流域水沙输移趋势及成因分析[J]. 水科学进展, 2014(05): 658-667. (LUO Wei, ZHANG Xiang, DENG Zhimin, et al. Runoff and sediment load transport and cause analysis in Poyang Lake basin over the period 1956-2008[J]. Advances in Water Science, 2014(05): 658-667. (in Chinese))
- [13] Yue S, Wang C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test[J]. Water Resources Research, 2002, 38(6): 1-4.
- [14] 李文文, 傅旭东, 吴文强, 等. 黄河下游水沙突变特征分析[J]. 水力发电学报, 2014(01): 108-113. (LI Wenwen, FU Xudong, WU Wenqiang, et al. Study on runoff and sediment process variation in the lower Yellow River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014(01): 108-113. (in Chinese))
- [15] Hengyi W, 刘纪元. 小波周期频率分析及其应用于热带西太平洋对流变化研究[J]. 海洋技术, 1997, 16(02): 62-75. (Hengyi W, LIU Jiyuan. Wavelet cycle frequency analysis and its application in the tropical western Pacific convection change research[J]. Marine Technology, 1997, 16(02): 62-75. (in Chinese))
- [16] 张宇, 钟平安, 万新宇, 等. 近 57 年江苏沿海降水量演变特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015(02): 36-39. (ZHANG Yu, ZHONG Pingan, WAN Xin Yu, et al. Analysis of characteristics of Jiangsu coastal precipitation evolution nearly in 57 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(02): 36-39. (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(02): 34-36. (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(02): 34-36 (in Chinese))
- [18] 张蔚, 严以新, 郑金海, 等. 珠江三角洲年际潮差长期变化趋势[J]. 水科学进展, 2010(01): 77-83. (ZHANG Wei, YAN Yixin, ZHENG Jinhai, et al. Interannual tidal range trend in Pearl River Delta[J]. Advances in Water Science, 2010(01): 77-83. (in Chinese))
- [19] 周园园, 师长兴, 范小黎, 等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011(11): 1361-1369. (ZHOU Yuan Yuan, SHI Changxing, FAN Xiaoli, et al. Advances in the research methods of abrupt changes of hydrologic sequences and their applications in drainage basins in China[J]. Progress in Geography, 2011(11): 1361-1369. (in Chinese))

## (上接第 29 页)

- [11] 徐海量, 叶茂, 宋郁东. 塔里木河源流区气候变化和年径流量关系初探[J]. 地理科学, 2007, 2: 219-224. (XU Hailiang, YE Mao, SONG Yurong. Relationship between climate changes and annual runoff of head streams of Tarim River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 2: 219-224. (in Chinese))
- [12] 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 Yujiang. Intrannual 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))
- [13] 孙美平, 姚晓军, 李忠勤, 等. 21 世纪天山南坡台兰河流域径流变化情景预估[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 342-349. (SUN Meiping, YAO Xiaojun, LI Zhongqin, et al. Estimation of TAILAN river discharge in the Tianshan Mountains in the 21st century[J]. Advances in Climate Change Research, 2012, 8(5): 342-349. (in Chinese))
- [14] Wang X Q, Huang G H, Lin Q G, et al. A stepwise cluster analysis approach for downscaled climate projection: a Canadian case study[J]. Environmental Modelling and Software, 2013, 49: 141-151.
- [15] Qin X S, Huang G H, Chakm A. A Stepwise inference based optimization system for supporting remediation of petroleum contaminated sites[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, 185: 349-368.
- [16] Wei S, Huang G H, Zeng G M, et al. A stepwise cluster microbial biomass inference model in food waste composting[J]. Waste Management, 2009, 29: 2956-2968.
- [17] Chen Y N, Yang Q, Luo Y, et al. Ponder on the issue of water resources in the arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1-9.
- [18] Dou Y, Chen X, Bao A M, et al. The simulation of snowmelt runoff in the ungauged Kaidu river basin of TianShan Mountains, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62: 1039-1045.
- [19] Ling H B, Xu H L, Fu J Y. Temporal and spatial variation in regional climate and its impact on runoff in Xinjiang, China[J]. Water Resources Management, 2013, 27: 381-399.
- [20] Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. Glacier changes during the last forty years in the Tarim Interior River basin, northwest China[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19: 727-732.