

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0152

宋苏林,高晓曦,左德鹏,等.小清河流域汛期多年降水变化趋势[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):46-52. SONG S L, GAO X X, ZUO D P, et al. Trend of precipitation variation in flood season in Xiaoqing River basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 46-52. (in Chinese)

# 小清河流域汛期多年降水变化趋势

宋苏林<sup>1</sup>,高晓曦<sup>2</sup>,左德鹏<sup>2</sup>,徐宗学<sup>2</sup>,韩先明<sup>2</sup>,蔡思扬<sup>2</sup>

(1. 济南市水文局, 济南 250014; 2. 北京师范大学 水科学研究院 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘要:**以黄台桥水文站为出口断面的小清河流域作为研究区,根据流域内5个雨量站1977-2014年日降水资料,首先采用非参数Mann-Kendall法对流域内各站多年汛期降水变化进行趋势分析,并用Morlet小波分析流域汛期降水的周期变化;其次使用Mann-Kendall检验法并结合滑动t检验、有序聚类法及Yamamoto法进行突变检验;最后使用Hurst指数法对流域各站点降水未来趋势进行预测。研究结果表明:流域内各站点汛期多年降水变化呈现增加趋势,但变化趋势并不显著;流域汛期降水变化存在22a左右的主周期;突变分析表明汛期各站点降水的突变年份并不完全相同,而预计汛期降水量的未来变化将呈现出微弱的上升趋势。

**关键词:**小清河流域;汛期降水;趋势变化;非参数检验;Hurst指数;Morlet小波

中图分类号:P426 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Trend of precipitation variation in flood season in Xiaoqing River basin

SONG Sulin<sup>1</sup>, GAO Xiaoxi<sup>2</sup>, ZUO Depeng<sup>2</sup>, XU Zongxue<sup>2</sup>, HAN Xianming<sup>2</sup>, CAI Siyang<sup>2</sup>

(1. Jí nán Hydrology Bureau, Jí nán 250014, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

**Abstract:** We took the Xiaoqing River basin as the study area. Based on the daily precipitation data from 1977 to 2014 at five rainfall stations, we used the Mann-Kendall trend test to analyze the variation trend of flood season precipitation at each station; then we used Morlet wavelet to analyze the periodical variation of flood season precipitation. We detected the abrupt change points of the precipitation series using various methods, including the Mann-Kendall method, sliding t test, sequential clustering analysis, and Yamamoto method. Finally, we used the Hurst exponent method to predict the future trend of the flood season precipitation at each station. The results showed that the flood season precipitation tended to increase, but the abrupt change points were insignificant. The period of the flood season precipitation was about 22 years. The abrupt change analysis showed that the abrupt change points of the flood season precipitation detected by different methods were not consistent, and the future variation of the estimated flood season precipitation showed a weak upward trend.

**Key words:** Xiaoqing River basin; flood season precipitation; change trend; non parameter test; Hurst index; Morlet wavelet

小清河流域是济南市重要经济区,在济南市经济发展中占有举足轻重的地位,同时流域内的小清

河是济南及沿岸地区唯一的排洪河道,担负着济南市、章丘、历城等地的泄洪任务。近几十年来,随着

收稿日期:2018-03-15 修回日期:2018-09-28 网络出版时间:2018-10-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181011.1122.006.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1502703);济南市海绵城市水循环演变与水文过程模拟项目(JNH MCS-2017)

Funds: National Key Research and Development Program of China (2017YFC1502703); Water Cycle Evolution and Hydrological Process Simulation of Sponge City in Jí nán (JNH MCS-2017)

作者简介:宋苏林(1984),男,山东乳山人,工程师,主要从事水文情报预报方面研究。E-mail: jnsqk@163.com

通讯作者:高晓曦(1993),男,河北张家口人,主要从事流域水文过程模拟方面研究。E-mail: 201721470008@mail.bnu.edu.cn

全球气候的变暖以及人类城市化进程的不断加快,流域水循环发生了重要变化。同时,由于该流域降水年内分配极不均匀,且主要集中在汛期,汛期降水约占到全年降水的 75.5%。因此分析该流域汛期降水的时空变化规律及未来变化趋势,对于探讨城市化对水文气象变化的影响具有重要意义。

近些年来,国内诸多学者针对小清河流域水文气象变化进行了一系列研究,例如,窦实等<sup>[1]</sup>分析了小清河流域降水、径流的时空变化,重点对济南“070718”次特大暴雨洪水资料进行了分析,结果表明该暴雨历时短、强度高,但空间分布相对均匀。黄国如等<sup>[2]</sup>根据流域内 5 个雨量站 1977–2013 年逐日降水资料分析了城市化对汛期降水的影响,结果表明汛期降水量和频次均呈增加趋势,且城区较郊区更为明显。于翠松等<sup>[3]</sup>分析了小清河流域防洪现状及问题,提出了加强河道、病险水库治理,建立洪水预报系统等建议。李祥松等<sup>[4]</sup>根据小清河流域内 7 个雨量站 1977–2013 的逐日降水资料,主要分析多年汛期降水量趋势变化和突变成分并对未来变化趋势进行了预测,结果表明汛期降水呈增长趋势,且未来将会继续增加。

本文在对小清河流域的汛期时空演变分析的同时,结合多种突变方法对小清河汛期降水突变点进行识别,并采用 Morlet 小波分析不同尺度下多年汛期降水的周期分量,旨在为当地的水资源管理及应对汛期洪水危机提供指导。

## 1 研究区概况

济南市小清河流域,南依泰沂山脉,北界黄河,位于鲁中山区与华北平原的过渡地带,属暖温带半湿润大陆性季风气候区。小清河济南段全长 70.5 km,自西向东流经槐荫、天桥、历城、章丘四区(市),流域面积为 2 792 km<sup>2</sup>。流域内地形地势复杂,地形南高北低,自西向东倾斜,由南到北依次为山区丘陵、平原、洼地。流域内大小支流有 20 条左右,大多分布在河的右岸河流,且都是山区性河流坡陡流急。流域多年平均降水量 617.2 mm,降水年际变化大,时空分配不均,汛期降水量要占到全年降水量的绝大多数。济南小清河流域位置见图 1。

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 趋势分析

Manr Kendall 法是一种基于秩的非参数统计检验法,常用来检测水质、气温、降水等水文气象序

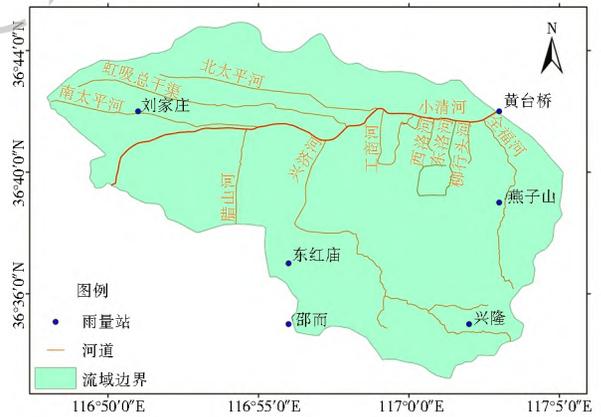


图 1 小清河流域位置示意图

Fig. 1 The location of Xiaoqing River basin

列资料的趋势变化<sup>[5]</sup>。其优点是样本可以不遵循某种特定的分布,且不受异常值的干扰,计算相对简便<sup>[6]</sup>。Manr Kendall 法中有两个参数比较特殊,一个是代表序列趋势显著性水平的  $Z$  值,另一个是表示序列变化趋势倾斜度的  $\beta$  值。其中利用  $Z$  判断序列的显著性水平,当  $Z > 0$  时,表明序列呈上升趋势;当  $Z < 0$  时,序列呈递减趋势;而变化趋势的大小可根据  $\beta$  值确定,当  $\beta > 0$  时,表示序列变化呈递增趋势; $\beta < 0$  时则相反,且  $\beta$  绝对值越大,表示变化程度越大<sup>[7]</sup>。

#### 2.1.2 周期分析

小波分析具有多分辨率的功能,可以揭示水文序列的多时间尺度特性。小波分析可把时间序列同时在时域和频域上展开,对时频进行更精确的分析,其在时域和频域上同时具有的局部化功能,能更清楚的看出时间序列的周期变化情况<sup>[8]</sup>。本文采用 Morlet 小波分析小清河流域降水时间序列的多时间尺度特征及其周期。

#### 2.1.3 突变检验

由于突变检测的方法还不是很成熟,各种检测方法有其固有的优缺点,很难只根据一种方法就能对一时间序列做出准确的突变分析。若方法不当,很可能会得出错误的结论。因此,在确定某气候系统或过程发生突变的现象时,最好使用多种方法进行比较分析<sup>[9]</sup>。本研究使用 Manr Kendall 法,并结合滑动  $t$  检验、有序聚类法及 Yamamoto 法进行综合对比和验证。

(1) Manr Kendall 检验法。Manr Kendall 突变检验为非参数检验法,能够客观地反映样本时间序列的变化趋势。进行突变分析时,给定一定的显著性水平并确定临界值,计算并绘制  $UF$  和  $UB$  曲线。若  $UF$  或  $UB$  的值大于 0,表明序列呈上升趋势,反之,则相反。如果  $UF$  和  $UB$  在置信区间内有交点,

可认为该点为突变点<sup>[10]</sup>。

(2) 滑动  $t$  检验。对于时间序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , 设定某一时刻为基准点, 计算基准点前后两段子序列的平均值和方差, 并计算得到统计量  $t$ 。对于给定的显著性水平  $\alpha$  根据  $t$  分布表得到  $t_\alpha$ 。当  $|t| \geq t_\alpha$  时, 说明存在显著性差异, 否则认为两子序列均值无显著差异。由于子序列长度选择带有有人为性, 可能会造成突变点的飘移, 因此在具体使用时, 应该反复变动子序列长度进行试验比较, 提高计算结果的可靠性<sup>[9]</sup>。

(3) 有序聚类法。对存在变化趋势的水文序列利用有序聚类法进行跳跃性检验, 判断序列中的可能干扰点, 该点使同类之间的离差平方和最小, 类与类之间的离差平方和最大。对存在多个阶段变化过程的时间序列来说, 会形成多个谷底, 可根据谷底发生时间确定突变点<sup>[11]</sup>。

(4) Yamamoto 法。Yamamoto 法与滑动  $t$  检验原理类似, 也是通过检验两子序列均值差异来判别突变的, 但是比滑动  $t$  检验更简洁<sup>[12]</sup>。通过人为设置基准点, 计算前后两段序列的均值和标准差进而确定信噪比, 在给定的  $\alpha$  下确定有无突变点<sup>[9]</sup>。

#### 2.1.4 未来变化趋势分析

Hurst 指数法是由英国水文专家 H. E. Hurst 在研究尼罗河径流资料时发现的, 经国内外学者的不断发展, Hurst 指数已经成为对时间序列的未来变化趋势有很强预测能力的方法。它不需要假定 R/S 时间序列的分布特征<sup>[13]</sup>。根据 R/S 分析计算的 Hurst 指数大小, 可以判断序列中是否存在趋势性成分及其趋势强度。当  $H = 0.5$ , 表明序列是随机分布的, 未来变化趋势和过去没有关系; 当  $0 \leq H < 0.5$  时, 表明时间序列具有反持续性, 未来变化趋势将与过去相反; 当  $0.5H \leq 1$  时, 表明时间序列具有长期持续性, 未来变化趋势将与过去相同<sup>[14]</sup>, 且  $H$  越大, 持续性越强。

#### 2.2 数据来源

本文选择的研究区是以黄台桥为出口断面的小清河流域。研究采用的数据是小清河流域及其周边区域 6 个雨量站汛期日降水序列资料, 由济南市水文局提供。由于各站点降水序列起始年份不一, 序列长度不同, 为保证各站序列的一致性, 本研究采用 1977–2014 年作为研究时段。

### 3 结果分析

#### 3.1 汛期降水空间分布

为研究小清河流域汛期降水的空间分布, 根据

流域内 6 个雨量站 1977–2014 年的汛期平均降水量, 采用克里金法插值得到流域汛期降水空间变化, 见图 2。从图中可以看出, 汛期降水从西北部向东部及东南部逐渐递增。此结果与迟竹萍<sup>[15]</sup> 对山东省夏季降水空间变化研究得出的结果相吻合。其中流域汛期平均降水量最低的是刘家庄站, 最高的是兴隆站, 其降水量分别为 417.3 mm, 479.0 mm, 两者之间的插值为 61.7 mm, 空间变化较大。

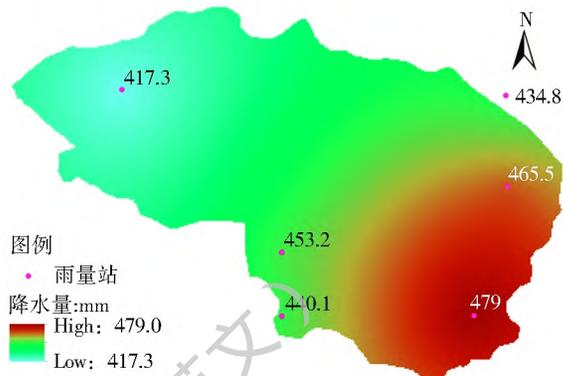


图 2 小清河流域汛期降水空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of flood season precipitation in Xiaoqing River Basin

#### 3.2 汛期降水趋势分析

使用 Mann-Kendall 法对小清河流域雨量站多年汛期降水变化进行趋势检验, 同时对汛期降水的多年平均变化率进行计算, 最终统计结果见表 1。由表 1 可知, 流域内各站点汛期降水多年变化呈上升趋势, 除黄台桥站通过了置信度 90% 的检验外, 其余站点变化均不显著。各站点中增长速度最快的是刘家庄站 1.60 mm/a, 其次是黄台桥站 1.39 mm/a 和东红庙站 1.32 mm/a。许多学者<sup>[16-19]</sup> 研究表明城市化会使城市下风区降水增加, 而李祥松等<sup>[4]</sup> 对小清河流域在 1984 年、1992 年、2002 年和 2013 年四期土地利用的统计表明, 研究区的城市建

表 1 小清河流域汛期降水趋势分析统计

Tab. 1 Trend analysis of the flood season precipitation in Xiaoqing River basin

站点	Mann-Kendall 趋势统计		
	Z 值	显著性	$\beta / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
东红庙	1.07	-	1.32
黄台桥	1.43	*	1.39
刘家庄	1.21	-	1.60
邵而	0.79	-	1.04
兴隆	0.60	-	0.86
燕子山	0.03	-	0.05
流域	0.88	-	1.15

注: \* 表示通过了置信度 90% 的检验

设用地近些年来急剧增加,其它用地面积迅速减少。而研究时段正好是在汛期(6月-8月),偏南风频次较多,而刘家庄与黄台桥正处于城市的下风口,可能受城市化影响,导致降水量增长率相较其他站点相对要快。

### 3.3 汛期降水突变分析

本文采用 Mann-Kendall 突变检验、滑动  $t$  检验、有序聚类法和 Yamamoto 法综合对比识别小清河流域各雨量站多年汛期降水量的突变点,这里只以东红庙雨量站为例进行分析,在给定显著性水平  $\alpha=0.05$  下,对东红庙多年汛期降水采用 Mann-Kendall 法进行突变点识别,见图3。由图3中  $UF$  曲线可以看出,汛期降水在 1977-1980 年和 1988-1989 年左右呈上升趋势;在 1980-1986 年和 1989 年左右呈下降趋势。总的来说,在 1977-1990 年汛期降水变化有增有减,呈波动状态,而在 1990 年之后则一直呈上升趋势,但变化范围处于  $\pm 1.96$  的信度线之间,说明多年变化并不显著。从  $UF$  和  $UB$  曲线位于置信区间内的交点来看,突变发生的时刻有 1978 年、1987 年左右,但不能直接下结论说这几个点就一定是突变点,也可能存在虚假的突变点,应结合其它检验方法综合分析,尽量避免错误产生。

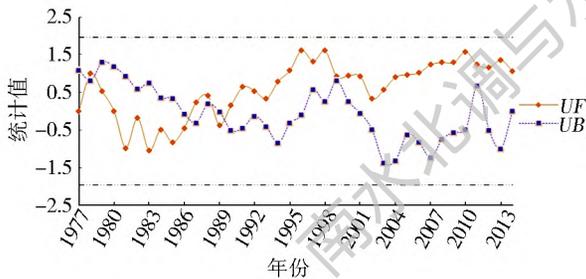


图3 东红庙站汛期降水量 Mann-Kendall 突变检验  
Fig. 3 Mann-Kendall abrupt change test of flood season precipitation at Donghongmiao station

结合滑动  $t$  检验法绘制  $t$  统计量序列图,见图4。其中滑动长度取  $n_1=n_2=7$ , 给定显著性水平 0.05。从图4中可以看出,一共有两个点超过置信水平,其中一处是正值(1996年),一处是负值(2003年),说明在这个阶段内,降水出现了两次明显的突变。在 1996 年左右,汛期降水出现由多转少的突变;在 2003 年左右汛期降水由少转多的突变。由于人为选择滑动长度不同所导致的突变点漂移问题,除了要反复变动滑动长度进行对比,还可采用多种方法对比可提高最终检测结果的可靠

性。故本文同时选择了有序聚类法对汛期降水进行突变检验。

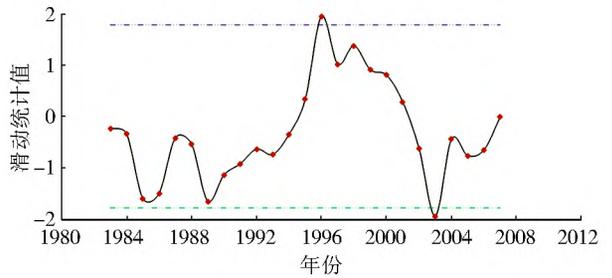


图4 东红庙站汛期降水量滑动  $t$  检验  
Fig. 4 Sliding  $t$  test of flood season precipitation at Donghongmiao station

汛期降水序列离差平方和  $S(\tau)$  曲线见图5。从序列图中可以看出,整个序列的最低点出现在 1986 年,局部的极小点有 1978 年、1989 年、1993 年、1998 年、2002 年、2010 年。可以看出,有序聚类检验在东红庙站并未检验出有效的突变点。

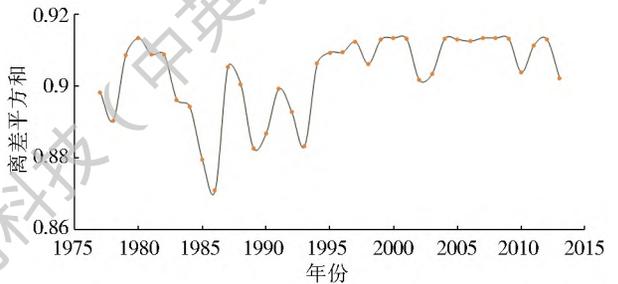


图5 东红庙站汛期降水量有序聚类检验  
Fig. 5 Sequential clustering analysis of flood season precipitation at Donghongmiao station

最后选择 Yamamoto 法,取  $n_1=n_2=10$ , 滑动计算信噪比 SNR 的值,但绘制出的曲线变化范围始终小于 1,并没有检测出有突变点,见图6。

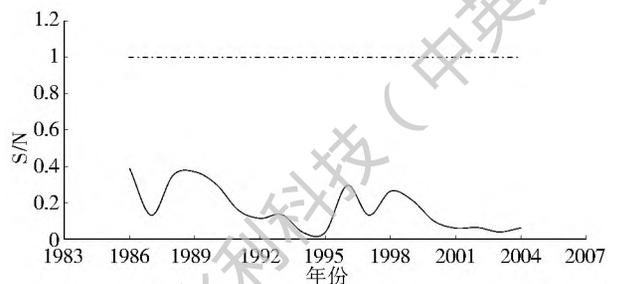


图6 东红庙站汛期降水量 Yamamoto 法检验  
Fig. 6 Yamamoto test of flood season precipitation at Donghongmiao station

对比以上四种突变方法的检验结果,说明各方法在检测突变点时各有其局限性和不足。对各种方法检测出的突变点进行对比分析,最后确定东红庙突变年份为 1986 年、1989 年。最终确定的各站点突变年份见表 2。

表 2 小清河流域各站点汛期降水量突变年份

Tab. 2 The abrupt change years of flood season precipitation at different stations in Xiaoqing River basin

站点	突变年份
东红庙	1986 年、1989 年左右
黄台桥	1986 年左右、1989 年左右
刘家庄	1989 年左右
邵而	1989 年左右
兴隆	1989 年左右
燕子山	1989 年左右、1998 年左右

### 3.4 汛期降水周期分析

通过泰森多边形法计算流域的面雨量, 采用 Morlet 小波并结合 Matlab 对小清河流域汛期降水量进行多尺度时间分析。根据 Morlet 小波变换得到的小波变换实部等值线图可以清晰的显示汛期降水的时间尺度变化及位相结构。汛期降水小波变换实部等值线图见图 7。从中可以看出, 在 1977-2014 年时间序列中, 存在两个比较明显的震荡周期。其中 3~8 a 的尺度表现的较强, 其中心尺度在 5 a 左右, 且呈现正负位相交替出现的现象。而 11~27 a 的尺度表现也十分明显, 其中心尺度分别是 15 a 和 22 a 左右。从时间尺度为 11~27 a, 中心尺度为 15 a 这一时间来看, 1977-1979 年, 1986-1989 年、1995-1998 年、2003-2006 年各时段降水偏多, 其余时间段则偏少。从 2014 年以后未闭合的等值线图来看, 未来几年汛期降水将很可能继续增加, 同时可能存在更长时间尺度的时间周期, 需要增加时间序列的长度以期进一步验证。

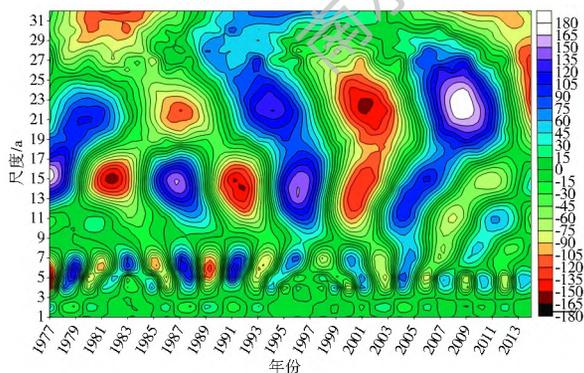


图 7 小清河流域汛期降水 Morlet 小波变换实部时频分布

Fig. 7 Time frequency distribution of Morlet wavelet transform coefficient of flood season precipitation in Xiaoqing River basin

小波方差能反映信号波动能量随尺度的分布, 因此可以确定信号中不同尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度<sup>[20]</sup>。小清河流域汛期降水小波方差见图 8。从图中可以看出存在三个明显的波

峰, 对应的时间尺度分别是 5 a、15 a 和 22 a, 其中最高点出现在 22 a 左右, 说明汛期降水在 22 a 左右的震荡周期最大, 可认为是小清河流域多年汛期降水的主周期, 第二周期的峰值仅次于第一周期, 为 15 a, 第三周期为 5 a。从未闭合的小波变换实部等值线图来看, 以 22 a 为周期, 未来几年降水会减少; 以 15 a 周期, 未来几年降水将继续增加; 以 5 a 为周期, 未来将呈现波动变化, 由于第一周期与第二周期峰值相差不大, 并不能准确判断未来的降水趋势变化, 需进一步分析。

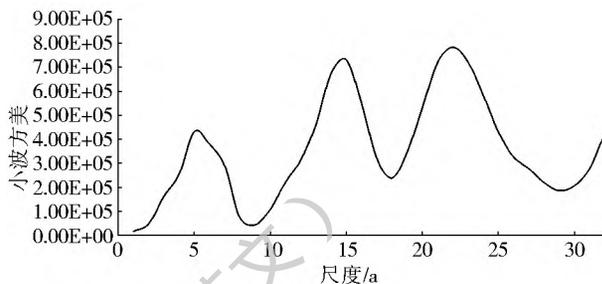


图 8 小清河流域汛期降水小波方差

Fig. 8 The wavelet variance diagram of flood season precipitation in Xiaoqing River basin

### 3.5 汛期降水未来变化趋势预测

使用 R/S 法绘制的小清河流域各雨量站点多年汛期降水的 Hurst 指数见图 9, 具体统计见表 3。从中可以看出各站点 Hurst 指数均大于 0.5, 表明汛期降水的未来趋势与过去相同, 即将继续呈现增长趋势, 这与以 15 a 为周期时, 小波分析得出的结论一致。其中 Hurst 指数最大的是兴隆, 其次是刘家庄、邵而。从中发现未来增长趋势最显著的三个站点也都是分布在城镇的周围, 分析其原因可能与城市化对降水的影响有关。城市化水平的不断提高使得降水不断增加, 但降水增加的趋势最终会受到城市化自身发展的影响, 不可能造成大范围降水的增加, 所以各站点未来汛期降水增长趋势要相对较弱<sup>[21]</sup>。

表 3 小清河流域各站点汛期降水 Hurst 指数统计

Tab. 3 Hurst index of the flood season precipitation at each station in Xiaoqing River basin

站点	东红庙	黄台桥	刘家庄	邵而	兴隆	燕子山	流域
Hurst 指数	0.540	0.557	0.722	0.649	0.728	0.520	0.635

## 4 结论

(1) 小清河流域汛期降水量由西北部向东部及东南部逐渐递减。其中降水量最高、最低的站点分别为兴隆站和刘家庄站, 变化差值为 617 mm, 空间变化差异较大。

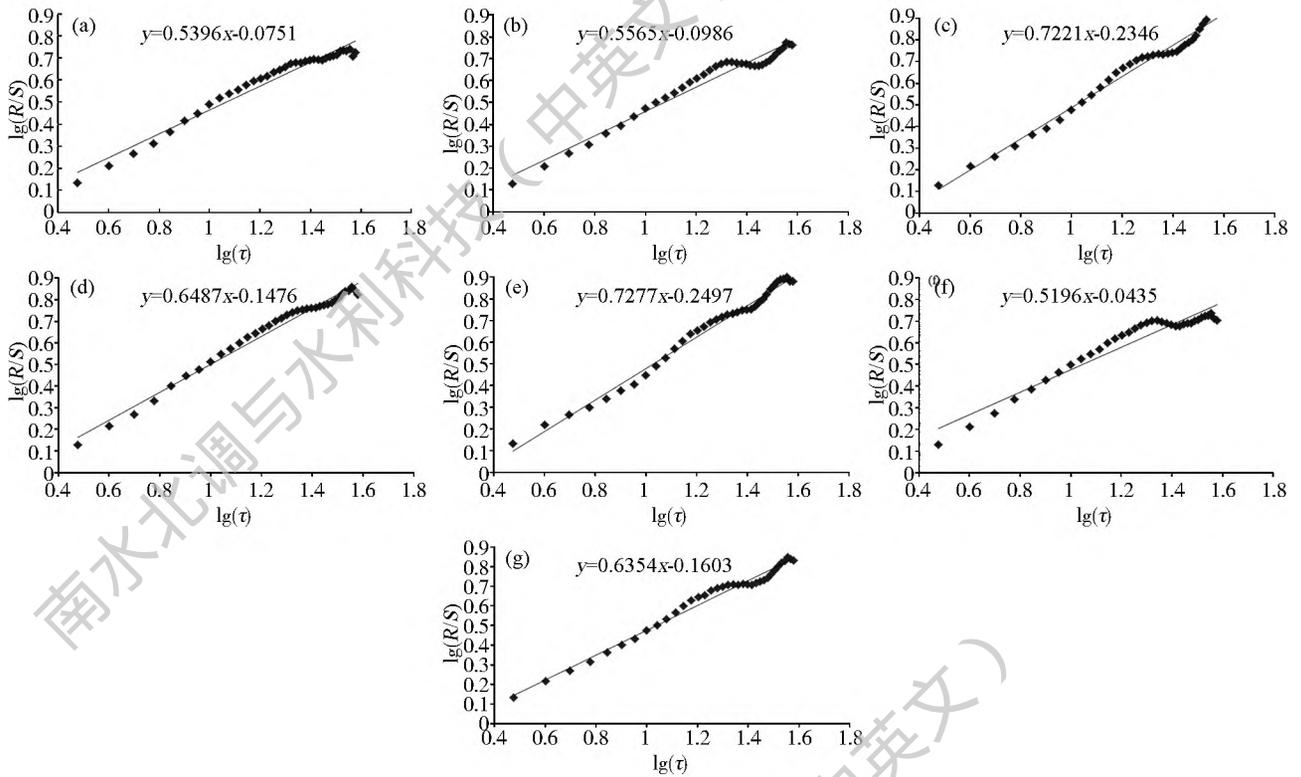


图9 东红庙(a)、黄台桥(b)、刘家庄(c)、邵而(d)、兴隆(e)、燕子山(f)、小清河流域(g)汛期降水Hurst指数拟合  
Fig.9 Hurst index of flood season precipitation at Donghongmiao (a), Huangtaiqiao (b), Liujiazuang (c), Shaoer (d), Xinglong (e), Yanzishan stations (f), and Xiaoqing River basin (g)

(2) 流域各站点多年汛期降水变化趋势基本相同,各站点突变年份也基本一致,都在1989年左右检测出了突变点。

(3) 流域汛期降水时间序列存在多个周期,时间尺度不一,其中第一主周期为22 a,第二、第三周期分别为15 a和5 a。

(4) 未闭合的小波等值线图与各站点Hurst指数综合分析表明流域未来汛期降水继续呈增长的趋势。

参考文献(References):

[1] 窦实,曹升乐.济南市小清河流域降雨径流及暴雨洪水特性分析[C].//第五届中国水论坛文集,2007:710-713. (DOU S, CAO S L. Characteristics of storm flood in Xiaoqing River Basin of Jinan City[C].//Water Forum of China, 2007:710-713. (in Chinese))

[2] 黄国如,何泓杰.城市化对济南市汛期降雨特征的影响[J].自然灾害学报,2011,20(3):7-12. (HUANG G R, HE H J. Impact of urbanization on features of rainfall during flood period in Jinan City[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(3): 7-12. (in Chinese))

[3] 于翠松,王艳玲.小清河流域的防洪问题及对策[J].水利发展研究,2002,2(5):39-41. (YU C S, WANG Y L. Flood protection and countermeasures in Xiaoqing River Basin[J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(5): 39-41. (in Chinese))

[4] 李祥松,于翠松,曹升乐,等.济南市小清河流域汛期降水时空

演变规律分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):72-78. (LI Y S, YU C S, CAO S L. The spatial-temporal evolution law of flood season precipitation in Xiaoqing River Basin of Jinan [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(6): 72-78. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2016.06.13.

[5] 徐宗学.水文模型[M].北京:科学出版社,2009. (XU Z X. Hydrological Models[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))

[6] 徐宗学,隋彩虹.黄河流域平均气温变化趋势分析[J].气象,2005,31(11):7-10. (XU Z X, SUI C H. Long term trend of temperature in the Yellow River Basin [J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(11): 7-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0526.2005.11.002.

[7] 傅丽昕.近57年来和丰县气温和降水量的趋势性及突变特征[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):38-41. (FU L X. Tendency and mutation analysis of annual temperature and precipitation of Hefeng County in recent 57 years[J]. South to North Water Transfers, and Water Science & Technology, 12(4): 38-41. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.009.

[8] 王文圣,丁晶,李跃清.北京:水文小波分析[M].化学工业出版社,2005. (Wang W S, Ding J, Li Y Q. Hydrology wavelet analysis. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))

[9] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999. (WEI F Y. Beijing: The technology of statistical diagnosis and prediction for modern climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999. (in Chinese))

- [10] 蔡霞, 蔡琳, 李春华, 等. 晋北地区降水量时空变化及突变分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 247-254. (CAI X, CAI L, LI C H, et al. Analysis of characteristics of precipitation variation and mutation in Northern Shanxi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 247-254. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7601.2012.02.042.
- [11] 张学真, 刘燕. 灞河出山径流序列变化的小波分析[J]. 水资源保护, 2006, 22(3): 12-15. (Zhang X Z, Liu Y. Wavelet analysis on runoff sequences from mountainous watershed of Bahe River[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(3): 12-15. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2006.03.004.
- [12] 李珍, 姜逢清. 1961-2004 年新疆气候突变分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 351-359. (ZHEN L I, JIANG F Q. A study of abrupt climate change in Xinjiang Region during 1961-2004[J]. Journal of Glaciology & Geocryology, 2007, 29(3): 351-359. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2007.03.003.
- [13] 燕爱玲, 黄强, 刘招, 等. R/S 法的径流时序复杂特性研究[J]. 应用科学学报, 2007, 25(2): 214-217. (YAN A L, HUANG Q, LIU Z, et al. Complicated property of runoff time series studied with R/S method[J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(2): 214-217. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0255-8297.2007.02.021.
- [14] 冯新灵, 罗隆诚, 邱丽丽, 等. 青藏高原至中国东部年雨日变化趋势的分形研究[J]. 地理研究, 2007, 26(4): 835-843. (FENG X L, LUO L C, QIU L L, et al. Fractal research of rainy day changing trend from Tibetan Plateau to Eastern China[J]. Geographical Research, 2007, 26(4): 835-843. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1000-0585.2007.04.021.
- [15] 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. (CHI Z P. Spatial and temporal distributions and climatic change of summer precipitation in Shandong[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(1): 220-226. (in Chinese))
- [16] HUFF F A, CHANGNON S A J. Climatological assessment of urban effects on precipitation: Final report part I[J]. Journal of Applied Meteorology, 1972, 11(5).
- [17] CHANGNON S A. Rainfall Changes in Summer Caused by St. Louis[J]. Science, 1979, 205(4404): 402.
- [18] SHEPHERD J M, PIERCE H, NEGRI A J. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. [J]. Journal of Applied Meteorology, 2007, 41(7): 689-701. DOI: 10.1175/1520-0450(2002)041<0689:RMBMU A>2.0.CO;2.
- [19] 北京市气象局气候资料室. 北京城市气候[M]. 气象出版社, 1992: 50-57. (Beijing Meteorological Bureau climate data room. Beijing City Climate[M]. China Meteorological Press, 1992: 50-57. (in Chinese))
- [20] 常浩娟, 刘卫国, 吴琼. 60 年玛纳斯河红山嘴径流规律特征分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 128-134. (CHANG H, LIU W, QIONG W U, et al. Runoff characteristics of Hongshanzui Hydrologic Station of Manas River in the past 60 years[J]. Research of Soil & Water Conservation, 2016, 23(6): 128-134. (in Chinese))
- [21] 周翠宁, 任树梅, 杨培岭, 等. 城市化对降雨特征影响研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(10): 62-65. (ZHOU C N, REN S M, YANG P L, et al. Study on impact from urbanization on rainfall characteristics[J]. Water Resources & Hydropower Engineering, 2007, 38(10): 62-65. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2007.10.019.