

Characteristics of Extreme Precipitation in Shule River Basin

Yuehua Wang, Zhanling Li*, Wei Zhao

School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing
Email: *zhanling.li@cugb.edu.cn

Received: Nov. 10th, 2015; accepted: Nov. 30th, 2015; published: Dec. 10th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Under the background of global warming, extreme climate events are proved to occur more frequently than before in most regions of China. Shule River basin, located in the Northwest of China, is one of the important parts of inland river basins in Hexi corridor. Studying the characteristics of extreme precipitation in Shule River basin is significant for better understanding the local eco-hydrological processes and its response to climate change. Based on the daily precipitation data from 1960 to 2012 at four meteorological stations, the trends, change points and period features of the annual total precipitation (ATP) and the annual maximum precipitation for one day (AMP) over Shule River basin are investigated by means of Mann-Kendall test, Pettitt test, Climate trend rate, the five-year moving average method and Morlet wavelet analysis. In addition, the occurrence number of extreme precipitation over the study area is also discussed in this paper. Results show that, the increasing trends are found for the ATP and AMP series at Yumenzhen station, Anxi station and Dunhuang station with the climate trend rates of 3.0 - 5.3 mm/10a and 0.7 - 1.0 mm/10a. No significant change points are found for the ATP and AMP series with Pettitt test. Based on the wavelet analysis, the ATP series are found to have a long period of 11 - 13 years, a middle period of 6 - 7 years and a short period of 2 - 4 years, in which the short period shows more outstanding. The AMP series have a long period of 17 - 18 years, a middle period of 6 - 10 years, and a short period of 2 - 4 years, with more significant long and middle periods. The occurrence numbers of extreme precipitation at three stations (Yumenzhen, Anxi and Dunhuang stations) are found to have an increasing tendency after the year of 2000.

Keywords

Extreme Precipitation, Trend, Change Point, Period Feature, Frequency

作者简介: 王月华, 1992 年出生, 女, 河北人, 硕士研究生。

通讯作者简介: 李占玲, 1980 年出生, 女, 内蒙古人。从事水文学及水资源研究。

*通讯作者。

疏勒河流域极端降水特征分析

王月华, 李占玲*, 赵 韦

中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京

Email: *zhanling.li@cugb.edu.cn

收稿日期: 2015年11月10日; 录用日期: 2015年11月30日; 发布日期: 2015年12月10日

摘 要

疏勒河流域是我国河西走廊内陆流域的重要组成部分。在全球气候变暖背景下, 研究其极端降水特征变化对于了解西北内陆流域生态水文过程以及对气候变化的响应均具有重要意义。本文以疏勒河流域4个气象站点1960~2012年逐日降水资料为基础, 采用Mann-Kendall检验、Pettitt方法、气候倾向率、滑动平均和小波分析等方法, 对研究区年降水总量、最大一天降水量的趋势变化、变点特征和周期特征进行分析, 并对极端降水发生频次进行讨论。结果表明, 近50多年来研究区玉门镇站、安西站和敦煌站年降水总量和最大一天降水量均呈波动上升趋势, 上升幅度分别为3.0~5.3 mm/10a和0.7~1.0 mm/10a。各站点年降水总量序列基本存在11~13年长周期、6~7年中周期和2~4年短周期, 短周期较为显著; 最大一天降水量序列存在17~18年长周期、6~10年中周期和3~4年短周期, 中周期和长周期较为显著。除马鬃山站以外, 玉门镇站、安西站和敦煌站2000年以后极端降水发生频次明显增加, 这与年降水总量和最大一天降水量变化趋势较为一致。

关键词

极端降水, 趋势, 变点, 周期, 频次

1. 引言

全球变暖问题一直以来受到人们的广泛关注。IPCC 第五次评估报告明确指出: 气候变暖已对生态系统和人类社会产生了不利影响, 而且未来气候变暖将持续。在气候变暖背景下, 国内外学者对极端降水事件进行了大量研究[1][2]。国内学者对我国极端降水事件的研究表明, 我国极端降水事件在不同地区表现出明显的差异性, 华北地区极端降水量主要集中在东南部, 整体呈现下降趋势, 并且表现出显著的季节性[3]; 西南地区极端降水强度和频次总体呈现增强、增多趋势, 空间差异明显, 其地形的复杂性是影响极端降水事件出现显著性差异的主要原因[4]; 长江流域极端降水量对年降水总量的贡献很大, 极端降水指标呈现源区向沿海地区增多的空间分布特征[5]; 黄河流域极端降水量和极端降水强度呈现不断下降趋势, 空间分布呈现由北至南阶梯状逐渐增多趋势[6]。

疏勒河流域是河西走廊内陆流域的重要组成部分, 具有独特的地貌类型, 即山前绿洲带和中下游地区的荒漠带, 其水资源的主要来源是山区冰雪融水和大气降水。研究表明[7]-[9], 疏勒河流域降水量少, 降水的时空分布极不均匀, 表现为从东南向西北递减的特征, 且降水大部分集中于祁连山区, 中下游降水量一致偏少。近年来, 受全球气候变暖的影响, 极端降水事件频发, 由此导致该地区生态环境恶化, 水资源分配愈发不均。本文以疏勒河流域逐日降水资料为基础, 应用 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 变点检验、气候倾向率、滑动平均和小波分析等方法, 对研究区极端降水事件的变化特征进行分析, 为当地合理开发利用和保护水资源提供依据。

2. 研究区概况和数据

疏勒河流域位于甘肃省河西走廊, 是我国三大内陆河之一。疏勒河发源于祁连山, 西北流经肃北县的高山

草地，穿大雪山—托来南山间峡谷，过昌马盆地。出昌马峡以前为上游，出昌马峡至走廊平地为中游，向北分流于大坝冲积扇面，流域面积为 $4.13 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，海拔 1100~2010 m，年降水量 40~63 mm。气候属大陆荒漠干旱型气候，四季分明，日照长，降水少，蒸发强[9]。本文根据研究区内 4 个气象站点 1960~2012 年日降水资料对疏勒河流域极端降水特征进行分析。各站点基本信息如图 1 和表 1 所示。降水资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。

3. 研究方法

本文选取最大一天降水量和极端降水频次描述研究区极端降水事件。最大一天降水量取每年最大的一日降水量值；极端降水频次为超过极端降水阈值的天数，其中，极端降水阈值的定义为逐年日降水量 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 的样本资料按照升序排列的第 95 个百分位值[10]。

Mann-Kendall (简称 M-K)趋势检验是一种广泛应用于气温、降水、径流等气象水文变量的非参数统计检验方法，其优势是不需要样本遵从某一特定分布。M-K 检验方法能很好地揭示时间序列的趋势变化[11]。气候倾向率用一元一次直线方程或一元二次曲线方程就能满足。这里用一元一次直线方程来定量描述，即 $y(t) = a_0 + a_1 t$ ，则趋势变化率方程为 $a_1 = dy(t)/dt$ ，把 $a_1 \times 10$ 称作气候倾向率，其单位为 $\text{mm}/10a$ ，方程中的系数可用最小二乘法或经验正交多项式来确定[12]。滑动平均可以在一定程度上消除序列频繁随机起伏的影响，用平均值显示时间序列的变化趋势，使水文变化的趋势性更直观[13]。Pettitt 方法可以用来检测一个序列的变点，计算较简便，可以明确变化的时间，能够较好地识别序列的突变点[14]。小波分析采用正交、复正交变换对连续的时间序列进行分析。本文选用 Morlet 小波作为母小波。小波系数实部的变化趋势与信号起伏一致，等值线中心表示时间序列的周期特征。小波方差用来确定时间序列中各种尺度扰动的相对强度，峰值表示该序列的主周期[15]。

4. 结果分析与讨论

4.1. 趋势分析

图 2 显示了采用 Mann-Kendall 检验方法对研究区最大一天降水量和年降水总量进行趋势检验的结果。由图

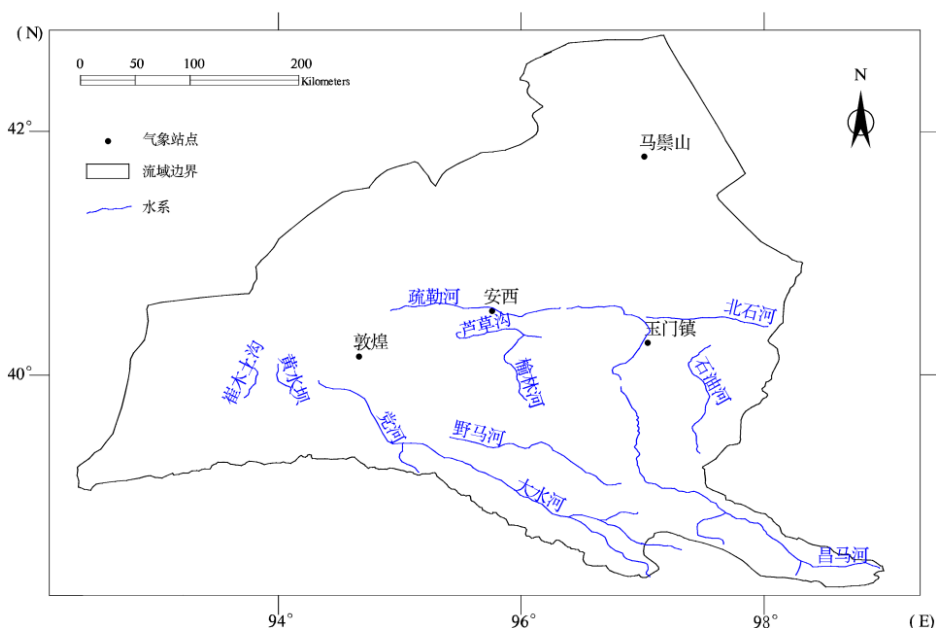
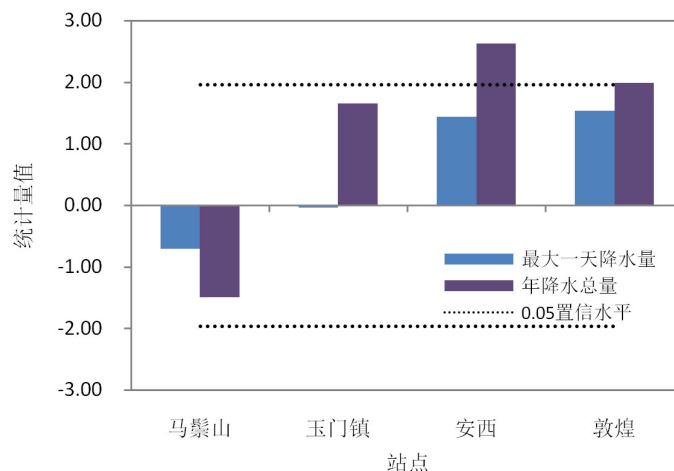


Figure 1. Locations of meteorological stations in Shule River basin

图 1. 疏勒河流域气象站点分布图

Table 1. Basic information of meteorological stations in Shule River basin**表 1.** 疏勒河流域气象站点基本信息

站点	纬度	经度	高程 m	多年平均降水量 mm	多年平均年最大降水量 mm (出现年份)	多年平均年最小降水量 mm (出现年份)
马鬃山	41°48'	97°02'	1770	73.2	157.5 (1979)	30.1 (2004)
玉门镇	40°16'	97°02'	1526	66.8	156.5 (2012)	24.7 (1960)
安西	40°32'	95°46'	1171	51.1	130.1 (2010)	11.9 (1960)
敦煌	40°09'	94°41'	1139	40.4	105.5 (1979)	7.8 (1960)

**Figure 2.** Trends of precipitation series in Shule River basin**图 2.** 疏勒河流域降水序列趋势性检验

可知，除安西站年降水总量序列的统计量值超过 0.05 显著性水平下的临界值外，其余站点对应的两个降水序列的统计量值均小于临界值，即不存在显著的趋势性。

图 3 表示 4 个站点降水量序列的变化趋势。表 2 给出了各站点降水量序列的变化倾向率。根据图 3(a)和表 2，马鬃山站年降水总量倾向率为 $-4.1 \text{ mm}/10\text{a}$ ，根据 5 年滑动平均曲线，马鬃山站整体呈现波动下降趋势，80 年代初期到中期下降趋势显著，90 年代以后降幅明显减缓，在 2007 年以后有微弱增加趋势。玉门镇站和安西站年降水总量倾向率分别为 $4.6 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $5.3 \text{ mm}/10\text{a}$ ，整体表现为波动上升趋势，两个站点降水量序列均表现为 60 年代至 80 年代初期的显著上升趋势，以及 80 年代以后的微弱上升趋势。敦煌站年降水总量倾向率为 $3.0 \text{ mm}/10\text{a}$ ，整体呈现波动上升趋势，70 年代和 80 年代上升趋势显著。

从图 3(b)和表 2 可以看出，马鬃山站最大一天降水量倾向率为 $-0.2 \text{ mm}/10\text{a}$ ，呈现波动下降趋势，趋势不显著，2008 年以后最大一天降水量有增加趋势。玉门镇站最大一天降水量倾向率为 $1.0 \text{ mm}/10\text{a}$ ，整体呈现微弱的上升趋势，在 90 年代至 2005 年左右略有下降。安西站和敦煌站最大一天降水量倾向率分别为 $0.9 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $0.7 \text{ mm}/10\text{a}$ ，呈现波动上升趋势，趋势显著，尤其在 2000 年以后降水量曲线上下起伏波动更加明显，表明 2000 年以后疏勒河流域中下游极端降水量序列表现更极端。

4.2. 变点分析

图 4 表示采用 Pettitt 方法对降水序列进行变点检验的结果。从图 4 可以看出，4 个站点年降水总量序列和最大一天降水量序列的统计量值均未超过 0.05 显著性水平下的临界值，即研究区 4 个站点的降水量序列均不存在显著的变点。

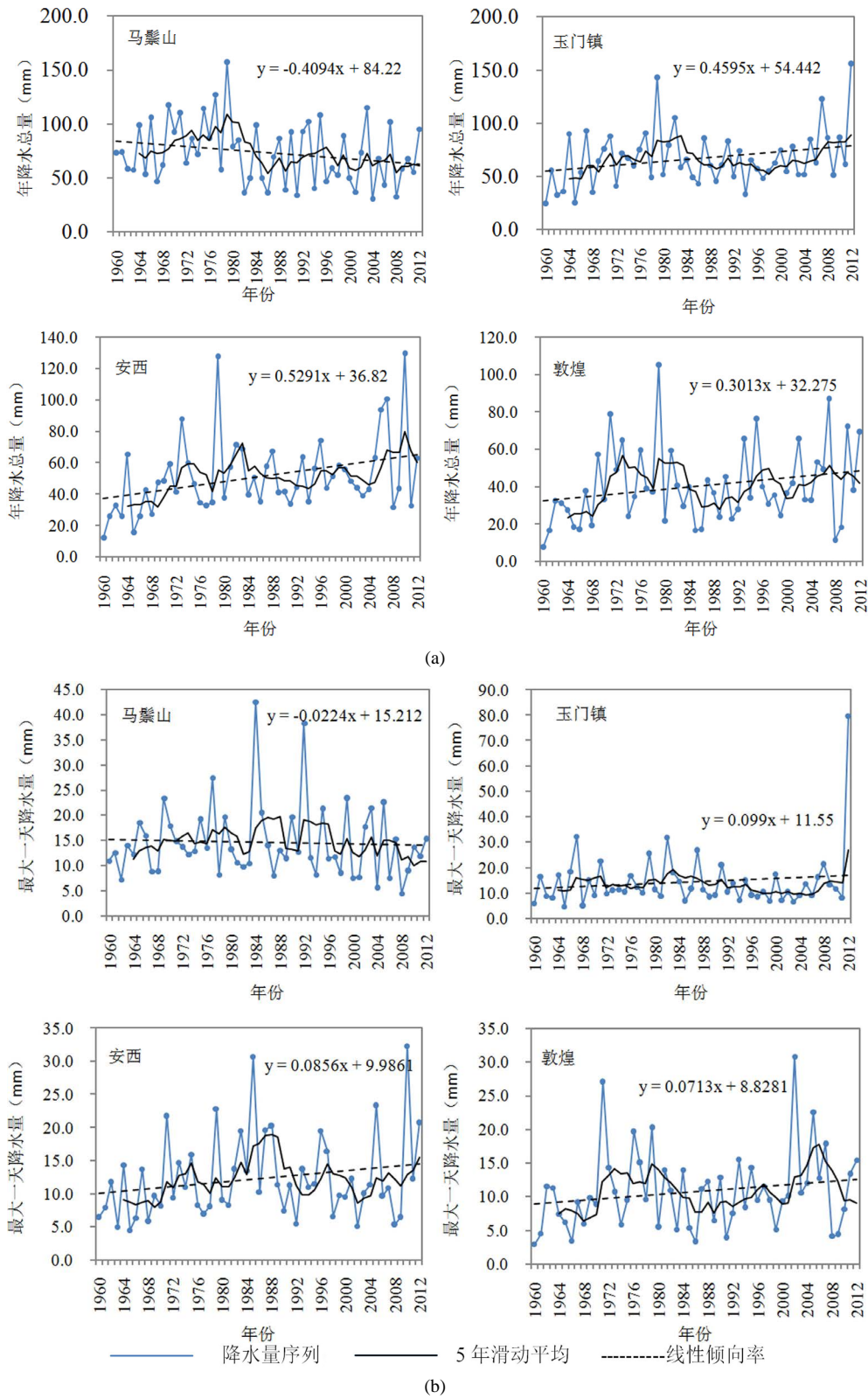


Figure 3. Trends of annual total precipitation and annual maximum precipitation for one day in Shule River basin

图 3. 疏勒河流域年降水总量(a)和最大一天降水量(b)变化趋势

4.3. 周期分析

利用 Morlet 小波分析疏勒河流域年降水总量序列和最大一天降水量序列的周期震荡特征，同时分析了不同时间序列的小波方差，以便更有效的识别不同时间序列的主周期。图 5 以马鬃山站为例，显示了在不同时间尺度上的小波分析结果。其中，横坐标表示年份，纵坐标表示变化周期。实线等值线表示降水量增加，虚线等值线表示降水量减少。图 6 显示马鬃山站降水量序列的小波方差。

根据图 5(a)，马鬃山站年降水总量存在 12~13 年长周期，6~7 年中周期和 3~4 年短周期。在 12 年左右的时间尺度上，年降水总量经历了“多 - 少 - 多 - 少 - 多 - 少 - 多”的交替演变，降水量增加的震荡中心分别在 60 年代初期、70 年代末期、90 年代初期和 2010 年左右，降水量减少的震荡中心分别在 70 年代初期、80 年代中期和 2000 年初期。6 年左右的周期主要出现在 60 年代中期到 70 年代中期，以及 2000 年以后。在 1960~2012 年之间，3~4 年的短周期震荡普遍存在，年降水总量增多期和减少期交替出现。3 个时间尺度的周期在 2010 年左右的曲线仍处于降水量增加期，表明未来一段时间内，年降水总量将呈现增加趋势。从图 6(a)可以看出，马鬃山站年降水总量的小波方差存在 3 个峰值，分别对应 12 年、7 年和 4 年的周期。

根据图 5(b)，马鬃山站最大一天降水量存在 3 个较为明显的周期，分别为 17 年、5~8 年和 3 年。17 年左右的周期震荡主要出现在 70 年代周期以后，经历了“少 - 多 - 少 - 多”4 个循环演变阶段。5~8 年的周期震荡在整个时间序列普遍存在，并且降水量增加期和减少期交替频繁，2010 年出现的降水增加期曲线尚未闭合，可以推测最大一天降水量的增加趋势未来还在持续。90 年代以后，3 年左右的周期震荡较为显著。根据图 6(b)，马鬃山站最大一天降水量的的小波方差出现 3 个峰值，分别对应 17 年、6 年和 3 年，其中 7 年和 3 年的周期较为突出。

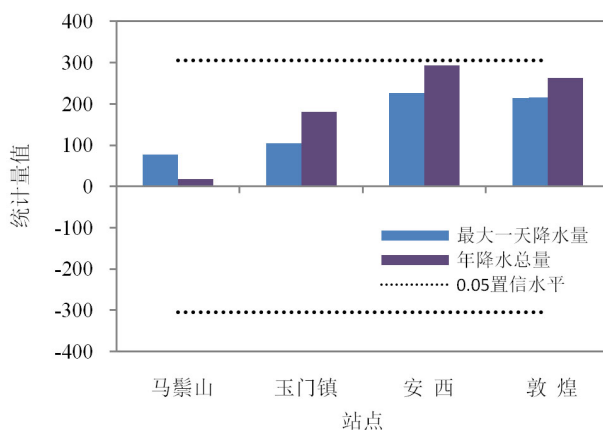


Figure 4. Change point tests of precipitation series in Shule River basin

图 4. 疏勒河流域降水序列变点特征检验

Table 2. Trend slope and period features of precipitation series in Shule River basin

表 2. 疏勒河流域年降水总量和最大一天降水量倾向率和周期特征

站点	倾向率 mm/10a		周期(小波系数)		周期(小波方差)	
	年降水总量	最大一天降水量	年降水总量	最大一天降水量	年降水总量	最大一天降水量
马鬃山	-4.1	-0.2	3-4、6-7、12-13	3、6-8、17	4、7、12	3、6、17
玉门镇	4.6	1	2-3、11-13	3-4、18	2、12	3、18
安西	5.3	0.9	3-4、11-13	3-4、9-10、18	4	10、18
敦煌	3	0.7	2-4、6-7、11-12	6-7	2、4、7	7

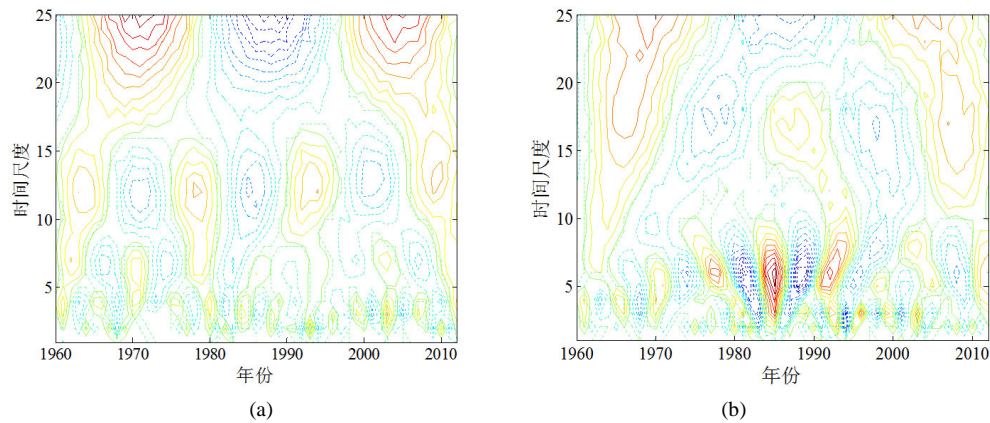


Figure 5. Wavelet coefficients for annual total precipitation and annual maximum precipitation for one day at Mazongshan station

图 5. 马鬃山站年降水总量(a)和最大一天降水量(b)的小波系数图

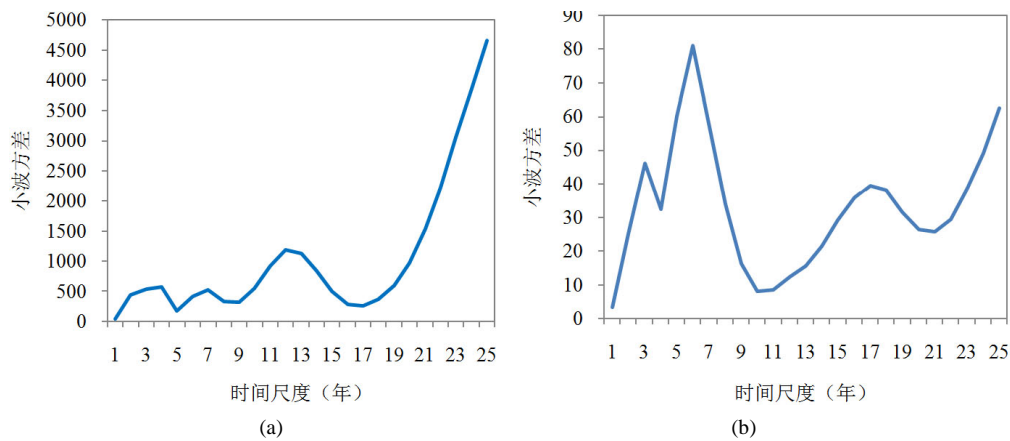


Figure 6. Wavelet variance for annual total precipitation and annual maximum precipitation for one day at Mazongshan station

图 6. 马鬃山站年降水总量(a)和最大一天降水量(b)的小波方差图

研究区 4 个站点年降水总量序列和最大一天降水量序列的周期分析结果(小波系数和小波方差)列于表 2。从表 2 可以看出, 4 个站点的年降水总量序列主要存在 3 个主周期, 分别为 11~12 年的长周期、6~7 年中周期和 2~4 年短周期。马鬃山站和敦煌站均存在 3 个时间尺度的周期震荡, 玉门镇站和安西站均存在短周期和长周期, 不存在中周期。根据小波方差, 4 个站点的年降水总量序列的短周期最为突出。对于最大一天降水量序列, 马鬃山站、玉门镇站和安西站均存在 17~18 年和 3~4 年时间尺度的周期震荡, 玉门镇站不存在中周期, 敦煌站不存在短周期和长周期。最大一天降水量序列通过小波方差分析得到的主要周期特征与小波系数的结果基本相同。这与李红英[16]等研究结果一致。

已有研究表明, 西北干旱区的水文气象序列的变化周期主要受海-气相互作用和太阳黑子活动周期的影响[17][18], 其中, 3~5 年的短周期主要受物理因子海-气相互作用影响, 11 年左右的长周期主要受太阳黑子周期的影响[19]。因此, 疏勒河流域降水量序列的周期特征可能与海-气相互作用和太阳黑子活动周期有一定联系, 但其影响机理需进一步研究。

4.4. 频次分析

极端降水频次分析结果列于表 3。可以看出, 马鬃山站超阈值极端降水发生频次 70 年代最多, 80 年代以后

Table 3. Occurrence number of precipitation extremes in decadal scale in Shule River basin**表 3.** 疏勒河流域不同年代极端降水发生频次

站点	1960~1969	1970~1979	1980~1989	1990~1999	2000~2012
马鬃山	20	26	16	19	17
玉门镇	11	24	20	11	24
安西	6	14	15	12	17
敦煌	6	16	7	11	16

明显减少；玉门镇站 70 年代、80 年代发生频次较多，90 年代明显减少，2000 年以后有显著增加趋势；安西站与玉门镇站类似，80 年代至 2000 年以后呈现明显“减少 - 增加”趋势；敦煌站 80 年代发生频次减少，随后呈现显著增加趋势，2000 以后最多。因此，除马鬃山站外，其余 3 个站点 2000 年以后发生频次均明显增加。结果与贾文雄[20]等研究结果较为一致。疏勒河流域位于西北干旱区西部，降水主要来自北冰洋和西风气流中的水汽，受大气环流因子的影响明显。近年来，气候变暖导致西北地区上空环流活动持续增强，研究区降水量增多，极端降水事件的发生也相对增多。这也是导致极端降水发生频次呈现增加趋势的原因之一。

5. 结论

1) 对于年降水总量序列，马鬃山站整体呈现波动下降趋势，倾向率为 $-4.1 \text{ mm}/10\text{a}$ ，其余三个站点呈现波动上升趋势，倾向率为 $3.0\sim 5.3 \text{ mm}/10\text{a}$ ，各站点在 70~80 年代上升趋势显著，80 年代以后表现为微弱上升趋势，表明研究区年降水总量在近年来有增强趋势；对于最大一天降水量序列，马鬃山站倾向率为 $-0.2 \text{ mm}/10\text{a}$ ，下降趋势不明显，其余三个站点呈现波动上升趋势，倾向率为 $0.7\sim 1.0 \text{ mm}/10\text{a}$ ，2000 年以后中下游最大一天降水量表现更极端。无论是年降水总量还是最大一天降水量序列均不存在显著突变。

2) 马鬃山站和敦煌站的年降水总量序列主要存在 2~4 年短周期、6~7 年中周期和 11~13 年长周期。马鬃山站、玉门镇站和安西站最大一天降水量序列均存在 3~4 年的短周期和 17~18 年的长周期。4 个站点年降水总量序列短周期较为突出，最大一天降水量序列长周期较为突出。降水量序列的周期特征受海-气相互作用和太阳黑子活动周期的影响。

3) 研究区各站点整体呈现 70 年代极端降水发生频次较多，90 年代发生频次较少的特点；除马鬃山站外，其余站点 2000 年以后极端降水发生频次明显增加，这与年降水总量、最大一天降水量变化趋势一致。气候变暖可能是导致疏勒河流域年降水总量、极端降水量和极端降水发生频次呈现增加趋势的原因之一。

基金项目

北京高等学校青年英才计划项目(YETP0654)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(35832015028)。

参考文献 (References)

- [1] LIU, J. D., DOAN, C. D., LIONG, S.-Y., SANDERS, R., DAO, A. T. and FEWTRELL, T. Regional frequency analysis of extreme rainfall events in Jakarta. *Natural Hazards*, 2015, 75(2):1075-1104. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-014-1363-5>
- [2] PANDA, D. K., KUMAR, A., GHOSH, S. and MOHANTY, R. K. Streamflow trends in the Mahanadi River basin (India): Linkages to tropical climate variability. *Journal of Hydrology*, 2013, 495: 135-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.054>
- [3] 安华, 延军平, 张涛涛, 等. 增暖背景下华北平原极端降水事件时空变化特征[J]. *水土保持通报*, 2013(3): 144-148. AN Hua, YAN Junping, ZHANG Taotao, et al. Temporal and spatial characteristics of extreme precipitation events in North China Plain on background of climate warming. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013(3): 144-148. (in Chinese)
- [4] 袁文德, 郑江坤, 董奎. 1962-2012 年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J]. *资源科学*, 2014, 36(4): 766-772. YUAN Wende, ZHENG Jiangkun and DONG Kui. Spatial and temporal variation in extreme precipitation events in South-

- western China during 1962-2012. *Resources Science*, 2014, 36(4): 766-772. (in Chinese)
- [5] 白路遥, 荣艳淑. 最近 50 年长江流域极端降水特征的再分析[J]. *水资源研究*, 2015(1): 88-100.
BAI Luyao, RONG Yanshu. Reanalysis of the characteristics of extreme rainfall in the Yangtze River basin during recent 50 years. *Journal of Water Resources Research*, 2015(1): 88-100. (in Chinese)
- [6] 贺俊平, 贺振. 近 53 年黄河流域降水时空分布特征[J]. *生态环境学报*, 2014(1): 95-100.
HE Junping, HE Zhen. Spatio-temporal characteristics of extreme precipitation event in Yellow River basin in recent 53 years. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014(1): 95-100. (in Chinese)
- [7] 蓝永超, 刘金鹏, 丁宏伟, 等. 1960-2012 年河西内陆河上游山区降水量变化及其区域性差异分析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1474-1480.
LAN Yongchao, LIU Jinping, DING Hongwei, et al. Changes of precipitation in mountainous areas of the three large inland river basins in the Hexi Corridor and their regional differences during 1960-2012. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1474-1480. (in Chinese)
- [8] 李小亚, 张勃, 汪宝龙, 等. 河西地区 1960 年至 2011 年不同级别降水日数和极端降水事件的变化特征[J]. *资源科学*, 2013, 35(1): 182-190.
LI Xiaoya, ZHANG Bo, WANG Baolong, et al. Variation in precipitation for Hexi region over 52 years. *Resources Science*, 2013, 35(1): 182-190. (in Chinese)
- [9] 蓝永超, 胡兴林, 肖生春, 等. 近 50 年疏勒河流域山区的气候变化及其对出山径流的影响[J]. *高原气象*, 2012, 31(6): 1636-1644.
LAN Yongchao, HU Xinglin, XIAO Shengchun, et al. Study on climate in mountainous regions of Shule River basin in past 50 years and its effect to mountainous rainfall. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(6): 1636-1644. (in Chinese)
- [10] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 2003, 58(S1): 1-10.
ZHAI Panmao, PAN Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(S1): 1-10. (in Chinese)
- [11] 李奇虎, 马庆勋. 1960-2010 年西北干旱区极端降水特征研究[J]. *地理科学*, 2014(9): 1134-1138.
LI Qihu, MA Qingxun. Extreme precipitation features of arid regions in northwest of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2014(9): 1134-1138. (in Chinese)
- [12] 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. *生态学报*, 2015(5): 1359-1370.
HUANG Xiaoyan, LI Yaohui, FENG Jianying, et al. Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015(5): 1359-1370. (in Chinese)
- [13] 刘健, 于兰兰, 翟建青. 近 50a 黄河三角洲极端降水事件特征研究[J]. *人民黄河*, 2013(2): 19-21+29.
LIU Jian, YU Lanlan and ZHAI Jianqing. Research on characteristics of extreme precipitation events in the Yellow River delta over the past 50 years. *Yellow River*, 2013(2): 19-21+29. (in Chinese)
- [14] 孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012(11): 1482-1492.
MENG Xiujing, ZHANG Shifeng and ZHANG Yongyong. The temporal and spatial change of temperature and precipitation in Hexi Corridor in recent 57 years. *Acta Geographica Sinica*, 2012(11): 1482-1492. (in Chinese)
- [15] 杨波, 张勃, 安美玲. 1961-2011 年秦巴山区极端降水事件的时空特征分析[J]. *水土保持研究*, 2014(1): 110-116.
YANG Bo, ZHANG Bo and AN Meiling. Spatiotemporal characteristics of precipitation extremes in the Qinba Mountains region during 1961-2011. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014(1): 110-116. (in Chinese)
- [16] 李红英, 高振荣, 白松竹, 等. 近 51 年河西走廊西部极端强降水事件变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013(10): 100-106.
LI Hongying, GAO Zhenrong, BAI Songzhu, et al. Analysis on the extreme strong precipitation events change in western Hexi Corridor since recent 51 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013(10): 100-106. (in Chinese)
- [17] 黄磊, 邵雪梅. 青海德令哈地区近 400 年来的降水量变化与太阳活动[J]. *第四纪研究*, 2005(2): 184-192.
HUANG Lei, SHAO Xuemei. Precipitation variation in Delingha, Qinghai and solar activity over the last 400 years. *Quaternary Sciences*, 2005(2): 184-192. (in Chinese)
- [18] 周群, 陈文. 太阳活动 11 年周期对东亚冬季风与随后东亚夏季风关系的影响及其过程[J]. *气候与环境研究*, 2014(4): 486-496.
ZHOU Qun, CHEN Wen. Impact of the 11-year solar cycle on the relationship between the east Asian winter monsoon and the following summer monsoon and the related processes. *Climatic and Environmental Research*, 2014(4): 486-496. (in Chinese)
- [19] 陈仁升, 康尔泗, 张济世. 小波变换在河西地区水文和气候周期变化分析中的应用[J]. *地球科学进展*, 2001(3): 339-345.
CHEN Rensheng, KANG Ersi and ZHANG Jishi. Application of wavelet transform on annual runoff, yearly average air temperature and annual precipitation periodic variations in Hexi region. *Advances in Earth Sciences*, 2001(3): 339-345. (in Chinese)
- [20] 贾文雄, 张禹舜, 李宗省. 近 50 年来祁连山及河西走廊地区极端降水的时空变化研究[J]. *地理科学*, 2014(8): 1002-1009.
JIA Wenxiong, ZHANG Yushun and LI Zongsheng. Spatial and temporal change of precipitation extremes in Qilian Mountains and Hexi Corridor in recent fifty Years. *Scientia Geographica Sinica*, 2014(8): 1002-1009. (in Chinese)