

Analysis of Spatiotemporal Distribution of Precipitation Changes in the Source Region of the Yangtze River

Youcheng Jiang, Jiao Liu*, Yueguan Zhang, Ying Shang

School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu Sichuan
Email: *245674624@qq.com

Received: Feb. 17th, 2020; accepted: Mar. 12th, 2020; published: Apr. 27th, 2020

Abstract

Precipitation plays an important role in exerting the water conservation function and maintaining the ecology in the source region of the Yangtze River. Based on the two different kinds of dataset including gauged point data and reanalysis distribute data in 1966~2017, the spatiotemporal distribution of the precipitation changes was analyzed by the linear regression, moving average, Mann-Kendall test, box plot method, and correlation test, etc. The results show that the annual precipitation in the source area presented a steady and slow increasing tendency in terms of time distribution; furthermore, at the 0.05 test level, the tendency became significant in 2009 which was 2.3 times the average annual increase. The trend of uneven distribution of precipitation during the year had increased that after the mutation point in 2002, the probabilities of the month with extreme precipitation increased to triple, and the proportion from June to September was increased by 11%. In terms of spatial distribution, the precipitation in the source area was small, and the changing trend was basically consistent with the average surface precipitation; while the precipitation of downstream outlet was abundant, meanwhile, the same features were expressed in the frequency of extreme precipitation months, and each site shows an unstable trend of change. Under the global climate change, the precipitation in the source region of the Yangtze river has great heterogeneity in the spatial and temporal distribution, and the increase of precipitation was mainly concentrated in the flood season of the downstream export area, which may make the water ecology in the source area face more adverse environment.

Keywords

Source Region, Yangtze River, Precipitation Changes, M-K Test, Spatiotemporal Distribution, Heterogeneity

长江源区降水变化的时空分布规律分析

蒋佑承, 刘蛟*, 张越关, 商滢

作者简介: 刘蛟(1986-), 男, 四川彭州人, 博士, 主要从事生态水利与水文水资源方向的研究。
*通讯作者。

西华大学能源与动力工程学院, 四川 成都
Email: *245674624@qq.com

收稿日期: 2020年2月17日; 录用日期: 2020年3月12日; 发布日期: 2020年4月27日

摘要

长江源区降水对发挥区域的水源涵养功能, 维护三江源区生态具有重要的作用。利用长江源区1966~2017年的站点实测与空间再分析两套降水数据, 综合线性趋势、滑动平均、Mann-Kendall检验、箱形图法和相关性检验等对源区降水的时空分布变化进行了分析。结果表明: 从时间分布来看, 长江源区的年际降水量表现为稳定的缓慢增加趋势, 且在0.05检验水平下, 2009年之后呈现出显著性增长, 其增长量为多年平均增长量的2.3倍; 年内降水分布不均的趋势加大, 突变点2002年之后, 出现极端降水月的概率增加了近3倍, 6~9月降水量在全年中的占比增加了11%。从空间分布上看, 源头区降水偏小, 变化趋势与面平均降水基本一致; 下游出口处降水丰富, 发生极端降水月的频率也更高, 各站点表现出不稳定的变化趋势。气候变化背景下, 长江源区的降水在时空分布上都存在较大的异质性, 降水量的增加主要集中在下游出口区域的汛期, 这可能使源区的水生态面临更加不利的环境。

关键词

长江源区, 降水变化, M-K检验, 时空分布, 异质性

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

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

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



Open Access

1. 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)第五次评估报告指出: 气候变化背景下极端降水事件在降水量与发生频率上都呈现出明显的增加趋势[1], 这种趋势对我国的水资源情势产生了不同程度的影响[2]。长江源区作为国家三江源保护区的重要组成部分, 在整个保护区乃至长江中上游流域具有重要的水资源涵养功能, 对维系生物多样性、流域生态安全等发挥着重要作用[3]。气候变化背景下, 长江源区降水变化导致的水资源系统改变, 不仅关系到区域内的生态环境发展, 同时也将对整个中下游流域的水资源利用产生影响[4] [5] [6]。近年来, 不少学者在长江源区开展了相关的研究, 也取得了一系列的认识。梁川等[7]进行了长江源高寒地区的气候变化对水文环境的影响研究, 指出长江源区的水文要素和水文环境在气候变化大背景下已受到较大影响; Rong 等[8]的研究发现长江源过去 40 年的降水增加明显, 极端降水事件增多; 裴超重等[9]基于 NOAA 的遥感数据, 对长江源区近 50 年来降水量、年平均气温进行了分析, 认为两者在源区的大部分范围内都存在增加的趋势。时光训等[10]分析了长江流域极端降水的时空变化特征, 指出主要强降水指数变化均呈现增加趋势, 弱降水变化不显著; 李林等[11]分析长江源区流量演变规律, 并指出降水量显著增加是径流出现明显增多趋势的主要原因之一。

长江源区站点稀缺, 以往的分析研究多仅以一套数据进行分析, 基于站点与空间数据的对比分析更有助于了解源区降水变化的时空分布差异, 本文以 1966~2017 年来的实测站点数据, 以及再分析的空间栅格数据为依据, 从年际以及年内两种尺度, 分析气候变化背景下长江源区最近 52 年降水变化的空间差异, 为区域的水资源与生态建设提供参考。

2. 研究区概况

长江源区位于青藏高原腹地昆仑山脉和唐古拉山脉之间，以直门达作为控制水文站，地理坐标大致位于E90°43'~96°45'，N32°30'~35°35'之间，流域面积13.7万km²，占青海省总面积的19.5%，占全流域面积的7.8%。本文选取的研究区及其河网、气候站点分布如图1所示。

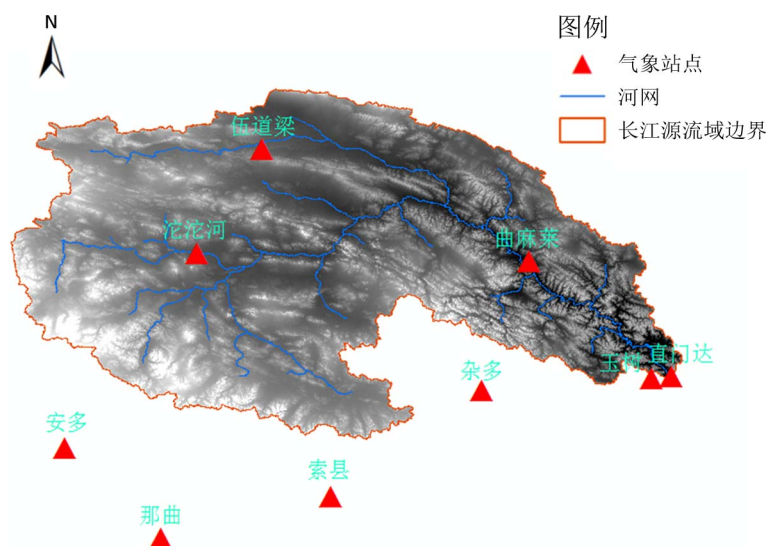


Figure 1. Sketch map of the Yangtze River source area and meteorological stations
图1. 长江源区和气象站点示意图

青藏高原腹地的唐古拉山是长江发源地，是西南季风进入我国大陆内部的第二道屏障，也是一条重要的气候分界线[12]。源区地貌以高原丘陵为主，地势高亢，平均海拔近5000米，区内常年平均气温一般在-5.5℃~4℃，属于典型且独特的高寒生态系统。研究区下垫面构建以冻土为主，占总面积的97.38%，其中多年冻土77.19%，季节性冻土20.19%；源区范围及邻近区域共发育1153条冰川，总面积1779.56 km²，冰川总储量136.19 km³；源区河网水系发达，分布大小河流有100余，同时也是青藏高原上高原湿地的主要分布地区之一[13]。降水主导下源区内多元的水资源组成形式对区域内生态系统发挥着重要的水源涵养功能，同时也影响着整个中下地区水资源的可持续利用[14]。

3. 资料数据和方法

3.1. 资料数据

本文采用国家气象数据共享网提供的1966~2017年长江源区及周边7个气象站点的逐日降水数据进行站点分析，其中伍道梁只有1986年~2017年共计22年数据资料；采用国家气象中心基于地面2472个台站降水资料，利用薄盘样条法(TPS, Thin Plate Spline)进行插值，生成的0.5°*0.5°分辨率的空间再分析数据，获取研究区的面平均降水。

3.2. 分析方法

本文主要利用线性趋势、滑动平均、箱形图以及相关分析与Mann-Kendall (M-K)检验法[15]，M-K检验法是世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)推荐并广泛使用的非参数检验方法，其不需要样本遵从一定的分布，也不会受少数异常值的干扰，计算简便。本文利用M-K对降水时间序列做趋势与突变检验。对于具有 n 个样本量的时间序列 x ，构造一秩序列：

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

当 $x_i > x_j (j=1,2,\dots,i)$ 时, $r_i = 1$, 否则, $r_i = 0$ 。

称秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数, 在时间序列上随机独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{Var(S_k)}} \tag{2}$$

其中 $U_{F1} = 0, E(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值, $Var(S_k)$ 是累积数 S_k 的方差, 在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立, 且有相同连续分布时, 可由下式算出:

$$E(S_k) = \frac{n \times (n+1)}{4} \tag{3}$$

$$Var(S_k) = \frac{n \times (n-1) \times (2n+5)}{72} \tag{4}$$

UF_k 曲线是标准正态分布且按时间序列 x 的顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出来的统计量序列。给定一个显著性水平 α , 查正态分布表, 若 $|UF_k| > U_\alpha$ (本文中取置信区间为 95%, 显著水平为 0.05, 对应的 $U_\alpha = 1.96$) 则表明序列存在明显的趋势变化。再按照时间序列 x 的逆顺序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k, k = n, n-1, \dots, 1, UB = 0$ 。分析绘出的 UF_k 和 UB_k 曲线图, 若 UF_k 或 UB_k 的值大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 反之若小于 0 则表明呈下降趋势; 当它们超过临界直线时, 表明上升或下降的趋势显著。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域, 如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的时刻便可能是突变开始的时间。

4. 结果分析

4.1. 年际变化

通过对插值的空间降水数据分析, 得到长江源区 52 年的面平均年降水量(如图 2 所示)。长江源区 52 年来的年平均降水量约为 412 mm, 年际变化存在较大的波动性, 最大的波动出现在 2014 年与 2015 年之间, 相差约为 199 mm。而无论从三年滑动平均还是五年滑动平均来看(如图 2 所示), 源区降水的变化都表现为缓慢的上升趋势, 年均增长量约为 1.5 mm/a。

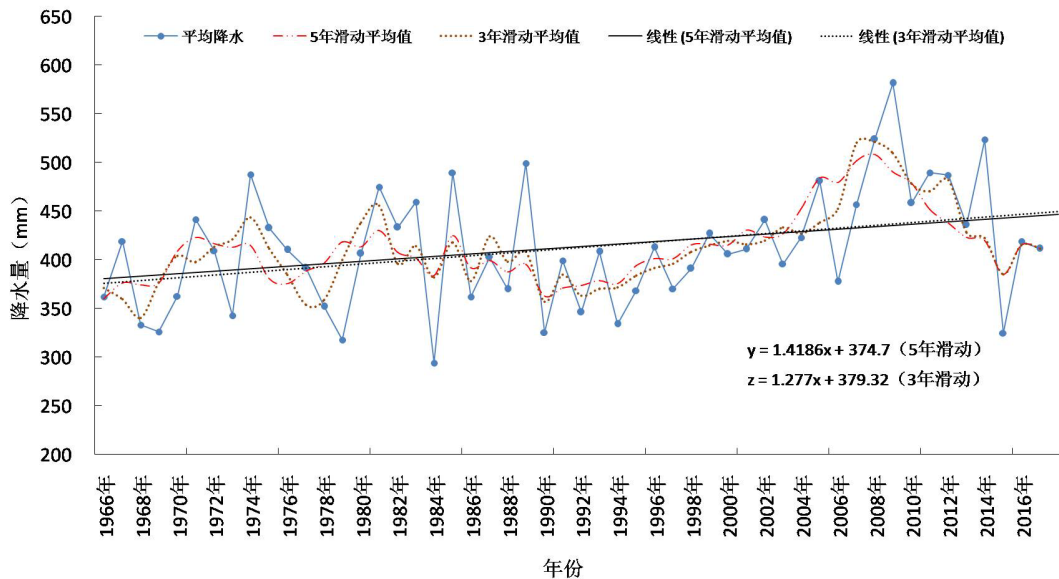


Figure 2. The average annual precipitation in the source region of Yangtze River in 1966~2017
图 2. 长江源区 1966~2017 年年均降水量曲线图

对长江源区内的年降水量进行 M-K 检验的结果也表明(如图 3 所示), 源区的年降水量基本处于上升趋势, 且在 0.05 ($\alpha = 1.96$)的显著性水平下, 2009 年之后的增长趋势变得显著, 年均增长量为 3.5 mm/a, 约为总体平均增长水平的 2.3 倍。由 UF 和 UB 曲线的交点可以判断, 研究区的降水量在 2002 年发生突变, 突变点以后的年增长量为 1.61 mm/a, 与总体增长率相差不大。

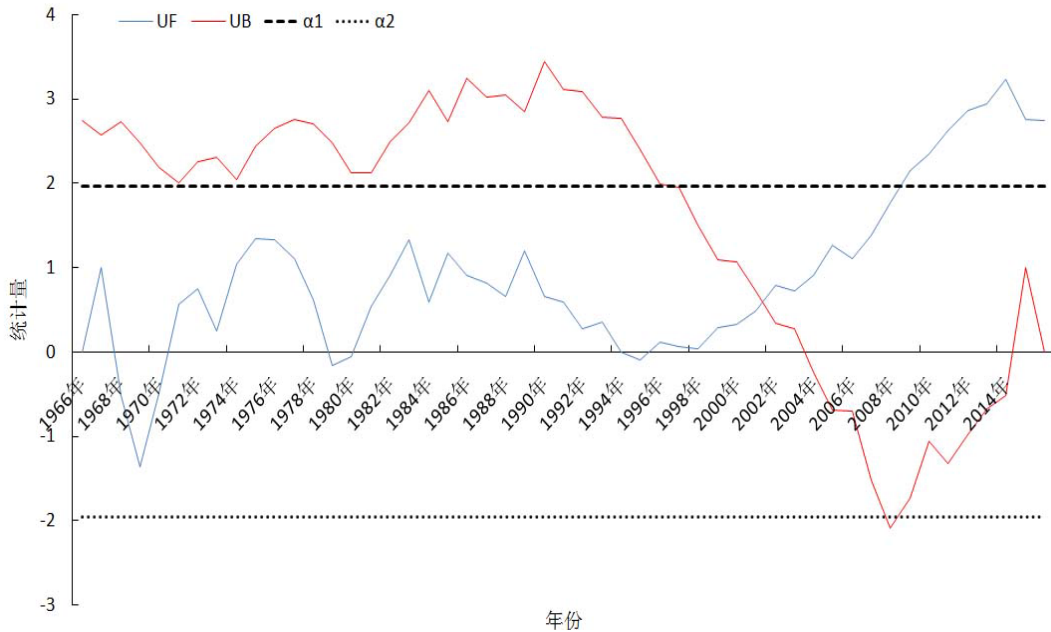
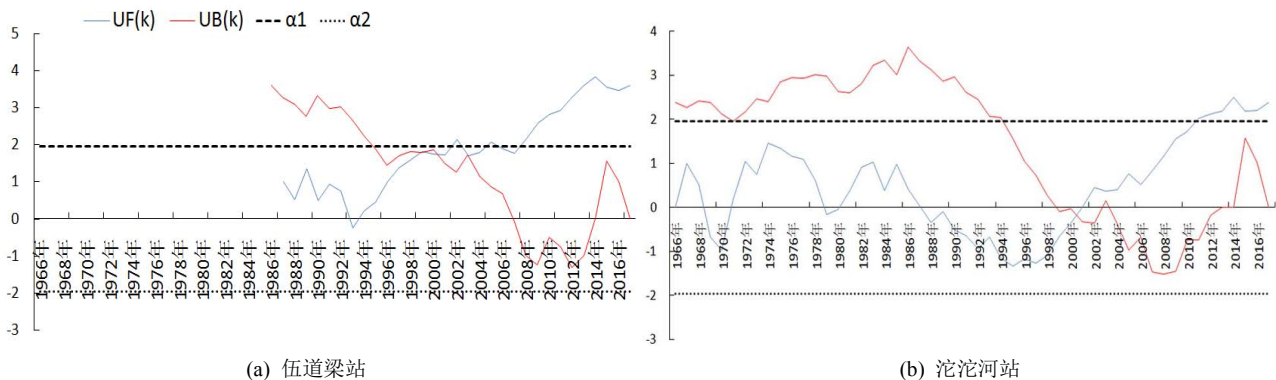


Figure 3. The M-K test curve of the precipitation in source region of Yangtze River in 1966-2017
 图 3. 长江源 1966-2017 年年均降水量 M-K 检验曲线图

选取源区内伍道梁、沱沱河、曲麻莱和玉树四个气象站点, 从空间分布上对降水变化的分析表明(如图 4 所示), 源区的空间降水分布存在较大差异, 分布极度不均。对于源头区的伍道梁和沱沱河气象站点, 基本与源区的年均降水变化保持一致, 即总体上呈增长趋势, 2009 年左右在 0.05 检验水平下的增长趋势变得显著; 同时在 2002 年左右降水出现突增点。而在源区中下游的曲麻莱和玉树两个气象站的降水与平均降水变化趋势不同, 中下游地区虽然 UF 曲线整体在坐标轴的第一象限, 呈增加趋势, 但超过显著水平线($\alpha = 1.96$)的部分较少, 增加趋势不显著, 也没有明显的突变点出现。这可能主要是由于源区的面平均降水数据采用的 TPS 插值法以站点的影响面积为权重, 而长江源区上游的伍道梁和沱沱河控制面积更大, 从而导致面平均降水更多呈现出上游站点的变化趋势。



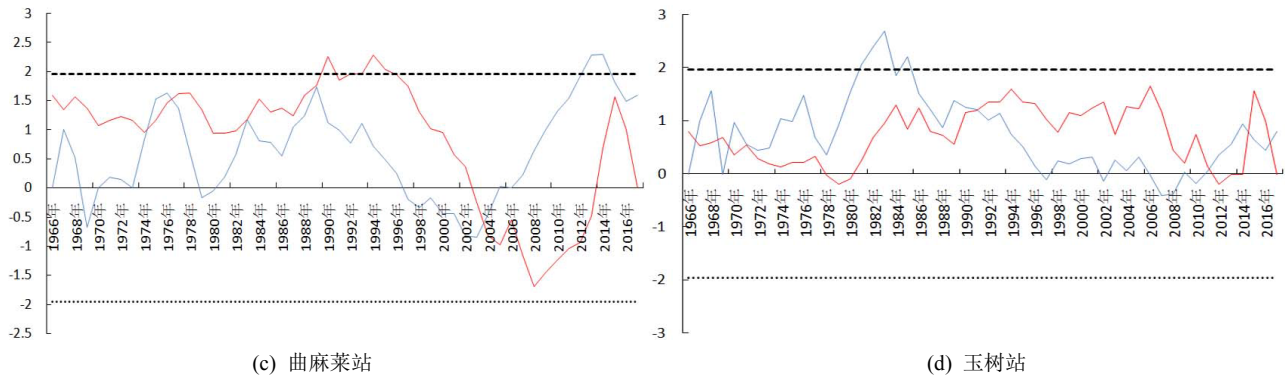


Figure 4. The M-K curve of different gauged precipitation in the source region of Yangtze River in 1966~2017
图 4. 长江源区各站 1966~2017 年降水量值 M-K 检验曲线图

各站点与均值年降水量的箱型图如图 5 所示，可以看出：源区平均降水的年际分布较均匀，主要集中在 360~450 mm 之间，无极端降水年(即异常值点)出现。各空间分布的站点中，从上游到下游地区降水逐渐增多，站点源头沱沱河与出口玉树站的年降水量相差 270.3 mm；结合周边站点，索县站的年降水最多，与沱沱河站相差 377 mm。从各站箱形图的中位数和上下四位数的间距可以看出除了伍道梁站与杂多站年际降水分布呈现左偏分布与右偏分布外，其余各站降水相对分布较均匀，年际降水波动也相对平稳，除沱沱河在 2009 年的降水以外，也无极端异常值出现。

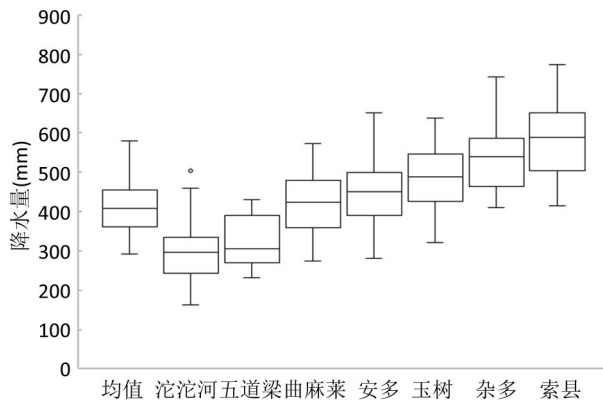


Figure 5. Curve: system result of standard experiment
图 5. 标准试验系统结果曲线

表 1 给出 95%置信区间内各站点与面平均年降水量的相关性检验与相对偏差值，虽然各站点实测降水与再分析的面平均降水量之间都均具有良好的显著相关性，但相关系数差异较大，因源头区站点的降水与面平均降水的变化趋势基本一致，所以源头区站点也具有更高的相关系数。从之前的分析来看，源头区域的降水量偏小，造成其与面平均降水的相对偏差较大，如沱沱河达到 38%。而源区出口区域的降水更加丰富，对面平均降水量的影响也更大，得到的相对偏差也较小，如曲麻莱仅为 2%。

Table 1. Significant correlation and relative deviation of the gauged data and reanalyzed mean annual precipitation at each site
表 1. 各实测站点与再分析均值年降水量的显著相关性 with 相对偏差

站	相关性系数	显著相关性	相对偏差
伍道梁	0.77	显著	27%
沱沱河	0.88	显著	38%

Continued

安多	0.55	显著	8%
索县	0.40	显著	30%
杂多	0.63	显著	23%
曲麻莱	0.74	显著	2%
玉树	0.53	显著	16%

4.2. 年内变化

近 52 年来, 源区的降水主要集中在 6~9 月, 对比突变点 2002 年前后(如图 6(a)所示), 即 1966~2001 年与 2002~2017 年的年内分布来看, 年内降水分布不均的趋势进一步加强, 6~9 月降水量在全年总降水量中的占比由 75.15%增加到了 86.03%。对突变点前后两个时段的月平均降水历时曲线如图 6(b)所示, 结果表明: 气候变化背景下, 更多的降水集中在发生概率小于 45%的降水事件中, 其中发生概率小于 20%的强降水事件(主要集中在 5~9 月)的降水量增长尤为明显, 而对于发生概率大于 55%的常规降水事件(主要集中在 10 月到次年 4 月)的降水量基本没有变化。

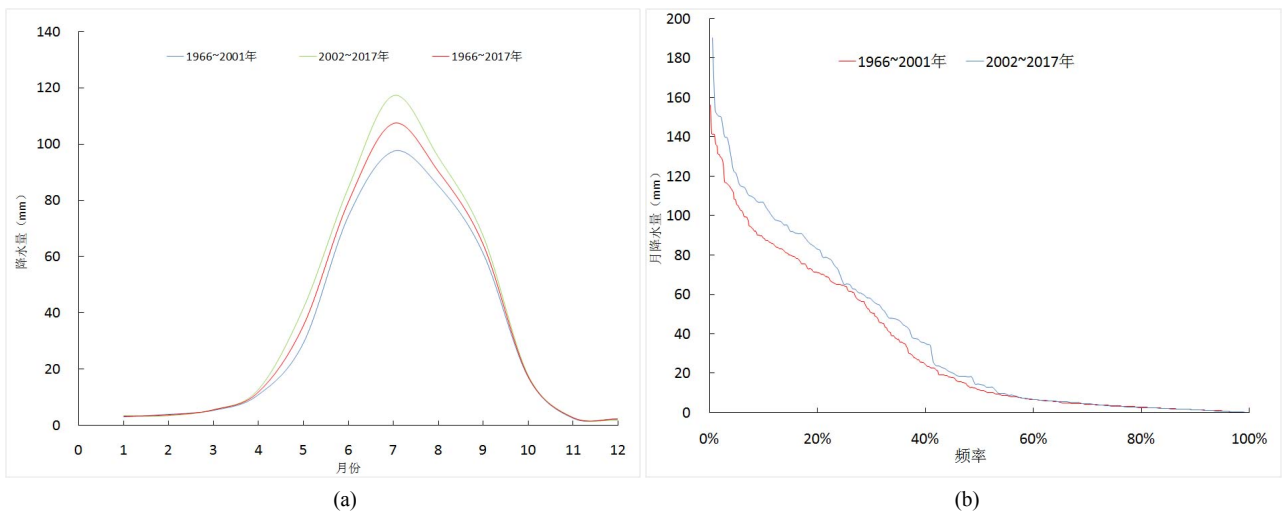


Figure 6. Monthly precipitation distribution curves in the source region of Yangtze in different periods (a) and the duration curves of monthly average precipitation before and after mutation point (b)

图 6. 长江源区不同时段年内各月降水分布曲线(a)与突变前后月平均降水历时曲线图(b)

进一步对各站点发生极端降水月(即各月降水分布的异常值)的事件进行统计后发现: 6~9 月为发生极端降水事件的主要月份, 突变后的 16 年间(2002~2017 年)共出现 9 次, 而突变前的 36 年间(1966~2001 年)共出现了 7 次, 突变点 2002 年前后发生极端降水月的频率增长了近 3 倍。从站点分布来看, 降水更加丰富的出口区域比源头区域更容易发生极端降水, 其年内降水分布也更加不均。

5. 结论

本文主要采用相关性与 M-K 检验等统计分析方法, 结合站点实测与再分析空间数据对长江源区 1966 年~2017 年降水变化的空间分布差异进行了分析讨论, 得出主要结论如下:

1) 从年际降水过程的变化趋势来看, 受站点空间分布差异影响, 源头控制面积更大的站点对源区平均降水变化具有主导作用, 因此源头区站点与面平均降水量呈现出基本一致的变化趋势, 即: 整体上为稳定的缓慢增

加趋势, 2002 年左右发生突变, 2009 年左右呈现显著性增长趋势后的年均增长量为多年平均的 2.3 倍。

2) 从降水量的分布来看, 空间各站点与源区平均降水过程都具有良好的相关性, 但是降水丰富的出口处区域对源区平均降水量的影响更大, 相对偏差最小近 2%; 而降水相对稀少的源头地区, 相对偏差均在 30% 左右。

3) 从降水的年内变化来看, 源区年内降水分布不均的趋势更加明显, 更多的降水集中在发生概率小于 20% 的强降水事件中。2002 年突变点前后 6~9 月降水量在全年的占比增加了 11%, 发生极端降水月事件的概率增加了近 3 倍。而源区内降水较多的出口区域, 这种趋势更加明显, 更容易发生极端降水事件, 其年内降水分布也更加不均。

气候变化背景下, 长江源区近 52 年的降水总体表现为缓慢的增长趋势, 源头区降水变化趋势与面平均降水基本一致, 而下游区域降水与面平均降水的相对偏差更小。长江源区的降水增长主要都集中在了下游地区 6~9 月的汛期, 这使得年内的降水分布更加不均, 在此变化趋势下, 源区的水资源利用可能面临更加不利的局面。

参考文献

- [1] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
SHEN Yongping, WANG Guoya. The latest scientific points of global climate change awareness in the fifth assessment report of IPCC Working Group I. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068-1076. (in Chinese)
- [2] 曾建军, 金彦兆, 孙栋元, 等. 气候变化对干旱内陆河流域水资源影响的研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 72-78.
ZENG Jianjun, JIN Yanzhao, SUN Dongyuan, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in arid inland river basins. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(2): 72-78. (in Chinese)
- [3] 乔飞, 富国, 徐香勤, 等. 三江源区水源涵养功能评估[J]. 环境科学研究, 2018, 31(6): 1010-1018.
QIAO Fei, FU Guo, XU Xiangqin, et al. Evaluation of water conservation function in the source area of the Three Rivers. *Environmental Science Research*, 2018, 31(6): 1010-1018. (in Chinese)
- [4] 齐冬梅, 李跃清, 陈永仁, 等. 气候变化背景下长江源区径流变化特征及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1075-1086.
QI Dongmei, LI Yueqing, CHEN Yongren, et al. Analysis of runoff variation characteristics and genesis in the source region of the Yangtze River under climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 1075-1086. (in Chinese)
- [5] 刘光生, 王根绪, 张伟. 三江源区气候及水文变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 302-309.
LIU Guangsheng, WANG Genxu, and ZHANG Wei. Study on the characteristics of climate and hydrology change in the three river source regions. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(3): 302-309. (in Chinese)
- [6] YI, X., LI, G. and YIN, Y. Spatio-temporal variation of precipitation in the Three-River Headwater Region from 1961 to 2010. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(3): 447-464. <https://doi.org/10.1007/s11442-013-1021-y>
- [7] 梁川, 赵莉花, 张博雄. 长江源区高寒地区气候变化对水环境影响研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013(1): 81-86.
LIANG Chuan, ZHAO Lihua, and ZHANG Boxiong. A review of the impact of climate change on the hydrological environment in the alpine region of the Yangtze River. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013(1): 81-86. (in Chinese)
- [8] RONG, Y., WEI, L., and BAI, L. Extreme rainfall events in the sources of the Yangtzi and the Yellow Rivers. 2011.
- [9] 裴超重, 钱开铸, 吕京京, 等. 长江源区蒸散量变化规律及其影响因素[J]. 现代地质, 2010(2): 170-176.
PEI Chaozhong, QIAN Kaizhu, LV Jingjing, et al. Variation of evapotranspiration in the source region of the Yangtze River and its influencing factors. *Modern Geology*, 2010(2): 170-176. (in Chinese)
- [10] 时光训, 刘健, 马力, 等. 1970-2014 年长江流域极端降水过程的时空变化研究[J]. 水文, 2017, 37(4): 77-85.
SHI Guangxun, LIU Jian, MA Li, et al. Study on the spatiotemporal changes of extreme precipitation process in the Yangtze River Basin from 1970 to 2014. *Hydrology*, 2017, 37(4): 77-85. (in Chinese)
- [11] LI, L., SHEN, H., DAI, S., et al. Response of water resources to climate change and its future trend in the source region of the Yangtze River. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(2): 208-218. <https://doi.org/10.1007/s11442-013-1004-z>
- [12] 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 等. 长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 125-133.
WANG Shaoyong, WANG Qiaoli, WU Jinkui, et al. Hydrogen and oxygen stable isotope characteristics of precipitation and source of water vapor in the source region of the Yangtze River. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 125-133. (in Chinese)
- [13] 王朕, 梁川, 张彦南. 青藏高原江河源区干湿变化特征及影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2017(2): 18-22.

WANG Yan, LIANG Chuan, and ZHANG Yannan. Analysis of the characteristics of wet and dry changes and influencing factors in the source region of the Qinghai-Tibet Plateau. *Hydropower Energy Science*, 2017(2): 18-22. (in Chinese)

- [14] 李燕, 李其江, 刘希胜, 等. 长江源区径流量变化分析[J]. *水文*, 2017(1): 92-95.
LI Yan, LI Qijiang, LIU Xisheng, et al. Analysis of runoff changes in the source region of the Yangtze River. *Hydrology*, 2017(1): 92-95. (in Chinese)
- [15] 刘聚涛, 方少文, 冯倩, 等. 基于 Mann-Kendall 法的湖泊稳态转换突变分析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(12): 3707-3713.
LIU Jutao, FANG Shaowen, FENG Qian, et al. Catastrophe analysis of lake steady state transition based on Mann-Kendall method. *China Environmental Science*, 2015, 35(12): 3707-3713. (in Chinese)