

长江源区年最大洪峰流量与极端气候的关系分析

周宝佳^{1,2}, 代 琼³, 赵 璐^{2*}

¹重庆市永川区水利电力工程质量站, 重庆

²四川大学水利水电学院, 四川 成都

³重庆水利电力职业技术学院, 重庆

Email: 1714877226@qq.com, *luya1121@163.com

收稿日期: 2021年6月1日; 录用日期: 2021年6月23日; 发布日期: 2021年6月30日

摘 要

基于长江源区1960~2016年最大洪峰流量序列和气象资料,运用线性最小二乘法、Mann-Kendall显著性检验、Khronostat突变检验软件,分析了长江源区年最大洪峰流量的变化趋势和突变特征,并采用Spearman相关分析法探讨了洪水极值与极端气候指数之间的关系。结果表明:近57年直门达和沱沱河水文站的年最大洪峰流量均呈不显著增加趋势,变化速率分别为 $41.20 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ 和 $0.39 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot 10\text{a})$;直门达站年最大洪峰流量序列不存在突变现象,沱沱河站在1972和1995年分别发生显著减小和增大突变。长江源区7~9月1日最大降水量和连续5日最大降水量均呈不显著增加趋势,7~9月极端最高气温和极端最低气温均呈显著上升趋势,变暖速率分别为 $0.36^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.32^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。直门达站和沱沱河站的年最大洪峰流量均与其7~9月连续5日最大降水量显著相关,在直门达站还与7~9月极端最高气温显著负相关,沱沱河站则与7~9月极端最低气温存在显著正相关关系。研究成果可为长江源区水资源管理和防灾减灾提供科学参考。

关键词

最大洪峰流量, 极端气候指数, 趋势分析, 突变分析, 长江源区

Analysis of the Relationship between Annual Maximum Peak Discharge and Extreme Climate in the Source Region of the Yangtze River

Baojia Zhou^{1,2}, Qiong Dai³, Lu Zhao^{2*}

¹Hydraulic & Hydropower Engineering Quality Station of Yongchuan District Chongqing, Chongqing

²College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu Sichuan

³Chongqing Water Resource and Electric Engineering College, Chongqing

Email: 1714877226@qq.com, *luya1121@163.com

Received: Jun. 1st, 2021; accepted: Jun. 23rd, 2021; published: Jun. 30th, 2021

作者简介: 周宝佳, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源、气候变化研究和水利工程运行管理等工作。

*通讯作者。

文章引用: 周宝佳, 代琼, 赵璐. 长江源区年最大洪峰流量与极端气候的关系分析[J]. 水资源研究, 2021, 10(3): 261-269.

DOI: 10.12677/jwrr.2021.103028

Abstract

Based on the annual maximum peak discharge (AMPD) series and meteorological observation data from 1960 to 2016 in the source region of the Yangtze River (SRYR), the trend and mutation characteristics of the AMPD were analyzed by using linear least squares method, Mann-Kendall significance test and Khronostat software. In addition, the correlations between the AMPD and extreme climate indices were explored by Spearman correlation analysis method. The results show that the AMPD at the Chumda and Tuotuohe hydrological station exhibit non-significant increasing trend in the past 57 years, with an increase rate of 41.20 and 0.39 m³/(s·10a), respectively. There is no abrupt change in the AMPD series at Chumda hydrological station, however, an abrupt decrease and increase occurred in 1972 and 1995 at the Tuotuohe hydrological station, respectively. The Max 1-day precipitation and the Max 5-day precipitation in July-September for the SRYR exhibit non-significant increasing trend. However, the maximum value of daily maximum temperature and the minimum value of daily minimum temperature in July-September for the SRYR exhibit significant increasing trend, with an increase rate of 0.32°C and 0.36°C/10a, respectively. The AMPD at both stations is significantly correlated with the Max 5-day precipitation in July-September. In addition, the AMPD at the Chumda hydrological station is significantly negatively correlated with the maximum value of daily maximum temperature in July-September, while there is a significantly positive correlation between the AMPD and the minimum value of daily minimum temperature in July-September at Tuotuohe hydrological station. The research results can provide a scientific basis for water resource management and disaster prevention/mitigation policies in the SRYR.

Keywords

Maximum Peak Discharge, Extreme Climate Indices, Trend Analysis, Abrupt Change Analysis, The Source Region of the Yangtze River

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

全球气候系统的异常变化改变了水文循环, 导致极端水文事件(如干旱、洪涝等)的时空特征发生明显变化, 对生态健康、水安全和社会经济发展带来严重威胁。近年来, 我国洪涝事件的发生概率、频率和强度均呈增加趋势, 未来洪涝灾害的强度和影响范围仍呈上升趋势[1]。长江源区深处青藏高原腹地, 是我国重要的水源涵养区和生态保护区, 也是对气候变化响应最为敏感的区域之一[2] [3]。受气候变化和生态环境的影响, 源区水文过程发生明显变化[4] [5] [6]。源区径流变化对气候变暖的响应特征引起了许多学者的关注[7] [8], 然而, 前人研究多集中在径流平均值方面, 缺乏径流极值的变化特征研究。因此, 本文基于长江源区实测最大洪峰流量序列和气象观测数据, 运用线性回归、Mann-Kendall 显著性检验和 Khronostat 突变检验程序分析序列的时间变化特征, 并采用 Spearman 相关分析法探讨了洪水极值与极端降水和极端气温指数之间的关系, 以期为源区水资源管理和防灾减灾政策提供科学参考。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

本文采用的洪水资料为直门达和沱沱河水文站 1960~2016 年的年最大洪峰流量序列, 数据来源于青海省水

文水资源勘测局和长江流域水文资料(金沙江区)。气象资料为源区 5 个气象站的逐日降水和气温序列,降水资料来源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0) (<http://data.cma.cn/>); 气温资料来源于中国科学院大气物理研究所研制的逐日均一化气温数据集(CHTM 3.0) [9], 时间序列为 1960~2013 年, 本文根据气候日值资料数据集(V3.0)将序列延长至 2016 年, 并重新进行均一性检验。长江源区位置和站点分布如图 1 所示。

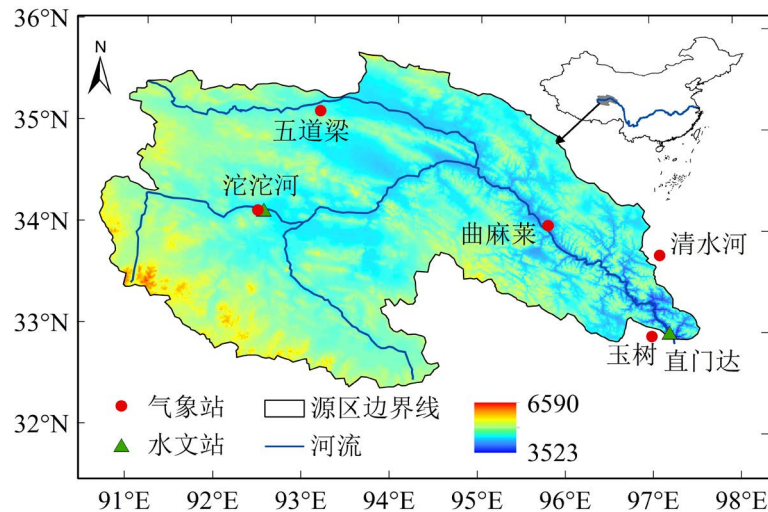


Figure 1. Location of the source region of the Yangtze River and stations
图 1. 长江源区地理位置和站点分布图

2.2. 研究方法

2.2.1. 气象数据质量控制

原始气象资料已经过简单的质量控制, 但气象站迁址、仪器更换等非气候因素的变化可能导致数据序列存在非均一性, 造成分析结果不能真实的反映气候变化的情况[10], 并给洪涝事件的归因带来困难, 因此在使用地面气象资料前, 对其进行均一性检验是十分必要的。本文逐日气温序列的均一性检验采用 RHtests V4 软件包, 逐日降水序列则采用 RHtests_dlyPrep 检验, 具体步骤参看文献[11]。检验结果表明, 各站点 1960~2016 年逐日气温、逐日降水序列均不存在显著断点, 因此认为本文采用的气温和降水序列不存在非均一性, 无需订正。

2.2.2. 极端气候选取

为了分析洪水极值与极端气候之间的关系, 本文从世界气象组织“气候变化检测与极端气候事件指标专家组”(ETCCDI)定义的极端气候事件核心指数中, 选取了 4 个极端气候指数: 1 日最大降水量(RX1day)、连续 5 日最大降水量(RX5day)、极端最高气温(TXx)和极端最低气温(TNn), 均采用 RClimDex 1.1 程序计算[12]。考虑长江源区年最大洪峰发生时间集中在 7~9 月[13], 各极端指数均取 7~9 月的相应值。长江源极端指数的区域值采用泰森多边形法计算, 沱沱河流域则采用沱沱河气象站数据。

2.2.3. 统计分析方法

洪峰极值和极端气候指数的变化趋势均采用 RClimDex 建议的线性最小二乘法估计。各要素的时间变化曲线采用局部加权回归法(Loess)拟合, 参数 span 取值越大则曲线越平滑, 本文取 span = 0.35 (约 20 年)能较好的表达各要素的总体变化趋势。趋势的统计显著性采用 Mann-Kendall (M-K)检验, 该方法是一种非参数统计方法, 其优点是样本不需要服从一定的分布, 并受异常值的影响小, 因此常用于评价极端气候水文要素时间序列趋势的显著性。M-K 检验的标准统计参数 Z 为正值(负值), 表示趋势为增加(减少)趋势; 当 $|Z| > 1.96$ 时, 表示通过 0.05 的显著性水平检验; 当 $|Z| \leq 1.96$ 表示变化趋势在统计上不显著。突变检验采用法国发展研究所开发的

Khronostat 1.0.1 程序[14], 本文选择程序中的 Lee & Heghinian 法、Buishand 法和 Hubert 分割法进行突变分析。相关性分析则采用 Spearman 秩相关系数和双尾 t 检验。

3. 结果与分析

3.1. 年最大洪峰流量趋势变化特征

长江源区直门达站和沱沱河站的 1960~2016 年的年最大洪峰流量变化如图 2 所示, 相关统计参数如表 1 所示。直门达站年最大洪峰流量在 846~3860 m³/s 之间变化, 极大值出现在 1989 年。沱沱河站年最大洪峰流量在 74.1~750 m³/s 之间, 极大值出现在 1966 年; 两站最大洪峰流量极小值均出现在 1979 年。

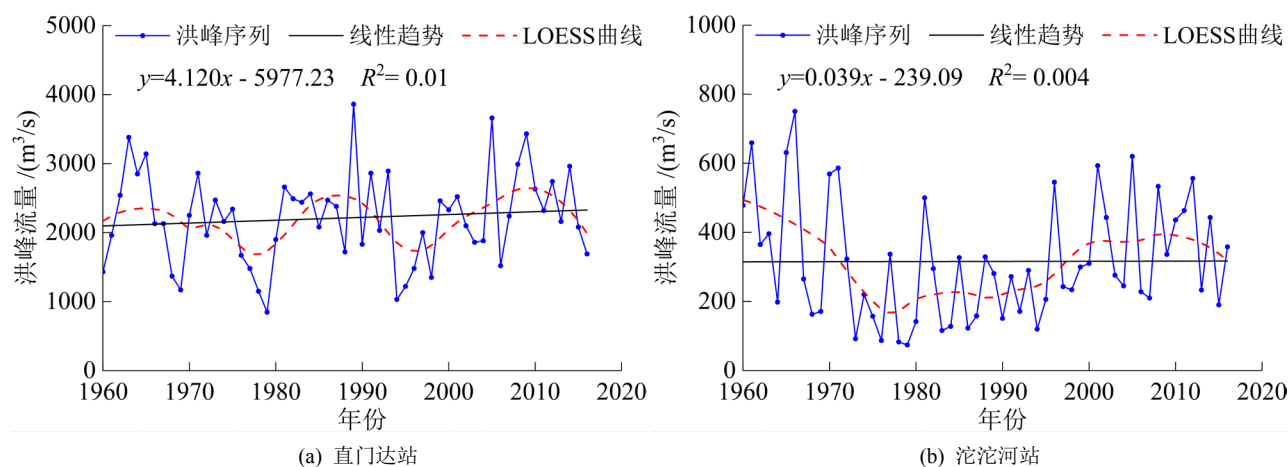


Figure 2. The curves of the annual maximum peak discharge in the source region of the Yangtze River
图 2. 长江源区年最大洪峰流量变化曲线

对直门达和沱沱河站年最大洪峰流量序列的线性回归分析表明, 1960~2016 年两站年最大洪峰流量均呈不显著增加趋势($P > 0.05$)。直门达站年最大洪峰流量总体趋势率为 41.20 m³/(s·10a), 年际变化呈明显波动特征, 如图 2(a)所示, 其在 20 世纪 70 年代末和 90 年代初为相对低值期, 60 年代初、80 年代末以及 2010 年前后为高值期。沱沱河站年最大洪峰流量在研究期内以 0.39 m³/(s·10a)的速率总体微弱增加, 但阶段变化特征明显, 如图 2(b)所示, 其在 20 世纪 60 年代至 70 年代末减少趋势明显, 之后呈持续增加, 至 2010 年前后转呈减小趋势。

Table 1. Statistical characteristic values of annual maximum peak discharge in the source region of the Yangtze River
表 1. 长江源区年最大洪峰流量统计特征表

站名	极大值(m ³ /s)	极小值(m ³ /s)	趋势率[m ³ /(s·10a)]	统计量 Z
直门达	3860	846	41.2	0.61
沱沱河	750	74.1	0.39	0.63

3.2. 年最大洪峰流量序列突变分析

1960~2016 年直门达站年最大洪峰流量序列突变检验如图 3 所示。Lee & Heghinian 法检验结果显示, 其概率密度最大值为 0.056, 出现在 2004 年, 但历年概率密度值差异并不明显, 且不符合单峰或双峰分布(图 3(a)); Buishand 法检验结果显示, 直门达站年最大洪峰流量在 2004 年的增加变化并不显著(图 3(b)); Hubert 分割法也未检测出序列的显著突变点; 因此认为, 直门达站年最大洪峰流量在 1960~2016 年不存在突变现象。褚茜茜等

[13]的研究也显示,直门达站径流极值在1978~2009年未出现突变。然而,有学者的研究表明直门达站平均径流在2004年存在显著增多突变[8],这说明极端径流和平均径流的突变特征存在明显差异。

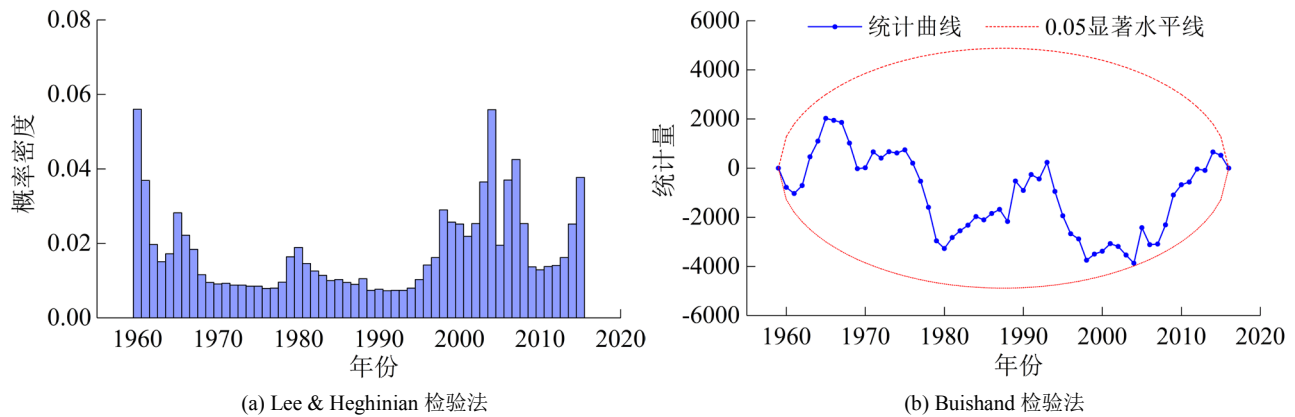


Figure 3. Abrupt change analysis for the annual maximum peak discharge at the Chumad hydrological station
图 3. 直门达站年最大洪峰流量突变检验图

沱沱河站年最大洪峰序列突变检验如图 4 所示。Lee & Heghinian 法检测出历年概率密度呈双峰分布,峰值区分别位于 1966 年和 1995 年前后(图 4(a)); Buishand 法则显示 1972 和 1995 年为显著突变年(图 4(b))。采用 Hubert 分割法检验,当序列仅考虑一个最显著的突变点时为 1966 年;当考虑两个突变点时,为 1972 和 1995 年。由此可知,不同方法的突变检测结果既有共性也有差异。

为了查清 1960~2016 年沱沱河站年最大洪峰流量的突变特征,将序列分为两个子序列:1960~1995 年和 1973~2016 年。对子序列分别采用 Lee & Heghinian 法、Buishand 法和 Hubert 分割法再次检验,三种方法均显示沱沱河站年最大洪峰流量在 1972 年发生显著减小突变,1995 年发生显著增大突变(图略)。这与沱沱河站平均径流在 2004 和 2007 年发生突变[15]的结论有所不同,说明沱沱河站年径流极值和平均值的突变特征也存在一定的差别。

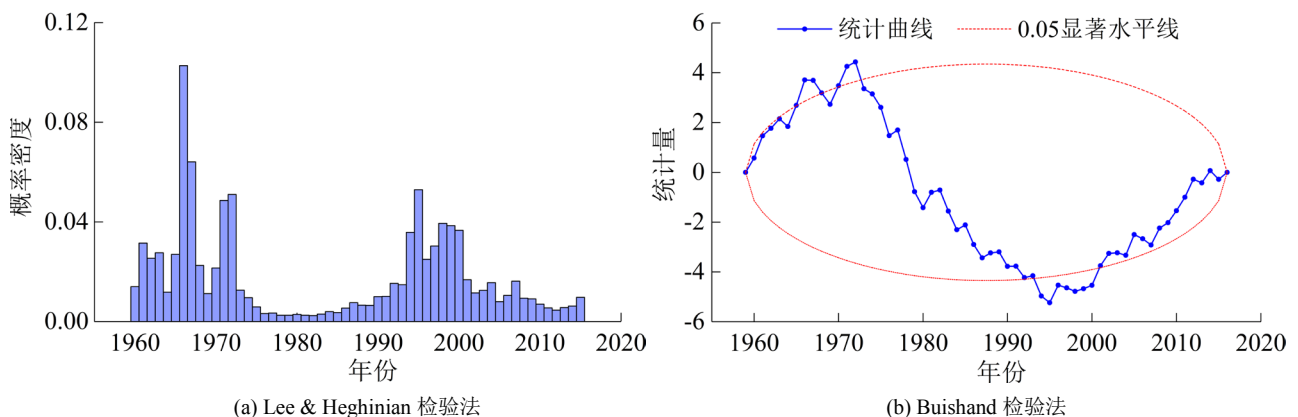


Figure 4. Abrupt change analysis for the annual maximum peak discharge at the Tuotuohe hydrological station
图 4. 沱沱河站年最大洪峰流量突变检验图

3.3. 极端气候指数相关分析

图 5 为长江源区 7~9 月 1 日最大降水量(RX1day)与连续 5 日最大降水量(RX5day)的变化曲线。可以看出,1960~2016 年源区 7~9 月 RX1day 和 RX5day 总体上均呈不显著增加趋势,趋势率分别为 0.29 mm/10a 和 0.67

mm/10a。RX1day 的历史高值主要分布在 20 世纪 80 年代，低值期为 20 世纪 90 年代，近 10 余年来变化相对平缓(图 5(a))。RX5day 则呈较明显的波动变化特征，峰值期位于 20 世纪 70 年代初和 2000s 末期，以 20 世纪 90 年代中期至 2009 年前后的上升趋势最为明显，其后呈下降趋势(图 5(b))。

图 6 为沱沱河站 7~9 月 1 日最大降水量(RX1day)与连续 5 日最大降水量(RX5day)的变化曲线。由图可知，1960~2016 年沱沱河 7~9 月 RX1day 呈不显著减小趋势，趋势率为 $-0.25 \text{ mm}/10\text{a}$ ，历史高值主要分布在 20 世纪 80 年代及以前，20 世纪 90 年代末期以前总体呈减小趋势，其后呈增加趋势(图 6(a))。7~9 月 RX5day 波动变化特征与源区基本一致，但总体呈不显著减小趋势，趋势率为 $-0.21 \text{ mm}/10\text{a}$ (图 6(b))。

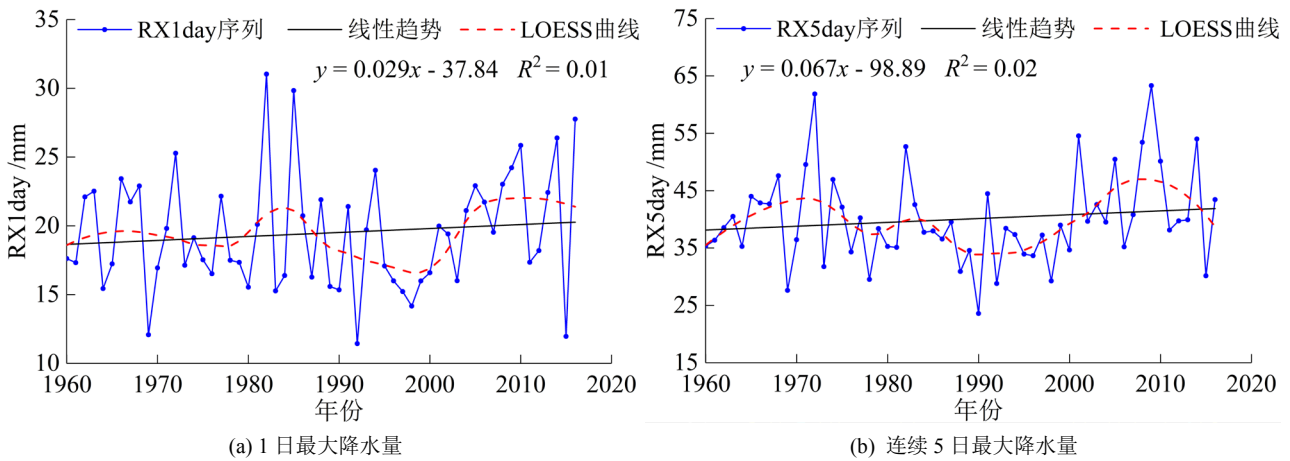


Figure 5. The curves of the extreme precipitation indices from July to September in the source region of the Yangtze River

图 5. 长江源区 7~9 月极端降水指数变化曲线

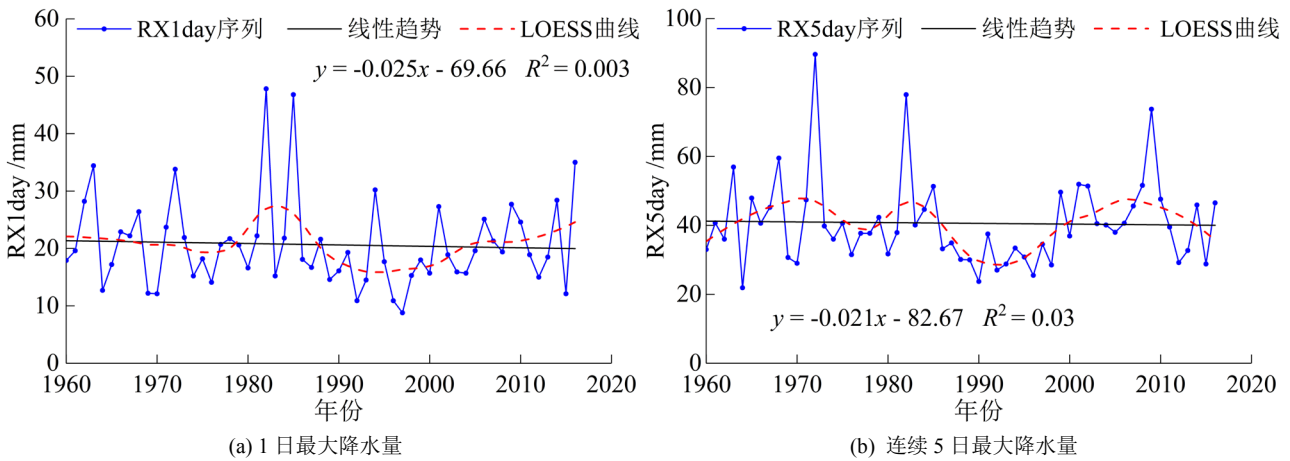


Figure 6. The curves of the extreme precipitation indices from July to September in the Tuotuohe station

图 6. 沱沱河站 7~9 月极端降水指数变化曲线

长江源区和沱沱河站 7~9 月极端最高气温(TXx)、极端最低气温(TNn)变化曲线如图 7 和图 8 所示。可以看出，长江源区 7~9 月 TNn 的增暖速率较其 TXx 略快，年际变化也存在明显差异。源区 TXx 总体呈波动上升趋势，增暖速率 $0.32^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($P < 0.05$)，21 世纪以来先降后升(图 7(a))。TNn 升幅达 $0.36^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($P < 0.01$)，其在 20 世纪 60 年代初至 90 年代末总体呈下降趋势，其后快速升温，2010 年以来略有降低(图 7(b))。沱沱河站 7~9 月 TXx 和 TNn 的增暖速率分别为 $0.19^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($P > 0.10$)和 $0.33^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($P < 0.05$)，其年际变化特征与源区基本一致，但总体升温幅度较长江源区低。

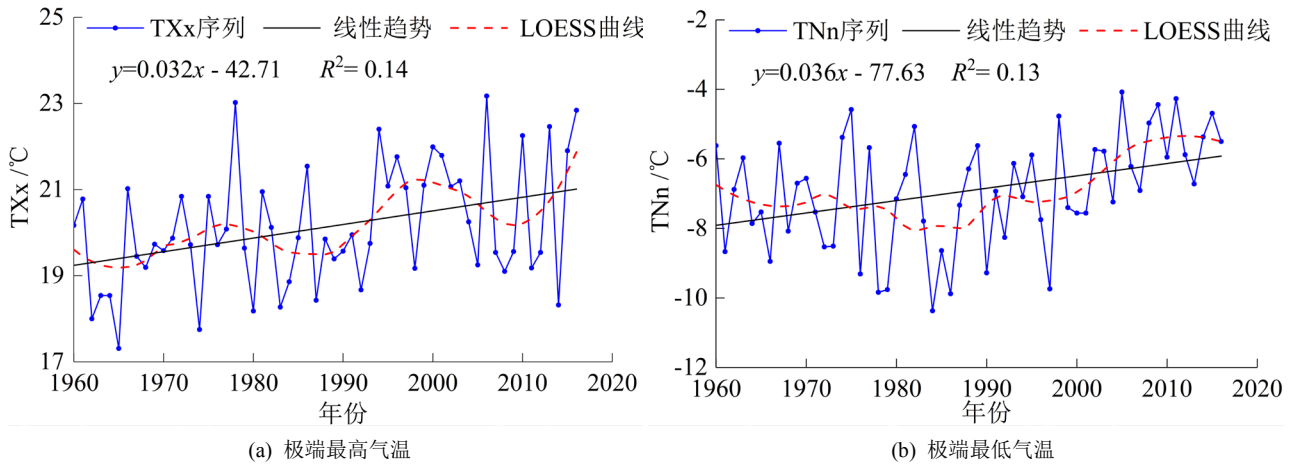


Figure 7. The curves of the extreme temperature indices from July to September in the source region of the Yangtze River
图 7. 长江源区 7~9 月极端气温指数变化曲线

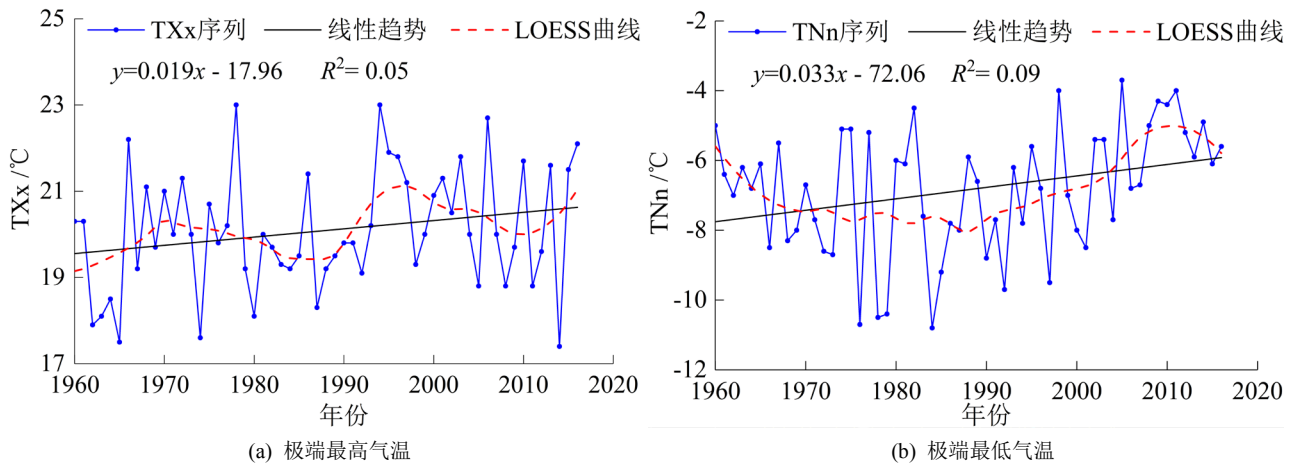


Figure 8. The curves of the extreme temperature indices from July to September in the Tuotuohe station
图 8. 沱沱河站 7~9 月极端气温指数变化曲线

源区年最大洪峰流量与 7~9 月极端气候指数的相关系数如表 2 所示。由表可知，直门达站和沱沱河站的年最大洪峰流量与其 7~9 月 RX5day 均存在显著的正相关关系，与 7~9 月 RX1day 相关性相对较弱。值得注意的是，两站的年最大洪峰流量与其 7~9 月极端最高温(TXx)均呈负相关关系，且在直门达站通过 0.05 的显著性水平检验。这可能是由于气温上升使得冰雪融化和冻土解冻提前，进而改变源区内年径流分布，导致多发于夏季汛期的洪峰极值有所减小[16]。同时，长江源区极端洪水还受多年冻土活动层和陆面生态系统变化的综合影响[4]。

Table 2. Correlation coefficient between the annual maximum peak discharge and the extreme climate indices from July to September

表 2. 年最大洪峰流量与 7~9 月极端气候指数相关系数

站名	RX1day	RX5day	TXx	TNn
直门达	0.20	0.47**	-0.37**	0.23
沱沱河	0.21	0.28*	-0.03	0.44**

注：**和*分别表示通过 0.01 和 0.05 显著性水平检验。

两站点的年最大洪峰流量与 7~9 月 TNn 均呈正相关关系，但仅在沱沱河站显著相关。前人研究表明，沱沱

河站平均降水的增加趋势并不显著,但平均气温上升趋势明显[15],尽管沱沱河流域的降水对径流贡献最大,但气温上升导致的冰雪融水也是径流增加的重要原因,1990s 径流增加量的 2/3 都来源于冰雪融水[17]。在源区冬克玛底河流域,冰川融水甚至贡献了 1966~2015 年径流增加量的 75% [18]。由于最高气温和最低气温上升的不对称特征,其对径流变化的影响程度也不同。分析认为,沱沱河流域的径流极值不仅受极端降水的显著影响,还与极端最低气温存在密切关系。

4. 结论

1) 1960~2016 年直门达站和沱沱河站的年最大洪峰流量总体均呈不显著增加趋势,倾向率分别为 $41.20 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ 和 $0.39 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot 10\text{a})$;直门达站年最大洪峰流量序列不存在突变现象,沱沱河站在 1972 年和 1995 年分别发生显著减小和增大突变。

2) 长江源区 7~9 月 1 日最大降水量(RX1day)和连续 5 日最大降水量(RX5day)均为不显著增加趋势,倾向率分别为 $0.29 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $0.67 \text{ mm}/10\text{a}$ 。7~9 月极端最高气温(TXx)和极端最低气温(TNn)均呈显著上升趋势,变暖速率分别为 $0.32^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.36^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。

3) 直门达站和沱沱河站年最大洪峰流量与 7-9 月连续 5 日最大降水量均存在显著相关关系,但直门达站年最大洪峰流量与 7~9 月极端最高气温显著负相关,沱沱河站则与 7~9 月极端最低气温显著正相关。极端气候对源区洪水极值的影响过程十分复杂,本文初步探讨了其相关关系,具体作用机制还有待进一步研究。

基金项目

国家自然科学基金项目(41271054)。

参考文献

- [1] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015. Compilation Committee of "The Third National Assessment Report on Climate Change". The third national assessment report on climate change. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 游庆龙, 康世昌, 李潮流, 等. 三江源地区 1961~2005 年气温极端事件变化[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 232-236. YOU Qinglong, KANG Shichang, LI Chaoliu, *et al.* Change in extreme temperature over Sanjiangyuan region in the period from 1961 to 2005. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(2): 232-236. (in Chinese)
- [3] 强安丰, 魏加华, 解宏伟. 青海三江源地区气温与降水变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(2): 10-14. QIANG Anfeng, WEI Jiahua and XIE Hongwei. Trend analysis of temperature and precipitation in Sanjiangyuan region of Qinghai Province. Water Resources and Power, 2018, 36(2): 10-14. (in Chinese)
- [4] 王根绪, 李娜, 胡宏昌. 气候变化对长江黄河源区生态系统的影响及其水文效应[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 202-208. WANG Genxu, LI Na and HU Hongchang. Hydrologic effect of ecosystem responses to climatic change in the Source Regions of Yangtze River and Yellow River. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(4): 202-208. (in Chinese)
- [5] 梁川, 侯小波, 潘妮. 长江源高寒区域降水和径流时空变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 53-59. LIANG Chuan, HOU Xiaobo and PAN Ni. Spatial and temporal variations of precipitation and runoff in the Source Region of the Yangtze River. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 53-59. (in Chinese)
- [6] 蒋佑承, 刘蛟, 张越关, 等. 长江源区降水变化的时空分布规律分析[J]. 水资源研究, 2020, 9(3): 335-343. JIANG Youcheng, LIU Jiao, ZHANG Yueguan, *et al.* Analysis of spatiotemporal distribution of precipitation changes in the source region of the Yangtze River. Journal of Water Resources Research, 2020, 9(3): 335-343. (in Chinese)
- [7] 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.* Changing characteristics and cause analysis of the runoff in the source regions of the Yangtze River under the background of climate change. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1075-1086. (in Chinese)
- [8] 李其江. 长江源径流演变及原因分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(8): 1-5.

- LI Qijiang. Investigation of runoff evolution at the Headwaters of Yangtze River and its driving forces. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(8): 1-5. (in Chinese)
- [9] LI, Z., CAO, L. J., ZHU, Y. N., *et al.* Comparison of two homogenized datasets of daily maximum/mean/minimum temperature in China during 1960-2013. *Journal of Meteorological Research*, 2016, 30(1): 53-66.
<https://doi.org/10.1007/s13351-016-5054-x>
- [10] 严中伟, 李珍, 夏江江. 气候序列的均一化——定量评估气候变化的基础[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(10): 2101-2111.
YAN Zhongwei, LI Zhen and XIA Jiangjiang. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(10): 2101-2111. (in Chinese)
- [11] WANG, X. L., YANG, F. Rhtests V4 User Manual. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada, 2014. <http://etccli.pacificclimate.org/software.shtml>
- [12] ZHANG, X. B., YANG, F. RclimDex (1.0) User Manual. Ottawa: Climate Research Branch Environment Canada, 2004.
<http://etccli.pacificclimate.org/RclimDex/RclimDexUserManual.doc>
- [13] 褚茜茜, 陈进, 陈广才. 长江源区 1978~2009 年径流极值序列变化趋势分析[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(2): 16-19.
CHU Xixi, CHEN Jin and CHEN Guangcai. Variation trend of extreme runoff series in the Source Region of Yangtze River from 1978 to 2009. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(2): 16-19. (in Chinese)
- [14] TRAORE, V., NDIAYE, M., MBOW, C., *et al.* Khronostat model as statistical analysis tools in low casamance river basin, Senegal. *World Environment*, 2017, 7(1): 10-22.
- [15] 唐雄朋, 吕海深. 沱沱河流域水文气象要素变化特征分析[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(12): 37-40.
TANG Xiongpeng, LV Haishen. Temporal variation of main hydrologic meteorological elements in Tuotuohe River Basin. *Water Resources and Power*, 2016, 34(12): 37-40. (in Chinese)
- [16] SHEN, Y. P., WANG, G. Y., WANG, G. X., *et al.* Impacts of climate change on glacial water resources and hydrological cycles in the Yangtze River source region, the Qinghai-Tibetan Plateau, China: A progress report. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2009, 1(6): 475-495.
- [17] ZHANG, Y., LIU, S. Y., XU, J. L., *et al.* Glacier change and glacier runoff variation in the Tuotuo River basin, the source region of Yangtze River in western China. *Environmental Geology*, 2008, 56(1): 59-68.
<https://doi.org/10.1007/s00254-007-1139-2>
- [18] 何秋乐, 匡星星, 梁四海, 等. 1966~2015 年长江源冰川融水变化及其对径流的影响: 以冬克玛底河流域为例[J]. *人民长江*, 2020, 51(2): 77-85.
HE Qiule, KUANG Xingxing, LIANG Sihai, *et al.* Glacial meltwater variation in Dongkemadi River Basin of Yangtze River source from 1966 to 2015 and its influence on runoff. *Yangtze River*, 2020, 51(2): 77-85. (in Chinese)