

Runoff Trend and Natural Driving Force in the Upper Jinsha River

Ming Xiong, Jue Li, Yali Chen

Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei
Email: xiongm@cjh.com.cn

Received: Apr. 7th, 2020; accepted: May 21st, 2020; published: Jun. 16th, 2020

Abstract

Based on the runoff, air temperature and precipitation data from 1961 to 2015 at the major stations on the upper Jinsha River, the annual and monthly variation characteristics and correlations among temperature, precipitation and runoff were analyzed. The results show a temperature rising trend which is gradually weakening from upstream to downstream. Most of the sudden changes in temperature occurred between 2002 and 2005, and the changes upstream are earlier than those downstream. The annual precipitation shows an increasing trend which is obvious in the upper and lower river sections, and not significant in the middle. The precipitation increase in the upper and middle sections from November to April is greater than that in summer and autumn months, and is significantly increased from March to May. In the lower river section, the precipitation shows a trend of slight increase from March to May, and in the other months there exist no obvious trends of decrease or increase. The sudden change points of precipitation occurred between 1997 and 1999. The trend of change in annual runoff is not obvious. The runoff increases significantly in the upper section from November to April, but not obviously in the remaining months. In the middle section, the increase from November to April is greater than that in summer and autumn, but the increase is not obvious. The runoff in the middle section shows trend of insignificant increase from February to May, and increases or decreases alternately in the other months. The sudden change points of runoff were between 2002~2003. On the upper Jinsha River, the closer the area to the source of the Yangtze River, the closer the relationship between precipitation and temperature. The increase of runoff is caused jointly by rising temperature and the precipitation, and is mainly affected by the change of precipitation in the lower section.

Keywords

Jinsha River Runoff, Air Temperature and Precipitation, Evolution Trends

金沙江上游径流演变趋势及自然驱动力

熊明, 李珏, 陈雅莉

作者简介: 熊明, 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源研究。

摘要

基于金沙江上游干流水文站1961~2015年月径流量与控制面积以上同步气温、降水资料,对年和各月的气温、降水和径流年际变化特征及相关性进行了分析。结果表明:金沙江上游气温呈显著上升趋势,自上而下气温上升幅度逐渐减弱。气温突变点大都位于2002~2005年之间,上游早于下游;年降水量均呈增加趋势,上段和下段增加趋势明显,中间不显著。上中段冬春季11~4月降水增加趋势大于夏秋季,春季3~5月降水量呈显著增加趋势。下段仅春季3~5月呈非显著性增加趋势,其它月份增加和减少趋势互现。降水突变点位于1997~1999年之间;年径流变化趋势均不明显,除上段冬春季11~4月径流显著增大,其余月份径流增大趋势不明显。中段存在冬春季11~4月的增大趋势大于夏秋的现象,但增大趋势不明显。下段除春季2~5月呈不明显增大趋势外,其余各月增大和减小趋势交替出现。径流突变位于2002~2003年之间;金沙江上游愈靠近长江源头降水与气温的关系越密切,其径流量增加系由于气温上升和降水的共同影响,下段主要受降水变化的影响,气温影响可忽略。

关键词

金沙江径流, 气温降水, 演变趋势

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

金沙江上游是连接长江源区和长江干流的重要河段,上起青海省玉树巴塘河下至石鼓,河长 965 km。左岸自北而南是高大的雀儿山、少鲁里山、中甸雪山;右岸对峙着达马拉山、宁静山、芒康山和云岭诸山;流域宽度不大,支流不甚发育,水网结构大致呈树枝状。河段径流受长江源区冰雪融化和流域降水产流的共同影响,受气候变化影响程度大,受人类活动影响较小,是研究径流自然演变规律的极佳场所。

目前,已有许多学者在长江流域开展了有关气温、降水和径流序列变化趋势研究[1]-[6],但大多数研究是将气温、降水和径流作为独立对象[7],少有将各种要素相互关联。因长江源头地区受温度显著上升影响,导致冰川和积雪融水增多,2005年以来长江源径流量快速增加[8] [9] [10],长江源头径流增加对金沙江上游径流的影响如何却缺乏研究。有关金沙江上游气温、降水和径流趋势的研究表明[11] [12] [13] [14] [15],年气温显著升高、降水有增加趋势,而年径流呈非显著增加趋势,然而,研究时间尺度绝大多数采用年尺度,极少研究年内分配规律。同时,现有学者研究针对的是长江源头、金沙江流域甚至长江流域,空间尺度大,难以掌握径流沿程细微变化,无法确认各种因素对径流的影响范围。

本文以金沙江上游为研究区,分别利用单变量 MK 趋势分析、突变检验及相关分析,研究金沙江上段气温、降水和径流的变化趋势,解析金沙江上游降水径流演变的驱动因子,更好地为最严格的水资源管理提供

基础支持。

2. 数据来源和研究方法

2.1. 数据来源

金沙江上游至上而下分布岗拖、巴塘、石鼓三个水文站(见图 1), 均有较完整的径流观测资料, 是本次径流演变分析的基础。

岗拖水文站, 控制集水面积 149,072 km², 距河口距离 4830 km。岗拖水文站 1956 年 6 月设立, 观测项目有水位、流量、水温、岸温、降水量、蒸发量等。该站多年平均年径流量为 170 亿立方米, 多年平均降水量 590.9 mm。

巴塘水文站, 控制集水面积 180,055 km², 距河口距离 4538 km。岗拖水文站 1952 年 12 月设立, 观测项目有水位、流量、悬移质输沙率、水温、降水量等。该站多年平均年径流量为 291.32 亿立方米, 多年平均降水量 449.8 mm。

石鼓水文站, 控制集水面积 214,184 km², 距河口距离 4175 km。岗拖水文站 1939 年 2 月设立, 1953 年 5 月升级为水文站, 观测项目有水位、流量、悬移质输沙率、悬移质颗粒分、降水量、蒸发量、地下水等。该站多年平均年径流量为 435.33 亿立方米, 多年平均降水量 738.9 mm。

气温和降水数据来自于中国气象科学数据共享服务网。岗拖以上流域采用 5 个气象站, 巴塘以上流域采用 7 个气象站, 石鼓以上流域采用 12 个气象站 1961~2015 年逐月平均气温、降水数据, 数据均为剔除缺测值后站点区域平均。为使气温、降水和径流系列一致, 统一采用 1961~2015 年系列进行分析。

2.2. 分析方法

本研究的目的主要是弄清金沙江上段气温、降雨和径流的变化趋势及其相互关系, 采用 *Mann-Kendall* 检验对进行趋势分析。当 *Mann-Kendall* 检验用于分析时间序列变化趋势时, 原假设 H_0 : 时间序列数据 x_1, x_2, \dots, x_n 是 n 个随机独立同分布的样本; 备择假设 H_1 是双边检验: 对于所有的 $k, j \leq n$ 且 $k \neq j$, x_k 和 x_j 的分布是不相同的, 检验的统计变量 S 计算如下式:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

式中: sgn 是符号函数; S 为统计量, 在给定的 α 置信水平上, 如果 $|Z| \geq Z_{\alpha/2}$, 则原假设是不可接受的, 即在 α 置信水平上, 时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计变量 Z 大于 0 时, 是上升趋势, 小于 0 时, 则是下降趋势。

针对趋势突变点, 亦采用 *Mann-Kendall* 法构造一秩序列:

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

在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\operatorname{Var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

将时间序列 x 按逆序排列, 再重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_{k'}$ ($k = 1, 2, \dots, n, k' = n + 1 - k$)。若 UF_k 值大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 小于 0 则表明呈下降趋势, 当它们超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著。如果 UB_k 和 $-UF_k$ 两条曲线出现交点, 且交点在临界直线之间, 交点对应的时刻就是突变开始的时刻。

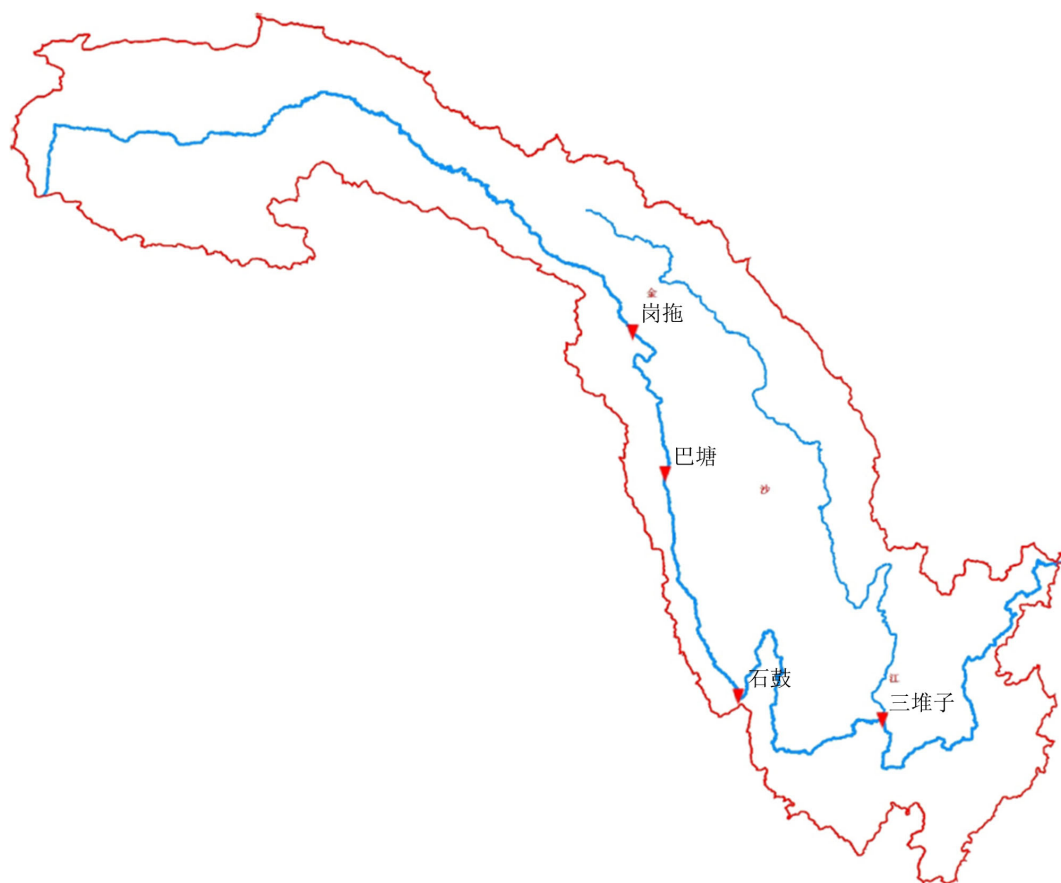


Figure 1. Location of water systems and hydrological stations in the Jinsha River basin
图 1. 金沙江流域水系及水文站位置图

3. 结果分析

3.1. 趋势分析

1) 图 2 表明：岗拖、巴塘、石鼓水文站以上流域年平均气温多年来呈升高趋势，升高幅度自上游至下游递减。其中，岗拖水文站以上流域年平均气温由 1961~1965 年的 -1.67°C ，升高至 2011~2015 年的 -0.05°C ，且各月升高趋势均明显，升高幅度最大的是 1 月，升高幅度达 3.09°C ；巴塘水文站以上流域年平均气温由 1961~1965 年的 2.15°C ，升高至 2011~2015 年的 3.20°C ，除 4 月外各月升高趋势明显，升高幅度最大的是 2 月，升高幅度达 2.36°C ；石鼓水文站以上流域年平均气温由 1961~1965 年的 5.43°C ，升高至 2011~2015 年的 5.91°C ，除 4、5、7、8、10 月外，其它月份升高趋势明显，升高幅度最大的是 3 月，升高幅度达 1.8°C 。

由图 2 的 M-K 趋势检验图可知，岗拖水文站以上流域年平均气温 UF_k 和 UB_k 曲线交点位置在 2002 年附近， UF_k 最终值大于 0 且超过临界直线，可认定上升趋势明显，突变点位于 2002 年；岗拖水文站以上流域 1~12 月平均气温 UF_k 最终值全部大于 0 且超过临界直线，有明显的上升趋势。突变点最早为 1999 年，最晚为 2014 年，大多数月份突变点在 1999~2003 年之间。

巴塘水文站以上流域年平均气温 UF_k 和 UB_k 曲线交点位置在 2004 年附近， UF_k 最终值大于 0 且超过临界直线，可认定上升趋势明显，突变点位于 2004 年；巴塘水文站以上流域 1~12 月平均气温 UF_k 最终值全部大于 0，除 4 月外全部超过临界直线，有明显的上升趋势。突变点最早为 2001 年，最晚为 2007 年，大多数月份突变点在 2002~2006 年之间。

石鼓水文站以上流域年平均气温 UF 和 UB 曲线交点位置在 2005 年附近, UF_k 最终值大于 0 且超过临界直线, 可认定上升趋势明显, 突变点位于 2005 年; 石鼓水文站以上流域 1~12 月平均气温 UF_k 最终值全部大于 0, 其中 4 月、5 月、7 月、8 月、10 月未超过临界直线, 上升趋势不明显, 其它月份有明显的上升趋势。突变点最早为 2002 年, 最晚为 2006 年, 月份突变点以 2002、2005 及 2006 年居多。

综上, 金沙江上游石鼓水文站以上流域年平均气温均上升趋势明显, 升高幅度自上游至下游递减, 突变点位于 2002~2005 年之间, 上游早于下游。从年内气温变化规律看, 各月 Z_{MK} 、 UF_k 值自上游向下游逐渐减小, 上升趋势下游较上游明显减弱, 上升趋势明显的月份由岗拖水文站以上流域的全部 12 个月降低至石鼓水文站以上流域的 7 个月(见表 1)。

2) 图 3 表明: 岗拖、巴塘、石鼓水文站以上流域年降水趋势均呈上升趋势, 岗拖、石鼓水文站以上流域年降水趋势超过给定的置信限, 上升趋势明显, 巴塘水文站以上流域年降水趋势未超过给定的置信限, 呈不明显上升趋势。从年内各月的变化趋势看, 靠近长江源头的岗拖、巴塘水文站以上流域 3 月、4 月、5 月降水 Z_{MK} 均为正, 且超过给定的置信限, 呈明显的增加趋势, 其余月份除岗拖水文站以上流域 8 月为接近 0 的负值外, 均为正值, 故绝大多数月份增加趋势不明显。石鼓水文站以上流域 5 月和 7 月降水 Z_{MK} 超过给定的置信限, 增加趋势明显, 2 月、3 月、6 月、12 月 Z_{MK} 为负, 呈非明显的减少趋势, 其余月份 Z_{MK} 为正, 呈非明显的增加趋势。

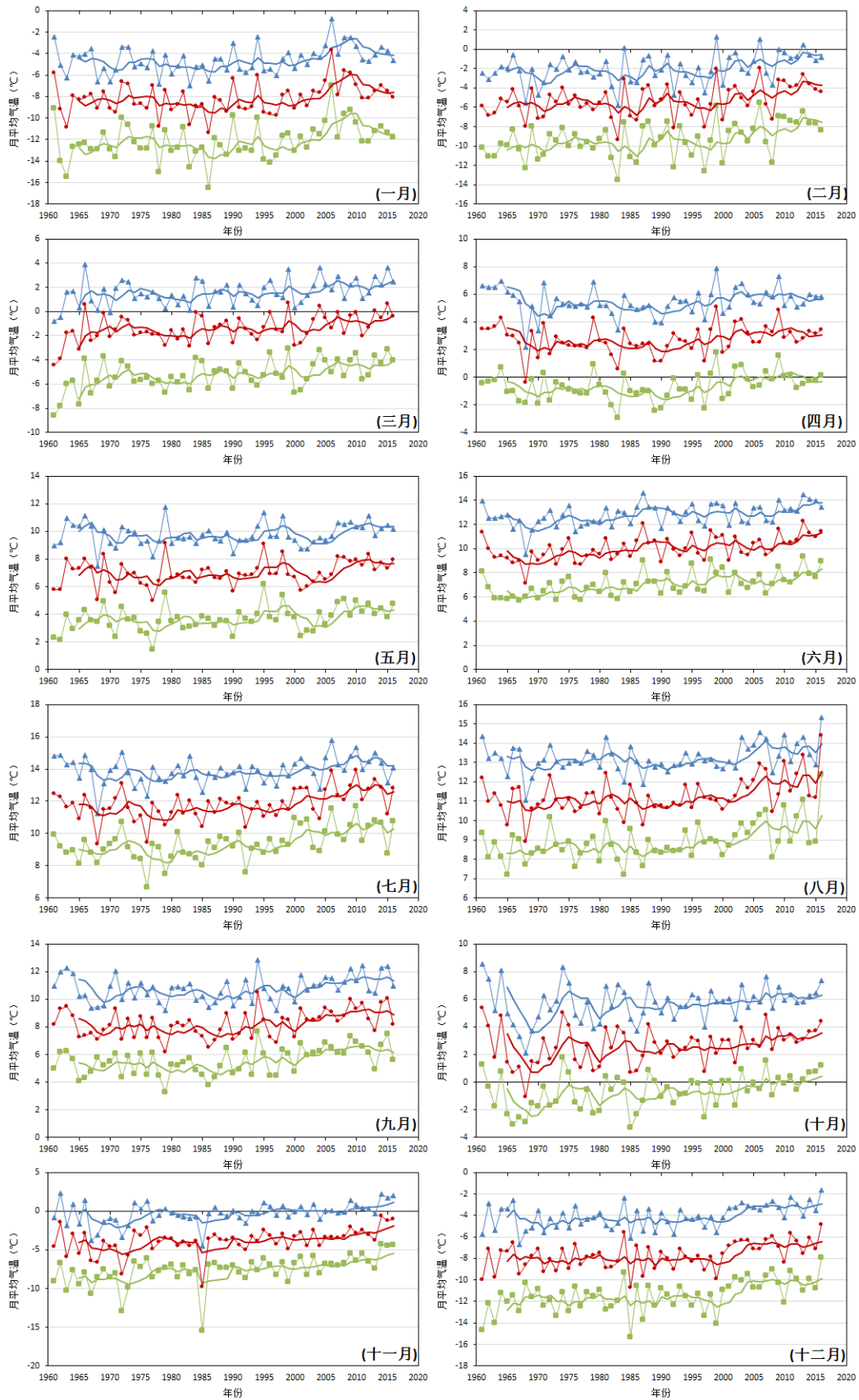
由图 3 的 M-K 趋势检验图可知, 岗拖水文站以上流域年降水 UF 和 UB 曲线交点位置在 1999 年附近, UF_k 最终值大于 0 且超过临界直线, 上升趋势明显; 岗拖水文站以上流域各月降水 UF_k 最终值全部大于 0, 但仅有 3 月、4 月、5 月超过临界直线, 有明显的上升趋势。 UF 和 UB 曲线除有明显上升趋势的 3 月、4 月、5 月以及 11 月有明显交点位置外, 其它月份相互纠缠在一起, 无明显的突变特性。有明显上升趋势的月份突变点在 1988~2009 年之间且交为分散, 各月突变点各不相同。

巴塘水文站以上流域年降水 UF 和 UB 曲线交点位置在 1998 年附近, UF_k 最终值大于 0 但未超过临界直线, 呈不明显上升趋势; 巴塘水文站以上流域各月降水 UF_k 最终值全部大于 0, 亦仅有 3 月、4 月、5 月超过临界直线, 有明显的上升趋势。 UF 和 UB 曲线除有明显上升趋势的 3 月、4 月、5 月以及 11 月有明显交点位置外, 其它月份相互纠缠在一起, 无明显的突变特性。有明显上升趋势的月份突变点在 1988~2004 年之间, 各月突变点各不相同。

Table 1. Test results of average temperature trend of Gangtuo, Batang and Shigu hydrological stations

表 1. 岗拖、巴塘、石鼓水文站以上流域平均气温趋势检验结果

月份	岗拖				巴塘				石鼓			
	Z_{MK}	UF_k	检验结果	突变点	Z_{MK}	UF_k	检验结果	突变点	Z_{MK}	UF_k	检验结果	突变点
1 月	2.40	2.40	显著上升	2002	2.08	2.10	显著上升	2002	2.11	2.12	显著上升	2002
2 月	3.33	3.34	显著上升	2002	2.71	2.71	显著上升	2002	2.44	2.45	显著上升	2002
3 月	3.83	3.82	显著上升	2003	3.38	3.38	显著上升	2002	2.93	2.94	显著上升	2002
4 月	1.94	1.93	显著上升	2002	0.93	0.93	不显著	2007	0.49	0.49	不显著	2006
5 月	3.29	3.29	显著上升	2003	2.14	2.15	显著上升	2005	1.51	1.51	不显著	2005
6 月	4.23	4.24	显著上升	2001	3.91	3.92	显著上升	2005	3.16	3.17	显著上升	2005
7 月	3.58	3.58	显著上升	1999	2.74	2.74	显著上升	2004	1.32	1.33	不显著	2004
8 月	3.46	3.45	显著上升	2002	2.88	2.88	显著上升	2003	1.22	1.23	不显著	2006
9 月	3.30	3.31	显著上升	2000	2.47	2.47	显著上升	2004	1.96	1.96	显著上升	2005
10 月	3.07	3.07	显著上升	2014	2.27	2.28	显著上升	2006	1.77	1.78	不显著	2006
11 月	4.78	4.79	显著上升	2007	3.72	3.73	显著上升	2006	3.47	3.48	显著上升	2004
12 月	4.01	4.01	显著上升	2000	3.54	3.55	显著上升	2001	3.41	3.42	显著上升	2002
年	5.07	5.07	显著上升	2002	5.33	5.33	显著上升	2004	4.15	4.16	显著上升	2005



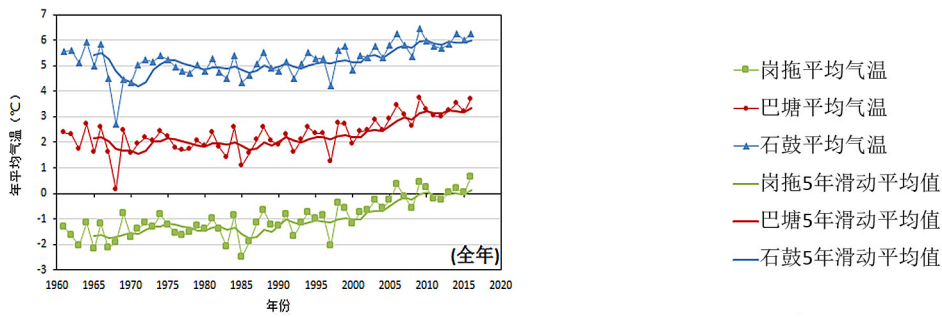
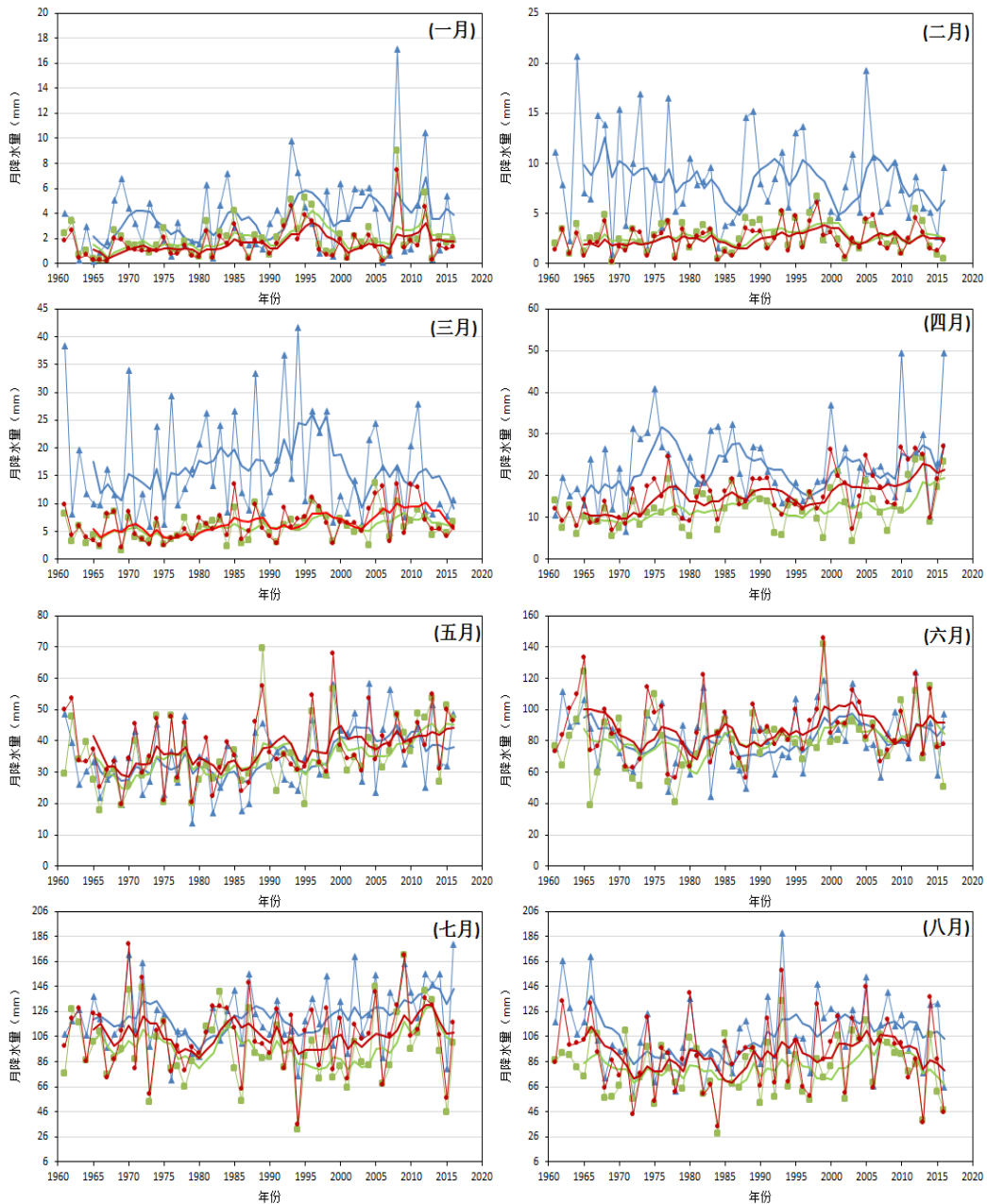


Figure 2. Trend of average temperature in the basin above Gangtuo, Batang and Shigu hydrological stations
图 2. 岗拖、巴塘、石鼓水文站以上流域平均气温趋势图



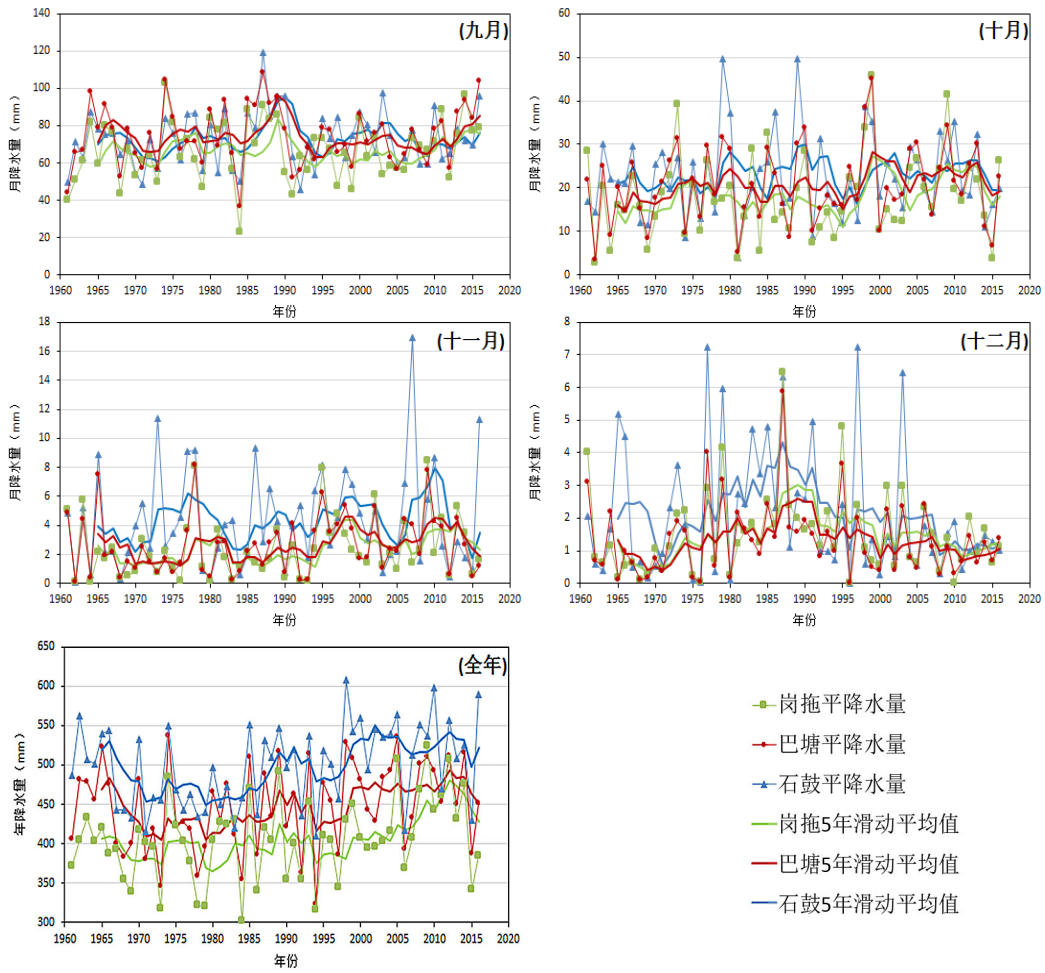
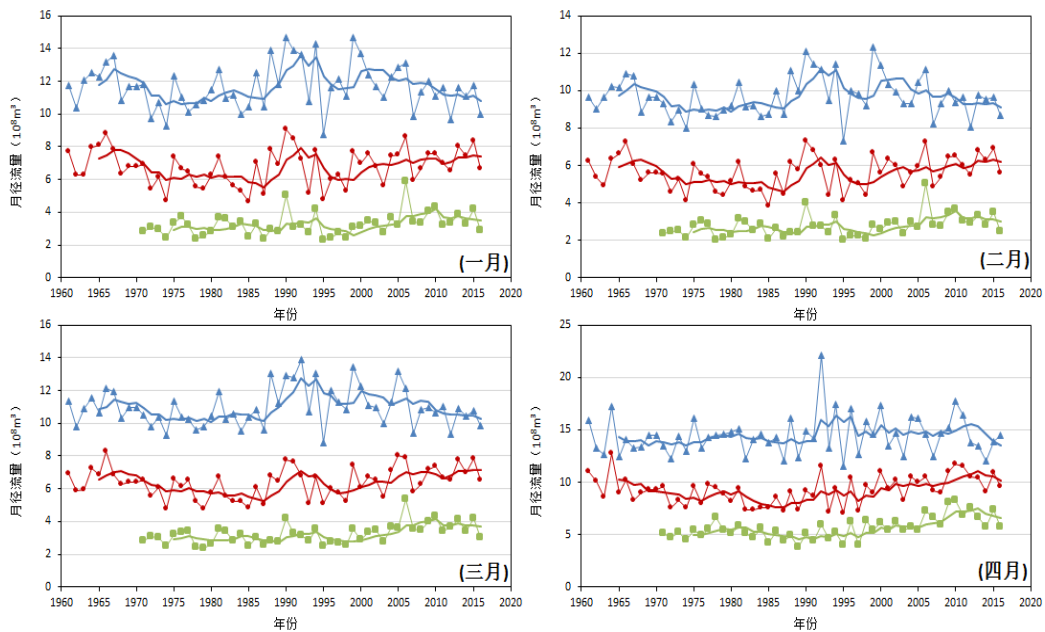


Figure 3. Precipitation trend in the basin above Gangtuo, Batang and Shigu hydrological stations

图 3. 岗拖、巴塘、石鼓水文站以上流域降水趋势图



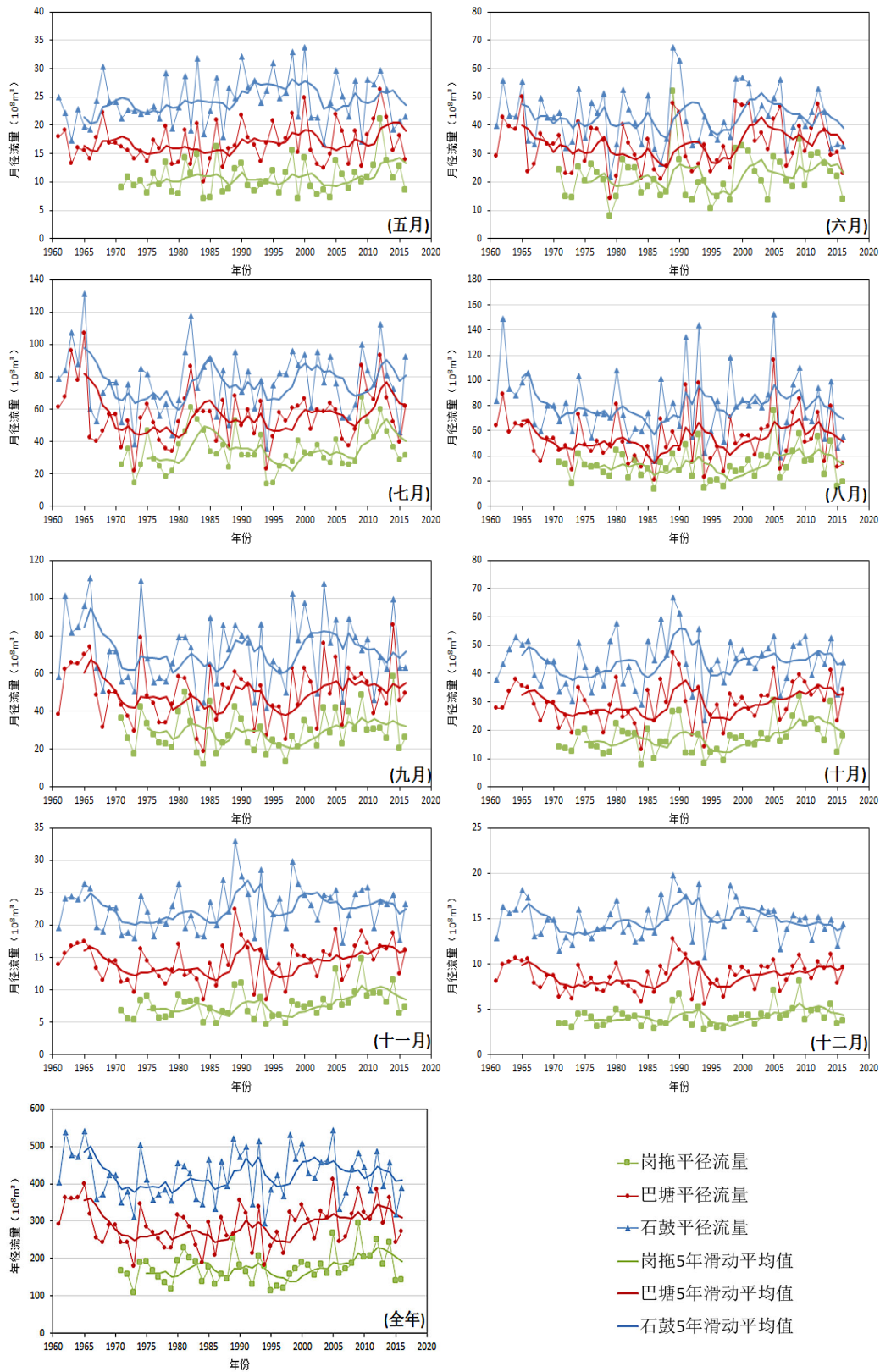


Figure 4. Runoff trend of Gangtuo, Batang and Shigu hydrological stations

图 4. 岗拖、巴塘、石鼓水文站径流趋势图

Table 2. Test results of precipitation trend of Gangtuo, Batang and Shigu hydrological stations
表 2. 岗拖、巴塘、石鼓水文站以上流域年降水趋势检验结果

月份	岗拖				巴塘				石鼓			
	Z_{MK}	UF_k	检验结果	突变点	Z_{MK}	UF_k	检验结果	突变点	Z_{MK}	UF_k	检验结果	突变点
1月	1.18	1.14	不显著	-	1.28	1.27	不显著	-	0.87	0.88	不显著	-
2月	0.23	0.23	不显著	-	0.86	0.85	不显著	-	-1.01	-1.00	不显著	-
3月	1.98	1.96	显著上升	1988	2.19	2.19	显著上升	1988	-0.28	-0.27	不显著	-
4月	2.56	2.53	显著上升	2009	4.00	4.00	显著上升	1985	1.01	1.02	不显著	-
5月	3.10	3.11	显著上升	2003	2.10	2.10	显著上升	2004	2.23	2.23	显著上升	1994
6月	0.65	0.65	不显著	-	0.65	0.65	不显著	-	-0.11	-0.10	不显著	-
7月	0.01	0.01	不显著	-	0.54	0.55	不显著	-	2.01	2.02	显著上升	2008
8月	-0.04	-0.03	不显著	-	0.08	0.08	不显著	-	0.90	0.90	不显著	1998
9月	1.27	1.27	不显著	-	0.57	0.58	不显著	-	0.83	0.83	不显著	-
10月	1.25	1.26	不显著	-	1.35	1.36	不显著	-	0.37	0.38	不显著	-
11月	1.56	1.55	不显著	1993	1.66	1.64	不显著	1993	0.78	0.77	不显著	-
12月	0.58	0.55	不显著	-	0.01	-0.01	不显著	-	-0.42	-0.40	不显著	-
年	2.18	2.19	显著上升	1999	1.83	1.84	不显著	1998	2.21	2.22	显著上升	1997

石鼓水文站以上流域年降水 UF 和 UB 曲线交点位置在 1997 年附近, UF_k 最终值大于 0 且超过临界直线, 上升趋势明显; 石鼓水文站以上流域各月降水 UF_k 最终值有 8 个月份大于 0, 仅有 5 月和 7 月超过临界直线, 有明显的上升趋势。 UF 和 UB 曲线除有明显上升趋势的 5 月和 7 月交叉为 1994、2008 年外, 其它月份相互纠缠在一起, 无明显的突变特性。

综上, 金沙江上游石鼓水文站以上流域年降水量均呈上升趋势, 靠近长江源的岗拖水文站和最下游的石鼓水文站以上流域年降水量上升趋势明显, 位于中段的巴塘水文站以上流域年降水却呈不明显上升趋势。从年内分配看, 靠近长江源的岗拖、巴塘水文站以上流域 3、4、5 月降水量上升趋势明显, 突变点在 1988~2009 年之间且交为分散, 无明显规律; 最下游的石鼓水文站以上流域有 8 个月份呈上升趋势, 但仅有 5 月和 7 月超过临界值上升趋势明显, 突变分别出现在 1994、2008 年(见表 2)。

3) 图 4 表明: 岗拖、巴塘水文站年径流呈现不明显上升趋势, 设定 M-K 检验的显著性水平为 0.05, 尽管岗拖、巴塘水文站计算的年径流 Z_{MK} 为正, 但全部位于给定的置信区间内, 上升趋势不明显。石鼓水文站年径流 Z_{MK} 接近 0, 无上升或下降趋势。其中, 岗拖水文站各月径流 Z_{MK} 均为正, 1 月、2 月、3 月、4 月和 11 月上升趋势明显, 2011~2015 年较 1971~1975 年径流量增加幅度分别为 0.69、0.65、0.86、1.82、1.99, 其余全部呈不明显上升趋势; 巴塘水文站除 8 月径流 Z_{MK} 为负外, 其余月份 Z_{MK} 均为正, 上升趋势不明显; 石鼓水文站各月 Z_{MK} 正负交替, 且均处于给定的置信区间内, 年月径流变化趋势不明显。

由图 4 的 M-K 趋势检验图可知, 岗拖水文站年径流 UF 和 UB 曲线交点位置在 2004 年附近, UF_k 最终值大于 0 但未超过临界直线, 有不明上升趋势; 岗拖水文站 1~12 月径流 UF_k 最终值全部大于 0, 但仅有 1 月、2 月、3 月、4 月、11 月超过临界直线, 有明显的上升趋势。 UF 和 UB 曲线交点位置最早为 2002 年, 最晚为 2008 年, 有明显上升趋势的月份突变点均在 2002、2003 年, 其它月份交点位置偏后且较为散乱。

Table 3. Test results of runoff trend of Gangtuo, Batang and Shigu hydrological stations
表 3. 岗拖、巴塘、石鼓水文站径流趋势检验结果

月份	岗拖				巴塘				石鼓			
	Z_{MK}	UF_k	检验结果	突变点	Z_{MK}	UF_k	检验结果	突变点	Z_{MK}	UF_k	检验结果	突变点
1 月	2.35	2.26	显著上升	2003	0.83	0.79	不显著	2012	-0.01	-0.07	不显著	-
2 月	2.71	2.66	显著上升	2003	1.22	1.12	不显著	2012	0.37	0.30	不显著	-
3 月	3.51	3.46	显著上升	2002	1.58	1.48	不显著	2012	0.34	0.30	不显著	-
4 月	3.98	3.93	显著上升	2003	1.77	1.71	不显著	2007	1.31	1.27	不显著	-
5 月	1.07	1.05	不显著	2008	0.70	0.69	不显著	2009	1.03	1.00	不显著	-
6 月	1.05	1.05	不显著	2004	0.32	0.30	不显著	-	-0.22	-0.30	不显著	-
7 月	1.06	1.03	不显著	-	0.81	0.78	不显著	-	0.43	0.40	不显著	-
8 月	0.40	0.39	不显著	-	-0.37	-0.38	不显著	-	-0.86	-0.88	不显著	-
9 月	0.62	0.60	不显著	2003	0.16	0.13	不显著	-	-0.13	-0.17	不显著	-
10 月	1.95	1.96	不显著	-	1.22	1.17	不显著	-	0.77	0.69	不显著	-
11 月	2.42	2.41	显著上升	2003	1.31	1.29	不显著	-	0.91	0.88	不显著	-
12 月	1.69	1.64	不显著	2002	0.78	0.74	不显著	-	0	-0.03	不显著	-
年	1.66	1.68	不显著	2004	0.70	0.69	不显著	-	0.08	0.08	不显著	-

巴塘水文站年径流 UF 和 UB 曲线纠缠在一起多次相交, UF_k 最终值大于 0 且未超过临界直线, 上升趋势不明显, 亦无明显的突变点; 巴塘水文站 1~12 月径流 UF_k 最终值除 8 月外均全部大于 0 且全部未超过临界直线, 上升趋势不明显。巴塘水文站 1~5 月 UF 和 UB 曲线相交在 2007~2012 年之间, 多数位于 2012 年, 其余月份 UF 和 UB 曲线相互纠缠, 无明显的突变点。

石鼓水文站年月径流 UF 和 UB 曲线交点位置相互纠缠, UF_k 最终值正负相间, 无明显趋势, 亦无明显的突变点。

综上, 各水文站年径流变化趋势均不明显, 但从各月径流看, 上游岗拖水文站冬春季 11~4 月大部分月份径流显著增大, 其余月份径流增大趋势不明显; 巴塘水文站除 8 月外均呈不明显增大趋势, 但仍存在冬春季 11~4 月的增大趋势大于夏秋的现象; 石鼓水文站则除春季 2~5 月呈不明显增大趋势外, 其余各月径流变化增大和减小趋势交替出现(见表 3)。

3.2. 驱动分析

3.2.1. 气温与降水相关分析

由图 5 可知, 岗拖、巴塘、石鼓水文站以上流域的气温与降水呈对数相关关系, 相关系数分别为 0.8157、0.8422、0.7535。当气温升高时, 降水量随之增高, 气温越高, 降水随气温变化速度越快, 且有相对明显的拐点。当岗拖、巴塘、石鼓水文站以上流域气温分别小于 0°C 、 3°C 、 5°C 时, 降水量随气温变化较慢, 气温大于 0°C 、 3°C 、 5°C 时, 降水量随气温变化较快。

岗拖、巴塘水文站以上流域因距长江源头较近, 受气温显著上升影响, 各月降水量均是呈增加趋势, 冬春季 11~4 月降水增加趋势大于夏秋季, 特别是春季 3、4、5 月降水量的还呈显著增加趋势。可见, 愈靠近长江源头降水与气温的关系越密切, 且因 3、4、5 月位于拐点附近, 随气温上升冰雪融化导致蒸发量增加, 在长江源头重复凝结引起了降水量增加。石鼓水文站以上流域因距长江源头较远, 受气温影响作用下降, 年降水量增加不明显, 仅春季 3~5 月呈非显著性增加趋势。

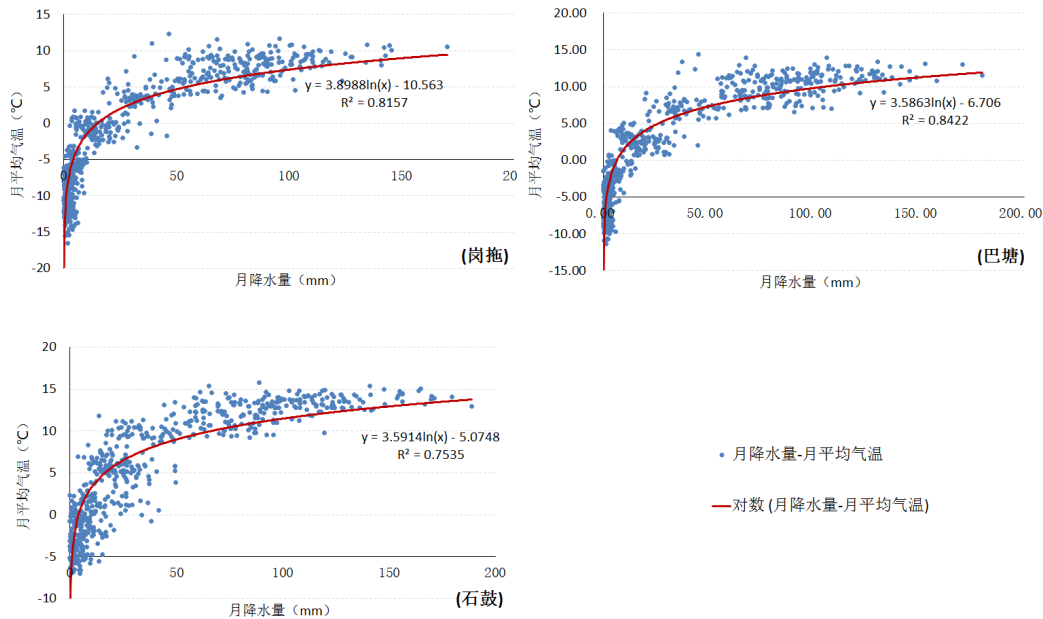


Figure 5. Correlation between temperature and precipitation in basin above hydrological stations on the upper Jinsha River

图 5. 金沙江上游水文站以上流域气温降水相关图

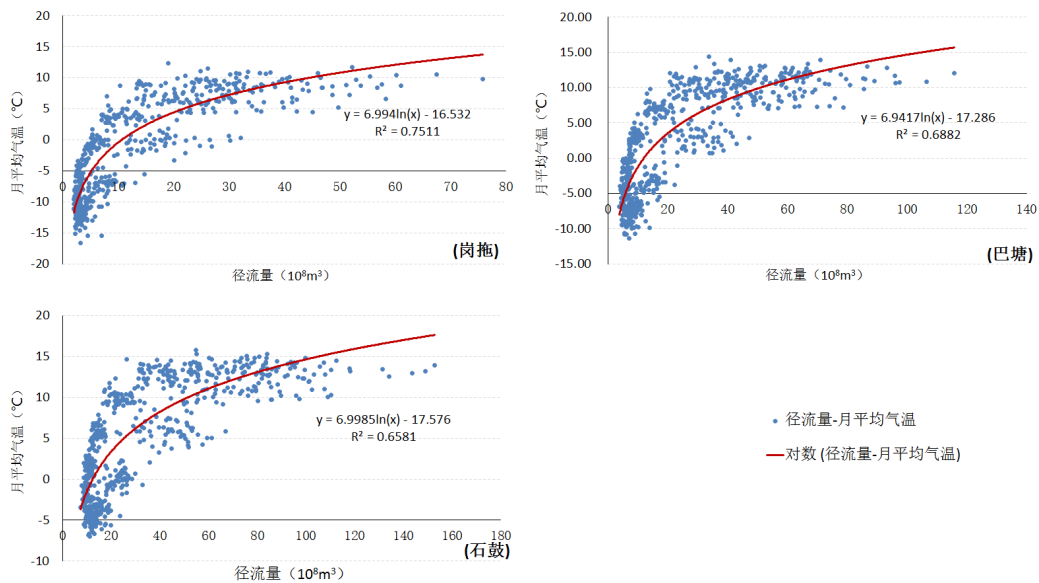


Figure 6. Correlation between temperature and Runoff in basin above hydrological stations on the upper Jinsha River

图 6. 金沙江上游水文站以上流域气温径流相关图

3.2.2. 气温与径流相关分析

由图 6 可知，岗拖、巴塘、石鼓水文站以上流域的气温与径流呈对数相关关系，相关系数分别为 0.7511、0.6822、0.6581。当气温升高时，径流量会随之增高，气温越高，径流量随气温变化速度越快。

可以推测，越靠近长江源头河道径流受气温升高影响越大，这主要由于长江源头受冰雪融化所致。11~5 月的冬春季，靠近长江源头的岗拖水文站受温度显著上升的影响，冰雪融化导致的径流量显著增加，其它月份受温度上升的影响，径流呈不显著上升趋势；巴塘水文站受温度显著上升影响，径流量增加尽管仍呈上升趋势，已不十

分明显,但 11~5 月的冬春季仍然较夏秋季明显;石鼓水文站 3~5 月的春季受长江源头温度显著上升导致的冰雪融化影响,径流量呈不显著的上升趋势,其它月份受降水的干扰,径流量上升或下降趋势相间,且均不明显。

3.2.3. 降水与径流相关分析

由图 7 可知,岗拖、巴塘、石鼓的降水与径流呈线性相关关系,相关系数分别为 0.7458、0.7555、0.7333,相关性较好。可见降水量越高,则径流量越高,金沙江上游的降水量变化是导致径流量变化的主要原因。

金沙江上游径流变化与降水变化的关系更密切,基本上呈线性相关,强于与气温的对数相关关系。靠近长江源头的岗拖、巴塘水文站径流量增加较多的冬春季 11~4 月,主要受降水和气温(冰雪融化)的共同影响,其余月份气温影响逐渐减弱。石鼓水文站则主要受降水变化的影响,气温影响已可忽略。

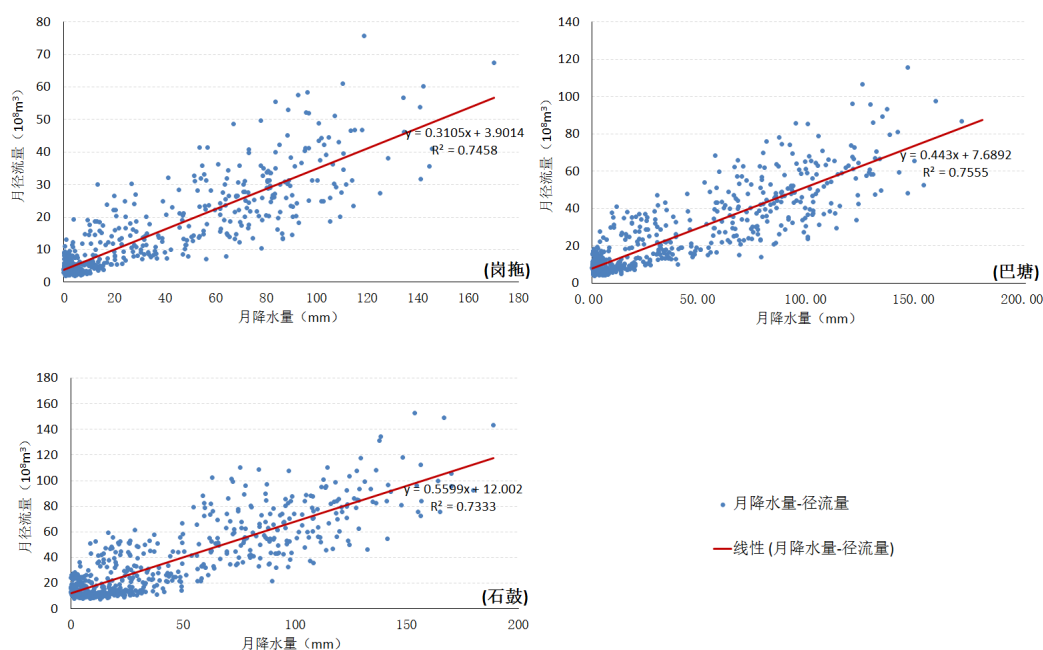


Figure 7. Correlation between precipitation and runoff in basin above hydrological stations on the upper Jinsha River

图 7. 金沙江上游水文站以上流域降水径流相关图

4. 结论

通过对 20 世纪 60 年代以来的金沙江上游气温、降水量和径流量变化趋势进行分析,得到以下结论:

1) 金沙江上游气温上升趋势明显,自上而下上升幅度逐渐减弱,出现明显上升的月份逐渐减少;气温突变点大都位于 2002~2005 年之间,上游早于下游。

2) 金沙江上游年降水均呈增加趋势,上段和下段增加趋势明显,中间呈不显著的增加趋势。上段的冬春季 11~4 月降水增加趋势大于夏秋季,特别是春季 3、4、5 月降水量还呈显著增加趋势。下段仅春季 3~5 月呈非显著性增加趋势,其它月份增加和减少趋势互现。降水突变点位于 1997~1999 年之间。

3) 金沙江上游年径流变化趋势均不明显。从各月径流看,上段冬春季 11~4 月径流显著增大,其余月份径流增大趋势不明显;中段仍存在冬春季 11~4 月的增大趋势大于夏秋的现象;下段径流除春季 2~5 月呈不明显增大趋势外,其余各月增大和减小趋势交替出现。径流突变位于 2002~2003 年之间。

4) 金沙江上游愈靠近长江源头,降水与气温的关系越密切,其降水量增加系由于气温上升引起的冰雪融化导致增加蒸发量的重复凝结;下段受气温影响作用下降,降水量增加不明显。上段径流变化主要受降水和气温(冰

雪融化)的共同影响, 下段主要受降水变化的影响, 气温影响已可忽略。

基金项目

国家重点研发计划(2016YFC0402301)。

参考文献

- [1] 杨焯, 陆桂华, 等. 金沙江上游流域水文循环要素变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(3): 8-10.
YANG Ye, LU Guihua, et al. Variation characteristics analysis of hydrological cycle factors in upper reaches of Jinshajiang Basin. *Water Resources and Power*, 2012, 30(3): 8-10. (in Chinese)
- [2] 冯亚文, 任国玉. 长江上游降水变化及其对径流的影响[J]. 资源科学, 2013, 35(6): 1267-1276.
FENG Yawen, REN Guoyu. Rainfall and runoff trends in the upper Yangtze River. *Resources Science*, 2013, 35(6): 1267-1276. (in Chinese)
- [3] 曾小凡, 翟建青, 等. 长江流域年降水量的空间特征和演变规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 727-732.
ZENG Xiaofan, ZHAI Jianqing, et al. Spatial characteristics and evolutionary trends of annual precipitation in the Yangtze River basin. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2008, 36(6): 727-732. (in Chinese)
- [4] 孙甲岚, 雷晓辉, 等. 长江流域上游气温、降水及径流变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 1-4.
SUN Jialan, LEI Xiaohui, et al. Variation trend analysis of meteorological variables and runoff in upper reaches of Yangtze River. *Water Resources and Power*, 2012, 30(5): 1-4. (in Chinese)
- [5] 王艳君, 姜彤, 等. 长江上游流域 1961-2000 年气候及径流变化趋势[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 709-714.
WANG Yanjun, JIANG Tong, et al. Changing trends of climate and runoff over the upper reaches of the Yangtze River in 1961-2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(5): 709-714. (in Chinese)
- [6] 陈珩, 王保栋, 等. 气候变化及人类活动对长江入海径流的影响[J]. 人民长江, 2018, 49(16): 36-40.
CHEN Kan, WANG Baodong, et al. Impact of climate change and human activities on runoff variation of Yangtze River into sea. *Yangtze River*, 2018, 49(16): 36-40. (in Chinese)
- [7] 郑杰元. 气候变化影响下区域水文要素变化研究[D]. 硕士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2011.
ZHENG Jieyuan. Research of variations of regional hydrologic and meteorologic elements on global climate change. Master's Thesis. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] 齐冬梅, 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): 1076-1086.
QI Dongmei, 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)
- [9] 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)
- [10] 梁川, 侯小波, 等. 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, et al. 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)
- [11] 徐长江, 范可旭, 等. 金沙江流域径流特征及变化趋势分析[J]. 人民长江, 2011, 41(7): 10-14.
XU Changjiang, FAN Kexu, et al. Runoff characteristics and variation tendency of Jinsha River Basin. *Yangtze River*, 2011, 41(7): 10-14. (in Chinese)
- [12] 卢璐, 王琼, 等. 金沙江流域近 60 年气候变化趋势及径流响应关系[J]. 华北水利水电大学学报, 2016, 37(5): 16-21.
LU Lu, WANG Qiong, et al. Trend of climate change over the recent 60 years and its hydrological responses for Jinsha River Basin. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2016, 37(5): 16-21. (in Chinese)
- [13] 陈媛, 王顺久, 等. 金沙江流域径流变化特性分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(2): 26-30.
CHEN Yuan, WANG Shunji, et al. Runoff variation characteristics analysis on Jinsha River. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2010, 30(2): 26-30. (in Chinese)
- [14] 奚园园, 黄晓荣. 金沙江流域降水量变化特征分析[J]. 人民长江, 2017, 48(23): 50-55.
XI Yuanyuan, HUANG Xiaorong. Variation trend analysis on debris flow scale in Zhamunong Gully. *Yangtze River*, 2017, 48(23): 50-55. (in Chinese)
- [15] 张海荣, 周建中, 等. 金沙江流域降水和径流时空演变的非一致性分析[J]. 水文, 2015, 35(6): 90-96.
ZHANG Hairong, ZHOU Jiangzhong, et al. Inconsistency analysis of spatial and temporal evolution of precipitation and runoff in Jinshajiang River Basin. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(6): 90-96. (in Chinese)