

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221672

岷江上游近 59 年径流变化及归因识别

陈 前^{a,b}, 雷孝章^{a,b}, 张崟崟^{a,b}

(四川大学 a. 水利水电学院; b. 水力学与山区河流保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 为高效利用岷江上游流域的水资源, 基于 1960~2018 年流域水文气象资料, 采用多种统计学理论分析径流的趋势、周期和突变点, 应用基于 Budyko 理论的弹性系数法(Choudhury-Yang 公式)和累积量斜率变化率比较法(SCRCQ 法)对径流变化进行归因分析。结果表明, 径流以 12.5 mm/10a 的速率呈显著减少趋势, 并在 1993 年发生突变。径流变化存在 3、8、12、18 年的主周期, 其年内分配不均, 主要集中于夏秋两季, 占比 73.6%。降雨对径流变化最为敏感, 下垫面参数次之, 潜在蒸散发最不敏感。Choudhury-Yang 公式和 SCRCQ 法计算出气候变化对径流减少的贡献率分别达到 58.13%、63.29%, 表明气候变化是研究区径流减少的主要因素, 而人类活动对径流减少的贡献亦不容低估, 贡献率分别达到 41.87%、36.71%。

关键词: 岷江上游; 径流演变; Budyko 理论; 归因分析

中图分类号: TV121; P339

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0010-04

划提供参考。

1 概况

岷江作为长江上游最重要的支流之一, 其上游位于青藏高原东缘的高山峡谷地带, 处于青藏高原边缘和成都平原的接壤处, 包括四川省阿坝藏族羌族自治州的松潘县、黑水县、茂县、理县和汶川县五个县^[1]。岷江上游水系众多, 水能资源丰富, 蕴藏量达 800×10^4 kW, 干流全长 334 km, 流域总面积约 2.28×10^4 km², 是“天府之国”的重要生态屏障。随着岷江上游干流径流量持续减少, 城市发展需要和灌溉区供水面积增大, 水资源供给问题日益紧迫, 岷江上游已成为长江上游水土流失最严重的地区之一。目前, 关于岷江上游径流归因的研究相对较少, 且主要集中在径流演变特征及不同情境下径流模拟等方面, 如梁淑琪等^[1]发现 1937~2018 年岷江上游径流年内分配呈均匀向不均匀转变特征; 梁小军等^[2]运用 SWAT 模型很好地模拟了岷江上游径流变化。因此, 本文基于研究区 1960~2018 年气象水文资料, 在对径流演变特征研究的基础上, 采用 Choudhury-Yang 公式及 SCRCQ 法对径流变化归因, 旨在为岷江上游流域水资源合理开发与规

2 研究资料与方法

2.1 数据资料

数据资料包括 1960~2018 年岷江上游控制站—紫坪铺水文站的径流资料和流域内及周边气象站点(松潘、黑水、茂县、汶川、理县、都江堰)的逐日气象资料, 径流资料来源于成都市水文局, 气象资料来源于四川省气象局, 水文站点和气象站点分布见图 1。采用联合国粮农组织(FAO)的

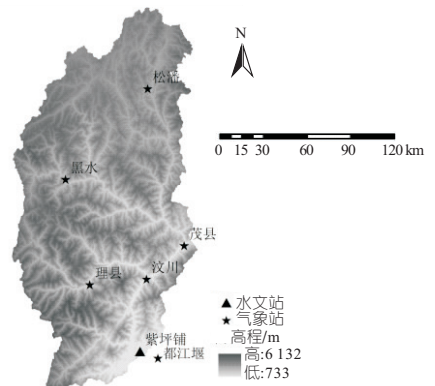


图 1 流域水文和气象站点分布

Fig. 1 Distribution of hydrological and meteorological stations

收稿日期: 2022-08-13, **修回日期:** 2022-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772321); 四川省科技计划项目(2020YFN0011)

作者简介: 陈前(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水土保持, E-mail: 245143067@qq.com

通讯作者: 雷孝章(1965-), 男, 教授、硕导, 研究方向为水土保持, E-mail: 314129368@qq.com

ET₀ Calculator 软件计算站点的潜在蒸散发,基于反距离加权法(IDW)算出流域平均潜在蒸散发,基于泰森多边形计算流域面雨量。

2.2 径流演变特征分析

采用 MK 趋势分析法、Spearman 法和 R/S 分析法对水文气象序列进行趋势检验,采用累计距平法和 Pettitt 检验方法进行突变分析,同时应用 Morlet 小波分析法研究径流周期性变化。

2.3 径流归因方法

2.3.1 弹性系数法

弹性系数法中 Choudhury-Yang 公式^[3,4]是在 Budyko 理论^[5]的基础上,采用量纲分析和数学推理方法推导而来,其表达式为:

$$E = PE_0 / (P^n + E_0^n)^{1/n} \quad (1)$$

式中, P 、 E 、 E_0 、 n 分别为流域降雨量、蒸发量、潜在蒸散发和下垫面参数。

将式(1)代入水量平衡方程 $R = P - E$, 得出新的水量平衡方程为:

$$R = P - PE_0 / (P^n + E_0^n)^{1/n} \quad (2)$$

假定式(2)中各因子是相互独立的,则可写成全微分形式:

$$dR = \frac{\partial f}{\partial P} dP + \frac{\partial f}{\partial E_0} dE_0 + \frac{\partial f}{\partial n} dn \quad (3)$$

Schaake 将弹性系数 ϵ 定义为单位影响因素的变化引起的流域径流量的变化程度,其表达式为:

$$\epsilon_x = (dR/R) / (dx/x) \quad (4)$$

式中, x 为水文气象因素 P 、 n 、 E_0 中的任意一个。

将式(3)除以径流深 R 可得:

$$\frac{dR}{R} = \epsilon_P \frac{dP}{P} + \epsilon_{E_0} \frac{dE_0}{E_0} + \epsilon_n \frac{dn}{n} \quad (5)$$

令 $\varphi = E_0/P$, 再根据式(4),各弹性系数表达式可表示为:

$$\epsilon_P = \frac{1 - \left[\frac{\varphi^n}{1 + \varphi^n} \right]^{1/n+1}}{1 - \left[\frac{\varphi^n}{1 + \varphi^n} \right]^{1/n}} \quad (6)$$

$$\epsilon_{E_0} = \frac{1}{1 + \varphi^n} \frac{1}{1 - \left[(1 + \varphi^n) / \varphi^n \right]^{1/n}} \quad (7)$$

$$\epsilon_n = \frac{A - B}{\left[1 + (P/E_0)^n \right]^{1/n} - 1} \quad (8)$$

$$A = (P^n \ln P + E_0^n \ln E_0) / (P^n + E_0^n) \quad (9)$$

$$B = \frac{1}{n} \ln (P^n + E_0^n) \quad (10)$$

由 Choudhury-Yang 公式求得径流总变化量为:

$$\Delta R = \Delta R_P + \Delta R_{E_0} + \Delta R_n \quad (11)$$

式中, ΔR 为水热耦合平衡方程求得的径流总变化量; ΔR_P 、 ΔR_{E_0} 、 ΔR_n 分别为降雨、潜在蒸散发

和下垫面参数引起的径流变化量。

根据弹性系数 ϵ_P 、 ϵ_{E_0} 、 ϵ_n , 可分别求得 ΔR_P 、 ΔR_{E_0} 、 ΔR_n , 计算公式分别为:

$$\Delta R_P = \epsilon_P R \Delta P / P \quad (12)$$

$$\Delta R_{E_0} = \epsilon_{E_0} R \Delta E_0 / E_0 \quad (13)$$

$$\Delta R_n = \epsilon_n R \Delta n / n \quad (14)$$

式中, ΔP 、 ΔE_0 、 Δn 分别为降雨、潜在蒸散发、下垫面参数在径流突变前后两个时间段的变化量。

根据各水文气象要素的变化量,结合径流总变化量,可求出各因素对径流变化的贡献率:

$$\eta_x = (\Delta x / \Delta R) \times 100\% \quad (15)$$

2.3.2 累积量斜率变化率比较法

累积量斜率变化率比较法^[6]的原理是将各驱动因子(如降雨、潜在蒸发等)累积量——年份的斜率变化率与累积径流深——年份的斜率变化率的比值用于计算各因子对径流深变化的贡献率。

将降雨和潜在蒸散发作为气候变化影响径流变化的驱动因素,则降雨、潜在蒸散发对径流变化的贡献率 C_P 、 C_{E_0} 表示为:

$$C_P = (S_P / S_R) \times 100\% \quad (16)$$

$$C_{E_0} = (S_{E_0} / S_R) \times 100\% \quad (17)$$

人类活动对径流变化贡献率为:

$$C_H = 1 - C_P - C_{E_0} \quad (18)$$

式中, S_P 、 S_R 、 S_{E_0} 分别为降雨、径流及潜在蒸散发的斜率变化率。

3 结果分析

3.1 水文气象要素趋势分析

岷江上游的水文气象要素年际变化见图 2。由图 2 可知,岷江上游的降雨量 P 、潜在蒸散发 E_0 和径流深 R 总体均呈减少趋势,其减少趋势分别为 8.0、2.7、12.5 mm/10a。运用 MK 趋势分析法和 Spearman 法对水文气象序列进行变化趋势显著性检验,并采用 R/S 分析法求得 Hurst 指数,进一步判断序列在未来变化的持续性,结果见表 1。在置信水平 $\alpha = 0.05$ 条件下, MK 趋势分析法和 Spearman 分析法的统计量临界值分别为 1.96、2.01。由表 1 可知,降雨、潜在蒸散发、径流深的 MK 趋势分析法的统计结果分别为 -1.05、-1.45、-2.64, Spearman 分析法的结果分别为 -1.05、-1.07、-2.58,两种方法都只有径流序列的统计量的绝对值超过了检验临界值,说明径流深下降趋势明显,降雨和潜在蒸散发下降趋势不明显,这与赵璐等^[7]研究结果一致。由 R/S 分析法的原理可知,当 Hurst 指数大于

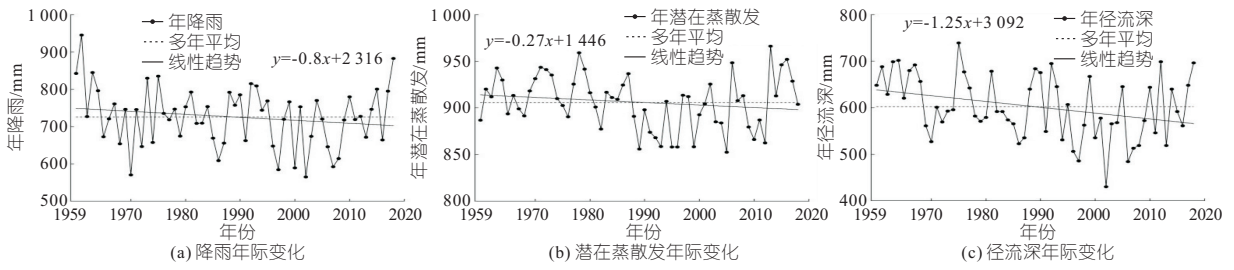


图2 水文气象要素年际变化

Fig. 2 Interannual variation of hydrometeorological elements

表1 水文气象序列趋势检验结果

Tab. 1 Results of trend test of hydrometeorological series

水文气象要素	MK 趋势分析法	Spearman 法	显著性	Hurst 指数
降雨	-1.05	-1.05	不显著	0.67
潜在蒸散发	-1.45	-1.07	不显著	0.88
径流深	-2.64	-2.58	显著	0.74

0.5 时,其序列变化总趋势与过去相同,越接近 1,持续性越强,降雨、潜在蒸散发及径流深的 Hurst 指数分别为 0.67、0.88、0.74,说明三者的减少趋势在未来将持续下去,其中潜在蒸散发在未来减少的趋势可能性最大。

3.2 水文气象要素突变分析

水文气象要素突变检验结果见图 3,根据累积距平法的结果,降雨量、潜在蒸散发、径流深分别在 1995、1987、1993 年达到顶点,是可能发生突变的年份。降雨量在 1960~1995 年上下波动,随后开始下降,其余两者皆大体在 1960 年开始上升,到达顶点后开始逐年下降。为进一步确定突变年份,采用 Pettitt 检验法分别对水文气象要素进行检验,结果表明三者的突变年份与累积距平法结果一致,但降雨的统计量检验结果为 0.51,大于显著水平 0.05,突变不显著,潜在蒸散发和

径流深的统计量分别为 0.031、0.038,突变显著。与突变前时段相比,突变后的降雨量、潜在蒸散发、径流深分别减少了 38.45(2.33%)、21.34(5.19%)、51.01 mm(8.18%)。

3.3 径流年内变化及周期分析

表 2 为岷江上游径流年内分配统计。由表 2 可知,各月径流分配极不均匀,呈“不对称双峰型”分布,其中 7 月径流占比最大,为 16.5%,2 月的径流占比最小,仅 2.4%,月径流量极值比为 6.88。汛期的径流量占全年径流 78.6%,连续 4 个月最大径流量出现在 6~9 月,约占全年径流量的 57.9%。四季中夏季径流占比最高(44.7%),秋季次之(29.1%),春季较少(17.4%),冬季最少(8.8%)。

表 2 岷江上游径流年内分配

Tab. 2 Annual distribution of runoff in the upper reaches of Minjiang River

指 标	春季			夏季			秋季			冬季			汛期(5~10月)
	3月	4月	5月	3月	4月	5月	3月	4月	5月	3月	4月	5月	
占比/%	2.6	4.6	10.5	16.0	16.5	12.4	13.0	10.2	5.5	3.6	2.7	2.4	78.6

岷江上游年径流序列的小波方差图见图 4。由图 4 可知,径流序列存在 3、8、12、18 年的主周期。其中,18 年尺度对应第一峰值,表明 18 年左右的周期振荡最强,为径流变化的第一主周期。

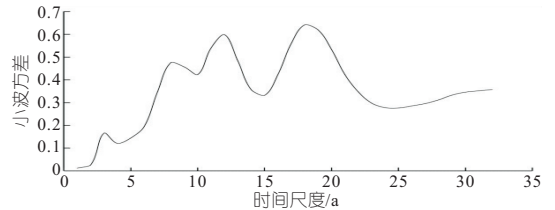


图4 年径流序列的小波方差图

Fig. 4 Wavelet square difference diagram of annual runoff series

3.4 径流归因分析

3.4.1 弹性系数法

以径流突变点作为节点,将研究时段划分为基准期(1966~1993)和变化期(1994~2015),根据式(2)、(6)~(10)计算各时期下垫面参数 n 及

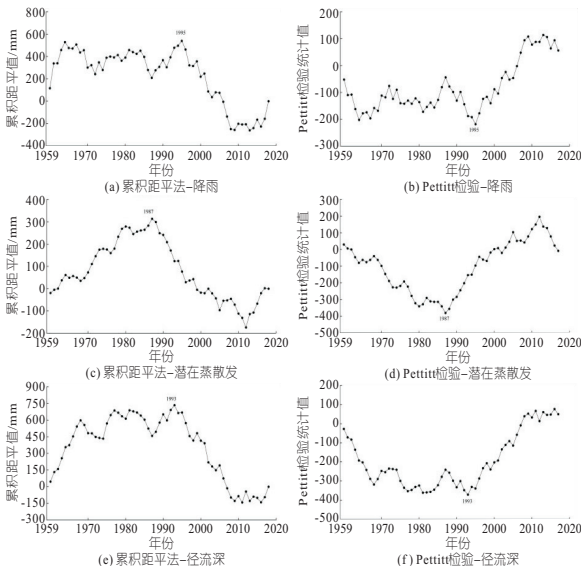


图3 水文气象序列突变分析

Fig. 3 Abrupt change analysis of hydrometeorological series

弹性系数,结果见表 3。表 3 中,整个研究时段的 ϵ_{E_0} 、 ϵ_n 值分别为 -0.10 、 -0.39 ,意味着径流深随潜在蒸散发和下垫面参数 n 增大而减小,具体表现为 E_0 和 n 各增大 1%,径流分别减小 0.1%、0.39%,而 ϵ_p 的值为 1.11,说明降水增大 1%时,径流增大 1.11%。根据弹性系数的定义,其绝对值越大,径流对该因素的敏感性越强。因此,研究时段内径流变化对各因素敏感性的大小具体表现为降水 $P >$ 下垫面变化 $n >$ 潜在蒸散发 E_0 。

表 3 各时段气象水文变量特征

Tab. 3 Characteristics of meteorological and hydrological variables

时期	P/mm	E_0/mm	R/mm	n	ϵ_p	ϵ_{E_0}	ϵ_n
整个时段	725.73	906.11	602.12	0.37	1.10	-0.10	-0.39
基准期	739.79	909.75	623.74	0.35	1.09	-0.09	-0.36
变化期	706.61	901.18	572.73	0.39	1.11	-0.11	-0.42

由岷江上游径流变化归因分析结果可知,降水、潜在蒸散发和下垫面变化因素导致径流深分别变化 -28.68 、 1.03 、 -22.88 mm,贡献率分别达到 59.23%、 -1.1% 、41.87%,说明研究区径流减少,潜在蒸散量贡献值为负,降水和下垫面变化贡献值均为正。弹性系数法求得的径流深 ΔR 变化为 -51.05 mm,而岷江上游流域实际径流深 $\Delta R' - 51.01$ mm,双方的误差仅 0.04 mm,说明该方法在岷江上游流域同样适用。气候变化是引起研究区径流减少的主要因素,下垫面对径流变化的贡献也不容低估,两者贡献率分别达到 58.13%、41.87%。

3.4.2 累积量斜率变化率比较法

为使弹性系数法的结果更可靠,采用累积量斜率变化率比较法进行验证,结果表明,降水、潜在蒸散发对径流变化的贡献率分别达到 54.85%、8.44%,则气候变化对其贡献率达到 63.29%,人类活动对径流变化的贡献率为 36.71%,与文献[8]方法所得结果一致。综上所述,气候变化是径流减少的主要因素,弹性系数法在该流域具有适用性。

但无论哪一种归因方法,均将气候变化与人类活动分割成独立的因素,而实际上各因素相互影响,并非相互独立。其次,研究区径流归因分析中仅考虑降水、潜在蒸散发和人类活动 3 个因素,而事实上融雪补给占岷江上游年径流量的 5%~10%,应充分考虑融雪对径流的影响。最后,除由降水和潜在蒸散发组成的气候因素引起的径流量,其余径流变化均统一认为人类活动所致。

结合文献[9]的研究可知,人类活动一方面通过改变下垫面条件影响径流;另一方面通过修建水利工程影响径流。因此,建议因地制宜地开发水电,积极探求岷江上游水量调配的最优方案,加大水土流失治理力度,在保护水资源的同时进行合理利用。另外,在未来应进一步加强定量分离气候变化和人类活动对径流变化响应,为水资源开发利用提供理论支撑。

4 结论

a. 岷江上游径流序列呈显著减少趋势,减少幅度约为 -0.94 (m^3/s)/a。径流序列存在多时间尺度周期变化,18 年是第一主周期,径流在 1993 年发生突变。

b. 气候变化是岷江上游径流减少的主要因素,人类活动对径流变化的贡献不容忽视,两种方法计算得到平均贡献率分别为 60.71%、39.29%。

参考文献:

- [1] 梁淑琪,王文圣,黄伟军. 1937-2018 年岷江上游径流演变特征分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020,50(5):761-770.
- [2] 梁小军,江洪,王可,等. 基于 SWAT 模型的岷江上游干旱河谷区水文特征情景模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8):79-84.
- [3] CHOUDHURY B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of hydrology, 1999, 216(1-2):99-110.
- [4] YANG H B, YANG D W, LEI Z D, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. Water resources research, 2008, 44(3):893-897.
- [5] BUDYKO M I. Climate and life[M]. Academic press, 1974.
- [6] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3):388-397.
- [7] 赵璐,崔宁博,梁川,等. 基于云模型的四川省潜在蒸散量时空分布研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013,45(1):91-97.
- [8] 周登科. 岷江上游近 40 年径流对土地利用和气候变化的响应研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2019.
- [9] 郭文献,周昊彤,张丽,等. 岷江流域径流变化及成因分析[J]. 水电能源科学, 2022,40(4):32-36.

- risk analysis of crop water requirements and effective precipitation based on the copula method in the Hilly Area of Southwest China[J]. *Agricultural water management*, 2022, 266: 107571.
- [5] 张泽中, 袁义杰, 谷红梅, 等. 贵阳烟草生长期内旱涝急转特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(10): 32-39.
- [6] DU L, MIKLE N, ZOU Z H, et al. Global patterns of extreme drought-induced loss in land primary production: Identifying ecological extremes from rain-use efficiency[J]. *Science of the total environment*, 2018, 628-629: 611-620.
- [7] 赵志龙, 罗娅, 余军林, 等. 贵州高原 1960-2016 年降水变化特征及重心转移分析[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(10): 1432-1442.
- [8] 毛春艳, 戴丽, 杨广斌, 等. 1960-2016 年贵州喀斯特山区干旱时空动态分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(3): 64-72, 79.
- [9] 梁任刚, 周旭, 李松, 等. 基于 CWSI 的贵州省干旱时空变化特征及影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 284-291.
- [10] 王亚虹, 许自成, 高森, 等. 烟草干旱胁迫研究进展[J]. *节水灌溉*, 2016(12): 103-107, 111.
- [11] 赵洪春, 焦芳蝉, 王莎莎, 等. 六个烤烟品种抗旱性与抗寒性的比较鉴定与综合评价[J]. 2018, 16(3): 1011-1019.

Research on Matching Degree Between Water Conservancy Project for Tobacco and Tobacco Drought in Guizhou Province

ZHANG Ze-zhong¹, LAI He-xin¹, WANG Fei¹, FENG Kai¹, ZHU Xiao-meng²

(1. College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Guizhou Quality and Safety Centre of Water Conservancy Engineering Construction, Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to evaluate the matching degree between water conservancy project for tobacco and tobacco drought in Guizhou Province, the daily rainfall data from 17 meteorological stations, tobacco production and water supply data of water conservancy project for tobacco during 2006-2017 was used to construct a matching degree evaluation model, and grade standard of matching degree was proposed. The results show that the water conservancy project for tobacco alleviated tobacco drought to a certain extent. However, the matching relationship between water conservancy project for tobacco and tobacco drought still needs to be improved. The matching degrees of Qianxinan, Qiannan, Anshun, Liupan-shui, and Guiyang were 55.4%, 52.1%, 46.2%, 45.9%, 44.7%, and 34.4%, respectively, which were in the fourth grade with a poor matching degree. The matching degrees of Bijie, Qiangongnan, Tongren, and Zunyi were 31.7%, 28.6%, and 26.8%, respectively, which were in the fifth grade with a worse matching degree. In different growth stages, water shortage in root extension period mainly occurred in 90% and 95% effective rainfall frequency, and water shortage in prosperous and mature periods mainly occurred in each effective rainfall frequency. Additionally, the lowest matching degree occurred at the mature period. It is suggested that in the future, the layout of the water conservancy project for tobacco should focus on strengthening the construction in Zunyi, Tongren and Qiangongnan, and improve the rationality of the layout of water conservancy project for tobacco, as well as enhance the guarantee ability of drought resistance of tobacco.

Key words: drought; matching degree; water conservancy project for tobacco; tobacco; Guizhou Province

(上接第 13 页)

Runoff Changes and Attribution Identification in the Upper Reaches of Minjiang River in Recent 59 Years

CHEN Qian^{a,b}, LEI Xiao-zhang^{a,b}, ZHANG Yin-yin^{a,b}

(a. College of Water Resource and Hydropower; b. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Protection, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to efficiently utilize water resources in the upper reaches of the Minjiang River Basin, based on hydro-meteorological data of the basin from 1960 to 2018, a variety of statistical theories were used to analyze the trend, cycle and abrupt point of runoff. The elastic coefficient method based on Budyko theory (Choudhury-Yang formula) and the comparative method of cumulated slope change rate (SCRCQ method) were used to analyze the attribution of runoff changes. The results show that the runoff decreases significantly at a rate of 12.5 mm/10a, and a sudden change occurred in 1993. There are 3 years, 8 years, 12 years and 18 years main cycles of runoff change, and the annual distribution is uneven, mainly concentrated in summer and autumn, accounting for 73.6%. Rainfall is the most sensitive to runoff, followed by underlying surface parameters, and potential evapotranspiration is the least sensitive. Choudhury-Yang formula and SCRCQ method calculated that the contribution rate of climate change to runoff reduction was 58.13% and 63.29%, respectively. Climate change was the main factor of runoff reduction in the study area, and the contribution rate of human activities to runoff reduction should not be underestimated, reaching 41.87% and 36.71%, respectively.

Key words: the upper reaches of the Minjiang River; runoff evolution characteristics; Budyko theory; attribution analysis