

1956 – 2016 年拉萨河径流量变化及影响因素分析

蔡俐辰¹, 李志威^{1,2}, 游宇驰¹, 黄 草^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 泥沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 通过分析拉萨河径流量的演变规律和突变情况, 开展降水和人类活动对径流量变化的成因分析, 为拉萨河流域水资源管理与利用提供科学依据。基于 1956 – 2016 年的径流和降水数据, 利用 Mann – Kendall 趋势分析、累积距平 – 滑动 t 检验法和降水 – 径流双累积曲线法, 统计分析拉萨河径流序列的趋势性和突变性, 计算降水与人类活动对拉萨河汛期 6 – 9 月径流量变化的贡献率。结果表明: 1956 – 2016 年拉萨河径流量年际变化波动较大, 其中 1995 和 2005 年为径流量突变年份。以 1956 – 1994 年为基准期, 通过双累积曲线法定量分析表明 1995 – 2004 年人类活动对汛期径流量变化的贡献率小于 50%, 而 2005 – 2016 年人类活动的贡献率增大至 70% 以上, 即人类活动成为汛期径流量改变的主要影响因素, 且下游河道人类活动的影响程度更大, 主要原因是新建的直孔和旁多水库调控了下游河段的流量过程。

关键词: 径流变化; 降水量; 人类活动; 双累积曲线法; 拉萨河

中图分类号: TV211.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0090-07

Analysis of runoff changes in Lhasa River from 1956 to 2016 and the influencing factors

CAI Lichen¹, LI Zhiwei^{1,2}, YOU Yuchi¹, HUANG Cao^{1,2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water – Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: The variation trend and the abrupt changes of runoff in the Lhasa River Basin were analyzed, the contributions of climate change and human activities to runoff were quantitatively calculated to provide statistical support for the management and utilization of water resources in the area. Based on the runoff and precipitation data from 1956 to 2016, the variation trend and abrupt changes of runoff were analyzed using Mann – Kendall trend analysis, cumulative anomaly – sliding t test method and double-mass curve method, as well as the contribution of precipitation and human activities to the runoff change from June to September. The results showed that in the past 61 years, the inter-annual variation of the runoff fluctuated greatly, and abrupt changes of flood season runoff occurred in 1995 and 2005. Using the years of 1956 – 1994 as the base period, the quantitative analysis of the double-mass curve method revealed that the proportion of human activity contribution to the runoff from 1995 to 2004 was less than 50%, then it rose up to be more than 70% in the period of 2005 – 2016, which became the dominating influencing factor of runoff changes in flood season with a greater impact on the lower reaches of the river. This is mainly attributed to the newly built Zhikong Reservoir and Pangduo Reservoir, which regulated the flow process.

Key words: runoff change; precipitation; human activity; double-mass curve; Lhasa River

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2021-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(91647204, 51979012); 湖南省教育厅重点项目(19A017); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ3036)

作者简介: 蔡俐辰(1998-), 女, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要从事水文及水资源方面研究。

通讯作者: 李志威(1984-), 男, 湖北云梦人, 博士, 副研究员, 主要从事青藏高原河流动力学研究。

1 研究背景

全球气候变暖和人类活动的共同作用对流域水资源系统产生了剧烈影响^[1]。降水量的增大和气温的升高引起河流补给量的增减,体现为河流径流量、输沙量等水文要素的变化^[2–4];人类活动则通过土地利用类型变化、河道外引水调水和梯级水库建设运行等方式^[5–6]对河流水文要素造成影响。近年来,诸多学者围绕河流径流演变规律及其归因开展了大量研究^[7–8],如潘扎荣等^[9]通过非参数检验法分析淮河流域径流量的演变规律,结果表明流域大部分地区年径流量呈减少趋势,且受人类活动影响,流域内径流突变年份存在一定时空差异;王少丽等^[10]运用 Mann–Kendall 法、双累积曲线法分析北京市漫水河流域的降水量和下垫面对径流量贡献率情况,结果表明该流域径流量的突变点为1980年,且2000年后人类活动贡献率均在50%以上;Wu等^[11]采用 Yamamoto 法和 ABCD 模型分析拉萨河流域枯季径流变化情况,结果表明近60年流域枯季径流量增加的主要原因为气候变化,其次是人类活动和耦合作用项。

青藏高原生态系统复杂多样,气候变暖背景下高原冰川加速消融、流域下垫面变化显著,同时不断增加的人类活动也改变着河流水文情势,使洪水等极端水文事件发生更加频繁^[12]。拉萨河位于青藏高原南部,是雅鲁藏布江中游的主要支流,属于农业发展和城镇化集中的河谷地区,为拉萨市等城镇提供了水资源保障^[13]。研究表明,拉萨河6–10月径流与降水显著相关,10–次年2月径流与气温相关性较高^[14–15],冬季气温的升高使流域内积雪和冰川冻土消融加快,从而增加了河流补给量^[16]。另一方面,近30年来拉萨河流域的建筑用地面积增幅为82.65%^[17],严重侵占了流域面积,且拉萨河干流梯级水电站的建设阻断了河流连续性,水电站工程对下泄流量的控制又使河流的多项水文指标发生了改变^[18–19],同时城镇化发展使居民生产生活引水量增加。因此,影响拉萨河径流变化的要素复杂多元,在降水和气温等气候因素的影响下,其径流直接受到大量人类活动的干扰,而关于降水和人类活动对径流变化量化影响的研究还较为缺乏。

本文以拉萨河干流的拉萨水文站以上流域为研究对象,采用1956–2016年拉萨河流域的水文与气象数据分析径流的演变规律和突变年份,并通过双累积曲线法进一步定量评估降水和人类活动对汛期

拉萨河流域径流的影响。研究结果可为拉萨河流域水资源的合理开发利用和水利工程的建设等提供科学依据,为流域生态保护管理和区域可持续发展提供重要参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

拉萨河是雅鲁藏布江中游左侧的主要支流,海拔高度3 580~5 500 m,是全世界海拔最高的辫状河流之一^[20]。拉萨河流域范围在29°20'N~31°15'N、90°05'E~93°20'E之间,全长568 km,流域面积32 896 km²。拉萨河流域气候以半干旱、半湿润气候为主,太阳辐射强烈,常年气温偏低,日温差大,多年平均降水量在400~500 mm范围内,降水主要集中在6–9月,约占全年总降水量的84%。拉萨河流域内河流水系分布较发达,水资源较丰富,多年平均流量为288 m³/s,年径流总量为90.8×10⁸ m³。拉萨河流域概况图如图1所示。

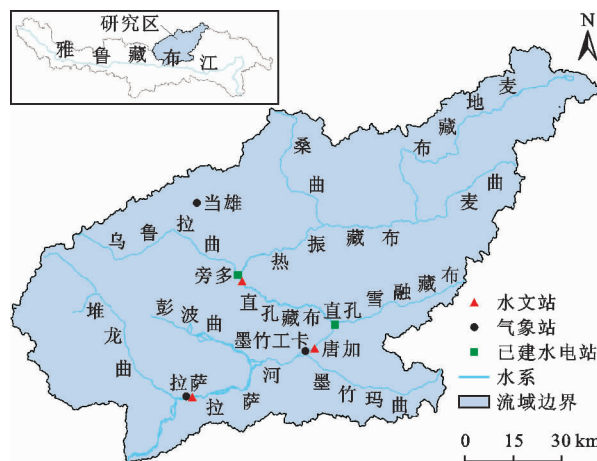


图1 拉萨河流域位置及水系、气象水文站分布

2.2 数据来源

本文采用拉萨河干流3个水文站的月平均观测流量数据(旁多站:1956–2003年、2008–2016年,唐加站:1956–2016年,拉萨站:1956–2016年)。由于旁多站与唐加站在同一时期内的流量显著相关(在0.01置信区间内,显著性系数为0.00),因此旁多站缺测的2004–2007年的月流量数据可通过TREND函数进行插值获得。

气象资料收集了流域内3个气象站的日实测降水数据(拉萨站:1956–2016年,墨竹工卡站:1978–2016年,当雄站:1963–2016年)。因实测降水数据部分缺失,当缺测数据为1 d时,采用前后两日平均值代替;当缺测数据大于1 d时采用当月平

均值补足。其中墨竹工卡气象站位于唐加水文站的西南方约 8 km 处,当雄气象站位于旁多水文站的西北方约 40 km 处,且当雄气象站和旁多水文站均位于拉萨河流域的中上部,因此本文选用墨竹工卡、当雄气象站的降水数据分别代表唐加、旁多水文站的气象数据进行分析研究。

2.3 研究方法

2.3.1 Mann-Kendall 趋势分析 Mann-Kendall 趋势分析法是检测变量序列变化趋势的常用方法之一,能有效分析温度、降水和径流等水文气象要素的趋势变化特征^[21]。该方法中样本 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为随机分布的时间序列,其构造的统计变量 S 计算如下式^[22]:

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

其中:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

将 S 统计量标准化后得到 Z ,当 $n > 10$ 时,对 Z 进行显著性检验,公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & (S < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中:方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。

该方法是通过判断统计量 Z 的正或负,来辨别样本存在的趋势为增大或减小。对于给定的趋势检验显著性水平 α ,若 $|Z| \geq Z_{(1-\alpha/2)}$,表明序列数据的变化趋势不显著;若 $|Z| \geq Z_{\alpha/2}$,表明其存在显著增大或减小趋势。本文选取置信水平 $\alpha = 0.05$,临界值 $Z_{\alpha/2} = \pm 1.96$ 。

2.3.2 累积距平与滑动 t 检验 累积距平法与滑动 t 检验法常被用于统计分析水文序列的突变性。径流样本序列 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 在任一时刻 t 的累积距平的计算公式如下^[23]:

$$S_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

绘制 $S_t \sim t$ 曲线,选择极值点后应用滑动 t 检验法进行显著性分析判断是否为突变点,是否可将样本序列划分为基准期 and 变化期。现设定 $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ 和 s_1, s_2

分别为初选点前后相邻且连续的 n_1 年和 n_2 年的平均值和标准差,则统计量 T 值可以通过下式计算得出:

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (7)$$

2.3.3 双累积曲线法 通过双累积曲线法计算和量化拉萨河流域内降水与人类活动对汛期 6-9 月的径流量变化的贡献情况^[24]。降水-径流双累积曲线法是以同一时期内的累积降水量和累积径流深分别为直角坐标系的 x 轴、 y 轴,其中基准期的累积径流深与累积降水量存在以下线性回归关系:

$$\sum R = k \sum P + b \quad (8)$$

将变化期的累积降水量 $\sum P$ 代入线性方程式 (7),拟合出该关系式下的变化期累积径流深 $\sum R$,再计算得到模拟径流深。现设定 R_i' 为模拟径流深 (mm), R_i 为实测径流深 (mm),其中 $i = 1, 2$,分别表示基准期、变化期, ΔR 为变化期相对于基准期的实测径流深的变化量。当变化期与基准期的下垫面条件相似时,径流受降水或人类活动影响而出现的变化量可由模拟径流深与实测值的差值计算得到,即人类活动和降水对径流量的变化量 ΔQ_h 和 ΔQ_p 可表示为:

$$\Delta Q_h = R_2 - R_2' \quad (9)$$

$$\Delta Q_p = R_2' - R_1 \quad (10)$$

则人类活动和降水对径流深改变值的相对贡献率 η_{Q-h} 和 η_{Q-p} 分别为:

$$\eta_{Q-h} = \Delta Q_h / \Delta R \times 100\% \quad (11)$$

$$\eta_{Q-p} = 1 - \eta_{Q-h} \quad (12)$$

3 结果与分析

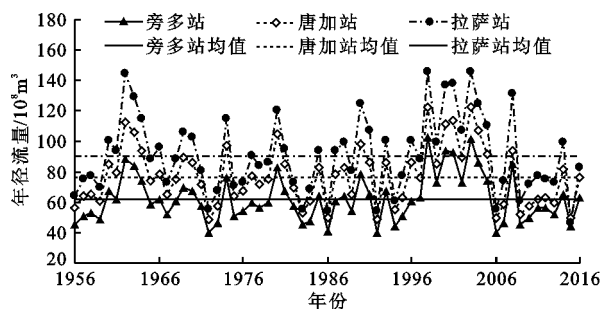
3.1 径流量年际与年内变化特征

3.1.1 径流量年际变化特征 根据 1956-2016 年拉萨河流域年径流数据,绘制拉萨河干流 3 个水文站的径流量年际变化曲线和多年平均值线,如图 2(a) 所示。在双变量相关性分析的 $p = 0.01$ 置信区间下,旁多站、唐加站与拉萨站径流通过显著性水平检验(显著性系数为 0.00),说明 3 个水文站在同一时期内的径流量显著相关,因此选取拉萨站为代表,在其径流量年际变化曲线的基础上绘制径流量 5 a 滑动平均曲线,见图 2(b)。

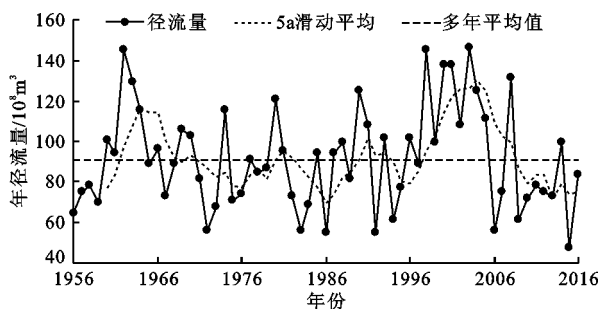
由图2(a)可知,1956-2016年旁多、唐加和拉萨水文站的多年平均径流量分别为 62.14×10^8 、 76.96×10^8 、 $90.99 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图2(a));拉萨站共有28 a的径流量大于平均值,即偏丰年约占46%,5 a滑动平均曲线存在丰、枯年份的波动特征,但径流量在2000年前后呈明显上升趋势,达到极大值后至2016年径流量呈现波动减少趋势(图2(b))。通过Mann-Kendall趋势检验可知,旁多、唐加和拉萨水文站年径流量的统计量 Z 分别为0.37、-0.03、0.21;在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的条件下,旁多站和拉萨站年径流量均表现为不显著的增大趋势,唐加站表现为不显著的减少趋势,说明拉萨河年

际径流量变化较为平稳。

3.1.2 径流量年内变化特征 图3(a)为拉萨河3个水文站1956-2016年的月平均径流量箱形图。由于2007年在拉萨河干流唐加水文站上游约13 km处修建直孔水电站,2015年在旁多水文站上游约3 km处建成旁多水利枢纽,将研究总时段1956-2016年划分为建库前的1956-2006年和建库后的2007-2014、2015-2016年3个时段来对比分析水库建成前、后月均径流的变化,拉萨河流域3个水文站在建库前、后的月平均径流量情况如图3(b)、3(c)、3(d)所示。

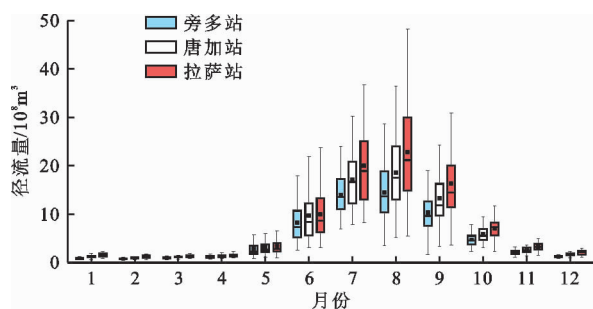


(a) 拉萨河3个水文站径流量年际变化及多年平均值

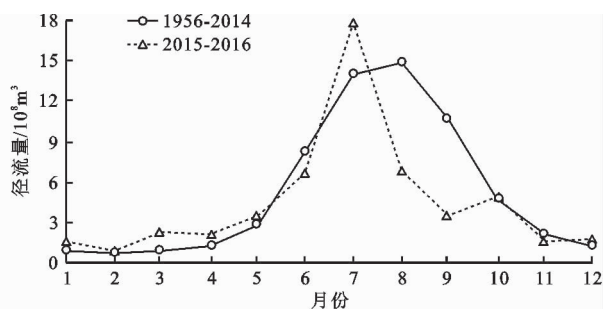


(b) 拉萨站年径流量变化及其5a滑动平均曲线

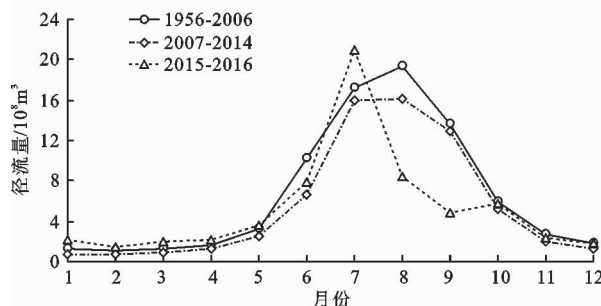
图2 1956-2016年拉萨河3个水文站径流量的年际变化情况



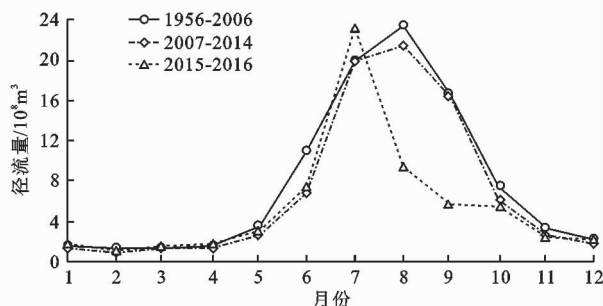
(a) 1956-2016年拉萨河3个水文站月平均径流量箱形图



(b) 建库前、后旁多站月径流量变化



(c) 建库前、后唐加站月径流量变化



(d) 建库前、后拉萨站月径流量变化

图3 1956-2016年拉萨河3个水文站月平均径流量及建库前后年内径流量变化情况

分析图3(a)可知,拉萨河3个水文站径流量年内分布不均且季节性变化特征一致,汛期6-9月径流量占全年的75.9%~76.4%,月均值在 $11.0 \times 10^8 \sim 17.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间;非汛期10-次年5月径流量仅占全年的23.6%~24.1%,月均值在 $1.8 \times$

$10^8 \sim 2.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间。而且3个水文站在8和9月的最小径流量值与最大径流量值的最大差值达到 $42.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,远大于其他月份的平均最值差 ($7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$)。由图3(b)、3(c)、3(d)可看出,直孔水库建成后,唐加站和拉萨站的月平均径流量在

汛期和非汛期均出现小幅减小;旁多水库建成后,3个水文站的汛期月平均径流量总体减小而非汛期月平均径流量小幅增大或基本持平,说明这两座水库建成后对河段下泄径流量进行了削峰补枯控制。

对 1978–2016 年拉萨河流域 3 个水文站汛期气温 T 、降水量 P 和径流量 Q 进行多元回归分析。在回归统计区域中,三者之间建立的回归模型为 $Q = 58.8 - 5.05T + 0.155P (R^2 = 0.675)$;在 $p = 0.01$ 的置信区间下,降水量与径流量通过显著性水平检验(显著性系数为 0.00),气温与径流量未通过显著性水平检验(显著性系数为 0.06)。因而拉萨河流域汛期径流量与降水量显著相关,与气温的相关性较低,说明汛期径流变化主要受降水量的直接影响。

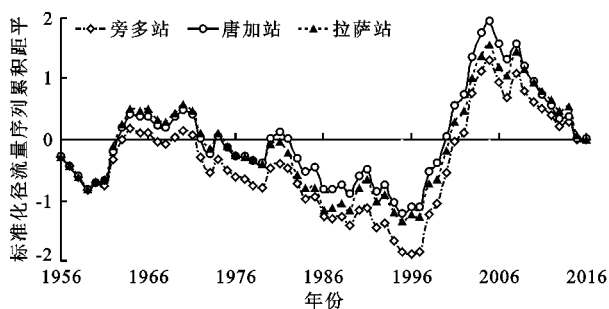


图4 拉萨河 3 个水文站的标准化年径流量序列累积距平曲线

3.2 拉萨河流域汛期径流量的突变分析

图 4 为拉萨河 3 个水文站的标准化年径流量序列累积距平曲线,由图 4 可看出,3 个水文站的累积距平曲线变化趋势基本相同,因此以拉萨站为例,对其年内径流量按全年、汛期和非汛期 3 个不同时段进行分析,见图 5。由图 5 可知,拉萨站的年径流量与汛期 6–9 月径流量的变化趋势和突变性情况基本一致,且标准化汛期径流量累积距平曲线在 1995–2004 年呈明显上升趋势,2005–2016 年呈明显下降趋势。选取累积量极值出现的年份作为初始变点进行滑动 t 检验,汛期径流量累积距平极大值出现在 2005 年,累积距平极小值出现在 1995 年,3 个水文站的汛期径流量滑动 t 检验计算结果见表 1。

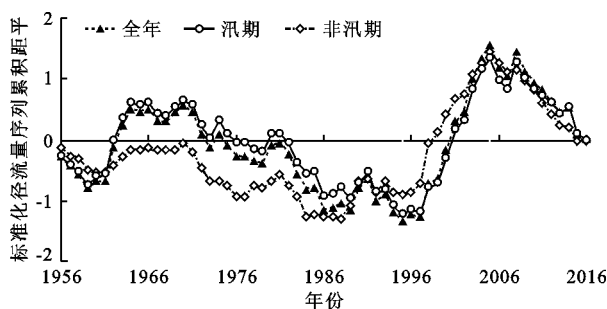


图5 拉萨水文站不同分析时段的标准化径流量序列累积距平曲线

表 1 拉萨河 3 个水文站汛期径流量的滑动 t 检验

水文站	年份	累积距平极值	统计量 t 值	临界 $t_{\alpha/2}(\alpha=0.05)$	是否显著
旁多	1995	-1.33	-3.80	2.1	显著
	2005	1.64	3.79	2.1	显著
唐加	1995	-1.16	-3.76	2.1	显著
	2005	1.67	4.18	2.1	显著
拉萨	1995	-1.24	-3.44	2.1	显著
	2005	1.33	3.44	2.1	显著

由表 1 可知,各水文站在 1995 和 2005 年均通过显著性检验,表明 1995 和 2005 年为拉萨河的汛期径流量发生突变的年份。以 1995、2005 年作为序

列分界点,选取 1956–1994 年为拉萨河汛期径流量趋势分析的基准期,1995–2004 年作为变化期 I,2005–2016 年作为变化期 II。

3.3 降水与人类活动对流域汛期径流量变化的贡献率

根据拉萨河流域 3 个水文站 1956–2016 年径流数据,计算出汛期在基准期、变化期 I 和变化期 II 3 个阶段的平均径流量、平均径流深和平均降水量,如表 2 所示。基于降水和径流深的时间序列数据,将 1995–2004 年(变化期 I)和 2005–2016 年(变化期 II)的累积降水数据代入基准期的线性关系式,计算变化期的模拟累积径流深,绘制旁多、唐加和拉萨水文站的降水–径流深双累积曲线图,见图 6。

表 2 1956–2016 年不同阶段拉萨河 3 个水文站汛期径流量和降水量特征值

水文站	控制面积/ km ²	基准期(1956–1994 年)			变化期 I(1995–2004 年)			变化期 II(2005–2016 年)		
		平均径流量/ 10 ⁸ m ³	平均径流深/ mm	平均降水量/ mm	平均径流量/ 10 ⁸ m ³	平均径流深/ mm	平均降水量/ mm	平均径流量/ 10 ⁸ m ³	平均径流深/ mm	平均降水量/ mm
旁多	16459	45.64	277.28	392.55	59.26	360.02	448.59	41.36	251.26	375.78
唐加	20143	57.03	283.11	434.20	75.47	374.66	545.08	50.16	249.02	447.44
拉萨	26235	66.93	255.11	379.72	89.79	342.24	447.85	60.80	231.77	397.49

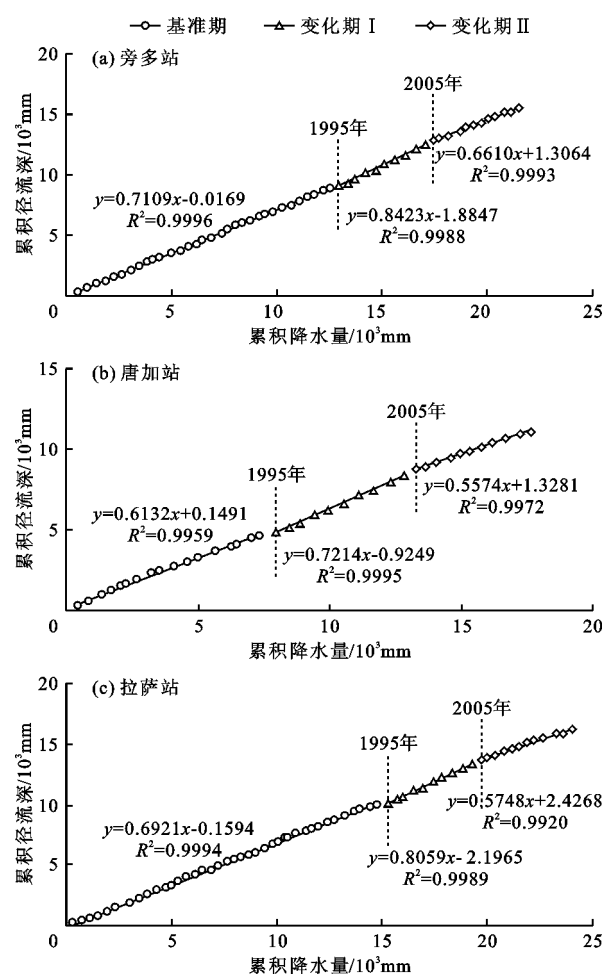


图 6 1956 – 2016 年不同阶段拉萨河 3 个水文站汛期降水量 – 径流深双累积曲线

由图 6 可知,旁多站基准期的累积径流深($\sum R$)与累积降水量($\sum P$)之间的关系为 $\sum R =$

$0.7109 \sum P - 0.0169 (R^2 = 0.9996)$, 实测平均径流深为 277.28 mm,模拟径流深为 279.07 mm,则旁多站该阶段径流深的绝对误差为 1.79 mm,相对误差为 0.65%,且唐加和拉萨水文站的双累积曲线的拟合系数 R^2 也均大于 0.99,表明该方法的线性拟合精确度较高,可以通过降水 – 径流双累积曲线关系式分离径流量受降水或人类活动影响而出现的变化量。具体计算结果见表 3。

由表 3 可知,1995 – 2004 年,拉萨河流域旁多、唐加、拉萨站以上流域段汛期径流量的改变度受人类活动因子的影响率在 37.0% ~ 49.7% 之间,2005 – 2016 年,旁多、唐加站以上流域段汛期径流量的人类活动因子影响率分别增加至 71.5%、74.4%。对拉萨站以上流域段,降水与人类活动因子共同影响使径流深的减少量达到 23.34 mm,变化期 II 模拟径流深较基准期实测径流深增加了 20.00 mm,变化期 II 的实测径流深较模拟径流深减少了 43.33 mm,人类活动因子导致径流量显著减少,其影响率占比为 185.7%,降水因子影响率为 – 85.7%。

由此可得出结论,1995 – 2004 年拉萨河流域汛期径流量变化主要受降水因子的影响;2005 – 2016 年人类活动因子成为研究区汛期径流量改变的主要影响因素,且越往流域下游,人类活动的影响率越大。这与近十几年来拉萨河中下游的城镇迅速发展,以及旁多至拉萨河段建成的能够进行季调节的直孔水库和能够进行年调节的旁多水库有关,两座水库控制了河段下泄流量,并使得与河流流量相关的多项水文指标参数均发生不同程度的改变。

表 3 双累积曲线法量化降水与人类活动对不同阶段拉萨河汛期径流量变化的影响

水文站	变化期 I (1995 – 2004 年)				变化期 II (2005 – 2016 年)			
	实测径流 深/mm	模拟径流 深/mm	降水影响 率/%	人类活动影 响率/%	实测径流 深/mm	模拟径流 深/mm	降水影响 率/%	人类活动影 响率/%
旁多	360.02	318.90	50.3	49.7	241.75	267.14	28.5	71.5
唐加	374.66	334.24	55.9	44.1	249.02	274.37	25.6	74.4
拉萨	342.24	309.96	63.0	37.0	231.77	275.10	– 85.7	185.7

4 结论与讨论

(1) 拉萨河干流 3 个水文站在同一时期内的径流量显著相关,均存在年际振荡特征,其中 2000 年前后径流量开始呈明显上升趋势,达到极大值后至 2016 年径流呈现波动下降趋势。1965 – 2016 年旁

多和拉萨水文站的年径流量均为不显著的增大趋势,唐加水文站的年径流量为不显著的减少趋势,即拉萨河年际径流变化较平稳,且汛期径流主要受降水量的直接影响。

(2) 结合累积距平 – 滑动 t 检验法和降水 – 径流双累积曲线法对拉萨河 3 个水文站汛期径流序列

进行突变性检验,判断 1995 和 2005 年均为显著性突变点,根据突变点将水文序列划分为基准期(1956–1994 年)和变化期 I(1995–2004 年)、变化期 II(2005–2016 年)。1995–2004 年,3 个水文站的降水对拉萨河流域径流量变化的贡献率均在 50% 以上,该阶段拉萨河流域主要受降水因子的影响。2005–2016 年,人类活动对拉萨河流域径流量变化的贡献率均提高至 70% 以上,成为拉萨河流域径流量变化的主要影响因素,且越往流域下游人类活动的贡献率越大,其中梯级水库建设运行、农业发展和生活用水是人类活动影响拉萨河流域径流量变化的主要表现形式。

(3)在不考虑蒸散发影响的情况下,定量评估人类活动与降水对径流量的影响,可为流域水资源的合理开发利用提供一定科学依据。因此,之后的分析重点可放在流域汛期时人类活动因子与气候因子的耦合关系上。

参考文献:

- [1] AHN K H, MERWADE V. Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 515:257–266.
- [2] GUO Danlu, WESTRA S, MAIER H R. Impact of evapotranspiration process representation on runoff projections from conceptual rainfall–runoff models[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(1):435–454.
- [3] 赵林,胡国杰,邹德富,等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11):1233–1246.
- [4] LI Dongfeng, LI Zhiwei, ZHOU Yinjun, et al. Substantial increases in the water and sediment fluxes in the headwater region of the Tibetan Plateau in response to global warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(11):e2020GL087745.
- [5] 宫兴龙,付强,王斌,等. 土地利用方式变化对水循环过程响应机制研究[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2):252–259.
- [6] 夏伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对沱河流域径流量影响的定量评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(6):47–52.
- [7] 文广超,王文科,段磊,等. 青海柴达木盆地巴音河上游径流量对气候变化和人类活动的响应[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1):136–144.
- [8] GAO Chao, RUAN Tian. The influence of climate change and human activities on runoff in the middle reaches of the Huaihe River Basin, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(1):79–92.
- [9] 潘扎荣,郭东阳,唐世南. 淮河流域径流时空变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(5):8–14.
- [10] 王少丽,臧敏,王亚娟,等. 降水和下垫面对流域径流量影响的定量研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6):1–5.
- [11] WU Zhenhui, MEI Yadong, CHEN Junhong, et al. Attribution analysis of dry season runoff in the Lhasa River using an extended hydrological sensitivity method and a hydrological model[J]. *Water*, 2019, 11(6):1187.
- [12] 汤秋鸿,兰措,苏凤阁,等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(27):2807–2821.
- [13] 陈歆,靳甜甜,苏辉东,等. 拉萨河河流健康评价指标体系构建及应用[J]. *生态学报*, 2018, 39(3):799–809.
- [14] 徐丽娇,胡泽勇,赵亚楠,等. 1961–2010 年青藏高原气候变化特征分析[J]. *高原气象*, 2019, 38(5):911–919.
- [15] 张核真,卓玛,向飞,等. 1981–2013 年气候因子变化对西藏拉萨河径流的影响[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5):1304–1311.
- [16] 刘江涛,徐宗学,赵焕,等. 基于改进降水输入模块的融雪径流模拟:以拉萨河为例[J]. *水利学报*, 2018, 49(11):1396–1408.
- [17] 税燕萍,卢慧婷,王慧芳,等. 基于土地覆盖和 NDVI 变化的拉萨河流域生境质量评估[J]. *生态学报*, 2018, 38(24):8946–8954.
- [18] 黄草,黄梦迪,胡国华,等. 梯级电站运行下拉萨河干流水文情势变异及归因分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5):62–69+79.
- [19] WU Xinyu, LI Zhiwei, GAO Peng, et al. Response of the downstream braided channel to Zhikong Reservoir on Lhasa River[J]. *Water*, 2018, 10(9):1144.
- [20] 倪飞宇,吴鹏飞,王静,等. 基于数字地形信息的拉萨河流域河宽预测模型研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5):102–109.
- [21] DANNEBERG J. Changes in runoff time series in Thuringia, Germany – Mann–Kendall trend test and extreme value analysis[J]. *Advances in Geosciences*, 2012, 31:49–56.
- [22] 王娇,姜仁贵,解建仓,等. 泾河流域径流量变化特征研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(6):88–93.
- [23] 刘浏,刘丽丽,索滢. 近 53 a 黑河流域水文气象要素时空演变特征[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(3):465–478.
- [24] 杨思雨,姜仁贵,解建仓,等. 渭河上游径流变化特征及归因研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2):37–42.