

拉萨河流域近 50 年来径流变化趋势分析

蔺学东^{1,2}, 张懿铨², 姚治君², 巩同梁^{3,4}, 王 宏⁵, 刘林山²

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 西藏水利勘测设计研究院, 拉萨 850000; 4. 清华大学水利工程学院, 北京 100084; 5. 西藏水文水资源局, 拉萨 850000)

摘 要:以拉萨水文站以上流域为研究区, 基于拉萨水文站和唐加水文站的水文实测数据和当雄县等 3 个气象站的气候观测数据, 统计分析了 1956~2003 年研究区径流的年内、年际变化, 利用 Mann-Kendall 趋势分析法和 Pettitt 变点检验法分析了拉萨河流域径流的变化特征, 采用多元回归方法分析了气候因素(气温、降水)对径流变化的影响。结果表明: (1) 研究时段内, 径流年际变化波动较大, 在 1970 年前后径流发生了较大的突变, 呈现出明显的增加趋势, 尤以近 20 年来的趋势最大; 月均径流的年际变化中, 有增加趋势的主要分布在冬半年(11~4 月)和夏半年的个别月份(5、7、9 月); (2) 流域内气候变化趋势与径流变化趋势基本一致, 但不同月/年均径流受不同气候因素影响, 主要表现在年平均尺度上受降水影响较大, 在月平均尺度上, 夏半年径流增加趋势受降水增加影响较大, 而冬半年径流变化则主要与气温有较显著相关性, 其主要原因可能是全球变暖导致冰川融水增加。

关 键 词:拉萨河流域; 径流变化趋势; Mann-Kendall 趋势分析; Pettitt 变点检验; 多元回归

1 引言

受全球变化影响, 青藏高原气候发生了较大的变化^[1-3]。研究表明, 几十年来青藏高原气候变化的总体特征表现为气温呈上升趋势, 降水量呈增加趋势, 近些年来趋势更为明显^[4-7]。气候变化势必会引起青藏高原敏感地区包括冰冻圈和水文水资源等方面的一系列变化, 对高原本身及周边地区的生态系统以及人类生存环境和经济社会发展产生重大影响^[8-13]。拉萨河流域地处青藏高原中南部, 是西藏自治区首府所在地, 人类活动较集中。过去 50 年来, 该地区工业、农业、城市建设等都取得了较大的进步, 尤其是在 20 世纪 90 年代初开始的“一江两河”综合开发项目, 更加促进了该地区的农业、水利等各方面建设。拉萨河为该地区提供了各方面用水的保证, 也为拉萨地区发展发挥了重要的作用。全球变化背景下, 研究拉萨河流域的水文水资源变化动因显得尤为重要。

近年来, 许多学者在拉萨河流域的水环境状况、土地利用变化、气候变化等方面做了大量工作, 取得了一些重要成果^[14, 16-18], 但流域径流变化的系统研究报道鲜见^[15]。本文系统地分析了近 50 年来拉萨河流域径流的变化趋势, 探讨了流域气候变化与径流变化的关系, 研究

收稿日期: 2007-03; 修订日期: 2007-05.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2005CB422006)、国家自然科学基金项目(90202012, 40561002).

作者简介: 蔺学东(1982-), 男, 山东东营人, 硕士生, 研究方向为自然地理学与水文学。

通讯作者: 张懿铨(1962-), 男, 吉林人, 研究员, 博士生导师。E-mail: zhangyl@igsnrr.ac.cn

结果为认识拉萨河流域水文变化动因尤其是对区域水资源持续利用管理有重要参考价值。

2 研究区概况

拉萨河为雅鲁藏布江中游左岸的一级支流,发源于念青唐古拉山中段南麓,流域范围在东经 $90^{\circ}05' \sim 93^{\circ}20'$ 、北纬 $29^{\circ}20' \sim 31^{\circ}15'$ 之间,流域面积 $32\,588\text{km}^2$,是雅鲁藏布江最大的支流。主要由降水、融水、地下水补给,分别占径流总量的 46%、26%、28%^[19]。本文以拉萨河拉萨水文站以上流域为研究对象,集水面积 $26\,225\text{km}^2$,占整个拉萨河流域面积的 80.5%。流域内包括拉萨、墨竹工卡、当雄三个气象站以及拉萨、唐加、旁多三个水文站。研究区及站点分布如图版 II 图 1 所示。研究区气候属高原温带半干旱气候,干湿季节分明,流域年均温 5.3°C ,年均降水量约 500mm ,受印度洋暖湿气流影响降水多集中于夏季,年温差小,日温差较大,辐射强度大。流域内植被多为山地灌丛草原、高山草原、草甸及垫状植被等,土壤以山地灌丛草原土、高山草甸土及亚高山草甸土为主,分布规律具有明显的垂直带谱特点^[20],土地利用类型多为牧草地。流域平均海拔在 $4\,900\text{m}$ 左右,在山地斜坡间夹有盆地或河谷平原,如澎波盆地、拉萨河谷平原等,河源区及流域周边有季节性冻土及冰川发育(共有冰川 885 条,面积 $690.53\text{km}^{2[21]}$),成为河流重要的补给水源^[22-24]。

3 数据与方法

3.1 资料收集和预处理

本文所用水文资料包括研究区拉萨水文站(简称拉萨站)(1956~1968 年、1973~2003 年)、唐加水文站(简称唐加站)(1961~2000 年)的逐月实测径流资料。鉴于拉萨站与唐加站相同时期径流数据有很好的相关性(在相关系数 0.989,0.01 水平上显著相关),因此本文利用最小二乘法将拉萨站径流序列中缺失的 1969~1972 年数据插补完整,使拉萨站水文资料序列延长至 48 年(1956~2003 年),以拉萨站径流资料分析拉萨河流域径流变化状况。由于所选拉萨水文站控制断面以上流域人类活动用水多集中在下游,相对整个流域水资源来说所占比例较小,且无大型湖泊存在,因此水文站点的实测流量基本反映河流天然径流状况。

气候资料包括拉萨气象站(1955~2005 年)、墨竹工卡气象站(1978~2005 年)、当雄气象站(1962~2005 年)的逐月气温、降水资料。其中当雄站海拔 $4\,250\text{m}$,距离旁多水文站(海拔 4050m)约 40km ,且当雄和旁多站位于流域的中上部,因此本文选用当雄气象站气温数据与旁多水文站的降水数据作为旁多站以上流域的气候资料进行分析。本文仅对流域内 3 个气象站点气温、降水资料的平均值进行趋势分析,并不能准确代表整个流域的平均状况,但各站点地理位置分布较均匀且具有一定的海拔梯度差异,能够代表一定范围的气候状况,基本上能够反映整个流域的气候变化趋势。

3.2 研究方法简介

(1) Mann-Kendall 趋势检验

传统参数检验是标准趋势检验简单的样本与时间回归相关。本文采用一种非参数统计

检验方法——Mann-Kendall(M-K)检验法^[25-27]。该方法变量可以不具有正态分布特征,因此适用于水文变量的趋势检验^[28,29]。假定 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的时间序列变量, n 为时间序列的长度, M-K 法定义了统计量 S :

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

式中 x_j, x_k 分别为 j, k 年相应的测量值,且 $k > j$, 而

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

接着,
$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{3}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

式中, Z 是一个正态分布的统计量,正值表明有上升的趋势,负值表示有下降的趋势。并且定义了显著性水平 α 。

如果确定有变化趋势,再用 Sen 坡度估计法^[30]来计算变化趋势大小,趋势函数如下:

$$f(t) = Qt + B \tag{5}$$

式中, Q 表示变化的趋势大小, B 是常数

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \tag{6}$$

式中, $j > k$ 。如果序列长度是 n , 那么将得到 $N = n(n-1)/2$ 个 Q_i , 最终的 Q 由 N 决定:

$$Q = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]} & N \text{ 是奇数} \\ \frac{1}{2}(Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]}) & N \text{ 是偶数} \end{cases} \tag{7}$$

(2) Pettitt 突变点检验

水文序列变点检测与识别是研究水文序列对气候变化响应的统计方法之一。本文采用 Pettitt 变点检测方法^[31-34], 该方法基于非参数检查一个水文时间序列的突变点, 计算较简便, 可以明确突变的时间, 能够较好地识别一个水文时间系列的突变点, 在变点检测方法中应用较多且物理意义清晰^[35]。该检验基于 Mann-Whitney 的统计函数 $U_{i,T}$, 认为两个样本 $x_1, \dots, x_i$ 和 $x_{i+1}, \dots, x_T$ 均来自于同一序列分布。那么对于连续的序列, $U(t)$ 和 $V(t)$ 则可由下列公式计算得出:

$$U_{i,T} = U_{i-1,T} + V_{i,T} \quad t = 2, \dots, T \tag{8}$$

其中
$$V_{i,T} = \sum_{j=1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad \left(\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \right) \tag{9}$$

则最显著的突变点为:

$$p(t)=\max |U_{i,T}| \tag{10}$$

可能突变点的显著性水平可以通过下式计算得出:

$$p(t)=1-\text{txp}\left(\frac{-6U_{i,T}^2}{T^3+T^2}\right) \tag{11}$$

4 拉萨站径流的变化趋势分析

4.1 径流的年内变化特征

拉萨站径流的年内分配差异较大,受降水影响多集中在夏半年(5~10月),期间的径流量占到全年的 96%,冬半年(11~4月)则明显偏少。从拉萨水文站 1956~2003 年内各月多年平均流量及降水分布图(图 2a)上可以明显看出,从冬季的 11 月份开始一直到次年 4 月份,流量基本上没有变化,这段时间处于严寒的冬季,降水基本上以固体形势存在,河流主要是靠深层地下水补给^[19,20];5 月份气温回升,积雪融水以及降水共同补给河流,使得流量增加;伴随着暖湿气流的侵入,6 月份降水明显增多,流量也开始增大,8 月份达到最大(869.5m³/s);10 月份随着气温降低及暖湿气流影响减小,流量也逐渐减小。5~10 月间拉萨河主要是依靠季风带来的丰沛降水补给河流^[17,19,20],径流随降水变化而变化。

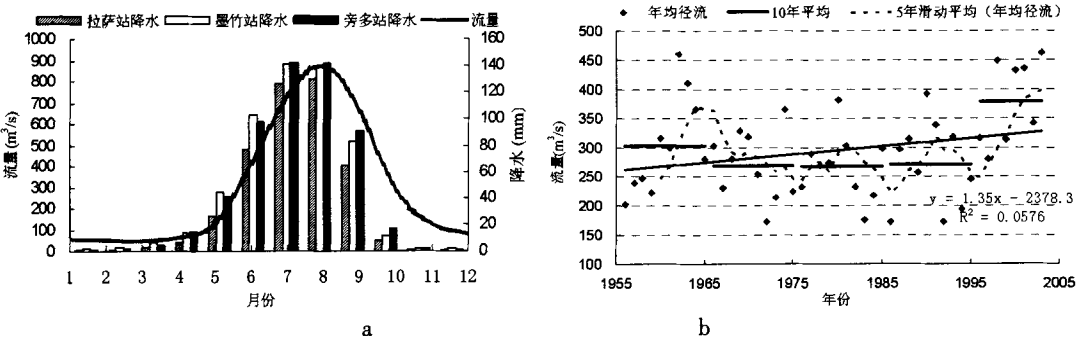


图 2 拉萨水文站年内径流与降水(a)、径流年际变化曲线(b)图

Fig.2 Variations of monthly mean runoff and precipitation (a) and annual mean runoff variations (b) at Lhasa hydrological station

4.2 径流的年际变化特征

许多研究表明,雅江中游地区径流年际变化主要受降水影响^[19,20]。研究区年径流变差系数 C_v 值为 0.25,最大值与最小值之比为 2.70,多年总平均流量为 294.1m³/s。从拉萨水文站多年来径流年际变化曲线图(图 2b)中可以看出,其 5 年滑动平均曲线在近 50 年中呈波动式变化,在 21 世纪初的几年,流量达到了历年来的较高值。从图 2b 中阶段 10 年平均流量变化看,中间的 30 年平均流量变化不大,近 10 年来的流量平均值则达到了历史的最高值。

受气候因素及下垫面状况变化的影响,径流也表现出一定的变化趋势。对年平均径流序列以及各月平均径流序列进行 Pettitt 变点检验,标示 $P(t)$ 值的高值(可能突变点)区如图版 II 图 3 所示。可以看出月/年均径流发生突变的年份有较好的一致性,多集中在 1970 年及 1984 年左右。考虑到序列长度的有效性,本文将径流序列分为 1956~2003、1971~2003、

1984~2003 三个时期进行 M-K 趋势分析,所得结果如表 1 所示。

表 1 拉萨河(拉萨水文站以上)流域不同时期月/年均径流 Mann-Kendall 趋势检验结果
Tab.1 Results of trend analysis of the mean runoff (annual and monthly) for three periods with Mann-Kendall test in Lhasa River Basin (upper reach of the Lhasa hydrological station)

序列	(1956~2003)			(1971~2003)			(1984~2003)		
	Zc	α	Q ₁	Zc	α	Q ₂	Zc	α	Q ₃
1 月	2.14	*	0.27	3.39	***	0.85	2.30	*	1.41
2 月	1.63		0.20	3.18	**	0.68	2.30	*	1.16
3 月	1.08		0.10	2.93	**	0.51	2.43	*	1.00
4 月	0.73		0.11	2.34	*	0.67	2.11	*	1.51
5 月	1.25		0.69	1.87	+	2.09	2.04	*	5.15
6 月	1.95	+	3.49	1.01		3.14	2.37	*	21.57
7 月	1.36		4.74	2.06	*	13.97	2.17	*	32.58
8 月	-0.79		-3.76	1.10		7.96	0.88		13.13
9 月	1.63		4.08	3.05	**	14.52	1.91	+	19.82
10 月	2.07	*	1.78	2.49	*	3.77	0.81		3.77
11 月	1.68	+	0.57	2.87	**	1.71	1.78	+	2.65
12 月	2.00	*	0.39	3.30	***	1.11	2.11	*	1.35
年均	1.63		1.36	3.02	**	4.28	2.63	**	9.69

(表格中 α 显著水平一列中: +表示 0.1; * 表示 0.05; ** 表示 0.01; *** 表示 0.001; 空格表示大于 0.1)

可以看出通过显著性检验的绝大多数月/年均径流序列 Zc 均为正值,说明径流有增加的趋势。对比月/年均径流不同时期表示径流序列变化趋势大小的 Q 值可以看出, $Q_3>Q_2>Q_1$,说明近 30 年来径流增加的趋势逐渐增大,尤其是 1984 年之后增加趋势更为明显。计算各月 Q 值的平均变率 $H(H=\frac{Q_{i+1}-Q_i}{Q_i}, i=1,2)$ 得出 $H_{(1971)}$ 与 $H_{(1984)}$ 分别为 1.84、1.17, $H_{(1971)}>H_{(1984)}$, 结合上文 Pettitt 变点检验结论得出径流在 1970 年前后发生的变化相比 1984 年的更大,可以认为 1970 年前后为径流最有可能发生突变的年份。有研究已经证实 20 世纪 60 年代末及 70 年代初全球范围内发生了气候的突变^[34,36],青藏高原也在 60 年代中期及 80 年代初发生气候突变^[37-39],本文研究区径流的突变年份与上述研究结果基本一致,可以说拉萨河径流变化灵敏的反映了气候的变化,具有一定的指示作用。

对月/年均径流序列在 3 个不同时期(1956~2003、1971~2003、1984~2003)的趋势进行分析(表 1)可以看出,年均径流在 1970 年以后表现出了较大的增加趋势^[19,20,40],且近 20 年的趋势更为明显;各月均径流序列中,1956~2003 年期间通过显著性检验的序列较少,仅有 1 月、6 月、10 月、11 月和 12 月,且增加趋势较小;1971~2003 以及 1984~2003 这两个时期内除个别月份外大都通过了较高的显著性检验,表现出较大的增加趋势。综合以上分析可以得出,冬季的 11~2 月、春季的 3~5 月和夏季的 7 月、9 月、10 月在三个时期内都表现出了不同程

度的增加趋势,尤以近 20 年来增加趋势更大。

4.3 径流变化的气候影响因素分析

在某种尺度上,河流径流特征的季节模式反应了区域气候和自然地理条件的综合效应。独立于气候和自然地理条件,这种径流特征模式响应了大气和地表的交互作用以及气温和降水两种变量的变化^[15]。基于此,本文针对气温与降水两个因素对径流的影响进行分析,探讨不同时期内气候变化与径流变化趋势的一致性。

利用 M-K 法对流域气温及降水进行趋势分析,得出年均气温和降水在三个时期内都分别呈现出不同程度的增加趋势(表 2)。年降水在近 30 年表现出较大的增加趋势,尤其是近 20 年以 87.3mm/10a 的速率增加,与年均径流的变化趋势相吻合。年均气温同样有升高的趋势,以 1971~2003 年期间的升温率最高 (0.4℃/10a),明显高于西藏年均气温的增长率 (0.26℃/10a)。对各月份的气温和降水趋势分析可以看出,降水有增加趋势的月份多集中在冬半年及 9 月、10 月;气温升高主要集中在冬半年,以 1971~2003 年期间 11~3 月平均气温变化看,各月升温率分别为 0.5℃/10a、0.6℃/10a、0.7℃/10a、0.4℃/10a、0.3℃/10a,明显高于该时期年升温率,因此可以说冬季气温的明显升高是造成整个年均气温升高的主要原因^[41]。综合以上 M-K 法趋势分析结果可以得出,各月份的气温、降水变化趋势与径流的变化趋势基本一致,尤其是冬半年气温与径流的变化趋势表现出较高的一致性。

表 2 拉萨河(拉萨水文站以上)流域不同时期月/年均降水和气温 Mann-Kendall 趋势检验结果
Tab.2 Results of trend analysis of the mean precipitation and temperature (annual and monthly) for three periods with Mann-Kendall test in Lhasa River Basin (upper reach of the Lhasa hydrological station)

	降水									气温								
	(1956~2003)			(1971~2003)			(1984~2003)			(1956~2003)			(1971~2003)			(1984~2003)		
	Zc	α	Q ₁	Zc	α	Q ₂	Zc	α	Q ₃	Zc	α	Q ₁	Zc	α	Q ₂	Zc	α	Q ₃
1 月	2.61	**	0.02	1.77	+	0.02	0.59		0.02	0.44	0.01	2.45	*	0.07	0.65		0.04	
2 月	4.09	***	0.04	1.83	+	0.04	2.14	*	0.10	0.52	0.01	1.95	+	0.04	0.45		0.03	
3 月	2.12	*	0.06	2.63	**	0.12	2.40	*	0.26	0.52	0.01	1.98	*	0.03	-0.58		-0.03	
4 月	2.14	*	0.16	0.98		0.13	1.01		0.25	-0.16	0.00	1.58		0.03	0.20		0.00	
5 月	2.27	*	0.56	0.79		0.42	1.78	+	1.83	-1.19	-0.02	1.35		0.03	-0.81		-0.03	
6 月	1.18		0.56	1.04		1.12	2.17	*	4.29	-0.94	-0.02	0.90		0.02	-1.14		-0.07	
7 月	0.89		0.32	2.00	*	1.38	0.42		1.06	-0.21	0.00	1.02		0.01	-0.55		-0.01	
8 月	-1.09		-0.59	0.82		0.87	0.42		1.51	0.41	0.00	2.22	*	0.02	1.53		0.04	
9 月	3.64	***	0.95	2.39	*	1.01	0.06		0.04	-0.19	0.00	2.50	*	0.03	1.72	+	0.04	
10 月	1.82	+	0.14	0.82		0.10	1.33		0.41	0.38	0.01	1.80	+	0.04	0.97		0.06	
11 月	1.26		0.00	-0.22		0.00	0.78		0.03	2.02	*	0.04	2.74	**	0.05	2.92	**	0.10
12 月	2.66	**	0.01	1.33		0.01	1.04		0.02	0.47	0.01	2.29	*	0.06	0.58		0.03	
年均	2.44	*	3.02	2.59	**	5.24	2.17	*	8.73	1.95	+	0.02	4.14	***	0.04	1.72	+	0.02

(表格中显著水平一列中: +表示 0.1; * 表示 0.05; ** 表示 0.01; *** 表示 0.001; 空格表示大于 0.1)

基于以上对气温与降水的趋势分析,只考虑这两方面对径流的影响,引入径流与气温、降水的多元回归方程如下:

$$Q=\beta+aT+bP$$

(12)

式中: Q 代表月/年均径流; T 代表拉萨、墨竹、旁多三个站平均的月/年均气温; P 代表拉萨、墨竹、旁多三个站平均的月/年均降水; a 和 b 分别为回归系数。

考虑到径流在 1970 年左右发生较大突变,本文以 1970 年为界,分别计算 1956~2003 年和 1971~2003 年两个时期内月/年均径流与气温、降水的回归系数、标准误差等,计算结果见表 3。对于线性相关而言,其回归系数大于相应的标准误差,对应参变量才有显著意义^[42],并且回归系数以及相关系数需通过显著性检验。由表 3 可以看出,1956~2003 年期间只有年均及 6~9 月降水的回归系数通过各项检验,说明这些月/年均径流与降水存在较大的相关性;在 1971~2003 年期间,年均及 6~10 月径流与降水显著相关,10~2 月径流则与气温有较高相关性。

表 3 拉萨河(拉萨水文站以上)流域不同时期月/年均径流与降水、气温多元回归计算结果

Tab.3 Results of multiple linear regression of the mean runoff and precipitation, temperature (annual and monthly) for two periods in Lhasa River Basin (upper reach of the Lhasa hydrological station)

	1956~2003 年					1971~2003 年				
	a_1	S.e(a_1)	b_1	S.e(b_1)	R_1	a_2	S.e(a_2)	b_2	S.e(b_2)	R_2
1 月	0.573	0.846	0.636	1.432	0.107	1.761	1.509	1.067	1.779	0.222
2 月	0.704	0.844	-0.131	0.928	0.138	3.498	1.438	0.352	1.136	0.414
3 月	-0.206	0.837	0.223	0.334	0.122	1.785	1.525	0.725	0.458	0.297
4 月	0.284	2.266	0.759	0.581	0.207	1.634	4.796	0.923	0.865	0.191
5 月	-1.458	6.719	0.715	0.518	0.257	5.730	12.366	1.259	0.755	0.309
6 月	-39.269	20.554	2.499	0.720	0.669	-48.888	37.883	2.451	0.992	0.658
7 月	-53.829	33.251	3.887	0.678	0.699	-16.591	60.458	4.381	0.991	0.673
8 月	-9.607	35.001	5.672	0.555	0.837	40.000	53.081	5.964	0.636	0.870
9 月	39.264	36.554	4.298	1.329	0.437	98.492	59.302	5.195	1.559	0.540
10 月	8.627	7.000	2.129	1.100	0.286	31.550	11.711	3.793	1.331	0.506
11 月	4.465	2.920	0.531	1.778	0.224	21.545	4.218	-0.672	1.708	0.684
12 月	2.087	1.532	0.270	1.213	0.212	5.443	2.371	1.312	1.445	0.401
年均	-2.792	4.858	0.670	0.051	0.891	-8.992	14.210	0.753	0.074	0.903

(表格中表示复相关系数;S.e 为标准误差,黑体为通过验证的回归系数项)

由此说明,年均及夏季径流增加趋势受降水增加影响较大,而冬季径流的增加尤其是近 30 年来则主要是受到冬季气温明显升高的影响。由于拉萨河北部及北部沿念青唐古拉山地区广泛分布有冰川及多年冻土和季节冻土,且流域内 11 月到 4 月有积雪分布,因此冬季径流增加很可能是气温升高导致积雪融化(>0℃状态下)直接补给河流,另一方面导致冻土冻融作用以及冰川消融作用加剧^[15],进而补给河流。

5 结论

1) 拉萨河流域年均径流多年来表现出增加趋势;月均径流中冬季的 11 月~2 月、春季的 3 月~5 月和夏季的 7 月、9 月、10 月都表现出了不同程度的增加趋势,尤以近 20 年来增加趋势更为明显。

2) 流域 1970 年前后及 1980 年代前期是径流发生突变的年份,并通过趋势分析验证得出 1970 年前后为径流最可能发生突变的年份。

3) 流域内气温、降水的变化趋势与径流变化趋势基本一致,并且不同月/年均径流受不同气候因素影响,主要表现在年平均尺度上受降水影响较大,在月平均尺度上,夏季径流增加趋势受降水增加影响较大,而冬季径流的增加尤其是近 30 年来主要受冬季气温升高的影响。

径流变化受气候、下垫面状况变化等多种因素影响,本文仅针对气温和降水两方面探讨了气候变化对流域径流的影响以及气候变化与径流变化趋势的一致性,另外诸如土地利用/覆被变化等人类活动因素也会导致径流发生较大变化^[43~46],这些因素对流域径流影响程度如何,有待进一步研究。

致谢:野外调查过程中,中国科学院地理科学与资源研究所张宪洲研究员、何永涛博士、杨续超同学,西藏高原大气环境科学研究所除多博士等给予支持与协助;在相关问题讨论中,中科院青藏高原研究所刘景时研究员、张菲同学,地理科学与资源研究所张一驰博士、朱奎博士等提出宝贵意见,在此特致感谢!

参考文献

- [1] 郑 度,姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应. 北京:科学出版社,2004.
- [2] 姚檀栋,朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策. 地球科学进展, 2006,21(5):459~464.
- [3] 莫申国,张百平,程维明等. 青藏高原的主要环境效应. 地理科学进展, 2004,23(02):88~96.
- [4] 杜 军. 西藏高原近 40 年的气温变化. 地理学报, 2001,56(6):682~690.
- [5] 林振耀,赵昕奕. 青藏高原降水变化的空间特征. 中国科学(D 辑), 1996,26(4): 354~358.
- [6] 吴绍洪,尹云鹤,郑 度等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. 地理学报,2005,60(1): 3~11.
- [7] Wang Shaowu, Zhu Jinhong, Cai Jingning. Interdecadal Variability of Temperature and Precipitation in China since 1880. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004,21(3): 307~313.
- [8] 施雅风,刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估. 科学通报,2000,45(4): 434~438.
- [9] 张镭锂,李秀彬,傅小锋等. 拉萨城市用地变化分析. 地理学报,2000,55(4): 396~406.
- [10] 除 多,张镭锂,郑 度. 拉萨地区土地利用变化情景分析. 地理研究,2005,24(6): 869~877.
- [11] 郑 度,林振耀,张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展. 地学前缘,2002,9(1): 95~102.
- [12] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau. *Ecology Letters*, 2004, 7(12): 1170~1179.
- [13] 牛亚非. 青藏高原生态环境研究. 地理科学进展,1999,(2):163~171.
- [14] 曹建廷,秦大河,康尔泗等. 青藏高原外流区主要河流的径流变化. 科学通报,2005,50(21):2403~2408.
- [15] 巩同梁,刘昌明,刘景时. 拉萨河冬季径流对气候变暖和冻土退化的响应. 地理学报,2006,61(5):519~526.
- [16] 吴 涛,袁 鹏,戴 露等. 西藏拉萨河径流预测方法研究. 水利科技与经济,2005,11(2): 77~79.
- [17] 宁爱凤,尹 观,刘天仇. 拉萨河地区的大气降水同位素分布特征. 矿物岩石,2000,20(3): 95~99.

- [18] 胡书银, 王建林. 西藏—江两河地区水资源及其开发利用. 国土与自然资源研究, 1999, 2: 16~18.
- [19] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征. 地理学报, 1999, 54(s): 157~164.
- [20] 王建林. 雅鲁藏布江及其支流中部流域地区水文特性分析. 水土保持通报, 1994, 14(2): 54~58.
- [21] 米德生, 谢自楚, 罗祥瑞 等. 中国冰川编目 XI, 恒河水系和印度河水系. 西安: 西安地图出版社, 2002, 1~572.
- [22] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984.
- [23] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏气候. 北京: 科学出版社, 1984.
- [24] 董光荣, 李 森, 董玉祥 等. 西藏“一江两河”中部流域土地沙漠化防治规划研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1996, 1~161.
- [25] Mann H B. Non-parametric tests against trend. *Econometric*, 1945, 13: 245~259.
- [26] Kendall M G. Rank Correlation Measures. London: Charles Griffin, 1975.
- [27] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 1982, 18: 107~121.
- [28] Donald H Burn, Mohamed A Hag Elnur. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 2002, 55: 107~122.
- [29] Omar I Abdul Aziz, Donald H Burn. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin. *Journal of Hydrology*, 2006, 319: 282~294.
- [30] Sirois Allan. A brief and biased overview of time series analysis on how to find that evasive trend. In WMO Report No.133: WMO/EMEP Workshop on Advanced Statistical Methods and Their Application to Air Quality Datasets 1998.
- [31] Pettitt A N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 1979, 28 (2): 126~135.
- [32] Pettitt A N. A simple cumulative sum type statistic for the change-point problem with zero-one observations. *Biometrika* 1980, 67: 79~84.
- [33] Pettitt A N. Some results on estimating a change-point using nonparametric type statistics. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 1980b, 11: 261~272.
- [34] Rowan Fealy, John Sweeney. Detection of a Possible Change Point in Atmospheric Variability in the North Atlantic and Its Effect on Scandinavian Glacier Mass Balance. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 1819~1833.
- [35] 符淙斌, 王 强. 气候突变的定义和检测方法. *大气科学*, 1992, 16(4): 482~493.
- [36] Perreault L, Haché M, Slivitzky M, Bobée B. Detection of changes in precipitation and runoff over eastern Canada and U.S. using a Bayesian approach, 1999, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment (SERRA)*, 13(3): 201~216.
- [37] Ye Duzheng, Yan Zhongwei. Climatic jumps in the history. *Climatic Variability*. China Meteorological Press, Beijing, 1993, 3~14.
- [38] 严中伟, 季劲均, 叶笃正. 60 年代北半球夏季气候跃变 I——降水和温度变化. *中国科学(B)*, 1990, (1): 97~103.
- [39] 汤懋仓, 白重璠, 冯 松 等. 本世纪青藏高原气候的三次突变及与天文因素的相关. *高原气象*, 1998, 17(3): 250~257.
- [40] 赖祖铭. 气候变化对青藏高原大江河径流的影响. *冰川冻土*, 1996, 18(s): 314~320.
- [41] 杨续超, 张德铨, 张 玮 等. 珠穆朗玛峰地区近 34 年来气候变化. *地理学报*, 2006, 61(7): 687~696.
- [42] 丁永建, 叶佰生, 刘时银. 祁连山中部地区 40a 来气候变化及其对径流的影响. *冰川冻土*, 2000, 22(3): 193~199.
- [43] Calder. Land Use Impacts on Water Resources. Land-Water Linkages in Rural Watersheds Electronic Workshop, 18 Sept. ~27 Oct. FAO, 2000.
- [44] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982, 55: 3~23.
- [45] 陈军锋, 李秀彬, 张 明. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2004, 34(7): 668~674.
- [46] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨. *地理科学进展*, 2005, 24(3): 25~33.

Trend Analysis of the Runoff Variation in Lhasa River Basin in Tibetan Plateau during the Last 50 Years

LIN Xuedong^{1,2}, ZHANG Yili², YAO Zhijun², GONG Tongliang^{3,4}, WANG Hong⁵, LIU Linshan²

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. Tibet Hydroelectric Investigation, Designed Research Institute, Lhasa 850000, China;

4. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;

5. Tibet Hydrographic and Water Resources Survey Bureau, Lhasa 850000, China)

Abstract: Taking the Lhasa River Basin above Lhasa hydrological station in Tibetan plateau as a study objective, the characteristics of the annual and monthly mean runoff in 1956–2003 were analyzed, which were based on the hydro-data of the two hydrological stations (Lhasa and Tangga) and the meteorological data of the three meteorological stations (Damxung, Lhasa and Tangga). The trends and the change-points of runoff and climate from 1956 to 2003 were detected by using the nonparametric Mann–Kendall test and Pettitt–Mann–Whitney change-point statistics. The correlations between the runoff and climate change were analyzed by using multiple linear regression. The major results could be summarized as follows: (1) The annual mean runoff in 1956~2003 is characterized by a great fluctuation and a positive trend with two change-points (around 1970 and the early 1980s), after which the runoff tended to increase and was increasing intensively in the last 20 years. Besides the annual mean runoff, the monthly mean runoff with a positive trend is in winter half year (from November to April) and summer half year (May, July and September). (2) The trends of the climate change in the study-area are generally consistent with the trend of the runoff, but the leading climate factors which aroused the runoff variation are distinct. Precipitation is the dominant factor influencing the annual and monthly mean runoff in summer half year, while temperature is the primary factor in winter.

Keywords: Lhasa River Basin; trend of runoff variation; Mann–Kendall trend analysis; Pettitt change-point test; multiple linear regressions

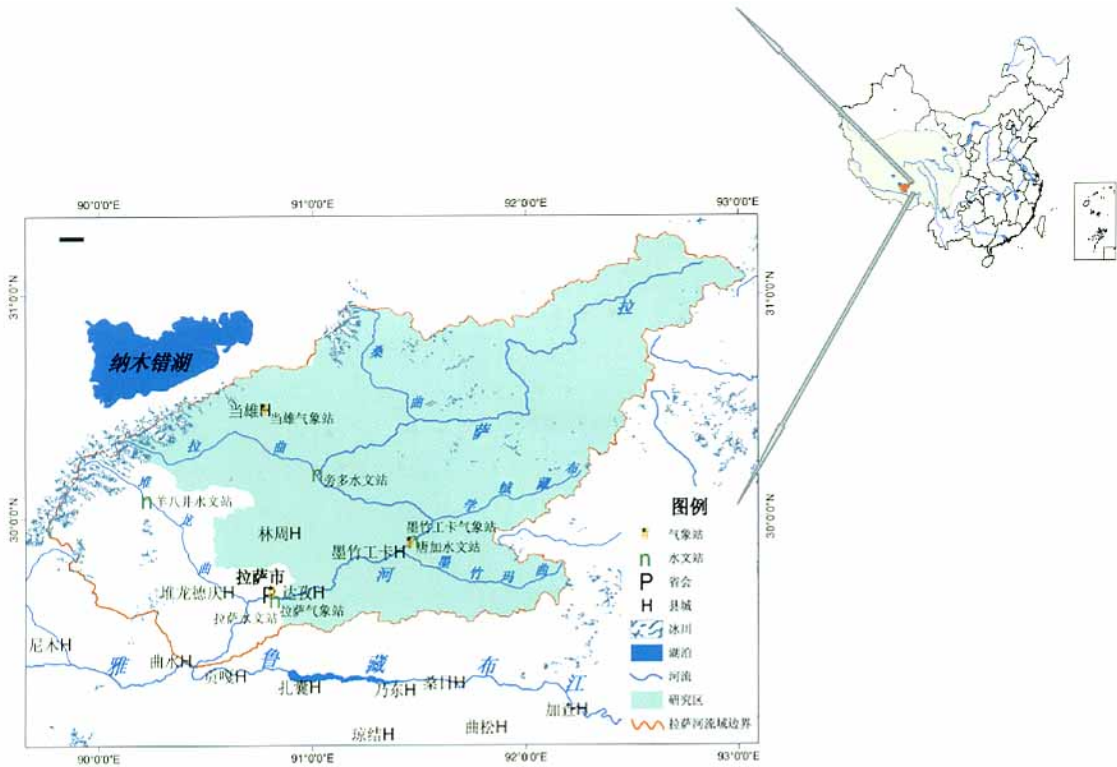


图 1 拉萨河流域与研究区示意图

Fig.1 Location of the Lhasa River Basin and Study Area in Tibetan Plateau, China

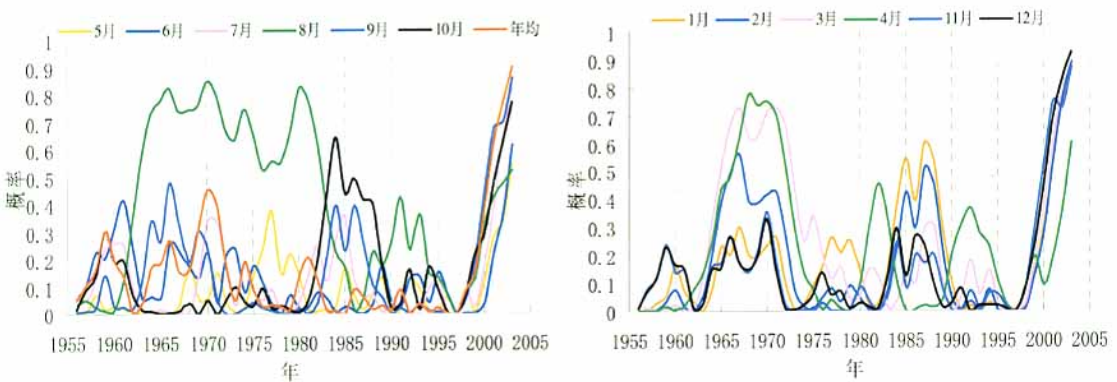


图 2 拉萨河（拉萨水文站以上）流域月均与年均径流 Pettitt 检验曲线

Fig.3 Curves of the mean runoff (annual and monthly) of the Lhasa River Basin (upper reach of the Lhasa hydrological station) with Pettitt test