

龙川江上游径流量变化及其对气候变化的响应

李 澜, 丁文荣

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650092)

摘 要:基于 1970—2012 年龙川江上游小河口水文站的径流资料和楚雄的气象资料,运用 M-K 法、相关系数法、累积距平法等方法,分析了龙川江上游径流量、降水量和气温的年内、年际和年代际的变化以及径流量对气候变化的响应。结果表明:龙川江上游径流量年内分配极不均,在 1994 年后渐趋均匀,年径流量呈不显著的波动下降趋势,而且径流量在 70、80 年代和 2010—2012 年偏枯,90 和 00 年代偏丰;年平均气温和年降水量都呈上升趋势,但后者的趋势不明显;年降水量对年径流量的影响很明显,而年平均气温对径流量的影响较小,四个季节中春季和秋季的径流量受降雨量变化的影响较大,降水量和气温的变化对夏季径流的影响都较为明显,而冬季相反。总之,不同季节的径流量对不同气候因素的响应是不同的。

关键词:龙川江上游;径流量;气候变化;响应

中图分类号:P339

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0083-06

Runoff Variation and Its Response to Climate Change in the Upstream of Longchuanjiang River

LI Lan, DING Wenrong

(College of Tourism and Geographic Science, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract:Based on the hydrologic data of Xiaohékou, the upstream of Longchuanjiang River, and the meteorological data of Chuxiong from 1970 to 2012, we used the methods of accumulative anomalies, Mann-Kendall and correlation coefficient to analyze the variation of inner-annual, inter-annual and inter-decadal for the runoff of the upstream of Longchuanjiang River, precipitation, the runoff and its response to climatic change. The results indicated that: (1) the annual runoff distributed unevenly, and it gradually become even, and annual runoff showed a wavelike decrease, but it wasn't obvious, and runoff volume was less than normal years in 1970s, 1980s and the the period from 2010 to 2012. The runoff volume in 1990s and 2000s was more than normal years; (2) temperature and annual runoff had showed a wavelike increase, but the latter was indistinctive; (3) annual precipitation effects on annual runoff was obvious, but the annual average temperature had less effect on runoff, precipitation of spring and autumn had larger effect on runoff, influences of precipitation, and temperature on runoff were obvious in summer, but were just opposite in the winter. In summary, responses of runoff in different seasons to different climate factors are different.

Keywords:upstream of Longchuanjiang River; runoff; climatic change; response

水循环是由多个环节组成的自然过程,其中降水、蒸发和径流是水循环过程中最主要的三个环节,这三者构成的水循环决定着全球的水量平衡,也决定着一个地区的水资源总量。水循环具有调节地球各圈层之间能量的作用,是气候变化的重要影响因素,同时气候变化也对水循环的各个环节具有重要的影响,尤其是对降水、蒸发和径流等环节。

气候的变化主要体现在气温和降水这两大因子,

而气候变化对径流的影响也主要体现在这两个方面,而且气温和降水都在某种程度上影响径流量的变化^[1-3]。在以冰川冰雪融水补给为主的地区气温的影响是非常显著的^[4-5],例如在青藏高原地区、新疆地区和中亚地区等。但很多研究表明降水的变化对径流的影响要比气温的影响要大,降水对径流量起主导作用^[6-8],其中夏季降水及其变化的影响突出^[9-10],而研究表明在西南的大部分地区径流对气温的响应相对

不显著^[11]。龙川江为金沙江南岸一级支流,发源于楚雄彝族自治州的南华县天子庙坡东侧,由西向东流,在元谋北部的江边乡汇入金沙江。龙川江流域不仅是楚雄州经济、文化、政治中心,也是滇中经济区重要组成部分,还是长江上游重要的产水区^[12]。目前对龙川江流域已经进行了多方面的研究,但研究的范围基本上都是整个区域^[13-15],对于龙川江上游的研究还很少,目前只有文安邦、张信宝等对上游泥沙输移比进行研究^[16]。由于龙川江上游是该流域主要的降水区,同时也是主要的产流区,本研究对于龙川江流域水资源的合理使用具有重要意义。

1 研究区概况

龙川江上游指的是小河口水文站以上地区,流经沙桥镇、南华县和楚雄市,流域面积为 1 788 km²,上游河段总长 96 km,河床比降 3‰^[16]。龙川江上游地区地形起伏较大,山高坡陡,河床切割较深。属于低纬度高原季风气候,气候类型为亚热带季风气候,深受南亚季风的影响,年平均气温为 16.17℃,年平均降水 861 mm。

2 资料与方法

本文所用资料为 1970—2012 年龙川江流域内的楚雄气象站的逐月气温和降水量数据,以及小河口水文站的逐月径流量数据,均来自于云南省水资源局。运用 Mann-Kendall 法分析径流量、降水量和气温的变化趋势^[3,7]。运用累积距平法^[17]和相关系数法分析径流量与气候因子关系及其响应。具体的方法:

(1) 非参数 Man-Kendall 趋势检验。

定义检验统计量 S :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (1)$$

式中:sgn()为符号函数,当 $x_k - x_i$ 小于、等于或大于 0 时,sgn($x_k - x_i$)分别为 -1, 0 或 1; M-K 统计量公式 S 大于、等于或小于 0 时分别为:

$$\begin{cases} Z = \frac{s-1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S > 0 \\ Z = 0 & S = 0 \\ Z = \frac{s+1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Z 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势, Z 的绝对值在大于等于 1.96 时,表示通过了信度 99.5% 的显著性检验。

(2) 非参数 Mann-Kendall 法突变检测。

对于具有 n 个样本量的时间序列,构造一秩序列:

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

$$r_i = \begin{cases} +1, & x_i - y_j \\ 0, & x_i - y_j \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (4)$$

式中: S_k 表示第 i 样本 $x_i - x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的累计数。在时间序列随机独立的假定下, S_k 的均值和方差分别为:

$$E(S_k) = \frac{k(k+1)}{4} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (6)$$

定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (7)$$

式中: $UF_1 = 0$ 。给定显著性水平 α ,若 $|UF_k| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。将此方法引用到反序列计算,同时使 $UB_k = -UF_k$ ($k=n, n-i, \dots, 1$),式中 $UB_1 = 0$ 。

(3) 累积距平法。

$$CA_i = \sum_{j=1}^i (x_i - \bar{x}) \quad (j \leq n, n \text{ 为序列长度}) \quad (8)$$

式中: CA_i 为第一年至第 j 年的累积距平; \bar{x} 为平均值。 CA_i 的正负极值点可能出现突变,对序列提取信号最强的几个极点,且不从首尾各四年处提取。

3 结果与分析

3.1 龙川江上游径流量的变化特征

3.1.1 月平均径流量 由于龙川江上游径流的补给主要来自降水,而其气候又受南亚季风的影响,干湿季分明,导致龙川江上游的径流量年内分配极不均匀。径流量主要集中在每年的 6 至 10 月(图 1),此时的径流量占全年的 81.06%。而每年的 1—5 月和 11—12 月的径流量只占全年的 18.94%。因此龙川江上游径流量集中分布在夏半年,每年 6 至 10 月为汛期。此外,龙川江上游的月径流量在分别在 1984 年和 2002 年前后发生转变,在 1984 年以前月径流量不断下降,之后一直处于上升状态,而在 2002 年以后又转为下降。而且在 1984 年前后年内径流量分布曲线,由以双峰曲线为主转变为以单峰曲线为主,但在 2010—2012 年波峰不明显。

总的来说,汛期径流量占全年总径流量的百分比是波动起伏的,而且在 1994 年前后汛期径流量占全年总径流量的百分比趋势有所改变(图 2)。在 1994 年以前汛期径流量占全年的百分比处于上升趋势,汛期径流量曾占到全年的 93%,年内分配越来越不均匀。1994 年以后汛期径流量占全年的百分比呈现出明显

的下降趋势($Z=-2.01$,通过了 0.05 的显著性检验),即 1994 年以后龙川江上游径流量年内分配渐趋均匀。

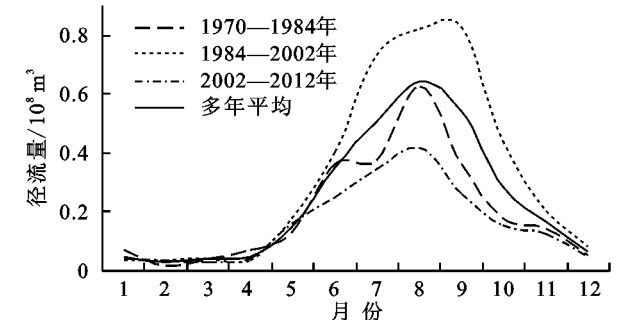


图 1 月平均径流量分布

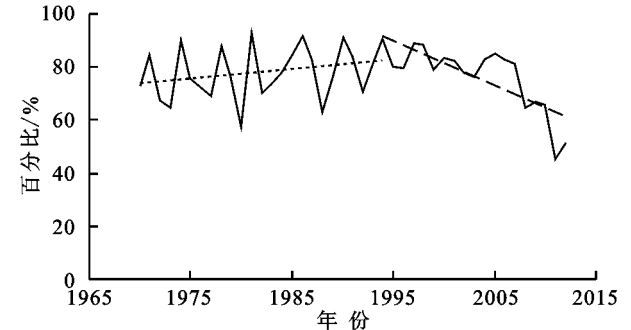


图 2 汛期径流量占年径流量的百分比

从年内季节分布来说,径流量主要集中在夏秋两季,分别占全年径流量的 52.33%和 34.52%,而冬季径流量占全年的百分比最小。而且在各年代的径流量变化中,夏季径流量变化最大,占总变化量的百分比也最大,其次是秋季,冬季最小(表 1)。因此夏季径流量是年径流量变化的主要部分,冬季径流量对年径流的影响最小。

表 1 各季节径流量变化量占径流总变化量的百分比

	%			
时间	春季	夏季	秋季	冬季
70s—80s	6.09	70.67	16.47	6.76
80s—90s	2.02	68.09	27.02	2.88
90s—00s	13.97	34.03	51.19	0.82
2010—2012 年	8.21	56.48	31.36	3.95

3.1.2 年径流量 在 1970—2012 年期间,龙川江上游径流量年际波动较大,径流量变差系数为 0.62。龙川江上游径流量在近 40 多年里经历了 3 个阶段(图 3):1970—1984 年期间年径流量下降;1984—2002 年期间年径流量波动上升;2002—2012 年下降。通过非参数 M-K 单调趋势检验计算得到的结果(表 2)也与年径流量 5 a 滑动曲线所呈现的阶段趋势一致,但均未通过显著性检验。

通过非参数 M-K 突变检测计算表明,在近 40 a 里,年径流量只在 1980—1984 年和 2002 年显著变化(前者下降,后者上升)(图 4)。并且年径流量分别在 1975 年、1985 年和 2009 年发生突变。非参数 M-K

单调趋势检验计算得 $Z=-1.84$,但未通过 0.05 的显著性检验,即近 40 多年来龙川江上游年径流量呈下降趋势,但趋势不明显。

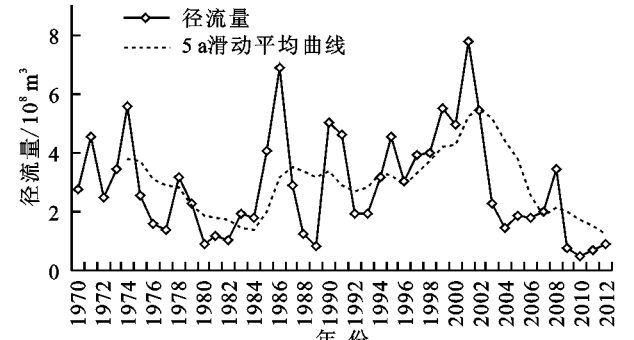


图 3 年径流分布图

表 2 龙川江上游年径流量 M-K 单调趋势检验

M-K 单调趋势检验	1970—2012	1970—1984	1984—2002	2002—2012
Z	-1.8	-1.05	1.26	-0.54

注: $|Z| \geq 1.96$ 表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平, * 表示通过显著性检验。

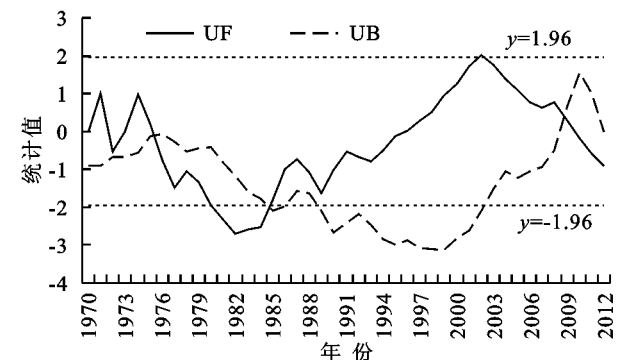


图 4 年径流量 M-K 突变检测

3.1.3 年代际径流量 龙川江上游各年代径流量均有不同,差别较大(表 3)。70 年代径流量偏枯,80 年代径流量最小,90 年代径流量上升幅度较大,是径流量最大。00 年代的径流量有所减少,而 2010—2012 年三年的平均年径流量比多年平均年径流量小很多。总的来说,龙川江上游 70,80 年代和 2010—2012 年径流量偏枯,90 和 00 年代径流量偏丰。

表 3 龙川江上游各年代径流量

项目	70 年代	80 年代	90 年代	00 年代	2010—2012 年
径流量/亿 m^3	29.24	22.38	37.69	31.99	2.08

3.2 龙川江上游气候变化特征

3.2.1 气温 龙川江上游地区地处亚热带季风气候区,全年温和,年温差较小。在 1970—2012 年期间龙川江上游多年平均气温 16.17℃,年内最大温差为 3.33℃,最高温出现在 6 月,最低温出现在 1 月。而且各年代各月平均气温具有上升的趋势,以冬季变化最为明显(图 5)。

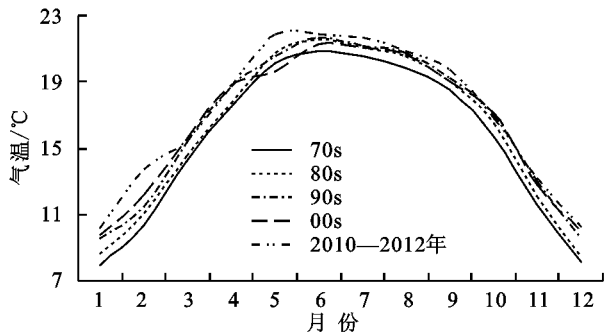


图5 年内月平均气温分布

从年平均气温的非参数 M-K 单调趋势检验 $Z=5.369$, 通过了 0.05 的显著性检验, 即近 40 多年来龙川江上游气温显著上升。年代际平均气温也呈现出上升趋势, 并且升高 1.61°C 。对龙川江上游气温的非参数 M-K 突变检测得出, 气温在 1986 年出现突变, 并且在 1986 年之后气温显著升高(图 6)。综上所述, 在 1970—2012 年期间龙川江上游年际气温显著升高。

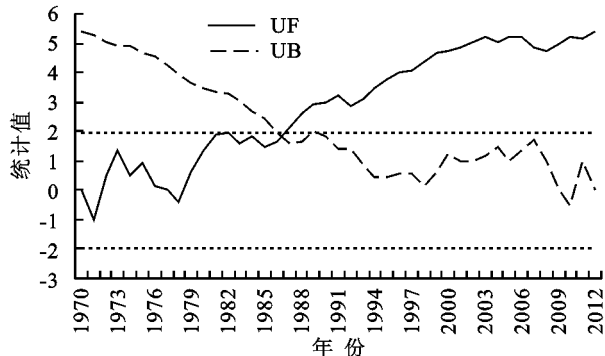


图6 气温 M-K 突变检测曲线

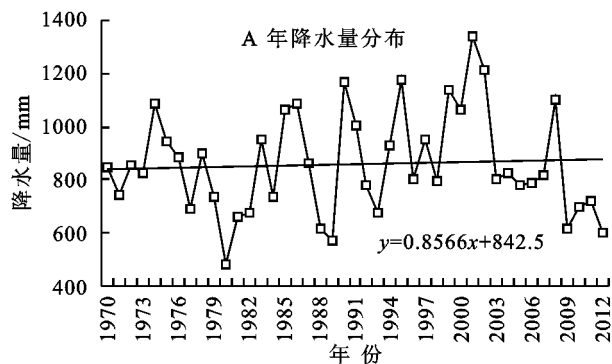


图8 1970—2012 年龙川江上游年降水量变化曲线

表4 1970—2012 年龙川江上游各年代降水量分布

项目	70s	80s	90s	00s	2010—2012 年
降水量/mm	8514.3	7723.9	9424	9355.7	2020

3.3 龙川江上游径流量与气候的关系

3.3.1 径流与降雨的关系 年内各月降水量与径流量的相关系数为 0.928, 为非常显著正相关关系。径流量与降水量都集中于 6—10 月, 汛期与雨季相重合, 其他月份降水量和径流量都相对很小。降水量和径流量的距平的最大值分别出现在 7 月和 8 月, 即径

3.2.2 降水 由于受亚热带季风气候的影响龙川江上游地区干湿季分明, 降水年内分配极不均匀, 降水量最大值出现在 7 月。降水量主要分布在每年 6—10 月(图 7), 即汛期, 此时的降水量占全年降水量的 88.3%。而且 1984 年以后汛期降水量占全年降水量的百分比几乎都在 85% 以上, 年内降水量更加分布不均。

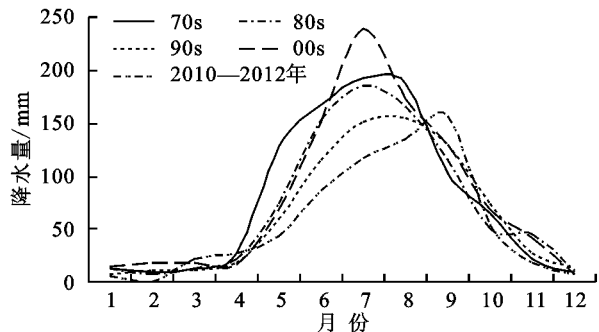
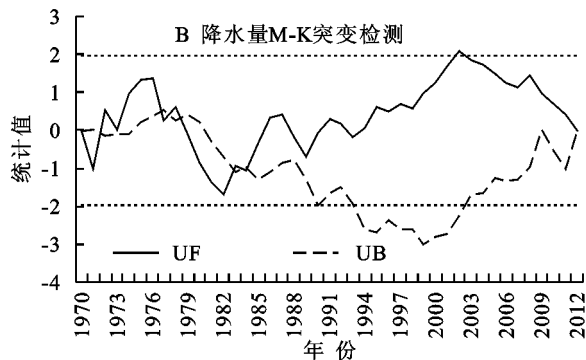


图7 年内月平均降水量分布

从年际来看, 龙川江上游年降水量波动很大, 最大相差 857 mm。从百分比几乎都在 85% 以上, 年内降水量更加分布不均。趋势线可以看出, 年降水量呈现幅度很小的上升(图 8A)。但非参数 M-K 单调趋势检验得出 $Z=0$, 即年降水量变化趋势不明显。年降水量 M-K 突变检测表明年降水量在 1972 年, 1977 年和 1984 年左右发生突变, 而且只在 2002 年发生明显变化(图 8B)。另外, 龙川江上游降水量在 80 年代和 2010—2012 年降水较少, 90, 00 年代降水量丰沛(表 4)。综上所述, 1970—2012 年龙川江上游年降水量呈上升趋势, 且很不明显。



流量的波峰出现的时间要比降水量的推迟一个月, 这是因为降水需要经过下渗、填洼等过程才能转化为径流。

从年际降水量与径流量的关系来讲, 除了个别年份年降水量与年径流量的变化趋势相反, 大多数年份的年降水量与年径流量都呈显著地正相关(图 9), 即降水量增加, 径流量增加; 反之亦然, 而且两者的相关系数为 0.868。从年代际来看, 年代际的降水量与径流量都在 80 年代和 2010—2012 年出现最小值, 90

年代出现最大值。从汛期与非汛期来讲,径流量与年降水量、汛期降水量、非汛期降水量都为正相关关系,而且通过了显著性检验(表 5)。所以综上所述,降水量和径流量的正相关关系显著。

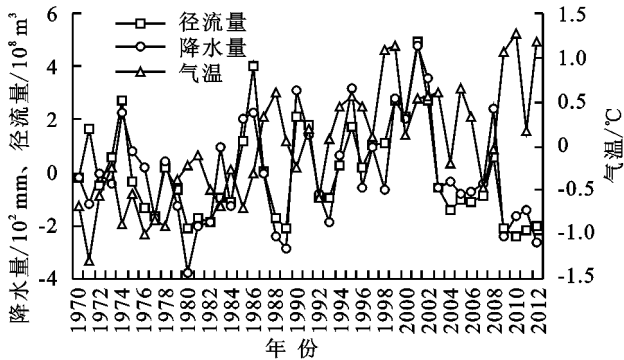


图 9 年际气温、降水量与径流量距平

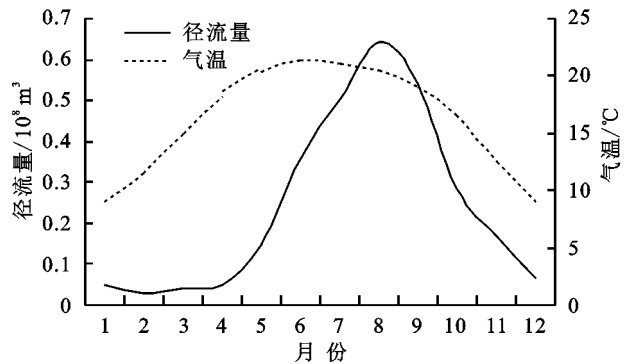


图 10 月气温径流量的年内分布

表 5 龙川江上游径流量与降水量、气温的相关系数			
项目	汛期径流量	非汛期径流量	年径流量
年降水量	0.839**	0.67**	0.868**
汛期降水量	0.87**	0.59**	0.881**
非汛期降水量	0.421**	0.556**	0.475**
年平均气温	-0.033	0.034	-0.014
汛期平均气温	-0.126	-0.028	-0.108
非汛期平均气温	0.010	0.057	0.270

注:相关系数绝对值 ≥ 0.38 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平,*表示通过显著性检验。

3.3.2 径流与气温的关系 月平均气温与径流量的相关系数为 0.69,表现出较为显著地正相关性。而且两者的年内分布都是单峰曲线,趋势基本一致,但径流量最大值比气温的推迟了两个月(图 10)。从年平均气温与径流量来看,两者的相关系数只有-0.014 3,未能通过 $\alpha=0.05$ 的相关性检验,而且两者的变化趋势相差很大,因此年平均气温与年径流量的相关性不明显。年代际平均气温与径流量都在 80—90 年代上升,90—00 年代略微下降,而且它们的相关系数为-0.486 9,所以年代际平均气温与径流量具有较为显著的负相关。从汛期与非汛期来说,汛期平均气温与径流量的相关系数都

为负值,而非汛期气温相反,但均未通过显著性检验(表 5)。综上所述,年内和年代际的平均气温与径流量的相关性较为显著,但年际的相关性不明显。

3.4 龙川江上游径流量对气候变化的响应

径流量与气候之间具有相当密切的关系,两者相互联系相互影响,气候的变化影响径流量的变化,在某种程度上来说径流量的变化又是气候变化的一种表现,即径流量的变化是气候变化的一种响应。降水和气温是气候最主要的两个因子,降水量和气温的变化都会直接或间接的影响径流量的变化。

通过对比可见,年径流量和降水量的变化过程几乎一致,发生突变的年份也相同(图 11),而且两者的相关系数为 0.868,年降水量的变化对年径流的影响很大。而年径流量与年平均气温的变化过程大概一致,但在某些阶段的趋势相差较大,例如在 1984—1993 年和 2002—2012 年。

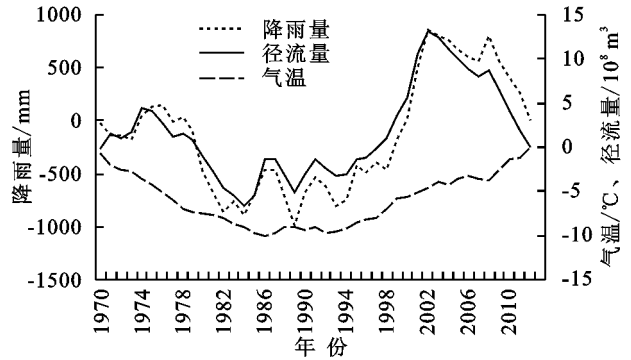


图 11 龙川江上游年径流量、年降水量和年平均气温累积距平

从四季来讲,除了冬季以外,其他季节的径流量和降水量的变化过程基本一致(图 12A 和 12B),而且径流量与降水量的相关系数都通过了 0.01 的显著性检验,所以降水量的变化对春夏秋三个季节的径流量影响很明显,其中对夏季的影响最明显。虽然夏秋冬三个季节的径流量和气温的变化过程大概一致,但比径流量与降水量的一致性差,一致性最差的是春季(图 12C 和 12D)。所以气温的变化对夏秋冬三季的径流量的影响较小,对春季的影响最小。

从季节径流与同期或者前期的降水量、气温的相关关系来看,春夏秋三个季节的径流量与同期的降水量正相关显著,而与同期气温为负相关(表 6),说明气温升高会使蒸发增大,导致径流量减少,而且夏季气温与同期径流量为显著负相关。但春秋两季的前期气温与径流量为正相关,这可能是气温升高促进了水文循环,使得降水量增加的原因^[1]。同时除春季以外,其他三个季节的径流量都与前期降水量呈正相关,而且夏秋为显著正相关,这是因为春季的降水量集中在后期,夏季和秋季又是雨季,而且降水形成径

流需要经过一定的过程与时间。而四季中冬季径流量与同期和前期的降水、气温的相关性系数都没有通过显著性检验。因此,春季和秋季的径流量受降雨量

变化的影响较大,降水量和气温的变化对夏季径流的影响都较为明显,而冬季相反。总之,不同季节的径流量对不同的气候因素的响应是不同的。

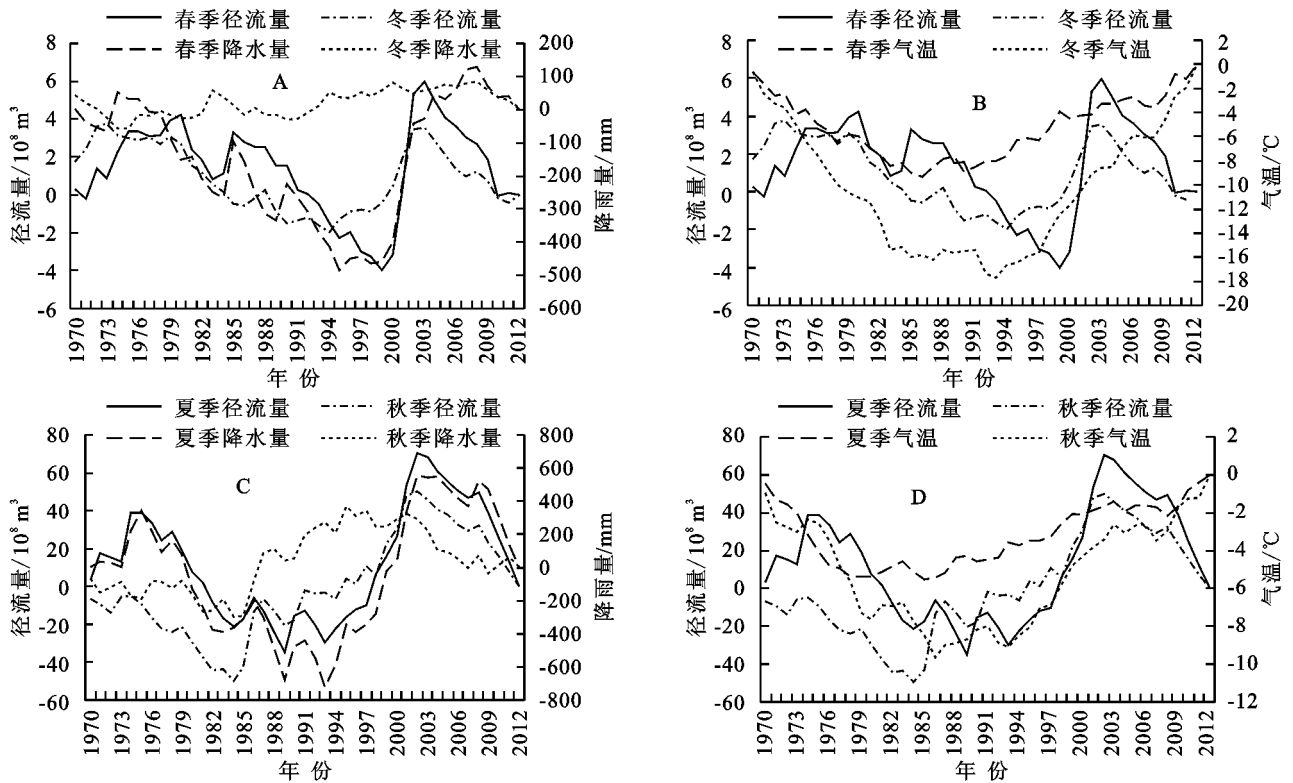


图 12 龙川江上游四季径流量、降水量和气温累积距平

表 6 龙川江上游季节径流量与同期、前期年降水量、年平均气温的相关系数

径流量	同期降水量	同期平均气温	前期降水量	前期平均气温
春季	0.648 **	-0.174	-0.265	0.025
夏季	0.868 **	-0.326 *	0.598 **	-0.256
秋季	0.618 **	-0.008	0.593 **	0.036
冬季	-0.011	0.074	0.227	-0.071

注: * 和 * 分别表示通过 0.01, 0.05 显著性检验。

4 结论

通过对龙川江上游 43 a 的径流量、降水量和气温数据的分析表明: 由于受亚热带季风气候的影响, 龙川江上游径流的年内分配极其不均, 但是在 1994 年以后有所变化, 而且夏季径流量对年径流的影响最大; 年径流量呈不显著的下降趋势, 并分为 3 个阶段: 1970—1984 年(下降), 1984—2002 年(波动上升)和 2002—2012 年(下降); 气温升高趋势很明显, 而且在冬季特别显著; 虽然降水量也呈上升趋势, 但很不显著, 而且年内降水量分布极不均匀; 降水量与径流量具有显著正相关关系, 虽然年内和年代际平均气温与径流量具有显著正相关, 但年均温与年径流量之间不存在显著关系; 相应的, 径流量对降水量的响应较为明显, 而对气温的响应则不明显, 其中夏季径流量对降水量和气温的响应都很显著, 而冬季相反。

在龙川江上游, 气温和降水量都在一定程度上影响着径流量的变化, 降水量的影响较为明显, 而气温则相反。这个结果与孙悦、陈玲飞等人的研究结论是一致的, 但径流量对气候的响应率还有待进一步研究。而且现在人类活动对自然环境的影响越来越大, 径流量也不可避免的受其影响, 在以后的研究中要注重人类活动的影响, 并将其纳入到相应的研究中。

参考文献:

- [1] 孙悦, 李栋梁, 朱拥军. 渭河径流变化及其对气候变化与人类活动的响应研究进展[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 396-405.
- [2] 鲁凤, 徐建华, 陈亚宁, 等. 叶尔羌河源流区近 50 年来年径流变化及其对气候变化的响应[J]. 第四纪研究, 2010(1): 152-158.
- [3] 许海丽, 潘云, 宫辉力, 等. 1959—2000 年妫水河流域气候变化与水文响应分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 43-47.
- [4] Chikita K A, Wada T, Kudo I, et al. The Intra-Annual Variability of Discharge, Sediment Load and Chemical Flux from the Monitoring: The Yukon River, Alaska [J]. Journal of Water Resource and Protection, 2012, 4(4): 173-179.

(下转第 93 页)

参考文献:

- [1] 孙世国. 露天煤矿开采对生态环境的影响及其亟待解决的问题[J]. 煤矿环境保护, 2000, 14(2): 53-54.
- [2] 王莉, 张和生. 国内外矿区土地复垦研究进展[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 294-300.
- [3] 薛玲, 李青丰. 乔灌草生态模式在准格尔煤田植被恢复中研究[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 1995, 26(2): 202-208.
- [4] 李文革, 刘志坚, 谭周进, 等. 土壤酶功能的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2007(6): 34-36.
- [5] Jimenez M D L P, Horra A D L, Pruzzo L, et al. Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 302-306.
- [6] Yao X, Min H, Lü Z, et al. Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration[J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(2): 120-126.
- [7] 陈红跃, 徐英宝. 马尾松、黎蒴栲混交林土壤肥力水平的研究[J]. 华南农业大学学报, 1992, 13(4): 162-169.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 2000.
- [9] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [10] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 93-96.
- [11] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 等. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 97-105.
- [12] Bradshaw A. Restoration of mined lands-using natural processes[J]. Ecological Engineering, 1997, 8(4): 255-269.
- [13] Iost S, Landgraf D, Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province PR China[J]. Geoderma, 2007, 142(3): 245-250.
- [14] 薛立, 陈红跃, 邱立刚. 湿地松混交林地土壤养分、微生物和酶活性的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 157-159.
- [15] 陈刚才, 甘露. 土壤中元素磷的地球化学[J]. 地质地球化学, 2001, 29(2): 78-81.
- [16] 邹慧, 毕银丽, 金晶晶, 等. 采煤沉陷对植被土壤容重和水分入渗规律的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(03): 125-128.
- [17] 陈建宇. 杉木林下植被生物量与土壤容重关系的研究[J]. 福建林业科技, 2000, 27(4): 56-60.
- [18] 余娜, 刘济明, 张超, 等. 不同沙生植被土壤酶活性分异特征研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 77-81.
- [19] 张刘东, 李传荣, 孙明高, 等. 沿海破坏山体周边不同植被恢复模式的土壤酶活性[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 112-116.
- [20] 赫晓慧, 常庆瑞, 温仲明, 等. 农牧交错带不同人工植被下荒漠化土壤肥力的变化[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 915-919.
- [21] Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. Applied Soil Ecology, 2001, 18(3): 229-238.
- [22] 何钢, 袁德义, 刘贤桂. 油茶低产林土壤改良对土壤养分及土壤酶活的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(3): 76-80.
- [23] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646.
- [24] 马佳慧, 张兴昌, 邱莉萍. 黑岱沟矿区排土场不同复垦方式下土壤性质的研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 93-96.
- [5] 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[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 519-526.
- [6] 刘士余, 章俊霞, 罗志军, 等. 近 50 a 赣西北大坑小流域径流对降雨的响应[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 19-22.
- [7] 卓嘎, 建军, 边巴次仁. 1960—2004 年金沙江径流量特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 405-415.
- [8] 刘明春, 李玲萍, 史志娟, 等. 石羊河流域径流量分布特征及对气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 193-198.
- [9] 张一驰, 李宝林, 程维明, 等. 开都河流域径流对气候变化的响应研究[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 69-76.
- [10] 李卓仑, 王乃昂, 李育, 等. 近 50 a 来黑河出山径流对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 7-16.
- [11] 陈玲飞, 王红亚. 中国小流域径流对气候变化的敏感性分析[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 62-67.
- [12] 何进花, 丁文荣. 龙川江流域近 50 a 气温、降水及径流的变化趋势分析[J]. 大理学院学报, 2011, 10(4): 54-58.
- [13] 马平森, 顾世祥, 卯昌书, 等. 龙川江流域径流量变化趋势及水资源合理配置研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(5): 6-10.
- [14] 许志敏, 臧庆春. 龙川江流域年径流特性的地区综合分析[J]. 人民长江, 2011, 42(10): 73-76.
- [15] 丁文荣. 龙川江水资源对气候变化的敏感性和适应性分析[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 15-18.
- [16] 文安邦, 张信宝, 王玉宽, 等. 云贵高原区龙川江上游泥沙输移比研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 139-141.
- [17] 李运刚, 何大明, 叶长青. 云南红河流域径流的时空分布变化规律[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 41-49.

(上接第 88 页)