长江源区沱沱河流域 1961—2011 年径流特征及其对降水的滞后效应

罗 玉[1,2]，秦宁生[1,2]，周 斌[2]，李金建[3]，王春学[2]，刘 佳[2]，庞轶舒[2]

(1. 中国气象局 成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室，四川 成都 610072；
2. 四川省气候中心，四川 成都 610072；3. 成都信息工程大学，四川 成都 610225)

摘 要：[目的] 分析 51 a 来长江源区沱沱河流域径流量在降水的年代、年代际、季节等时间尺度上的变化，以及径流对降水的滞后效应，为流域水资源管理和利用提供理论依据。[方法] 利用 1961—2011 年长江源区沱沱河流域沱沱河水文站和气象站的径流量和降水数据，在此基础上结合累积距平、变差系数、集中度、集中期等统计方法开展分析研究。[结果] 沱沱河流域 51 a 来年际及四季径流量均呈增加趋势，其中年际、春季、夏季增加显著，气候倾向率分别为 1.00×10^8 m^3/10 a，6.00×10^6 m^3/10 a，6.30×10^7 m^3/10 a；径流量和降雨量主要集中在 5—10 月，尤其集中在 7 月下旬至 8 月中旬之间。径流量与降水之间存在极显著的相关性；径流对降水均具有滞后效应，多年平均滞后时间为 10 d 左右，且滞后天数随着时间的推移呈扩大趋势。[结论] 近 51 a 来研究区径流量和降水量的变化趋势均呈增加趋势，径流对降水具有 10 d 左右的滞后效应。

关键词：沱沱河；径流；降水；相关关系

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)02-0022-07 **中图分类号**：P333.6，TV121.2

文献参数：罗玉，秦宁生，周斌，等. 长江源区沱沱河流域 1961—2011 年径流特征及其对降水的滞后效应[J]. 水土保持通报，2019，39(2)：22-28. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.004；Luo Yu，Qin Ningsheng，Zhou Bin，et al. Runoff characteristics and hysteresis to precipitation in Tuotuo River basin in source region of Yangtze River during 1961—2011[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(2)：22-28.

Runoff Characteristics and Hysteresis to Precipitation in Tuotuo River Basin in Source Region of Yangtze River During 1961—2011

Luo Yu[1,2], Qin Ningsheng[1,2], Zhou Bin[2], Li Jinjian[3], Wang Chunxue[2], Liu Jia[2], Pang Yishu[2]

(1. *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan* 610072, *China*; 2. *Climate Center of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan* 610072, *China*; 3. *Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan* 610225, *China*)

Abstract: [Obejective] The variation of runoff in the Tuotuo River in the headwaters of the Yangtze River in the past 51 years under different time scales of precipitation, such as interannual, interdecadal and season, and also the lagging effect of runoff on precipitation were analyzed in order to provide a theoretical basis for the management and utilization of water resources in the basin. [Methods] This paper used the runoff and precipitation data of hydrological station and the meteorological station in Tuotuo River of the Yangtze River source region from 1961 to 2011, and combined the statistical methods such as cumulative anomaly, variation coefficient, concentration frequency and concentration period, to investigate the variations of runoff and precipitation at decadal, annual and seasonal time scales. The hysteresis effect of runoff to precipitation was also discussed. [Results] The annual and seasonal runoff of the Tuotuo River Basin in the past 51 years showed an increasing trend. The annual, spring and summer runoff increased significantly. The climatic tendency rates were 1.00×10^8 m^3/10 a, 6.00×10^6 m^3/10 a, 6.30×10^7 m^3/10 a, respectively. The runoff

收稿日期：2018-08-04 **修回日期**：2018-09-12

资助项目：四川省科技厅项目“若尔盖生态区历史温湿配置演变及其可能机制研究”(2019YJ0620)；国家自然科学基金项目“基于树木年轮的长江上游水系径流场重建及气候影响机制研究”(41772173)

第一作者：罗玉(1989—)，女(汉族)，四川省成都市人，硕士，工程师，主要从事气候变化与气候预测方面的研究。E-mail：lda2008891229@163.com。

通讯作者：秦宁生(1962—)，男(汉族)，河南省商丘市人，正高级高级工程师，主要从事青藏高原气候方面的研究。E-mail：qinns0515@163.com。

of the river was mainly concentrated in the period from May to October, especially from late July to mid-August. There was a significant correlation between runoff and precipitation. The runoff had a lagging effect on precipitation in most years, and the average lag time was about 10 d. The hysteresis period was observed being increased over the past time. [Conclusion] In the past 51 years, the trend of runoff and precipitation in the study area had increased, and the lag effect of runoff on precipitation was about 10 days.
Keywords: Tuotuo River basin; runoff; precipitation; relationship

IPCC 第 5 次报告指出,全球气候变暖的事实毋庸置疑,1880—2012 年全球平均气温已升高 0.85 ℃,全球变暖将导致海平面上升、冰盖消融、冰川退缩[1]。并且,随着全球变暖和人类活动的加剧,河川径流也发生了显著的时空变化,这不仅直接影响流域水资源的配置、利用和开发,同时还对区域资源环境和可持续发展产生了重要影响[2-4]。在全球变暖背景下,位于青藏高原腹地的长江源区其水资源也发生了变化。已有研究表明,21 世纪前,长江源区水资源表现为逐年递减趋势;而由于气温显著升高,降水明显增多[5],导致最近 10 a 水资源显著增加。沱沱河流域是长江源头的主要流域,位于唐古拉山珠峰拉丹冬雪山群的西南侧,海拔高度为 6 621 m,流域面积达 15 924 km^2[6]。沱沱河径流补给受到降水和冰雪融水的共同影响,20 世纪 60 年代,降水是雨季径流的主要补给源;70 年代,径流是近 40 a 来的最低值;自 80 年代以来,气温变暖,大量冰川融水补给河流,径流量显著增多[5,7]。本文基于实测径流及降水资料,对 51 a 来沱沱河流域径流的年际、年内变化特征进行分析,旨在揭示全球变暖背景下流域径流变化特征及由降水变化引起的水文效应,以期得到一些有意义的结论,为流域水资源管理和利用提供理论依据。

1　研究区域和资料

沱沱河流域(33°22′—35°12′N,89°48′—92°54′E)位于青海省的西南部青藏高原腹地,是长江的正源,流域面积 15 924 km^2。流域内最高海拔 6 468 m,最低海拔 4 489 m,南北均为高山、地形所封闭,属高空西风带控制区。气候较干寒,终年低温,流域内多年平均气温达−4.2 ℃,每年冻结期长达 7 个月。流域内降水较少,多年平均降水量 283.1 mm,且多集中在 7—9 月。流域多年平均径流量 26.2 m^3/s,年径流深 51.9 mm[6]。流域径流主要由降水和冰雪融水补给[5]。本文选取 1961—2011 年长江源区沱沱河流域水文站逐月逐年径流量资料;沱沱河气象站(33°57′N,92°37′E,海拔 4 533.1 m)1961—2011 年逐月降水量数据进行分析研究,将四季划分为 3—5 月(春季)、6—8 月(夏季)、9—11 月(秋季)、12 月到翌年 2 月(冬季);其中,5—10 月为汛期,11 月至翌年 4 月为非汛期;气候平均值采用 1981—2010 年的平均值。

2　研究方法

研究方法主要包括:累积距平法、变差系数法、集中度和集中期以及相关的数理统计方法。

2.1　集中期和集中度

借鉴年降水量年内分配向量法,采用集中期和集中度来研究流域径流(降水量)年内变化规律。把一年内所有月的径流量看作向量,月径流量的大小作为该月向量的长度,所处的月份作为径流量向量的方向,用圆周 360°作为 1 a 的天数 365 d,1—12 月每月的方位角 h 依次为 0,30°,60°,…,330°,将各月径流量以向量方式累加,最后,以各分量之和的合成量占年径流量在年内的比值表示年径流量集中程度,以 12 个月分量和比值的正切角度表示年径流量集中期,可以客观反映一年中最大径流量(降水量)的出现时间[8]。计算公式为:

$$R_x=\sum_{i=1}^{12}R_i\sin h \tag{1}$$

$$R_{year}=\sum_{i=1}^{12}R_i \tag{2}$$

$$\mathrm{RCD}=\sqrt{R_x^2+R_y^2}/R_{\mathrm{year}} \tag{3}$$

$$\mathrm{RCP}=\arctan(R_x/R_y) \tag{4}$$

式中:R_i——第 i 月的径流量;h——第 i 月的径流方位角;R_{year}——年径流量;R_x,R_y——X,Y 方向上的合成向量。关于集中期 RCP 与集中度 RCD 的详细计算过程可见参考文献[8—9]。

2.2　差积曲线

为了消除年径流量等要素的单位和量纲差异及 C_v 值的影响,本文采用标准化 $(K-1)/C_v$ 来表示径流量等要素的多年变化情况,其中 K 由 $Q_i/\bar{Q}Q$ 求得,Q_i 为第 i 年的径流量,$\bar{Q}$ 为年均径流量。为体现径流量的阶段性变化趋势,本研究还计算了差积曲线,其纵坐标为 $\sum(K-1)/C_v$。

3　结果与分析

3.1　沱沱河流域径流年际变化规律

1961—2011 年沱沱河流域径流的年际变化规律如图 1 所示。由图 1 可知,近 51 a 来,沱沱河流域径流量在 $2.80\times10^8\sim1.99\times10^9$ m^3 之间波动,多年平均值为 9.34×10^8 m^3,且径流量波动较强,表现为前 40 a 下降,近 10 a 显著上升,总体表现为增加趋势,

气候倾向率为 1.00×10^8 m^3/10 a，通过 0.01 的显著性检验水平。流域年径流量在 2002 年出现最大值，为 1.99×10^9 m^3，在 1979 年出现最小值，为 2.80×10^8 m^3（表 1）；绝对变化幅度为 1.70×10^9 m^3，相对变化幅度为 6.7。流域径流量变差系数为 0.45，可见沱沱河年际径流量波动较大[10]。从沱沱河流域径流量累积距平曲线图（图 1）还可以看出，近 51 a 来，沱沱河流域的径流量变化主要经历了 3 个阶段：1961—1967 年和 1999—2011 年累积距平明显上升阶段，径流量以增加为主，表明这两个阶段总体上丰水年年份多于枯水年，1968—1998 年累积距平呈显著下降趋势，径流量以减少为主，表明这 31 a 枯水年年份多于丰水年。

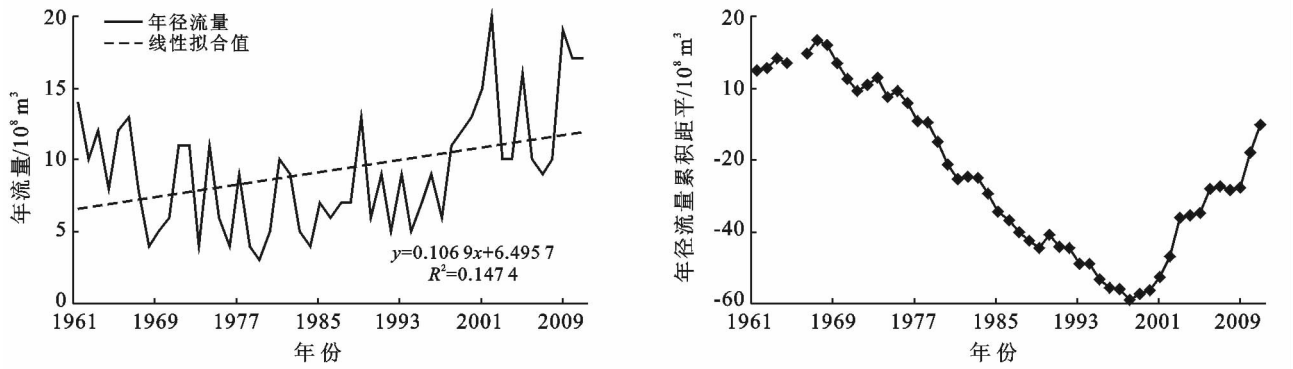


图 1 1961－2011 年沱沱河径流年际变化和累积距平曲线

表 1 1961－2011 年沱沱河流域径流年际变化特征

积水面积	多年平均量	最大水年径流量（2000 年）	最小水年径流量（1979 年）	年际极值比	变差系数 C_v
15 924 km^2	9.34×10^8 m^3	19.85×10^8 m^3	2.80×10^8 m^3	6.7	0.45

3.2 沱沱河流域径流年内分配变化规律

图 2 为沱沱河流域月径流量的年内分配情况。由图 2 可知，总体上，径流量在各个年代年内分配基本相似，均呈“单峰型”，流量在 1—2 月处于低值，3—4 月开始逐渐缓慢上升，5 月份开始急剧上升，在 7 月或 8 月径流量达到峰值，之后开始急剧减少，直至 12 月份达到最低值。

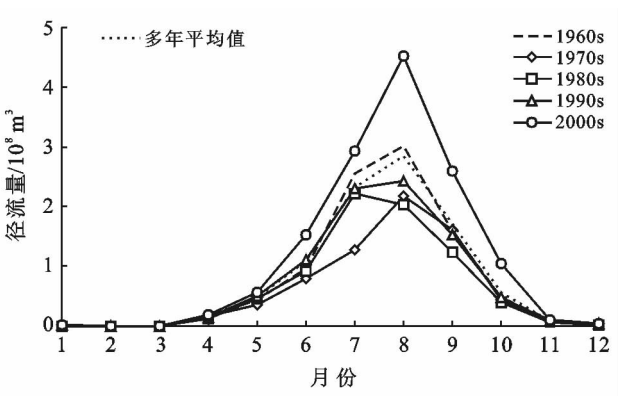


图 2 沱沱河径流年内分配特征

径流量在年内分配上，1—4 月和 11—12 月所占比例较小，主要集中在 5—10 月，季节上主要分配在夏、秋季，占年径流量的92.3%左右，且各个年代的径流也主要集中在这一时期（表 2）。就最大径流月份而言，20 世纪 60，70，90 年代，21 世纪初的 10 a 和多年平均最大径流均出现在 8 月，20 世纪 80 年代出现在 7 月，这主要与降水量在年内时间上的分配有关，与本区大气降水主要分布在 7 月份是相吻合的，在一定程度上蕴示着气候波动（大气降水）对河川径流的影响。

表 2 沱沱河流域汛期（5－10 月）径流年内分配特征

年代	汛期径流/10^8 m^3	年径流/10^8 m^3	汛期/年径流
1960s	9.0	9.4	96.5%
1970s	6.6	7.0	95.5%
1980s	7.2	7.5	96.7%
1990s	8.3	8.6	96.6%
2000s	13.2	13.5	97.2%
多年平均	9.0	9.3	96.7%

沱沱河流域各季节径流量波动性变化特征显著，从各季节线性趋势来看（图 3），春、夏、秋、冬四季径流量均呈增加趋势，气候倾向率分别为 6.00×10^6 m^3（$p<0.01$），6.30×10^7 m^3（$p<0.05$），2.10×10^7 m^3，2.62×10^8 m^3/10 a（$p>0.05$），且汛期和非汛期径流量同样均呈显著增加趋势（图略），气候倾向率分别为 8.90×10^7 m^3/10 a，4.10×10^7 m^3/10 a，均通过 0.01 显著性水平检验。春、夏、秋、冬、汛期、非汛期的平均径流量分别为 6.40×10^7 m^3，6.26×10^8 m^3，$2.39\times$

10^8 m^3,6.00×10^6 m^3,9.02×10^8 m^3,3.10×10^7 m^3,各自径流量占年径流量的百分比分别集中在 3.4%～21.8%,47.1%～80.1%,11.1%～44.5%,0.25%～1.2%,89.9%～97.7%,1.92%～7.16%,夏、秋季径流量所占年径流量比例达 58.8%以上,汛期径流量达89.9%以上,说明沱沱河流域径流量主要集中在夏、秋季、汛期,春、冬季、非汛期径流量较小。各季、汛期、非汛期变差系数分别为 0.36,0.45,0.55,0.33,0.43 和 0.50,表明夏、秋季、非汛期年际变化较大,冬季径流量较稳定。

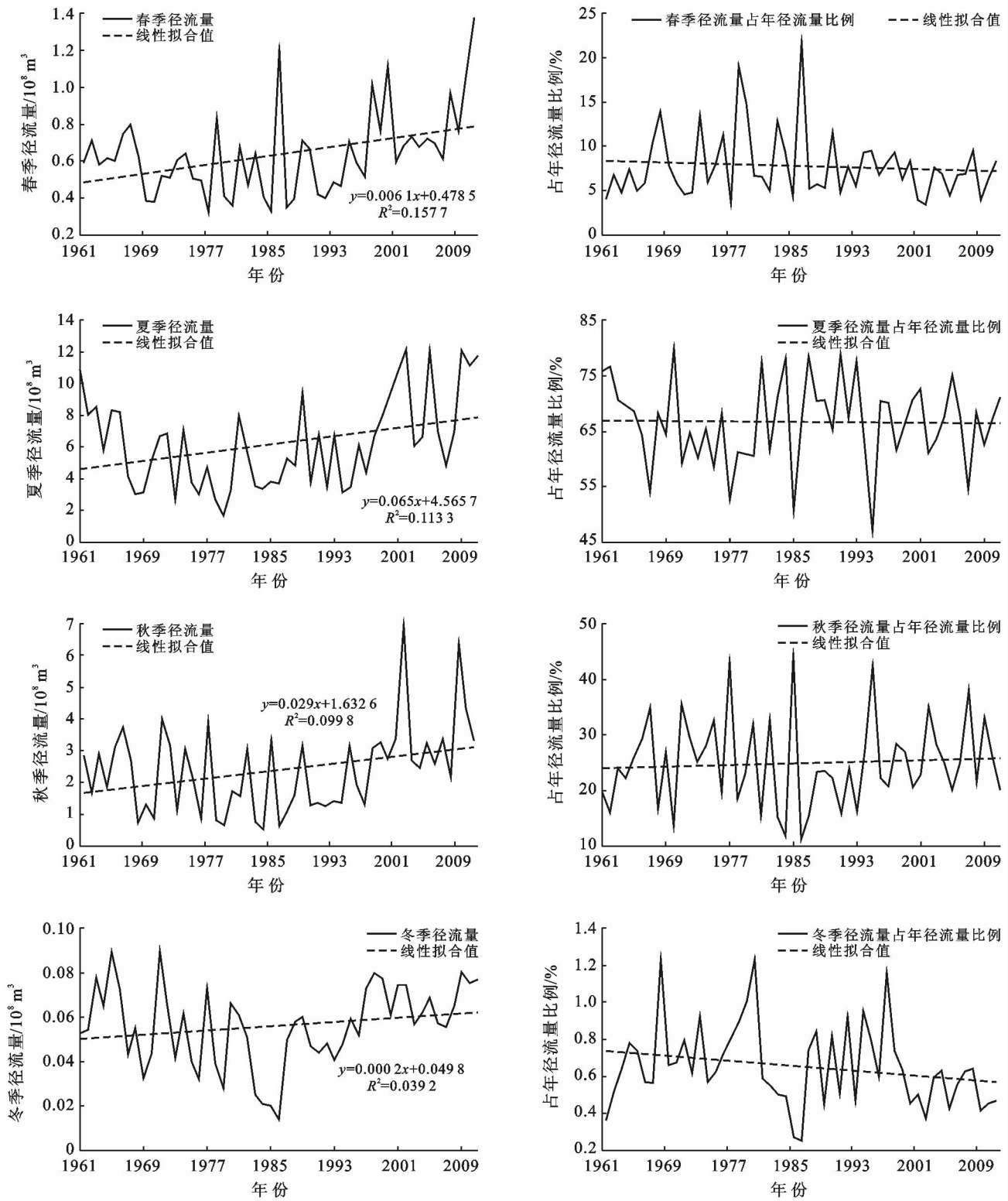


图 3　1961－2011 年沱沱河流域季节径流量及占年径流量百分比的变化

沱沱河流域集中度和集中期的年际变化表明(图4),集中度围绕平均值 76%上下波动,最高达83.0%,最低为 66.9%,与燕华云等[11]的结论较为一致,表明沱沱河流域径流主要集中在某些月内,这与图 2 呈现的径流主要集中在 5—10 月相符。流域的集中期分布范围主要集中在 7 月下旬至 8 月上旬,51 a中有 41 a 落在这一时间段,占到总年份的 80%,其中,集中期在 7 月 20 日—30 日的有 10 a,占 51 a 中的 19.6%,在 8 月 1 日—11 日的有 22 a,占 51 a 中的的 43.1%。

从各年代年内分配集中度和集中期来看(表 3),各年代集中度均较大,处于 74.0%～78.1%之间;集中期合成向量在 193.84°—203.6°之间的主要集中在 7 月 28 日—8 月 9 日,除了 20 世纪 80 年代最大径流量出现在 7 月下旬,其他年代均出现在 8 月上旬。集中期较好地反映了各个年代沱沱河径流量最大值出现的年份,这与上述结果一致。

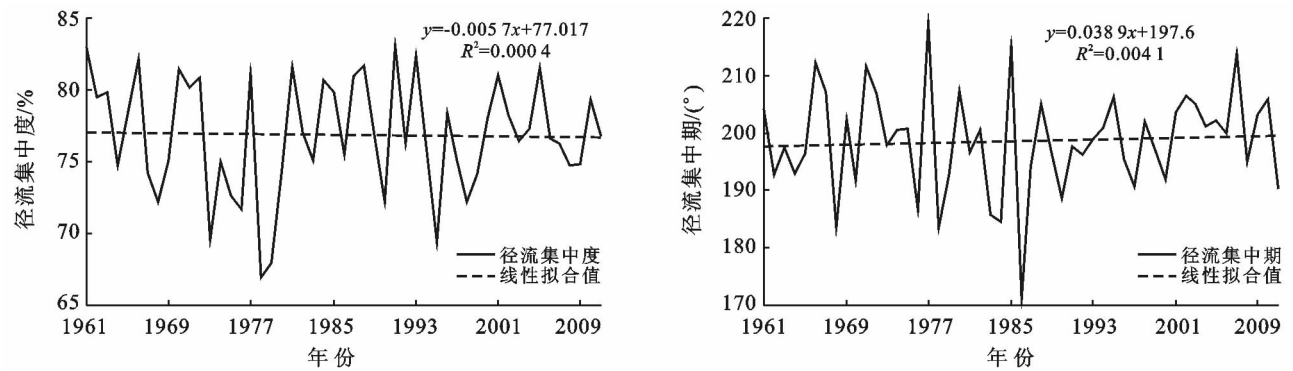


图 4 1961—2011 年沱沱河径流集中度和集中期年际变化

表 3 沱沱河流域径流统计特征

年代	年均径流量/10^8 m^3	集中度/%	集中期	
			合成向量方向/(°)	最大径流出现时间
1960s	9.40	78.1	198.05	8 月 3—4 日
1970s	7.00	74.0	200.70	8 月 5—6 日
1980s	7.50	78.1	193.84	7 月 28—29 日
1990s	8.60	76.5	197.72	8 月 2—3 日
2000s	13.50	77.6	203.60	8 月 8—9 日
多年平均	9.20	76.9	198.60	8 月 3—4 日

3.3 流域降水特征分析

1961—2011 年沱沱河流域降水量年际变化规律如图 5 所示。由图 5 可以看出,近 51 a 沱沱河流域降水量整体呈显著增多趋势,在 180.6～469 mm 之间呈波动变化,多年平均值为 290.1 mm,气候倾向率为 10.38 mm/10 a。

流域年降水量最大值出现在 2009 年,最小值出现在 1994 年,绝对变化幅度为 288.4 mm,相对变化幅度为 2.6,年降雨量变差系数为0.22,可见沱沱河年际降水量波动较小。从沱沱河流域降水量累积距平曲线图(图 5)还可以看出,近 51 a 来,沱沱河流域降水量呈明显阶段性变化,1987—1998 年降雨偏枯,1998 以后丰水年增多。

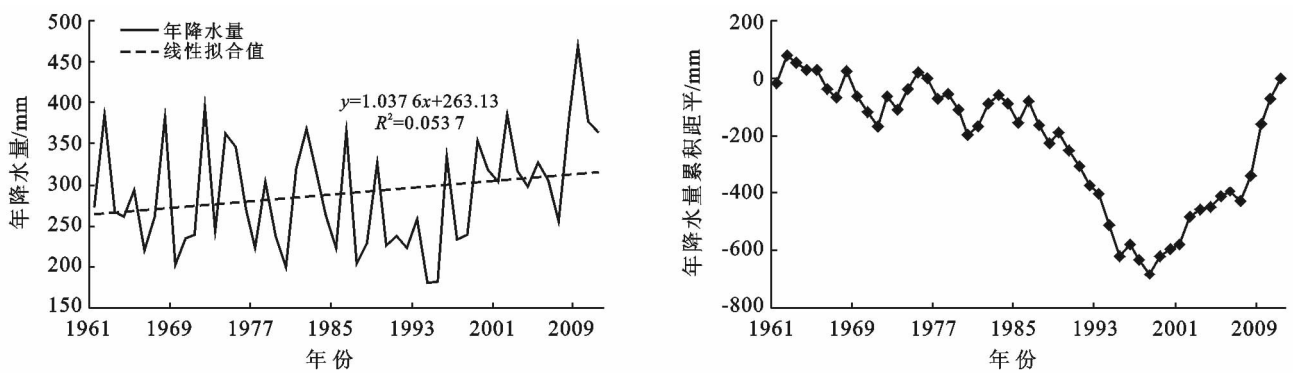


图 5 1961—2011 年沱沱河降水年际变化和累积距平曲线

从沱沱河流域降水量的年内分配特征(图 6)可以看出,总体上,降水量在各个年代年内分配较为相似,均呈明显的“单峰型”分布,在 1—2 月处于低值,3—4 月开始逐渐缓慢上升,5 月份开始急剧上升,在 6 月或 7 月达到峰值,之后开始急剧减少,直至 12 月份达到最低值。降雨量在年内分配主要集中在 5—

10 月,1—4 月和 11—12 月降水量较小;季节上主要分配在夏、秋季,占年降水量的 96.5%左右,各个年代的径流也主要集中在这一时期(表 4)。就最大降水量而言,各年代和多年平均最大降水量均出现在 7 月,说明各年代或年内的降水分布特征和集中程度较为一致,同时比较图 2 可以看出,径流量值落后于降水量值,说明径流量对降水有一定的滞后效应。

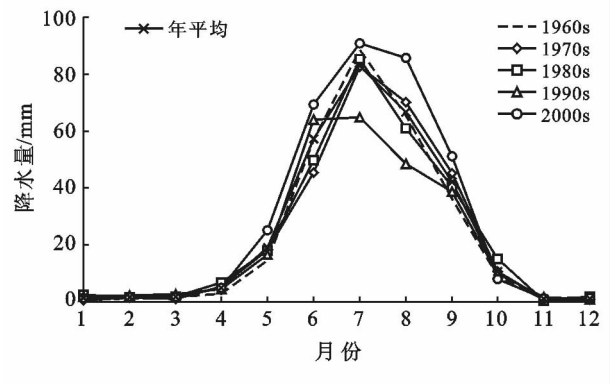


图 6　沱沱河降水年内分配特征

表 4　沱沱河流域汛期(5—10 月)降水量年内分配特征

年 代	5—10 月雨量/mm	全年雨量/mm	百分比/%
1960s	270.8	278.3	97.3
1970s	272.0	282.1	96.4
1980s	269.76	284.6	94.8
1990s	242.35	256.2	94.6
2000s	330.05	342.0	96.5
多年平均	278.5	288.6	96.5

沱沱河流域降水集中度和集中期的年际变化表明(图 7),集中度围绕平均值 76%上下波动,最高达 79.0%,最低为 73.2%,集中度呈明显下降趋势。流域径流量集中度与降水量集中度相差较小,表明降水与径流波动特征较为相似,集中期均较稳定。由降雨的集中期可以看出,降雨主要集中在 7 月上旬至 8 月上旬,51 a 中有 41 a 落在这一时间段,占到总年份的 80%,其中集中期在 7 月 10 日—30 日的有 38 a,占 51 a 中的 74.5%,在 8 月 1—10 日的有 8 a,占 51 a 的 15.7%。

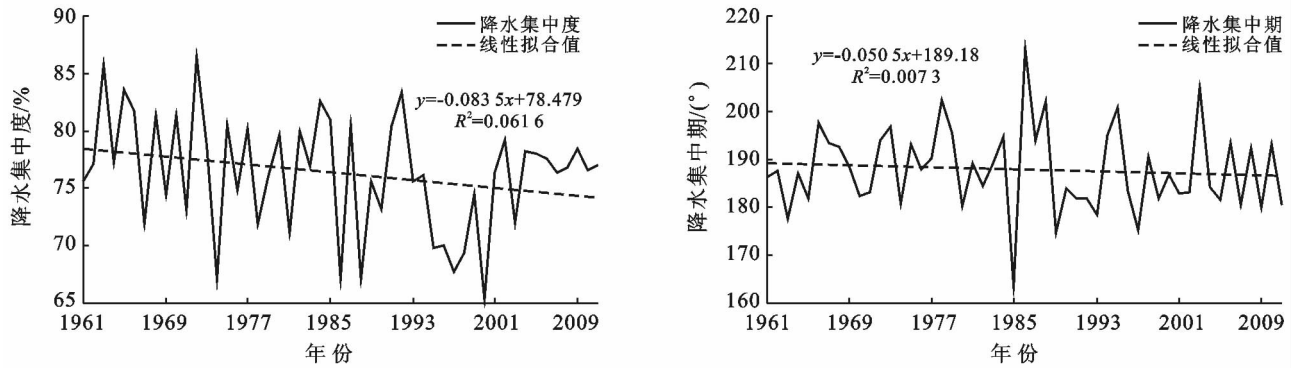


图 7　沱沱河流域 1961—2011 年降水集中度和集中期年际变化

从各年代年内分配集中度和集中期来看(表 5),各年代集中度均较大,处于 73.2%～79.0%之间;集中期的合成向量在 185.59°～190.41°之间的集中在 7 月 12—26 日,除了 20 世纪 60 年代最大径流量出现在 7 月中旬,其他年代均出现在 7 月下旬。

表 5　沱沱河流域降水统计特征

年 代	年均降水量/mm	集中度/%	集中期	
			合成向量方向/(°)	最大降水出现时间
1960s	278.3	79.0	187.48	7 月 12—13 日
1970s	282.1	76.8	190.41	7 月 25—26 日
1980s	284.6	75.5	188.90	7 月 23—24 日
1990s	256.2	73.2	185.59	7 月 20—21 日
2000 s	342.0	76.9	187.65	7 月 22—23 日
多年平均	288.6	76.3	198.60	7 月 22—23 日

3.4　径流对降水的响应

沱沱河流域径流补给受到降水和冰雪融水的共同影响[5],降水作为表征气候变化的重要因子对沱沱河流域径流具有一定影响,因此本文主要考虑降水量与径流之间的相关关系。由图 8 得出,年降水量与年径流量的年际波动变化具有较好的一致性,径流量随着降水量的增加而增加,两者的相关系数高达 0.53(通过 0.001 的显著性检验),表明降水量与径流量具有很好的相关性,在 51 a 当中正、负值一致的年份有 31 a,一致率达到 76.4%。因此,可以认为降水量是影响沱沱河流域径流量的重要因子,也充分说明了降水量是水资源补给的重要一环。

径流的形成是受到流域内气候和下垫面的共同影响,是流域内各种自然地理因素综合作用的产物。

从降水到形成径流需要经历 3 个特征阶段:停蓄阶段、漫流阶段、河槽集阶段,由于每次降水的强度和持续性不同,加之流域下垫面的影响,径流形成需要一定的时间,因此本文利用径流和降水的集中期来探讨径流对降水的滞后效应[12]。由图 9 可以看出,除了 1968,1976,1978,1979,1983,1984 和 1986 年外,其余年份的径流量对降水均存在滞后效应。径流集中期相对于降水集中期的滞后天数大致集中在 5—20 d,51 a 中有 31 a 的滞后时间在这一范围内,占总年份的 60%。径流对降水的平均滞后天数为 13.7 d,说明从流域降水开始经过停蓄、漫流、河槽急流 3 个阶段,最后汇流至沱沱河流域大约需要 13.7 d 左右。此外,20 世纪 60 年代到 21 世纪初,各年代的滞后天数分别为 14.0,10.7,16.3,12.6 和 14.8 d,径流对降水的滞后天数整体呈明显上升趋势(图 9)。

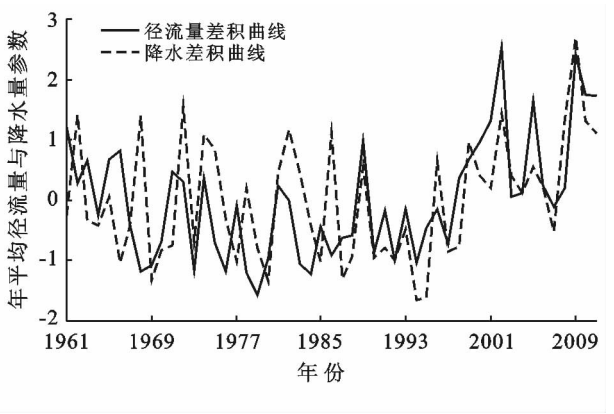


图 8 沱沱河流域年平均径流量与降水量的相关分析

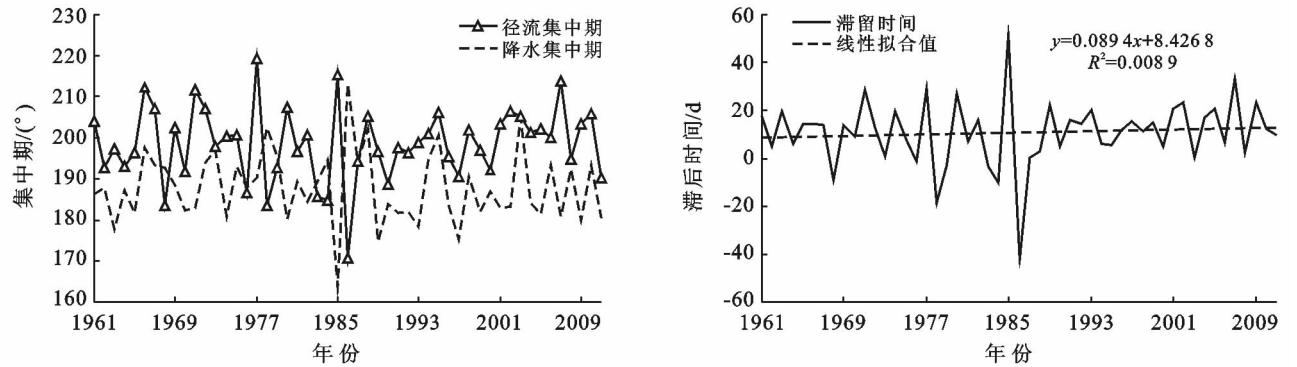


图 9 沱沱河流域 1961—2011 年降水和径流的集中期对比及滞后时间年际变化

4 结 论

(1) 1961—2011 年沱沱河径流量和降水量的变化趋势基本一致,径流量和降水量增加的倾向率分别为 1.00×10^8 m^3/10 a 和 10.38 mm/10 a。5—10 月径流量占年径流量的 96.7%,同期降水量占年降水量的 96.5%,径流量与降雨量的集中期均主要在 7 月上旬至 8 月上旬。

(2) 沱沱河流域各季径流量呈显著阶段性波动,整体表现为增加趋势。春、夏、秋、冬季气候倾向率分别为 6.00×10^6 m^3/10 a,6.30×10^6 m^3/10 a,2.10×10^6 m^3/10 a,2.62×10^8 m^3/10 a。

(3) 从来看,1961—1997 年,径流量及降水量的累积曲线整体呈显著阶段性减少,1998—2011 年,二者均表现为增加趋势。表明近 10 a 沱沱河流域来水量整体呈偏丰状态,气候相对湿润。

(4) 流域内多数年份的径流量对降水均存在滞后效应,平均滞后天数为 13.7 d。

[参 考 文 献]

[1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1086-1076.

[2] 曹建廷,秦大河,罗勇等. 长江源区 1956—2000 年径流变化分析[J]. 水科学进展,2007,18(1):29-33.

[3] 王国庆,张建云,贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展,2006,17(6):853-858.

[4] 白红英,侯钦磊,马新萍,等. 50 年秦岭金钱河流域水文特征及其对降水变化的响应[J]. 地理科学,2012,32(10):1229-1235.

[5] 齐冬梅,张顺谦,李跃清. 长江源区气候及水资源变化特征研究进展[J]. 高原山地气象研究,2013,33(4):89-95.

[6] 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.

[7] 杨建平,丁永建,刘时银,等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报,2003,18(5):595-602.

[8] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆. 基于集中度和集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学,2007,27(6):791-795.

[9] 陆志华,夏自强,于岚岚. 松花江干流中游段径流年内分配变化规律[J]. 河海大学学报,2012,40(1):63-69.

[10] 李林,王振宇,秦宁生,等. 长江上游径流变化及其与影响因子关系分析[J]. 自然资源学报,2004,19(6):694-700.

[11] 燕华云,杨贵林,汪青春. 长江源区径流年内分配时程变化规律分析[J]. 冰川冻土,2006,28(4):526-529.

[12] 郑红星,刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. 地理科学进展,2003,22(6):585-590.