

艾比湖流域径流水文特征及其对降水变化响应

——以博尔塔拉河为例

董煜^{1,2}, 海米提·依米提^{1,3}

(1. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆师范大学 干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054)

摘 要:在干旱区研究分析流域径流量的变化特征,是流域管理的重要科学问题。利用 1964—2012 年艾比湖流域博尔塔拉河径流、降水数据,采用变异系数、集中度和集中期等指标,对艾比湖流域博尔塔拉河的径流量、降水量在多长时间尺度上进行分析,并用集中期来反映径流对降水变化的响应。结果显示,博尔塔拉河径流年际变化较平稳,增长趋势不明显;流域径流主要集中在 6—8 月,季节上主要集中在夏季。径流集中期主要集中在 6 月下旬至 7 月中旬之间。降水集中期主要集中在 5—7 月;年降雨和年径流间存在较高的相关关系, ($r=0.2372>0.23292=R_{0.1,48}$, 回归显著水平超过 0.1),径流对降水具有滞后效应,多年平均滞后时间为 21 d 左右,且滞后天数随着时间推移呈缩小趋势。

关键词:径流; 降水; 变异系数; 集中度; 集中期; 艾比湖流域博尔塔拉河

中图分类号: P332.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0094-06

Runoff Characteristics and Responses to Precipitation in the Ebinur Lake Basin

—A Case Study of Boertala River

DONG Yu^{1,2}, Haimiti · Yimiti^{1,3}

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi

830046, China; 2. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: To reveal the change characteristics of runoff and their influencing factors has been an important scientific topic for drainage basin management in the arid regions. Taking the Boertala river of Ebinur lake basin as study area, this study analyzed the change trends of the runoff and precipitation in multi-time scales and runoff response to precipitation change according to the precipitation and runoff data in 1964—2012 based on assessment indices of coefficient of variation, concentration degree, concentration period. Resulting indicated that runoff interannual changes were relatively stable and increased insignificantly in Bortala River; the runoff of Boertala River was mainly concentrated from June to August, concentrated in the summer season. Runoff concentration period mainly concentrated in late June to middle of July and rainfall concentration period mainly concentrated from May to July. Correlation between annual runoff and annual precipitation has high relevance (the significant level is more than 0.1, $r=0.2372$, $R_{0.1}=0.2329$). There is a hysteresis of runoff to precipitation and hypsteresis period is about 21 days, and the hysteresis period becomes short over time.

Key words: runoff; precipitation; variation coefficient; concentration ratio; concentration period; Ebinur Lake Basin; Boertala River

在内陆干旱区,水资源直接影响社会经济发展和自然生态安全,气候变化对径流影响研究越来越受到重视^[1]。由于受全球气候变化影响,中国西北干旱区气候表现出向暖湿化转变的趋势^[2],全球气候变暖势

必会引起蒸散和降水的变化,从而影响河川径流的水文情势^[3]。已有研究证明在中国西部干旱区气候变化对径流产生了显著的影响^[4],这必然引起水分循环的变化,水资源在时空的重新分配以及径流数量的改

变,进而影响区域的生态环境和社会经济的可持续发展^[5-6]。艾比湖流域位于东经 79°53′—85°02′,北纬 43°38′—45°52′,新疆准噶尔盆地南缘,属典型的内陆咸水湖泊^[7],流域面积 5 062 km²。艾比湖水资源退化严重,突出表现在水位下降、水域面积减小、水质咸化,湖水水质污染严重,平均矿化度高达 170 g/L^[8],是生态环境脆弱和退化严重的湖泊^[9]。由于博尔塔拉河、精河等河流来水量大幅减少,艾比湖湖面大面积萎缩。艾比湖处于阿拉山口的大风通道,裸露的湖床成了新疆最大的沙尘暴策源地之一,给新疆尤其是北疆农牧业生产和公路、铁路运输带来极大威胁^[10]。该区域生态环境脆弱,艾比湖面积变化直接影响区域的环境和工农业发展,对新疆北部生态环境保护具有重大作用^[11]。对艾比湖流域的河川径流特征研究,主要集中于温度、径流等特征及与艾比湖湖水面积的关系方面^[12-16],而对流域内入湖径流的年内分配特征、降水对河川径流的定量分析等方面研究较少。博尔塔拉河、精河是现在仅有的入湖河流。本文选取艾比湖流域内的博尔塔拉河流域作为研究流域,采用变异系数、集中度和集中期等方法,对流域内径流量、降水量在年代、年际、季节等时间尺度上进行分析,通过对博尔塔拉河径流与降水集中度和集中期的深入研究,有利于全面了解河流的水文特征、变化趋势,这对河流水量调节、防洪防汛及河道管理水资源合理利用、艾比湖流域生态保护等方面具有现实意义。

1 研究区概况及资料来源

博尔塔拉河(简称博河)位于新疆博尔塔拉蒙古自治州境内。地理位置为东经 79°53′—83°53′,北纬 44°02′—45°23′。东北部与塔城地区托里县相连,南部与伊犁哈萨克自治州相邻,西部、北部以别珍套山和阿拉套山为界,与哈萨克斯坦共和国接壤。博河河谷南侧分别为横亘东西的别珍套山和东南—西北向的天山之脉科古琴山,北侧为西南—东北向的阿拉套山,西端空郭勒鄂博山位于阿拉套山和别珍套山之间的结合部,海拔最高 4 053 m。山势总体西高东低。干流经温泉县、博乐市,最后注入艾比湖,温泉水文站以上集水面积 2 206 km²,河长 97 km。博河流域气候冬夏漫长,春秋短暂,年平均气温 5.6℃。随着地势的向西升高,气温逐渐降低,极端最高气温 44.2℃,冬季 1 月平均气温为-15.7℃,极端最低气温-36.4℃^[17]。博尔塔拉河流域径流数据来源于博尔塔拉河温泉水文观测站 1964—2012 年观测月径流值(温泉县水文站位于 44°59′N,81°02′E,海拔 1 354 m)。流域内降水量数据采用温泉县气象站 1964—2012 年的月降水数据(温泉

县气象站位于 44°58′N,81°01′E,海拔 1 354 m)。水文站位于河源区,人类对水的利用数量相对较少,其水文监测数据基本接近自然状态,可看做天然径流量。在博河上游源区,温泉县气象站提供长序列降雨监测数据,且监测数据按照要求进行质量控制。研究区四季时间定义如下:春季(3—5 月),夏季(6—8 月),秋季(9—11 月),冬季(12 月—次年 2 月)^[18]。

2 研究方法

由于气候的季节性波动,气象要素如降水和气温都有明显的季节性变化,在一定程度上决定了径流年内的季节性变化。本文用径流年内变差系数 C_v 来衡量径流年内季节性变化程度^[19]。径流年内变差系数 C_v 的计算公式如下:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{R}} \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \tag{2}$$

式中: R_i ——各年径流量; \bar{R} ——年平均径流量。

由式(1)中可以看出, C_v 值越大即表明年内各月径流量相差悬殊,径流年内分配越不均匀。集中度和集中期的计算是将一年内各月的径流量作为向量看待,月径流量的大小为向量的长度,所处的月份为向量的方向^[20]。1—12 月每月的方位角 h 分别为 0, 30°, 60°, ..., 330°,并把每个月的径流量分解为 x 和 y 两个方向上的分量,则 x 和 y 方向上的向量合成分别为:

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} R_i \sin h \tag{3}$$

$$R_y = \sum_{i=1}^{12} R_i \cos h \tag{4}$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \tag{5}$$

$$C_d = \frac{R}{\sum_{i=1}^{12} R_i} \times 100\%, \quad D = \arctg\left[\frac{R_x}{R_y}\right] \tag{6}$$

式中: R_i ——第 i 月的径流量; h ——第 i 月径流的方位角; R_x, R_y —— X, Y 方向合成向量; R —— R_x 和 R_y 的合成总向量。集中度(C_d)反映了集中期径流量占年总径流量的比例,而集中期(D)则近似表示了一年中最大径流量出现的时间。

3 结果与分析

3.1 流域径流特征分析

博尔塔拉河多年平均径流量为 3.15 亿 m³, 1964—2012 年间,年径流量,5 a, 10 a 滑动平均流量均呈波动变化。总体上径流变化趋势不明显($r = 0.168 < 0.23292 = R_{0.1, 49}$, 回归显著水平不到 0.1),

没有出现年际断流情况(图 1),其中最大径流量出现在 1969 年,为 4.58 亿 m³,最小值出现在 1975 年,为 2.39 亿 m³,绝对变化幅度为 2.19 亿 m³,相对变化幅度为 1.92。博尔塔拉河年径流量的变差系数为 0.131 1,说明其年际变化较为平稳。

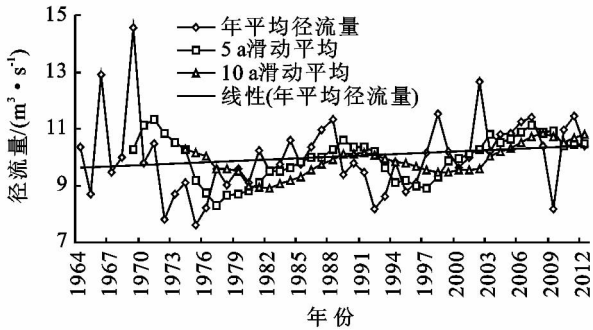


图 1 博尔塔拉河径流变化

从博尔塔拉河流域径流的年内分配特征来看(图 2),径流主要集中在 6—8 月,季节上主要集中在夏季,占到年径流量的 40%以上,各年代之间的径流变化也主要体现在这一阶段;在 1—5 月、9—12 月的径流较少,各年代之间的变化也较微弱。各年代的最大月径流量月份为 7 月,这主要是年代内径流集中时期同期造成的,与降水量在年内时间上的分配有关。

博尔塔拉河各季节径流量均呈波动性变化(图 3),其中春季径流量缓慢增加趋势明显($r=0.2887>$

$0.27594=R_{0.05,49}$,回归显著水平在 0.05 以下);夏季径流量变化趋势不明显($r=0.1053<0.23292=R_{0.1,49}$,回归显著水平不到 0.1);秋季径流量变化趋势明显($r=0.3430>0.23292=R_{0.1,49}$,回归显著水平超过 0.1);冬季径流量减少趋势明显($r=0.3105>0.27594=R_{0.05,49}$,回归显著水平在 0.05 以下)。春夏秋冬各季节平均径流量分别为 2.35 亿 m³、5.15 亿 m³、2.51 亿 m³ 和 2.62 亿 m³,径流量所占年径流量的百分比分别集中在 13.9%~21.80%,38.6%~50.5%,16.01%~21.42%,13.43%~26.8%,均说明博尔塔拉河的径流主要集中在夏季,春秋冬季节径流量较小。夏季所占径流比例达 40%以上,其夏季变化趋势不明显,春季、秋季径流量增大趋势明显。整体上博尔塔拉河年径流变化不明显(图 1)。

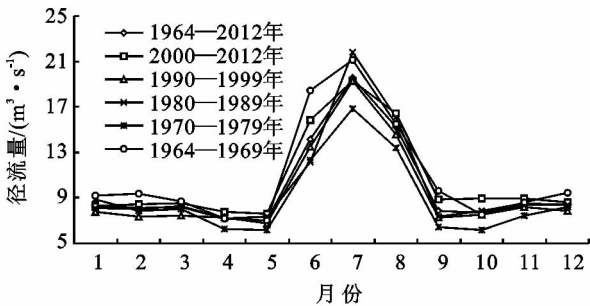
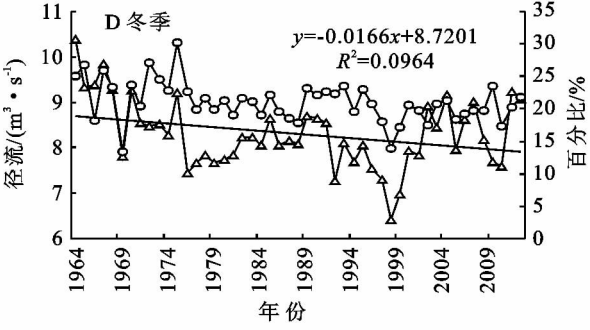
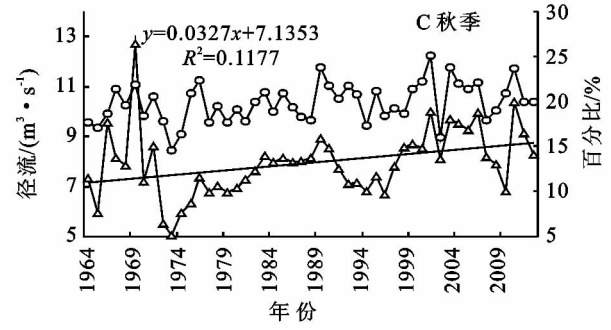
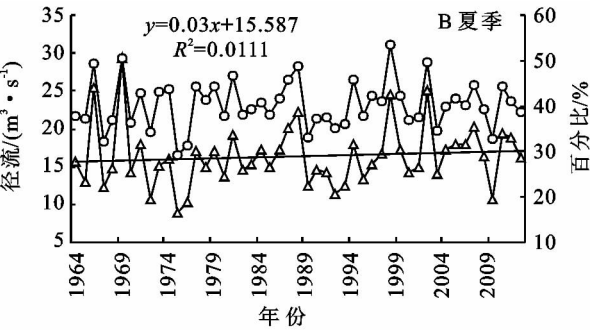
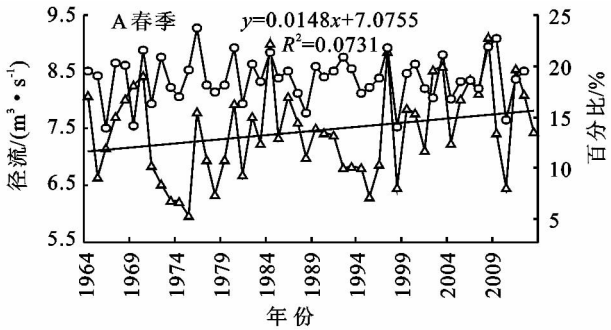


图 2 博尔塔拉河径流年内分配特征



—△— 径流 —○— 百分比 ——— 线性(径流)

图 3 博尔塔拉河季节径流量及其占年径流量百分比的变化

春夏秋冬各季节的变差系数分别为 0.108 4, 0.248 7, 0.171 0, 0.091 9,说明夏季的年际径流变化最大,冬季的年季径流量较稳定。图 3 中,各季节的

径流量及其所占年径流量的百分比波动一致,如各季节最大径流及百分比分别是:春季(1997 年:2.71 亿 m³、21.8%)、夏季(1969 年:9.27 亿 m³、50.5%)、秋

季(1983 年:2.59 亿 m³、21.07%)、冬季(1965 年:2.94 亿 m³、26.80%)。由于各季节或月份的径流量不同,使得各年内径流分配特征随年月不同而存在变化。对此,通过对博尔塔拉河径流量的集中程度和集中期的进一步讨论,加深对河流的水文特征了解,这对于干旱区径流调用、管理等方面具有现实意义。

通过博尔塔拉河流域径流集中度和集中期时间序列显示(图 4),集中度围绕平均值($C_d=27\%$)上下波动变化,最高达 48.1%,最低为 14.4%,说明博尔塔拉河的年内径流主要集中在几个月内,通过图 2,同样体现径流主要集中在 6—8 月。博尔塔拉河年内径流集中期也存在波动性变化,且随时间有逐渐向后推移的趋势(图 4)。径流集中期从分布时间范围来看,总年份 49 a 中 48 a 分布在 6 月至 7 月下旬之间。其中,集中在 7 月 1 日—7 月 30 日的有 32 a,集中在 6 月 1 日—6 月 30 日的有 16 a,分别占总年份的

65.3%和 32.7%。各年代的径流年内分配特征显示(表 1),集中程度均较高($C_d\geq 27\%$),集中期的合成向量在 155.56°—207.2°,说明径流集中期在 6 月、7 月,这与图 3 中各年代内的径流量主要集中在夏季的 7 月相一致。同时,相对变化幅度($C_m\geq 10.91$)和绝对变化幅度($\Delta Q\geq 11.8$ 亿 m³)也说明径流年内分配的不均匀性。

3.2 流域降水特征分析

1964—2012 年间,流域内降水量呈波动增加趋势,但增加幅度较小,平均每年增加 1.9401 mm(趋势线斜率),多年平均降雨量为 233.2 mm(图 5)。其中,最大降水量出现在 1999 年(394.3 mm),最小值出现在 1968 年(77.8 mm),绝对变化幅度为 316.5 mm,相对变化幅度为 5.07,变差系数为 0.278 4,与流域内径流量相比较,降水的相对变化幅度和变差系数均较大,说明流域内降水比径流变化更大。

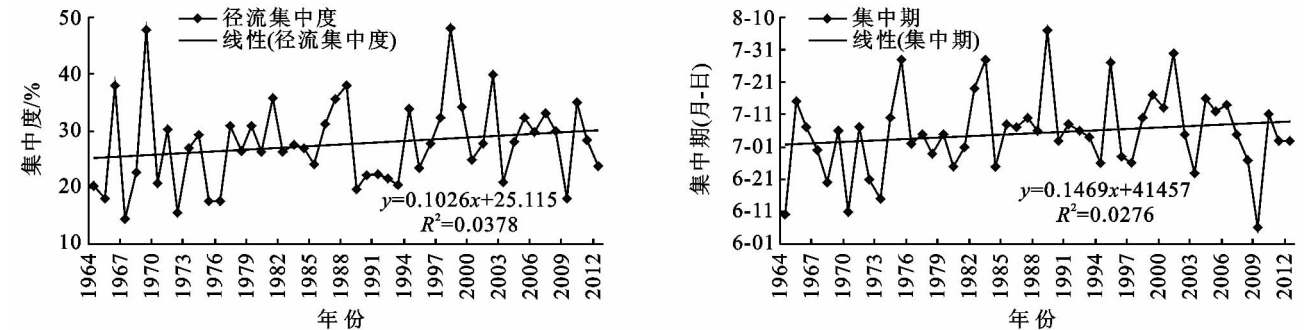


图 4 博尔塔拉河径流量集中度和集中期年际变化

表 1 博尔塔拉河径流统计特征

时间段	径流量/ 亿 m ³	集中度/%	集中期		相对变化幅度/ %	绝对变化幅度/ m ³
			合成向量方向/(°)	最大径流出现时间		
1960s	41.6	26.86	179.25	6 月 30 日	3.03	4.45×10 ⁸
1970s	34.0	24.40	172.75	6 月 23 日	2.78	3.36×10 ⁸
1980s	38.2	29.12	189.81	7 月 10 日	3.03	4.63×10 ⁸
1990s	36.2	28.61	185.36	7 月 06 日	2.86	3.96×10 ⁸
2000s	40.2	28.57	185.34	7 月 06 日	2.5	3.65×10 ⁸
多年平均	37.9	27.9	185.45	7 月 06 日	2.78	3.95×10 ⁸

注:相对变化幅度取河川径流最大月流量和最小月流量之比,绝对变化幅度取最大最小月河川径流量之差。

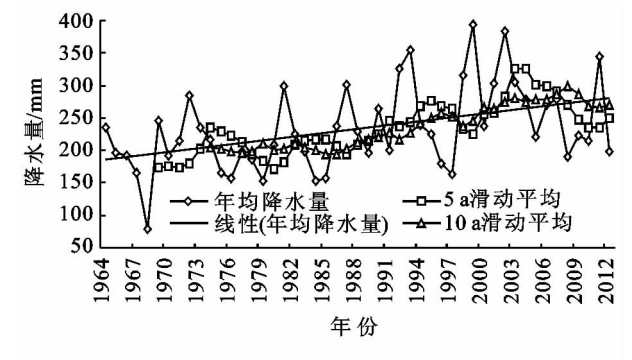


图 5 博尔塔拉河流域降水年际变化

博尔塔拉河流域降水的年内分配特征显示

(图 6),降水主要集中在 5—7 月,占到年降水量的 60%以上,从季节上看主要是在春季末到夏季末期,各年代之间的降水变化也主要体现在这一阶段。1—4 月、10—12 月的降水量较少,各年代之间的变化也较微弱。1960s、1980s、1990s、2000s 的最大月平均降水量为 5 月,分别为 15.28、18.75、20.85、16.45 mm。1970s 的最大月平均降水量为 6 月,为 12.8 mm,说明各年代或年内降水的分配特征和集中程度不同。同时,与博尔塔拉河年代径流最大径流量月相比(图 2),两者出现在不同时间或径流峰值时间落后于降水,这也证实径流对降水有滞后效应。

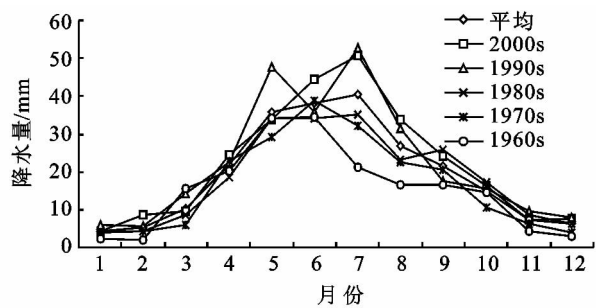


图 6 博尔塔拉河流域降水年内分配特征

根据各月的降水量数据获得博尔塔拉河流域降水集中度和集中期时间序列(图 7),集中度围绕平均值($C_d=47.14\%$)呈上下波动变化,最高达 63.43%,最低为 30.29%,集中度呈降低趋势(趋势线),但其波动范围和频率随时间增强。较高的集中度表明,流域年内降水较为集中,较低的集中度表明在年度内降水

分散,通过图 6 年代尺度上各月降水量的变化也体现了降水的集中与分散的关系。同时,与博尔塔拉河流域的径流集中度相比,降水波动性大于径流说明径流集中期比降水稳定。降水集中期存在波动性变化,且随时间推移波动幅度逐渐增大,说明降水集中程度降低。从降水集中期的分布时间范围来看,主要分布在 5 月、6 月、7 月内。其中,集中在 5 月有 12 a,集中在 6 月有 25 a,集中在 7 月有 12 a,分别占总年份的 24%,52%,24%。各年代的降水年内分配特征显示(表 2),年内集中程度均较低($C_d\geqslant 31.53\%$),并随年代呈减少趋势,说明集中程度减弱。集中期的合成向量在 $125.49^{\circ}\text{--}207.41^{\circ}$,各年代的降水集中期在 5 月、6 月、7 月左右。同时,相对变化幅度较小($C_m\geqslant 8\%$),说明降水在年内分配不均匀,月降水具有集中性。

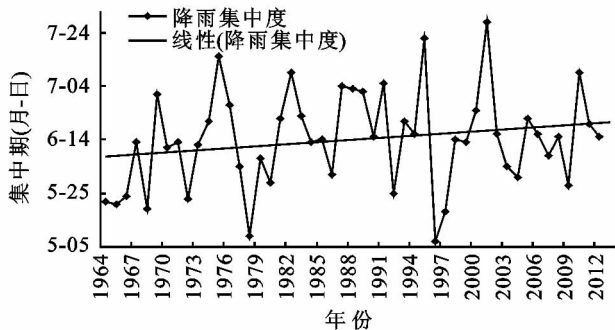
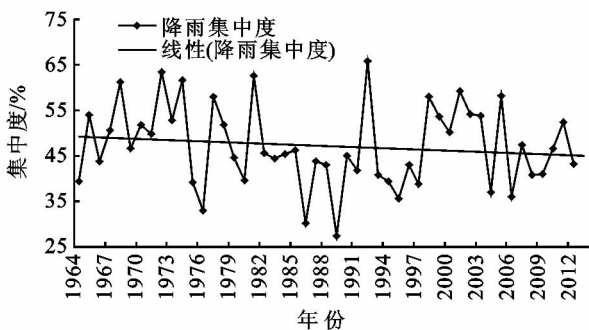


图 7 博尔塔拉河流域降水集中度和集中期年际变化

表 2 博尔塔拉河流域降水统计特征

时间段	降雨量/mm	集中度/%	集中期		相对变化幅度/ %	绝对变化幅度/ mm
			合成向量方向/($^{\circ}$)	最大降水出现时间		
1960s	185.1	49.28	150.46	6 月 1 日	17.73	32.62
1970s	200.5	50.58	166.21	6 月 17 日	9.78	34.69
1980s	220.6	42.83	170.75	6 月 21 日	8.41	30.91
1990s	266.2	46.16	162.69	6 月 13 日	9.57	47.21
2000s	265.0	47.71	167.43	6 月 18 日	11.59	46.42
多年平均	233.2	47.14	165.08	6 月 16 日	9.37	36.19

注:相对变化幅度取降水最大月降水量和最小月降水量之比,绝对变化幅度取最大最小月降水量之差。

3.3 径流对降水的响应

艾比湖流域为封闭式内陆湖流域,博尔塔拉河流域内无过境河流,径流完全依赖于降水和冰雪融水,因此,降水量直接影响地表径流量^[21]。采用博尔塔拉河流域年径流量与对应的年流域降水量进行相关分析,两者相关系数为 0.237 2。回归趋势分析表明,年径流量与年降水量存在线性回归关系,拟合方程为 $y=0.0575x+106.72$,有较高的置信度, ($r=0.2372>0.23292=R_{0.1,49}$,回归显著水平超过 0.1),即降水量增加会使径流量增加,反之亦然。

同样,对博尔塔拉河年内月降雨和月径流间相关系数的分析结果表明,年内月降雨和月径流间存在较高的相关关系, ($r=0.63>0.23292=R_{0.1,49}$,回归显

著水平超过 0.1),这意味着流域径流在年内也主要受降雨量变化的控制。径流是流域中气候和下垫面各种自然地理因素综合作用的产物,由降水所形成的径流需要经过停蓄、漫流、集流等阶段,要耗费不同时间,可通过降水和径流的集中期来研究两者之间的内在联系。从图 8 可看出,径流集中期均出现在降水集中期以后,且波动趋势相近。径流集中期相对降水集中期的滞后天数大多在 5~46 d 内,占到整个时间段的 81.6%,平均滞后 21 d,说明从流域降水开始,经过蓄流、汇流至艾比湖需 21 d 左右的时间。此外,从滞后天数的趋势线来看,滞后天数呈减少趋势,1960s—2000s 间,各年代的平均滞后天数分别为 29,24,20,

19 d, 随时间推移具有明显的减少趋势。从图 8 集中期的变化趋势上可以看出, 滞后天数的减少主要是由于径流集中期向前推迟的结果。原因有可能是区域

地表覆被改变使产流的各个阶段时间改变, 地表植被的破坏减少了降水的停蓄时间, 导致径流对降水的滞后时间相应缩短。

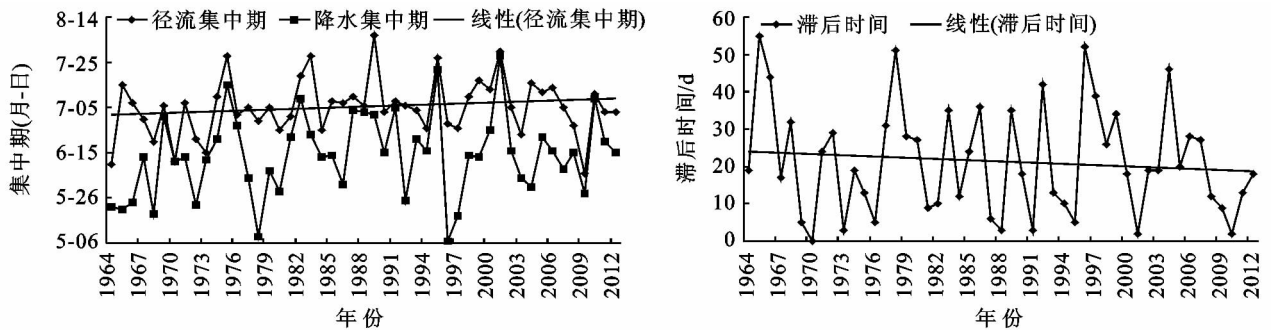


图 8 博尔塔拉河流域降水和径流的集中期对比及滞后时间年际变化

4 结论

流域径流量呈相关波动变化, 径流量主要集中在 6—8 月, 季节上主要集中在夏季, 占到年径流量的 38.6%~50.5%, 集中期主要分布在 6 月中旬至 7 月下旬; 流域内降水量呈波动增加趋势, 但增加幅度较小, 平均每年增加 1.9401 mm (趋势线斜率), 降水主要集中在 5—7 月, 占到年降水量的 60% 以上, 集中期主要分布在 6 月、7 月内。

博尔塔拉河流域年径流量与年降水量存在线性回归关系, 两者相关系数为 0.2372, 降水量增加会使径流量增加。这验证在中国西部干旱区气候变化对径流产生了显著的影响^[4]。

根据集中度和集中期, 博尔塔拉河流域的径流对降水具有滞后效应, 多年平均时间为 21 d 左右。49 a 间, 滞后天数随时间推移具有明显的缩短趋势。这种径流对降水的滞后时间随年际变化呈缩短趋势产生的原因是否因为流域内土地利用/覆被变化引起的, 影响程度影响方式如何, 仍需要进一步研究。

参考文献:

- [1] Stahl K, Moore R D, Shea J M, et al. Coupled modeling of glacier and streamflow response to future climate scenarios[J]. Water Resources Research, 2008, 44(2): W02422.
- [2] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-64.
- [3] Ma X, Yasunari T, Ohata T, et al. Hydrological regime analysis of the Selenge River basin, Mongolia [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(14): 2929-2945.
- [4] Chen Y, Takeuchi K, Xu C, et al. Regional climate change and its effects on river runoff in the Tarim Basin, China[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(10): 2207-2216.
- [5] 贾仰文, 高辉, 牛存稳, 等. 气候变化对黄河源区径流过程的影响[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 52-58.
- [6] Xu J, Chen Y, Ji M, et al. Climate change and its effects on runoff of Kaidu River, Xinjiang, China: a multiple time-scale analysis [J]. Chinese Geographical Science, 2008, 18(4): 331-339.
- [7] 陈强, 陈正江. 基于系统动力学的艾比湖沿岸生态环境问题分析及对策[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 33-35.
- [8] 吴荣, 张霞, 黄海龙. 属性识别模型在艾比湖水质评价中的应用[J]. 干旱区地理, 2009, 32(4): 571-577.
- [9] 陈志军, 张晶. 艾比湖水化学特征的因子分析研究[J]. 盐湖研究, 2008, 16(2): 19-21.
- [10] 周长海, 雷加强. 艾比湖地区风沙危害趋势及对欧亚大陆桥的影响[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 98-102.
- [11] 伊玛木·塔依尔, 亚尔买买提·台外库力, 等. 艾比湖的萎缩对湖周围生态环境的影响及其治理对策探讨[J]. 新疆大学学报: 理工版, 2001, 18(2): 208-211.
- [12] 刘世薇, 周华荣, 梁雪琼, 等. 艾比湖流域降水与径流变化特征分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 21-25.
- [13] 司桂琴, 刘志辉. 新疆精河气温、降水与径流量近 51 a 变化分析[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(9): 1792-1796.
- [14] 邢文渊, 李秀花, 常顺利, 等. 精河县气象因子对艾比湖湖水面变化的影响分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(2): 19-22.
- [15] 袁新春, 张莉萍. 新疆精河流域水文特性分析[J]. 现代农业科技, 2010(6): 290-291.
- [16] 乔木, 周生斌, 卢磊. 艾比湖流域年径流变化特征分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 236-239.
- [17] 张立山, 张庆. 近 50 a 博尔塔拉河源区气候变化对径流的影响[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(5): 8-10.
- [18] 李加强, 陈亚宁, 李卫红, 等. 天山北坡中小河川降水与径流变化特征: 以精河为例[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 615-622.
- [19] 刘士余, 章俊霞, 罗志军, 等. 近 50 年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.
- [20] 刘贤赵, 李嘉竹, 宿庆, 等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学, 2007, 27(6): 791-799.
- [21] 李加强, 陈亚宁, 李卫红, 等. 天山北坡中小河川降水与径流变化特征: 以精河为例[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 615-622.