第 16 卷 第 6 期
2022 年 12 月
沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology

刁鹏,李刚,张玮煊.天山巴音布鲁克盆地汛期水资源变化趋势及其影响因素分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(6):51-58.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.06.007
开放科学(资源服务)标识码(OSID):

天山巴音布鲁克盆地汛期水资源变化趋势及其影响因素分析

刁 鹏,李 刚,张玮煊
(巴音郭楞蒙古自治州气象局,新疆 库尔勒 841000)

摘 要:利用 1982—2018 年巴音布鲁克气象站逐日气象资料和开都河上游大山口水文站逐月径流量资料,采用 Morlet 小波分析、气候敏感与水量平衡法、时间序列分析等,分析了汛期(5—9 月)巴音布鲁克盆地地表径流量变化趋势及气候变化与人工增水作业对径流量的影响。结果表明:近 37 年巴音布鲁克盆地汛期地表径流量呈增加趋势,突变年份为 1989 年,存在14、22、4 和 7 a 的周期变化,具有 17~27、11~16 a 和 4~8 a 的丰枯位相交替变化特征。降水量是影响径流量变化的主导气候因素,对径流量变化的平均影响率为 73.1%。因人工增水因素影响,盆地的降水可分为自然降水和人工催化降水,其中自然降水在历史期(1982—1993 年)为 69.5%,作业前期(1994—2006 年)为 59.28%,作业后期(2007—2018 年)为 74.56%,而人工催化降水在人工增水期(1994—2018 年)对径流量变化的平均影响率为 7.93%,表明径流量对降水的依赖程度正大幅增加,同时人工增水作业对径流量也有一定增加作用。

关键词:人工增水;降水量;径流量; 统计检验;巴音布鲁克盆地
中图分类号:P481 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-0799(2022)06-0051-08

水资源是人类生存和发展的基础,不仅在农渔工方面有重要作用,还在调节陆地水文、生态环境方面有重要意义[1]。随着全球气候变暖,全球水循环过程加快[2],导致不同区域降水和蒸发显著改变,引发区域水资源产生变化[3-4],一定程度上影响了区域农业系统、社会发展及生态环境等安全[5]。作为全球气候变化敏感区的高寒山区,其水资源变化更易受气候系统变化的影响[6],这对山地降水量占降水总量 84.3%的新疆来说[7],其农业生产和社会经济的发展与水资源变化息息相关。水资源变化特征作为目前国内外研究热点之一[8],学者们已得出气候变化和人类活动是影响其显著变化的两大因素[9],在众多研究中发现,当气候变化对水资源变化的影响呈一定规律时,人类活动对水资源变化的作用会更为突出。吴彬等[10]通过分析新疆平原区地下水资源量变化及其影响因素,得出人类活动对地下水资源的影响大于气候变化。袁瑞强等[11]基于典型区域对光谱指数的性能和稳定性的评估方法,得出内蒙古地表水整体呈先减后增的趋势,而人类活动是地表水面积减少、湖泊萎缩的主要影响因素。盛昱凤等[12]分析了 1960—2018 年太湖水位变化特征及影响因素,得到 2000 年前太湖水位对降水的响应十分敏感,而 2000 年后太湖水位受人为调控而趋于稳定。由此说明,人类活动虽易对水资源变化造成负面影响,但人为选择性活动却能对水资源变化形成正面影响。

巴音布鲁克盆地位于海拔 2 400~2 600 m 的天山中段南麓,是新疆地区受气候变化影响最典型的

收稿日期:2021-12-28;**修回日期**:2022-09-15
基金项目:新疆气象科技创新发展基金项目(QN202111);第二次青藏高原综合科学考察研究任务子项目(2019QZKK010206)
作者简介:刁鹏(1990—),男,工程师,主要从事人工影响天气研究工作。E-mail:375648190@qq.com
通信作者:李刚(1976—),男,高级工程师,主要从事人工影响天气研究工作。E-mail:944607932@qq.com

高山高寒盆地[13],其年均降水量为 279.65 mm,年均气温为-4.6 ℃,积雪日数多达 139.3 d,有一定面积的永久性冰川,冬长夏短,其不仅是开都河的发源地和水资源储蓄地,还在水量调节、储水、维持地区水平衡方面发挥着巨大作用。为促进区域内社会经济发展,改善流域生态环境,自 1994 年以来,巴音布鲁克盆地一直作为人工增水重点区域,致力开发山区云水资源,增加区域径流量。有关学者研究发现,人工增水作业对关系密切的水资源地如河流、湖泊等具有一定程度的影响[14-15]。高子毅等[16]利用新疆天山中段北坡人工影响作业区内乌鲁木齐河与头屯河的河流径流量进行人工增雨效果研究,验证出人工增水作业对关系密切的河流径流量有一定程度增加。唐林等[17]通过对湖南省夏季大型水库开展的人工增雨蓄水实验,得出人工增雨作业不仅能增加水库水资源,还是一项投入少、回报明显的技术方式。因此巴音布鲁克盆地在开展人工增水作业的时期,其水资源的变化不仅受气候因素影响,在一定程度上也受人工增水作业影响。

研究表明,气候变化是影响巴音布鲁克盆地地表径流量变化的主要因素[18],而夏季是年径流量的主要分布时段[19]。然而对于人工增水作业对该盆地水资源变化的影响则鲜有研究,这主要是由于以前开展人工增水作业的时间序列较短,其次科学评估人工增水作业效果的条件难以满足。为此,本文基于对径流受气候变化影响估算准确性较高、结论较为切合实际的气候敏感法[20-21],定量估算出巴音布鲁克盆地地表径流量受气候因素及人工增水作业因素的影响程度,从而为当地水文效应研究、人工增水开展和水资源合理利用提供参考。

1 数据和方法

1.1 数据选取

由于巴音布鲁克盆地开展人工增水作业的时段为每 5—9 月,因此选取时间序列为 1982—2018 年的 5—9 月,日气象数据来源于巴音布鲁克气象站,包括日降水量、日平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数和风速等资料,水文资料主要来自于开都河流域出山口控制站——大山口水文站的实测月径流量数据,人工增水作业相关数据来源于新疆巴州人工影响天气办公室。根据巴音布鲁克盆地人工增水作业的开展时间,将未实施人工播云作业的 1982—1993 年命名为历史期,将开展人工播云作业的 1994—2018 年命名为人工增水期,并根据表 1 将人工增水期划分为 2 个阶段:即高炮作业的 1994—2006 年为前期阶段,火箭作业的 2007—2018 年为后期阶段。所有数据都已经过严格的人工检验,确保控制数据质量。

表 1 巴音布鲁克盆地人工增水作业发展历程

时间	人影作业器具	作业点类别	作业指挥方式	人影装备数量/个	作业点数量/个	年均作业量/次
1994—2006 年	高炮	固定	人工	5	5	100
2007—2018 年	火箭	流动	雷达	15	37	500

1.2 研究方法

1.2.1 气候敏感法与水量平衡法

根据姚俊强等[21]对巴音布鲁克盆地地表水资源变化分析的方法,通过将水量平衡方程与傅抱璞公式两者结合,经微分、求导后,可得出降水量和潜在蒸散发量对径流量的影响率,表达式如下:

$$\frac{\partial R}{\partial P}=(P^{\bar{w}}+ET_0^{\bar{w}})^{(\frac{1}{\bar{w}}-1)}p^{\bar{w}-1} \quad , \tag{1}$$

$$\frac{\partial R}{\partial ET_0}=(P^{\bar{w}}+ET_0^{\bar{w}})^{(\frac{1}{\bar{w}}-1)}ET_0^{\bar{w}-1}-1 \quad . \tag{2}$$

式中,$\bar{w}$ 是一个积分常数;P 为降水量;ET_0 为潜在蒸散量,$\frac{\partial R}{\partial P}$ 和 $\frac{\partial R}{\partial ET_0}$ 分别为降水量和潜在蒸散发量对径流量的影响率。

1.2.2 潜在蒸散发量计算方法

FA056—PM 公式是世界粮农组织推荐的潜在蒸散发量通用计算公式[22],该公式基于能量平衡和空气动力学原理,在不同环境和气候背景下具有较强的广泛适用性,能避免根据气候条件进行参数校正,因此本文中的蒸散发量均由此公式计算得出。

1.2.3 数理统计方法

Mann-Kendall(M-K)秩次相关检验法是一种非参数检验法,是目前比较常用的趋势诊断和突变检验方法[23]。利用 M-K 检验方法可以判断径流量、降水、气温及蒸散发量变化的拐点年份,并判别各因素的变化趋势及显著性检验。

1.2.4 Morlet 小波分析方法

由于地表径流变化趋势还易受到其他随机因素的影响,而 Morlet 小波分析方法不仅在时间与频率的局部化之间具有较好的平衡,而且能有效滤去随机因素对参数的影响,并将水文时间系列的频率特征在时间域上直观展现出来[24]。为此本文通过MATLAB 软件对盆地径流量的变化规律开展 Morlet 小波分析,并通过 Surfer 等软件制作小波分析图。

1.2.5 时间序列分析方法

根据高子毅等[16]对天山中段北坡人工增雨试验效果的评价方法，通过柯尔哥洛夫配合适度检验法(K-S)与 F—检验法对任意两个统计变量进行正态分布检验与方差相等性检验。当样本符合正太分布条件,且不存在方差显著差异时,采用 t 检验法计算径流量的增值置信区间；如果样本在显著性水平下存在方差显著差异,将采用 Welch 检验法计算径流量增值置信区间。在检验中,置信水平通常取 0.90。

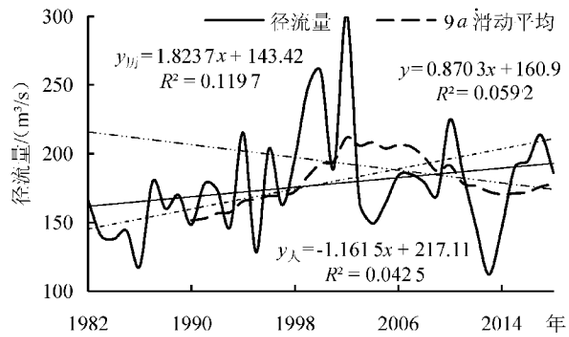

图 1 巴音布鲁克盆地汛期径流量实测值及距平

2 结果与分析

2.1 径流量变化的特征分析

2.1.1 趋势分析

由图 1 可知,1982—2018 年巴音布鲁克盆地汛期径流量有增加趋势,增加速率为 0.87 $(m^3/s)\cdot a^{-1}$,其中在 1994—2018 年人工增水期内径流量呈减小趋势,速率为-1.16 $(m^3/s)\cdot a^{-1}$,在 1982—1993 年历史期内径流量呈增加趋势,速率为 1.82 $(m^3/s)\cdot a^{-1}$。对比分析人工增水期与历史时期的汛期月累计平均径流量，发现 1994—2018 年比 1982—1993 年增加了 21.6%。由 9 a 滑动平均发现,2002 年之前呈快速增长趋势,之后呈缓慢减小趋势,这可能与 2002 年出现最高值,而 2013 年出现最低值有关。综上可知,1982—1993 年历史期是巴音布鲁克盆地汛期径流量快速增长时期,而 1994—2018 年人工增水期的径流量虽然大幅度减小,但较 1982—1993 年历史期依然有一定幅度的增加。

2.1.2 周期分析

根据小波系数实部图(图 2a)可知,盆地径流量存在 3 个明显的特征时间尺度，分别为 4~8 a 的年际尺度和 11~16 a,17~27 a 的年代际尺度,其中 11~16 a 的时间尺度在 20 世纪 90 年代之后震荡较为频繁,4~8 a 的时间尺度在 1993 年左右出现明显的短周期特征。从小波系数模等值线图(图 2b)发现,17~27 a 的时间尺度具有全域性,11~16 a 的时间尺度是变化最明显周期,4~8 a 的时间尺度在 1982—1993 年强度较为稳定，在 1994—2018 年呈增加趋势。由图 2c 和 2d 可知,开都河径流量具有 14、22、7、4 a 的周期,且平均变化周期为 5 a 左右。综上可知,在 1994—2018 年人工增水期内,盆地径流量明显增加的年份较多,且增幅显著,同时在各主周期的径流量变化上,除第 1 主周期外,剩余主周期的小波

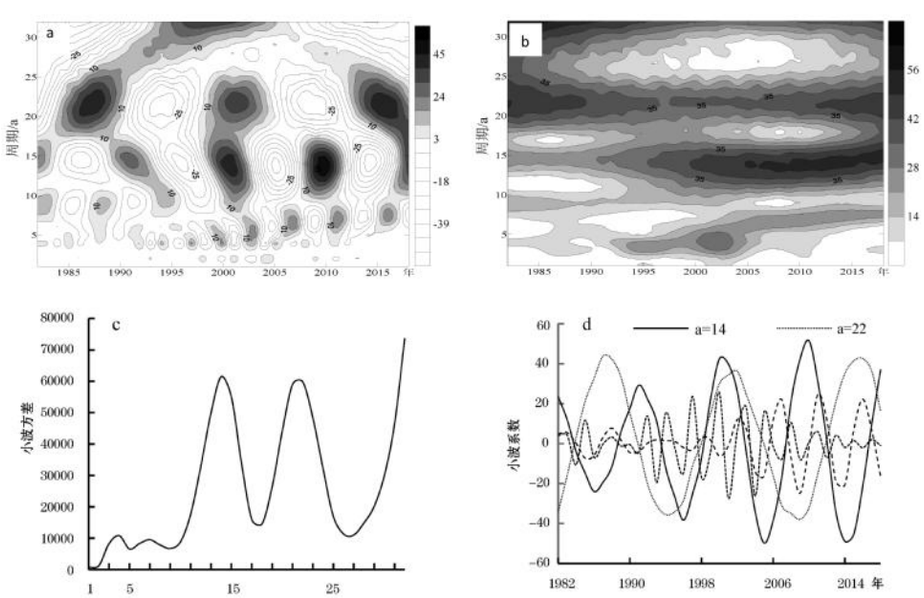

图 2 巴音布鲁克盆地汛期径流量 Morlet 小波分析

(a 为小波系数实部,b 为小波系数模,c 为小波方差,d 为小波变化系数)

系数均呈下降趋势，反映出目前汛期平均径流量较之前有所减少。

2.2 径流量变化的影响因素分析

降水和气温是影响汛期径流量变化的主要气候因素[18-19]，而蒸散发量不仅与气温密切相关，还是径流量的主要消耗量，因此为更科学分析人工增水期内径流量变化受各气候影响因素的影响程度，由各气候影响因素与径流量的相关性（表 2）可知，1982—2018 年降水量与径流量呈显著正相关，气温与径流量呈正相关，蒸散发量与径流量呈负相关，说明降水量是影响径流量变化的主要因素，且气温对径流量的增加也具有一定促进作用，而蒸散发量是水资源的消耗项。降水是各时期径流量增加的主要因素之一，蒸散发量对径流量呈“正负正”的影响变化，气温对径流量变化的影响在 1994—2006 年作业前期处于由负相关变为正相关的临界时期，并在 2007—2018 年作业后期与径流量呈正相关。

表 2 各时期径流量与降水量、气温、蒸散发量的偏相关系数

时期	降水量	气温	蒸散发量
1982—2018 年	0.663***	0.119	−0.153
1982—1993 年	0.707**	−0.425	0.367
1994—2006 年	0.692**	−0.011	−0.034
2007—2018 年	0.478*	0.148	0.032

注：*、**、*** 分别表示通过了 0.1、0.05、0.001 的显著性检验。

由图 3 可知，巴音布鲁克盆地汛期径流量及各气候影响因素在各时期变化存在明显差异。1982—1993 年，各因素的汛期月累计均值分别为：径流量为 155.3 m^3/s，降水量为 43.5 mm，气温为 8.1 ℃，蒸散发量为 163.5 mm，均普遍低于多年均值。对比 1994—2006 年与 1982—1993 年，蒸散发量平均距平百分率增加了 4.1%，气温增加了 7.2%，降水量增加了 14.1%，径流量增加了 23.8%；对比 2006—2018 年与 1994—2006 年，只有降水量和气温持续增加，增加率分别为 5.7%、2.6%。由此说明，在 1994—2006 年作业前期各因素均有较大增长，而在 2006—2018 年作业后期只有降水与温度依然呈增加趋势，且该时期径流量平均距平百分率接近于 0，表明径流量在 2006—2018 年作业后期较 1994—2006 年作业前期有减少，但较 1982—1993 年历史期有增加，这与图 1 和图 2d 的分析结论相符合。

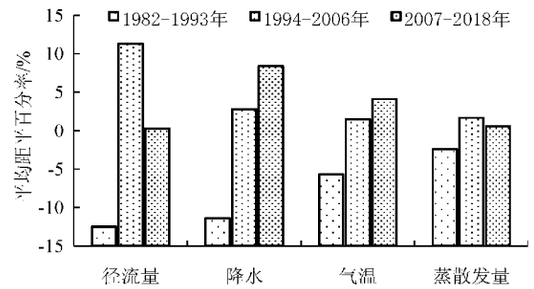

图 3 巴音布鲁克盆地径流量及各气候影响因素各时期平均距平百分率

2.3 径流量及影响因素的趋势检验分析

由图 4 可知，径流量于 1989 年发生突变，并在 1998—2013 年呈上升趋势；降水从 2005 年呈持续增长趋势，1991 年发生突变；气温发生突变年份为 1995 年，且自 1998 年起持续增长趋势；而蒸散发量变化趋势不明显。综上可知，盆地降水在 1994—2018 年人工增水期呈持续增加趋势，且 2007—2018 年作业后期比 1994—2006 年作业前期更显著；气温自 1995 年开始一直升高，而径流量在 1998—2013 年出现明显增加，考虑到巴音布鲁克盆地气温的增加将导致冰雪融水量增加，对径流量有促进作用[25-26]，径流量增加除受降水增加影响外，冰川融水量增加也是影响径流量增加的另一主要因素。而蒸散发量虽然与气温密切相关，但整体没有明显变化，这可能与巴音布鲁克盆地高寒气候显著有关[21]。结合表 2 与图 3 可知，2007—2018 年作业后期降水量与气温均增加的趋势下，径流量却减少，说明 2007—2018 年作业后期冰雪融水量并未大幅度增加，巴音布鲁克盆地内现有冰川等存量可能有缩减。

2.4 气候因素对径流量变化的定量分析

巴音布鲁克盆地地表径流量除了受降水和潜在蒸发量的波动影响外，影响径流量变化的因素还有冰雪融水量引起的变化，因此径流量的总体变化假设可以表示为：

$$\Delta R=\Delta R_{\mathrm{p}}+\Delta R_{\mathrm{ET0}}+\Delta R_{\mathrm{melt}}+\Delta R_{\mathrm{human}} \quad . \tag{3}$$

式中，ΔR 为实测径流量变化量，ΔR_{p} 为降水量变化引起的径流量变化量，ΔR_{ET0} 为蒸散发量变化引起的径流量变化量，ΔR_{melt} 为冰雪融水量变化引起的径流量变化量，$\Delta R_{\mathrm{human}}$ 为人类活动引起的径流量变化量。

根据气候敏感法公式得出的巴音布鲁克盆地各时期各因素对径流量变化的定量分析（表 3）可知，各因素在不同时期对径流量的影响存在差异。1994—2006 年冰雪融水量与人为活动对径流量的

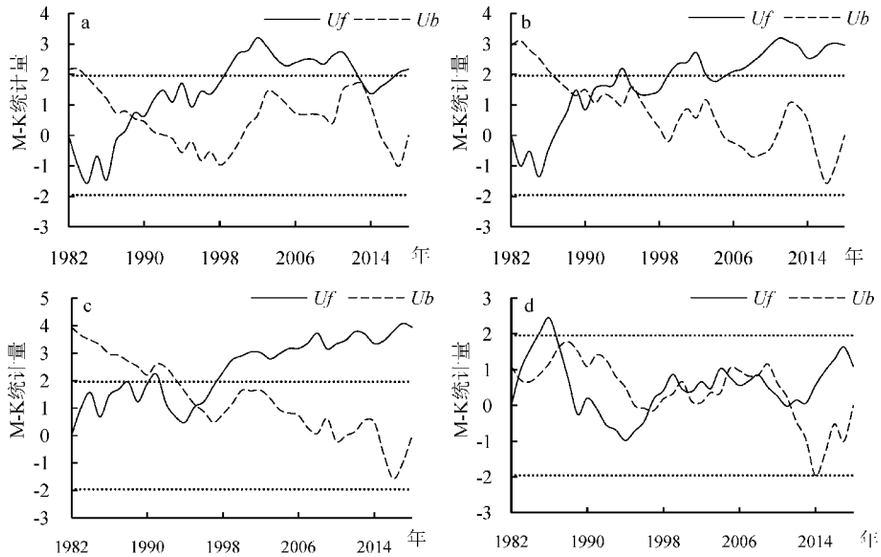

图 4　巴音布鲁克盆地汛期径流量及气候影响因素 M-K 检验

(a 为径流量,b 为降水,c 为气温,d 为蒸散发量)

表 3　不同时期的气候变化对径流的定量分析

时间	$\overline{w}$	$(\frac{\partial R}{\partial P})$/%	$(\frac{\partial R}{\partial ET_0})$/%	ΔR_p/(m³·s⁻¹)	ΔR_{ET0}/(m³·s⁻¹)	$\Delta R_{melt}+\Delta R_{human}$/(m³·s⁻¹)
1982—1993 年	1.25	69.5	−3.4			
1994—2006 年	1.34	63.1	−4.4	15.6	−3.4	30
2007—2018 年	1.11	86.6	−2.6	29.6	4.1	−51.8

共同影响量最大，达到 30 m³/s；降水量次之,为 15.6 m³/s;潜在蒸散发起到消耗作用,造成径流量减少了 3.4 m³/s。2007—2018 年,降水量对径流量的影响量比 1994—2006 年的影响最大;冰雪融水量与人为活动对径流量的共同影响量大幅减少，对径流量呈减少作用;而潜在蒸散发对径流量起到增加作用。1994—2006 年作业前期,冰雪融水量与人为活动对径流量的共同增加作用大于降水量。2007—2018 年作业后期,径流量增加的方式主要以降水为主,而潜在蒸散发对径流量的影响作用发生了从减少到增加的转变,这与表 2 结论相符。同时,高强度的人为活动会对水资源造成减少影响[27],在 21 世纪初,巴音布鲁克盆地开展了较大规模的土地和旅游开发,因此 2007—2018 年作业后期径流量的减少不仅受冰雪融水量减少影响,还与高强度人为活动影响有关。

根据各时期降水量、潜在蒸散发量对径流量的影响率，可以得到 1982—2018 年降水量对径流量的平均影响率为 73.1%,潜在蒸散发量的影响率为-3.5%,冰雪融水量及人为活动共同对径流量的影响率为 30.4%。按照陈亚宁[28]研究得出的冰雪融水量在 20 世纪 90 年代之后增加了 21.28%，可以得出人为活动对地表径流量的平均影响率为 9.12%,这与 Chen 等[20]得出的 9.5%的影响率基本一致。

2.5　人工增水因素对径流量变化的定量分析

2.5.1　参数检验分析

通过对 1982—2018 年的降水量 P、实测径流量 R 以及受降水量影响的径流量 R_p 正态分布检验(表4)，发现各种统计变量的 D 值均小于给定显著性水平 α=0.05 的检验统计量 $D_{0.05}$ 值,且显著性水平 P_0>0.05。由此说明,所有统计变量都符合正态分布。

表 4　不同统计变量的正态分布性检验

统计变量	D	$D_{0.05}$	k	P_0
P	0.108	0.659	0.223	0.777
R	0.131	0.797	0.451	0.549
R_p	0.157	0.956	0.68	0.32

由各种统计变量方差齐性 F 检验表（表 5)可知,各种统计变量能采用的统计检验方式各不相同,其中受降水量影响的径流量 R_p 可采用 t 检验法;降水量 P 可采用 Welch 检验法；而实测径流量 R 在 1982—1993 年与 1994—2006 年的对比分析中,适合用 t 检验法；在 1994—2006 年与 2007—2018 年

的对比分析中，适合用 Welch 检验法。

表 5 不同时期的各种统计变量方差齐性 F 检验

对比时期	P		R		R_p		自由度
	F_p	$F_{0.05}$	F_R	$F_{0.05}$	F_{Rp}	$F_{0.05}$	n_1、n_2
1982—1993 年与 1994—2006 年	0.39	0.34	0.15	0.34	0.18	0.34	n_1=10 n_2=11
1994—2006 年与 2007—2018 年	2.98	2.94	3.08	2.94	1.64	2.94	n_1=11 n_2=10

2.5.2 Welch 检验与 t 检验

由表 6 可知，不同时期的显著性检验结果具有一定差异性。对比 1994—2006 年与 1982—1993 年，发现各种统计变量均显著增加，其中实测径流量 R 不仅显著性检验水平最高，达到了 α=0.004，且增率最大，为 18.28%；而受降水量影响的径流量 R_p 与降水量 P 的增率基本一致，分别为 3.82%、4.48%，由此可知受其余因素影响的径流量增率为 14.46%。对比 2007—2018 年与 1994—2006 年，发现只有受降水量影响的径流量 R_p 能在显著性 α=0.053 水平上，检验出径流量的增量为 16.7 $m^3 \cdot s^{-1}$，增率为 12.04%。1994—2006 年作业前期，径流量增加受其余因素影响最大，而 2007—2018 年作业后期，径流量增加主要以降水影响为主，这与表 3 的结论一致，因此用气候敏感法定量分析各气候因素对径流量的影响结果比较符合实际，而巴音布鲁克盆地开展人工增水作业有助于汛期径流量增加，且火箭作业的后期比高炮作业的前期增水效果更高。

表 6 巴音布鲁克盆地不同时期人工增水效果序列分析表

统计分析结果	1982—1993 年与 1994—2006 年			1994—2006 年与 2007—2018 年		
	P	R	R_p	P	R	R_p
z	1.929	—	—	0.796	-1.19	—
t	—	2.923	1.816	—	—	2.891
$t_{2\alpha}$	1.327	1.319	1.319	1.329	1.327	1.319
v	19.5	23	23	18.3	19.2	23
a	0.027	0.004	0.043	0.212	0.883	0.053
Q/($m^3 \cdot s^{-1}$)	2.2	23.2	4.6	—	—	16.7
R/%	4.48	18.28	3.82	—	—	12.04

3 讨论

由于能反映流域下垫面特征的唯一参数 $\overline{w}$ 计算繁琐复杂，因此利用 Python 软件根据水量平衡方程与傅抱璞公式的结合式，计算出巴音布鲁克盆地流域各时期的参数 $\overline{w}$。对比其他学者对该参数的研究结果，发现其取值范围在 1.0~4.9[29-31]，尤其姚俊强等[21]计算出巴音布鲁克盆地径流的参数值为 1.21，这与本文得出的参数值相差不大，说明各时期参数选取较为合理。

由于人工增水作业的影响，盆地降水量在人工增水时期可分为自然降水与人工催化降水，根据人工增水时期降水量对地表径流量的平均影响率为 74.85%，人工增水对径流量的平均影响率为 7.93%，该时期自然降水对径流量的平均影响率为66.92%。1982—2018 年，气候性降水对径流量的影响率为 68.21%，这与姚俊强等[21]得出盆地降水量对径流影响率为 62.67%的结论相差不大。

对比气候因素定量分析与人工增水因素定量分析的结果，发现 1994—2006 年作业前期，冰雪融水量等因素对径流量的影响量比降水对径流量的影响量多 14.4 m^3/s，此时期受冰雪融水量等因素影响的径流量增率比受降水影响的径流量增率高10.64%；2007—2018 年作业后期，降水不仅对径流量的影响量增多了 14 m^3/s，且受降水影响的径流量 R_p 增率也增加了 8.22%，而该时期冰雪融水量等因素不仅对径流量呈减流影响，还无法有效检验出对径流量的增加程度。降水对巴音布鲁克盆地径流量的影响程度逐渐增加，而在全球变暖背景下，冰雪融水量等因素对径流量的影响程度正逐渐减小，山区盆地的冰川储量可能正缓慢减少，长期如此流域将面临水资源危机[25]。

人工增水作为水资源安全保障、生态保护修复的重要措施之一，一直受到广泛关注，尤其国办发〔2020〕47 号文件的出台，更是体现出国家对人工增水业务的重视与认可，因此积极开展人工增水作业不仅能有效缓解当地水资源短缺的问题，也能进一步满足当地生态文明建设、经济社会发展等需求。

4 结论

（1）近 37 年来巴音布鲁克盆地汛期径流量呈增加趋势，并具有多时间尺度下的枯位交替变化，其周期为 14、22、7、4 a。目前除 14 a 时间尺度的径流量呈上升趋势外，其余均呈下降趋势，表明目前径流量较前期呈减少趋势。

（2）巴音布鲁克盆地汛期降水量对径流量的平均影响率为 73.1%，其中自然降水的影响率为 68.21%，人工催化降水的影响率为 7.93%，潜在蒸散发量对径流量的影响率为-3.5%，受温度升高导致冰雪融水量的增加对径流量的影响率为 21.28%，人为活动对径流量的影响率为 9.12%，说明径流量变

化主要受气候降水的影响。

(3)1994—2006 年作业前期比 1982—1993 年历史期的盆地汛期径流量增加了 27.2%，这主要是由降水量增加和气温升高导致冰雪融水量增加的共同影响，而 2007—2018 年作业后期比 1994—2006 年作业前期径流量减少了 9.1%,这主要与冰雪融水量的减少以及高强度人为活动的增加有关。

(4)1994—2006 年作业前期与 2007—2018 年作业后期有 90%的概率能检验出受降水量影响的径流量分别增加了 4.6 与 16.7 m^3/s,增率为 3.82%、12.04%,说明在巴音布鲁克盆地汛期开展人工增水作业能有效增加径流量，而火箭作业模式的人工增水作业效率更好。

参考文献:

[1] 焦晨泰,宋世雄,黄庆旭,等.基于 Google Earth Engine 平台的官厅水库流域开放水体动态研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(5):1-10.

[2] Liepert B G.Global dimming and brightening and the water cycle.2005.

[3] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展,2009,20(2):6.

[4] 张雪芹,孙杨,毛炜峄,等.中国干旱区气温变化对全球变暖的区域响应[J].干旱区研究,2010.

[5] TULBURE M G,BROICH M,STEHMAN S V,et al.Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi -arid region [J].Remote Sensing of Environment,2016,178:142-157.

[6] LI B F,CHEN Y N,CHEN Z S,et al.Trends in runoff versus climate change in typical rivers in the arid region of northwest China [J].Quaternary International,2012,282:87-95.

[7] 王倩.开都河流域近 50 年径流变化特征及对气候变化的响应[D].济南:山东科技大学,2015.

[8] 赵阳,余新晓,郑江坤,等.气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响 [J]. 农业工程学报,2012,28(22):9.

[9] 张一驰,周成虎,李宝林.基于 Brown-Forsythe 检验的水文序列变异点识别[J].地理研究,2005,24(5):741-748.

[10] 吴彬,杜明亮,穆振侠,等.1956—2016 年新疆平原区地下水资源量变化及其影响因素分析 [J]. 水科学进展,2021,32(5):11.

[11] 袁瑞强,青松.1990—2015 年内蒙古地表水时空变化特征研究[J].灌溉排水学报,2021,40(2):8.

[12] 盛昱凤,薛媛媛,戚丽萍,等.1960 年以来太湖水位变化特征及影响因素分析[J].北京师范大学学报:自然科学版,2021,57(1):7.

[13] 张玉娜,徐长春,李卫红,等.开都河流域气候变化特征及其对径流的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(1):81-89.

[14] 叶家东,程克明.古田水库地区人工降水试验效果统计分析[J],大气科学,1979(2):131-140.

[15] 冯宏芳,隋平,蔡英群,等.蓄水型人工增雨效果检验[J].气象科技,2010,38(4):5.

[16] 高子毅,张建新,廖飞佳,等.新疆天山山区人工增雨试验效果评价[J].高原气象,2005,24(5):734-740.

[17] 唐林,蔡荣辉,王治平,等.湖南省夏季大型水库人工增雨效果效益评估方法[J].长江流域资源与环境,2008,17(A01):5.

[18] 韩鑫.GIS 支持下开都河流域水文特征定量分析[D].成都:四川师范大学,2014.

[19] 王维霞,王秀君,姜逢清,等.近 30 a 来开都河上游径流量变化的气候响应[J].干旱区研究,2013,30(4):6.

[20] CHEN Z,CHEN Y,LI B.Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region of northwest China[J].Theoretical and applied climatology,2013,111(3-4):537-545.

[21] 姚俊强,杨青,韩雪云,等.气候变化对天山山区高寒盆地水资源变化的影响——以巴音布鲁克盆地为例[J].干旱区研究,2016,33(6):1167-1173.

[22] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J].地理学报,2011,66(5):10.

[23] KADIOLGU M. Trends in surface air temperature data over Turkey [J].International Journal of Climatology,1997,17:511-520.

[24] 王鹏飞,郭云艳,周康.1961—2018 年呼伦湖水面面积变化特征及其对气候变化的响应 [J]. 环境科学研究,2021,34(4):9.

[25] 姚亚楠,徐俊荣,郭玲鹏,等.气温与降水形态关系研究——以开都河流域为例[J].干旱区研究,2015,32(1):94-101.

[26] 时卉,杨兆萍,韩芳,等.干旱区高山湿地生态风险时空变化——以巴音布鲁克自然遗产地为例[J].干旱区研究,2015,32(3):8.

[27] 刘晓琼,刘彦随,李同昇,等.高强度能源开发区河流径流量演变及其减流成因——以窟野河为例[J].兰州大学学报(自科版),2014(3):299-304.

[28] 陈亚宁.中国西北干旱区水资源研究[M].北京:科学出版社,2014.

[29] 孙福宝. 基于 Budyko 水热耦合平衡假设的流域蒸散发研究[D].北京:清华大学,2007.

[30] XU X,LIU W,SCANLON B R,et al.Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework [J].Geophysical Research Letters,2013,40(23):6123-6129.

[31] 徐静馨,郑有飞,吴荣军,等.里下河地区下垫面变化对降水、气温、风速的影响 [J]. 气象与环境科学,2016,39(4):14-22.

沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology
第16卷 第6期
2022年12月

Water Resources Variation Trend and Influencing Factors in Flood Season of Bayanbulak Basin in the TianShan Mountains

DIAO Peng, LI Gang, ZHANG Weixuan
(Meteorological Bureau of Bayingol Mongolian Autonomous Prefectrue, Korla 41000, China)

Abstract Based on the daily meteorological data of Bayanbulak meteorological station and the monthly runoff data of Dashankou hydrological station during 1982-2018, and the morlet wavelet analysis, sensitive method and water balance method, combined with time series analysis method were used to analyze the change trend of surface runoff in the Bayanbulak Basin and climate change and the effects of artificial rainfall enhancement on the runoff of Kaidu River in the flood season (May to September). The results showed that: in recent 37 years, the runoff of Bayanbulak Basin increased in flood season, and the abrupt change was observed in 1989. It presented the periodic variation of runoff was 14, 22, 4 and 7 a, the periods of 17-27, 11-16 a and period of 4-8 a were alternations of runoff. The main factor affecting the change of runoff was precipitation, and the average influence rate of precipitation on runoff was 73.1%. The precipitation in the basin can be divided into natural and artificial catalytic because of artificial precipitation enhancement, the impact rate of natural precipitation on runoff was 69.5% in the historical period (1982-1993), 59.28% in the early stage of the operation (1994-2006), 74.56% in the later stage of the operation (2007-2018), the average impact rate of artificial catalytic precipitation on the runoff change during the artificial water augmentation period (1994-2018) was 7.93%. It shows that the dependence of runoff on precipitation is increasing and the artificial precipitation enhancement operation can significantly increase the runoff.

Key words artificial precipitation enhancement; precipitation; runoff; statistical test; Bayanbuluk Basin