

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0017
WEN Guangchao, WANG Wenke, DUAN Lei, et al. Response of runoff to climate change and human activity in the upper reaches of the Bayin River, Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 136–144. [文广超, 王文科, 段磊, 等. 青海柴达木盆地巴音河上游径流量对气候变化和人类活动的响应[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 136–144.]

青海柴达木盆地巴音河上游径流量对气候变化和人类活动的响应

文广超^{1,2}, 王文科¹, 段磊¹, 李一鸣¹, 赵佳辉¹
(1. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 基于1959–2013年径流量及气象数据, 运用Mann-Kendall趋势检验、R/S分析、累积量斜率变化率等方法, 分析了青海柴达木盆地巴音河上游径流的年际变化、年内分配、变化趋势及其周期性, 定量评估了降水变化和人类活动对径流量变化的贡献率。结果表明: 巴音河上游径流量以 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 倾向率呈显著上升趋势, Hurst指数为0.78, 存在20 a左右的丰平枯变化周期, 21世纪流域进入丰水期; 径流量变化以21~22 a的年代际变化周期最为显著, 同时存在10~11 a的年际变化主周期; 径流量年内分配不均匀, 集中于夏秋两季, 径流量呈现先增后减的单波峰分布特点, 进入21世纪, 年内最大月径流量呈现向后推迟的趋势, 年内分配趋于集中; 径流突变发生在2001年, 降水对巴音河上游径流量增加的贡献率为83.06%, 人类活动的贡献率为16.94%。因此, 气候是影响巴音河上游河流径流变化的主要因素, 人类活动的影响次之。研究结果对巴音河流域未来水资源开发利用和生态环境保护有一定的指导和借鉴意义。

关键词: 巴音河; 德令哈; 径流; 气候变化; 人类活动; 影响因素

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)01-0136-09

0 引言

近年来, 全球气候变化和人类活动的加剧不同程度地改变了水文循环过程^[1-2], 其带来的水文效应得到了国内外学者的广泛关注^[3-4], 在气候变化与人类活动对水文过程的影响方面, 国内外学者做了大量研究工作^[5-6], 取得了一系列研究成果。特别是在气候变化与人类活动对地表径流的影响方面, 何旭强等^[7]运用累积量斜率变化率法, 分析了气候变化和人类活动对黑河上中游径流量的贡献率, 发现二者对上游径流量增加的贡献率分别为59.71%、40.29%, 对中游径流量减少的贡献率分别为25.23%、74.77%。张调风等^[8]等运用累积量斜率变化率法定量评估了气候变化和人类活动对湟

水河流域径流量的影响, 发现人类活动对径流量的减少起主导作用。陈伏龙等^[9]运用累积量斜率变化率方法, 计算了玛纳斯河流域肯斯瓦特站降水量、蒸发量及人类活动对径流量增加的贡献率, 发现气候变化是影响出山口径流量变化的主要因素。代稳等^[10]应用降水径流多元线性经验模型, 评估了长江中游气候变化和人类活动对径流减少的贡献率, 发现人类活动对径流变化的贡献率高于气候变化。冯畅等^[11]应用SWAT模型, 探讨了气候和土地利用变化对涟水流域径流的影响, 认为气候变化对流域径流减少的贡献在逐渐上升, 而土地利用对径流增加的贡献率在下降。上述研究表明, 在不同地区的不同流域、同一流域的不同地段, 气候变化和人类活动对径流量的影响不同。因此, 针对不同

收稿日期: 2017-07-17; 修订日期: 2017-11-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(41230314); 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室开放基金项目(2014G1502022); 中国地质调查局“柴达木盆地循环经济试验区重点地区(德令哈)地下水勘查”项目(1212011220975); 中国地质调查局西安地质调查中心“柴达木盆地巴音河-塔塔河流域1:5万水文地质调查”项目(121201011000150019)资助
作者简介: 文广超(1979–), 男, 河南西平人, 副教授, 2008年在河南理工大学获硕士学位, 现为长安大学在职博士研究生, 从事流域地下水循环演化研究。E-mail: wengc366@163.com.

区域，特别是生态环境脆弱的西北干旱半干旱地区，开展径流量对气候变化与人类活动的响应研究，分析水资源变化的原因，对于有效应对气候变化与人类活动诱发的水文循环过程变化、保持流域经济社会可持续发展具有重要的科学和现实意义。

巴音河作为青海省德令哈地区最大的内陆河，对地区工农业生产、人类生活及生态平衡具有重要的作用。近年来得到了众多学者的关注，在气候变化特征^[12-13]、土地利用/土地覆盖变化^[14]、水资源开发利用^[15]等方面开展了大量研究，但有关气候变化与人类活动对巴音河流域径流量变化影响的研究成果相对较少。受全球气候变暖的影响，巴音河上游径流量呈明显增加的趋势，但随着经济社会的快速发展，上游蓄集峡水库建设、泽令沟草场与农田灌溉、水源地取水等人类活动势必会引起上游径流量变化，进而影响水资源供需平衡，严重时会影响社会的健康发展。有关气候变化和人类活动对巴音河上游径流量变化的贡献率，目前尚未见到定量分离的研究报道。因此，本文从巴音河上游径流量的变化特征及影响因素入手，定量评价气候变化和人类活动对径流量的影响程度，以期能为流域水

资源合理配置、生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况

巴音河(图 1)位于青海省海西州德令哈市境内，地处青藏高原的东北部，发源于祁连山支脉却苟力安木吉勒(野牛脊山)，源头海拔 5 000 m 左右，河流长 320 km，流域总面积为 17 608 km²^[14]。流域内的主要河流有巴音河和白水河，巴音河经过几番潜流和溢出后，最终汇入下游的可鲁克湖、托素湖和尕斯库勒湖。本文的研究区为巴音河上游即德令哈水文站以上的区域，河流全长约 220 km，流域面积为 7 281 km²^[15]，地形上主要由两侧的宗务隆山、布赫特山和中间的巴音河上游河谷组成，主体地形特点是北高南低、东高西低。区内地貌主要为侵蚀构造中高山和冲洪积平原，前者分布于北部基岩山区，受构造运动和冰川、河水的强烈侵蚀，地形切割强烈，植被稀疏，主要的植被类型为康巴、盐爪爪、沙蒿等，岩石裸露，山体沟谷纵横，多呈 V 字型沟谷；后者主要分布于泽令沟盆地，少见冲沟，植被生长茂盛，为草场和人工改造农田的主要分布区，植被类型主要有芨芨草、针茅草、草

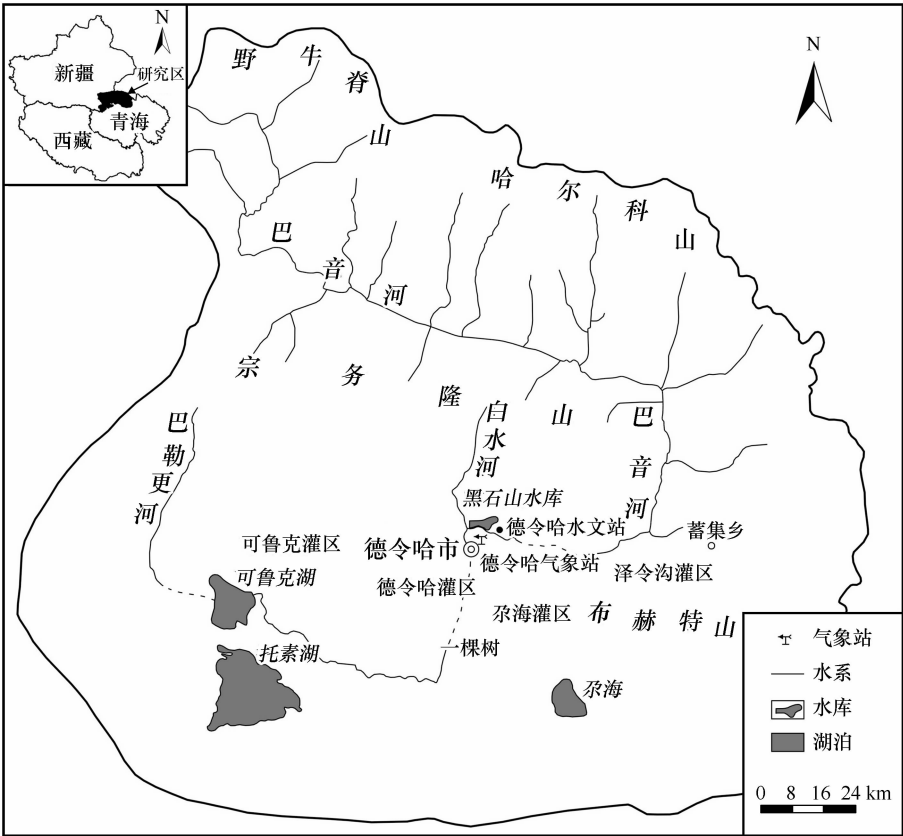


图 1 巴音河流域水系分布
Fig. 1 River system in the Bayin River basin

甸等,农作物主要为油菜和青稞。

巴音河流域为典型的高原荒漠半荒漠干旱气候区^[15],据德令哈气象站资料,多年平均气温为 3.9℃,多年平均降水量为 169.3 mm,多年平均蒸发量为 2 036.3 mm。日照时间长,全年日照时数为 3 124.8 h,年辐射总量为 724.1 kJ·cm⁻²,无霜期一般为 84~99 d。降水多集中在 5~9 月,占全年降水量的 85%。山区降水、冰雪融水形成的地表径流与地下水,以及宗务隆山、布赫特山的山区基岩裂隙水等是流域水资源的主要构成,年均地表径流量达到 3.3×10⁸ m³。区内分布的主要水利工程有已建成水库 1 座(黑石山水库),在建水库 1 座(蓄集峡水库)。此外,有德令哈、尕海和泽令沟 3 个大的农灌区(引巴音河水),有德令哈市水气总公司、青海碱业、昆仑碱业、德令哈工业园区等 4 个水源地(开发地下水)。

2 数据与方法

2.1 数据来源

径流数据为德令哈水文站资料,降水、温度和蒸发数据为德令哈市气象站资料,资料系列为 1959

年 1 月至 2013 年 12 月,数据均为 1959~2013 年的月平均值。

2.2 研究方法

本文利用年极值比(最大、最小年径流量的比值)和变差系数分析径流量的年际变化特征^[16];利用不均匀系数^[17]、集中度与集中期^[18]、完全调节系数^[19]等研究巴音河上游径流年内分配特点;利用线性趋势分析、Mann-Kendall 趋势检验^[20-21]、R/S^[22]等方法分析巴音河上游径流的变化趋势及其持续性;利用 Morlet 小波分析研究径流序列变化的周期性^[23];利用累积量斜率变化率法^[5]定量区分气候变化与人类活动对径流变化的贡献率。

3 径流变化特征

3.1 年际变化

通常利用年极值比和变差系数分析径流量的年际变化特征,其值越大,说明流域径流年际变化越剧烈。由表 1 可知,巴音河上游年径流极值比和变差系数在 1960~1999 年呈减小趋势,1990~1999 年极值比和变差系数最小,说明该时期径流变化量较小。进入 21 世纪后,极值比和变差系数变化较

表 1 1959~2013 年德令哈水文站径流年内与年际分配统计特征
Table 1 Statistic characteristics of annual and inter-annual runoff distribution at Delhi Hydrological Station

年份	极值比	变差系数	不均匀系数	完全调节系数	集中度/%	集中期	
						合成向量方向/(°)	出现日期
1960~1969	1.79	0.17	0.72	0.14	19.27	195.06	7 月 18 日
1970~1979	1.70	0.16	0.70	0.19	25.57	208.86	8 月 1 日
1980~1989	1.61	0.15	0.69	0.19	26.97	188.33	7 月 11 日
1990~1999	1.43	0.12	0.68	0.16	22.01	209.44	8 月 2 日
2000~2009	2.56	0.28	0.69	0.25	34.83	201.88	7 月 24 日
2010~2013	2.24	0.26	0.71	0.28	37.53	210.27	8 月 3 日
1959~2013	2.75	0.24	0.70	0.19	26.41	198.76	7 月 21 日

大,径流年际变化变大。

将径流量用《水文水情预报规范》(GB/T 22482-2008)中的距平百分率 $P[P=(\text{某年年径流量}-\text{多年平均径流量})/\text{多年平均径流量}\times 100\%]$ 作为划分径流丰、平、枯的标准。绘制巴音河上游德令哈水文站历年径流距平百分数及模比系数差积曲线,如图 2 所示。从历年径流距平百分数来看,20 世纪 60 年代处于偏枯水期($-20\% < P \leq -10\%$),20 世纪 70 至 80 年代处于平水期($-10\% < P \leq 10\%$),20 世纪 90 年代处于偏枯水期,21 世纪后为偏丰水期($10\% < P \leq 20\%$)。其中

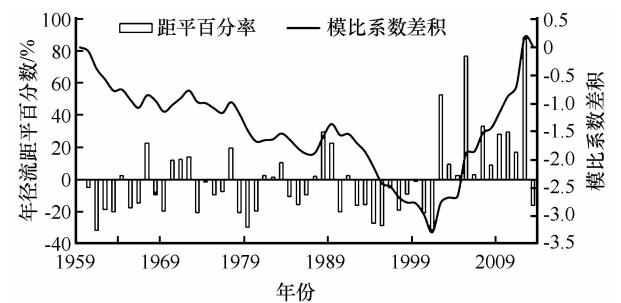


图 2 1959~2013 年德令哈水文站径流的年际变化
Fig. 2 Inter-annual variation of runoff at Delhi Hydrological Station from 1959 to 2013

1961、1973、1978、1979、1994、1995、2000、2001 年为特枯水年 ($P \leq -20\%$), 1967、1988、1989、2002、2005、2009、2010、2012 年为特丰水年 ($P > 20\%$)。从图 2 可以看出, 德令哈水文站径流年际变化存在 3 个丰平枯周期: 1959 – 1966 年为枯水期, 1967 – 1976 年为平水期, 1977 – 1986 年为偏枯水期, 1987 – 1989 年为丰水期, 1990 – 2001 年为枯水期, 2002 – 2012 年为丰水期。德令哈水文站径流量存在 10 a 左右的年际变化特征, 并存在 20 a 左右的丰平枯变化周期。

3.2 年内分配

径流的年内分配受补给条件影响四季分明, 从计算结果和图 3 可知, 春季(3 – 5 月)随着气温升高, 山区冰雪融化和河流解冻, 形成春汛, 流量开始显著增加, 来水量占全年径流量的 18.23%; 夏季(6 – 8 月)和秋季(9 – 11 月)是流域降水较多的时期, 也是流域洪水期, 这一时期(6 – 11 月)的来水量占全年径流量的 64.49%; 冬季(12 月至翌年 2 月)由于河水结冰, 径流主要来自于地下水补给。连续最大 4 个月径流量出现在 6 – 9 月, 占全年径流量的 50.55%。多年平均的最大月径流量出现在 7 月, 占全年径流量的 16.02%; 最小径流量出现在 2 月, 其径流量占全年径流量的 5.23%。由图 3 可知, 整体上, 德令哈水文站不同年代径流年内分配特征均呈现先增加后减少的单波峰分布, 月径流量在 1 – 2 月处于低值, 3 月以后随着气温的上升, 上游冰雪融化及河水解冻使得月径流量开始增加, 5 月以后急剧增加至 7、8 月达到最大值, 8 月以后开始急剧减少, 至 12 月达到低值。20 世纪 60 – 80 年代年径流量呈增加趋势, 20 世纪 90 年代有所减少, 进入 21 世纪以来, 径流量显著增加, 特别是 7、8

两个月的径流量增加明显, 2000 – 2009 年、2010 – 2013 年 7 – 8 月径流量分别占全年径流量的 37.74%、41.10%。

德令哈水文站径流年内分配不均匀系数、完全调节系数、集中度和集中期的计算结果见表 1。由表中可知, 1970 – 2013 年不均匀系数和完全调节系数的变化规律基本一致, 20 世纪 70 – 90 年代呈减少趋势, 90 年代的值最小, 进入 21 世纪开始增加。从径流年内分配集中度来看, 20 世纪 60、70、90 年代的值小于多年平均值, 径流年内分配相对不集中; 20 世纪 80 年代、21 世纪初的集中度值大于多年平均值, 径流年内分配相对集中。进入 21 世纪, 径流集中期相对于多年均值推迟了 3 ~ 13 d, 不均匀系数、完全调节系数和集中度均呈增大趋势, 说明径流量年内分配不均匀性增强, 年内分配趋于集中, 这与图 3 的结果一致。从集中期来看, 总体上, 德令哈水文站最大径流出现在 7 月中下旬至 8 月初, 分布相对集中。

3.3 变化趋势

从图 4 可以看出, 1959 – 2013 年德令哈水文站年径流量以 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的倾向率呈显著上升趋势(通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验), 从 6 阶多项式演变趋势看, 年均径流量呈“上升 – 下降 – 上升”的波动上升趋势(通过了 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平检验)。对 1959 – 2013 年年均径流量进行 Mann-Kendall 趋势检验, 其值(用 M 表示)为 1.82 (> 0), 说明年平均径流量呈递增趋势, 并通过了 $\alpha = 0.1$ 的显著性检验。利用 R/S 分析方法对年径流量序列的持续性进行分析, 计算得到的 Hurst 指数即 H 值为 0.78 (> 0.5), 说明未来径流量变化将保持当前的变化趋势。为了进一步分析径流量呈递增趋势的原因, 基于 1959 – 2013 年的降水数据, 利用 Mann-Kendall 方法计算了降水量变化

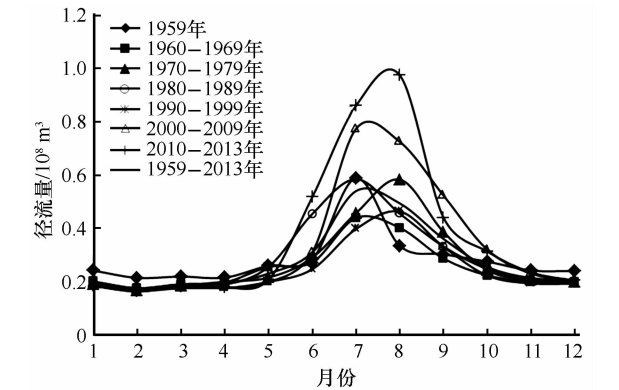


图 3 1959 – 2013 年德令哈水文站径流量的年内分配
Fig.3 Monthly variations of runoff at Delhi Hydrological Station from 1959 to 2013

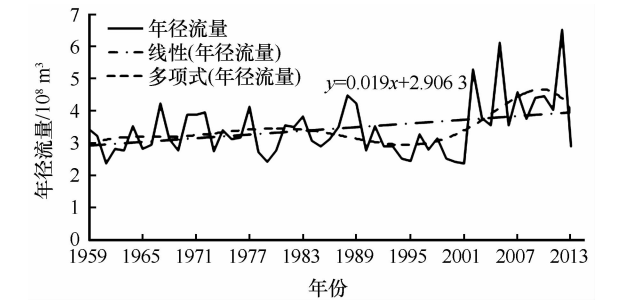


图 4 德令哈水文站径流量的年际变化趋势
Fig.4 Variation of the annual and seasonal runoffs at Delhi Hydrological Station

趋势, $M=4.55(>0)$, 说明降水量呈显著增加趋势, 并通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。作为巴音河上游径流的主要补给来源, 降水量的增加势必引起径流量的增大, 结合上述 M 和 H 值, 按照当前的下垫面条件, 未来巴音河上游的年径流量将保持上升的变化趋势。

3.4 周期性

对德令哈水文站年径流量进行小波分析, 得到小波系数实部等值线[图 5(a)], 图中实线为正值, 虚线为负值]和小波方差[图 5(b)]图。由图中可知, 德令哈水文站年径流量具有显著的年际及年代际变化特征, 年际变化的主周期为 10~11 a, 年代际变化以 21~22 a 为主周期, 此外 4~5 a 的变化周期也比较明显。从小波系数实部等值线可以看出, 2013 年以后小波系数实部等值线均为正相位, 且等值线未闭合, 推测未来一段时间巴音河上游将处于年径流量偏多期。

4 径流变化的影响因素

4.1 气候

对巴音河流域降水、气温、蒸发量和年径流量

进行分析(图 6), 结果表明 1959 年以来流域降水呈显著增加趋势(通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验), 倾向率为 $19.1\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 径流与降水的波动变化趋势一致, 说明降水是径流的主要补给源。2001 年之前, 降水波动与径流波动基本一致, 径流波动滞后于降水, 2001 年后这种趋势增强, 1959~2013 年气候变化导致流域气温显著升高(通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验), 但蒸发量呈显著减少趋势(通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验), 倾向率为 $-150.5\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。对降水、年径流量、蒸发量、气温进行相关分析, 降水与年径流量的相关系数为 0.65, 蒸发量与年径流量的相关系数为 -0.59 , 通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验, 气温与年径流量的相关系数为 0.13, 未通过显著性水平检验, 气温对径流量变化的影响较小。因此, 降水量增加和蒸发量减少是导致流域年径流量变化的主要因素。

4.2 降水和人类活动

根据上述分析, 降水是年径流量变化的主要影响因素, 同时考虑到上游引水灌溉(泽令沟草场和农田灌溉)、水源地取水(青海碱业、昆仑碱业及德

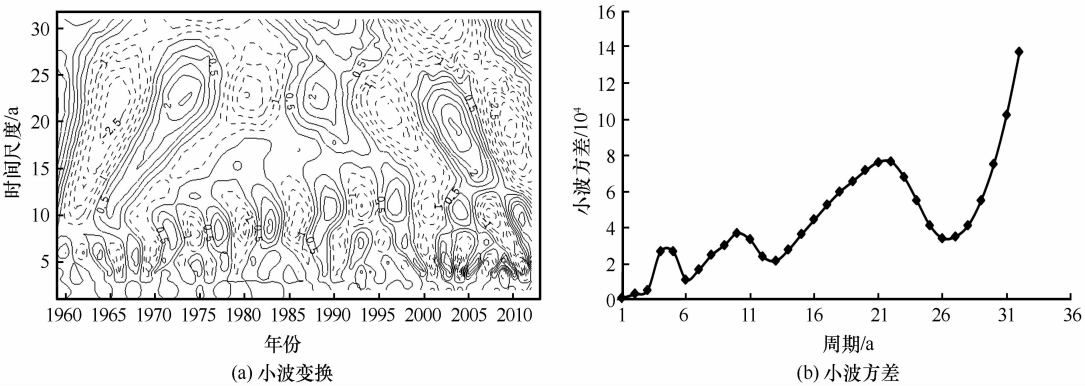


图 5 德令哈水文站年径流量小波变换及小波方差
Fig. 5 Wavelet transform and wavelet squared difference of annual runoff at Delhi Hydrological Station

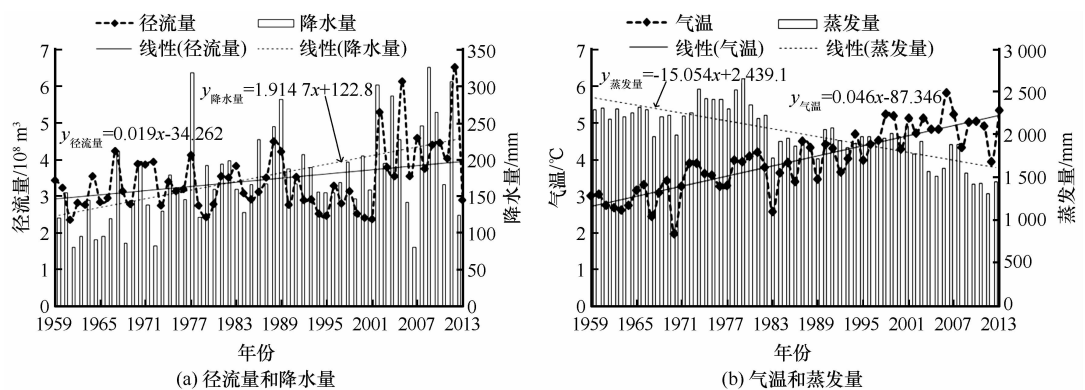


图 6 巴音河流域降水、气温、蒸发量和径流量的年际变化
Fig. 6 Variations of annual runoff and precipitation (a), temperature and evaporation (b) in the Bayin River basin

令哈市水气总公司水源地取水) 等人类活动的影响, 运用王随继等^[5]提出的累积量斜率变化率方法, 分析降水和人类活动对年径流变化的影响。第一步, 利用累积距平分析法确定径流突变点, 划分年径流变化的基准期与变异期。由图 7(a) 可知, 2001 年年径流累积距平达到最小值, 之前累积距平值呈现下降趋势, 之后累积距平值呈现上升趋势, 因此将 2001 年确定为突变点。1959–2000 年为基准期, 2001–2013 年为变异期。第二步, 定量分析气候和人类活动对年径流量变化的影响程度。以 2001 年为界, 分别做巴音河上游年份与累积径流量、累积降水量之间的关系曲线, 结果见图 7(b)~(c)。可见, 累积径流量、累积降水量与年份之间的拟合方程相关性高, 相关系数达到 0.99 以上, 并通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。由表 2 可知, 在整个研究期内, 年径流量和降水量呈增加趋势, 依据累积量斜率变化率方法, 可计算出降水量增加对年径流量增加的贡献率为 83.06%, 在不考虑其他因素影响时人类活动对年径流量增加的贡献率为 16.94%, 说明巴音河上游年径流变化受人类活动的影响相对较弱。

5 讨论

从上述分析知, 随着温度的升高, 巴音河流域蒸发量呈现减少的趋势。首先, 降水量的增加, 以及德令哈地区的气候呈现暖湿化趋势^[24], 使得空气湿度增加, 引起蒸发量减少; 其次, 近年来研究区风速减小, 减缓了空气流通, 导致蒸发量减少^[25]; 再次, 近 30 年来巴音河上游地区未利用土地减少, 大部分转换成了草地和林地, 使得其面积增加了近 40 km², 增加的林地和草地改变了土壤贮水能力, 也可能导致蒸发量减少^[26]。

研究表明, 20 世纪 50 年代至今, 我国西北干旱地区的疏勒河^[27]、黑河^[28]等流域上游(出山口)径流量均表现出上升趋势, 巴音河流域上游径流量变化趋势与之相似, 这可能与西北地区近年来气候

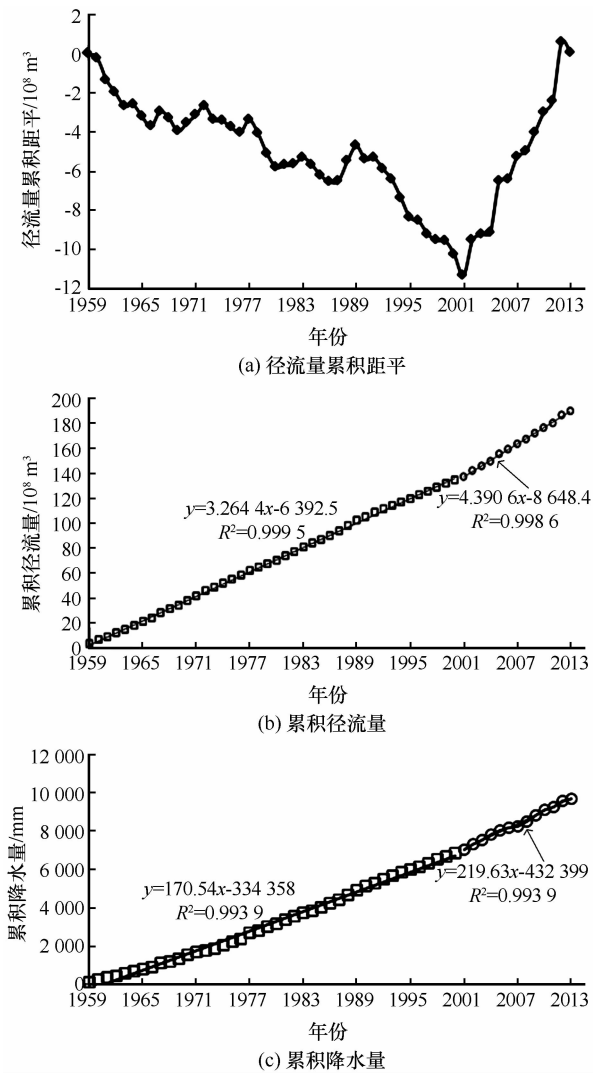


图 7 巴音河流域年径流量累积距平、累积径流量、累积降水量变化特征

Fig. 7 Variations of the accumulative runoff anomaly (a), accumulative runoff (b) and accumulative precipitation of the Bayin River basin

呈暖湿化趋势有关^[29]。根据曾彪等^[24]、施雅风等^[30]的研究成果, 德令哈地区近年来气候也呈现暖湿化趋势。由气象资料可知, 1959–2013 年巴音河流域降水量和气温呈显著增加趋势, 气温升高导致山区冰雪消融, 二者综合作用使得巴音河上游径

表 2 巴音河流域累积径流量、累积降水量斜率及其变化		
Table 2 Accumulative runoff slope and accumulative precipitation slope in benchmark phase (1959–2000) and variation phase (2001–2013) in the Bayin River basin		
项 目	累积径流量斜率/(10 ⁸ m ³ · a ⁻¹)	累积降水量斜率/(mm · a ⁻¹)
基准期(1959–2000 年)	3.26	170.54
变异期(2001–2013 年)	4.39	219.63
变异期相对基准期的变化量	1.13	49.09
变异期相对基准期的变化率/%	34.66	28.79

流量表现出上升趋势。

前人运用不同方法,在黑河^[7]、玛纳斯河^[9]、石羊河^[31]、疏勒河^[32]等流域开展了一系列流域径流量变化的研究工作,认为在流域上游,气候变化是影响径流变化的主要因素,多数河流在人类活动及气候变化的影响下,年径流量呈现增加趋势。本文利用累积量斜率变化率方法分析了巴音河流域上游径流量的影响因素,研究结果与西北上述河流一致。巴音河上游人类活动主要有泽令沟草场和农田灌溉(2015 年灌溉用水量为 $0.124 \times 10^8 \text{ m}^3$)及水源取水(2015 年取水量为 $0.307 \times 10^8 \text{ m}^3$),二者合计占上游全年径流量(2015 年为 $4.94 \times 10^8 \text{ m}^3$)的 8.7%,对径流量的影响较小。但是随着上游蓄集峡水利枢纽工程建设等人类活动的加剧,对径流量变化的影响将逐步增强。

需要说明的是,上述研究中多假定下垫面条件不变,把人类活动和气候变化假定为相互独立的事件,未考虑社会经济发展、自然环境变化、人类活动等对流域水循环的影响,在一定程度上限制了水循环模型对流域水文过程的真实表达。今后,如何合理界定气候变化和人类活动对径流变化的影响,如何科学表征水利建设、引水灌溉、人口增长、城镇化水平发展、植被覆盖度增减等人类活动,如何构建合理的模型去刻画或者模拟流域水文过程,将成为变化环境下流域水循环研究的关键。

6 结论

通过对德令哈水文站径流数据、德令哈市气象站气象数据的分析研究,得到如下结论:

(1) 20 世纪 60–90 年代,巴音河上游径流年际变化较小;21 世纪以来,径流年际变化变大。20 世纪 60 年代至今,径流年际变化存在 3 个丰平枯周期;21 世纪以来,流域进入丰水期,德令哈水文站径流量较多年平均值增加 22.3%。径流年内分配趋于集中,64.49% 的径流量集中在 6–11 月,最大径流一般出现在 7 月中下旬至 8 月初。

(2) 1959–2013 径流量以 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的倾向率呈增加趋势,R/S 和小波分析均表明,按照当前的发展趋势,未来巴音河上游径流量将保持上升趋势。径流量变化存在显著的年际和年代际变化特点,年际变化的主周期为 10~11 a,年代际变化以 21~22 a 为主周期,其次还有 4~5 a 的年际变化周期,以 21~22 a 的年代际变化周期最为显著。

(3) 降水是巴音河上游径流量变化的主要影响因素,其对径流量增加的贡献率为 83.06%,人类活动对径流量增加的影响不明显。但随着上游蓄集峡水利工程建设及引水灌溉等人类活动的加剧,其对径流量变化的影响将逐步增强,未来应对巴音河上游人类活动给予关注,以保护流域水资源、维持生态环境可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Nema P, Nema S, Roy P. An overview of global climate changing in current scenario and mitigation action [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2329–2336.
- [2] Dong Leihua, Xiong Lihua, Yu Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 278–285. [董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278–285.]
- [3] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. Nature, 2010, 467: 43–51.
- [4] Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Zhan Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779–790. [宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779–790.]
- [5] Wang Suiji, Yan Yunxia, Yan Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 388–397. [王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析[J].地理学报,2012,67(3):388–397.]
- [6] Barnett T P, Pierce D W, Hidalgo H H, et al. Human-induced changes in the hydrology of the western United States [J]. Science, 2008, 319(5866): 1080–1083.
- [7] He Xuqiang, Zhang Bo, Sun Liwei, et al. Contribution rates of climate change and human activity on the runoff in upper and middle reaches of Heihe River basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2884–2890. [何旭强,张勃,孙力炜,等.气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率[J].生态学杂志,2012,31(11):2884–2890.]
- [8] Zhang Tiaofeng, Zhu Xide, Wang Yongjian, et al. The impact of climate variability and human activity on runoff changes in the Huangshui River basin [J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2256–2262. [张调风,朱西德,王永剑,等.气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J].资源科学,2014,36(11):2256–2262.]
- [9] Chen Fulong, Wang Yixuan, Wu Zebin, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff of continental river in arid areas [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 692–697. [陈伏龙,王怡璇,吴泽斌,等.气候变化和人类活动对干旱区内陆河径流量的影响[J].干旱区研究,2015,32(4):692–697.]
- [10] Dai Wen, Lü Dianqing, Li Jingbao, et al. The effect of climate change and human activities on runoff in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,

- 2016, 38(2): 488–497. [代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 488–497.]
- [11] Feng Chang, Mao Dehua, Zhou Hui, et al. Impacts of climate and land use changes on runoff in the Lianshui basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(2): 395–406. [冯畅, 毛德华, 周慧, 等. 气候与土地利用变化对涟水流域径流的影响[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 395–406.]
- [12] Huang Lei, Shao Xuemei, Liu Hongbin, et al. Abrupt changes of precipitation in Delingha region, Qinghai for the last 1000 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 713–719. [黄磊, 邵雪梅, 刘洪滨, 等. 青海德令哈地区千年来降水量的突变分析[J]. 地理学报, 2006, 61(7): 713–719.]
- [13] Liu Bo, Liu Jinsheng, Shu Longcang, et al. Projections of climate change for the period 2016–2075 in Delingha basin under SRES A1B scenarios[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(2): 232–238. [刘波, 刘金胜, 束龙仓, 等. SRES A1B 情景下德令哈盆地 2016–2075 年气候变化预估[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 232–238.]
- [14] Gan Xiaoli, Hao Yupei, Zhai Yonghong, et al. Study on dynamic change of vegetation and hydrology in Bayin River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(2): 323–326. [甘小莉, 郝玉培, 翟永洪, 等. 巴音河流域植被与水文动态变化研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 323–326.]
- [15] Li Jian, Wang Jianjun, Huang Yong, et al. Analysis on the exploitation and utilization of water resources in the Bayin River watershed, Delingha City, Qinghai Province[J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(4): 483–489. [李健, 王建军, 黄勇, 等. 青海德令哈市巴音河流域水资源开发利用[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 483–489.]
- [16] Li Xue, Li Yungang, He Jiaonan, et al. Analysis of variation in runoff and impacts factors in the Yuanjiang-Red River basin from 1956 to 2013[J]. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1149–1159. [李雪, 李运刚, 何娇楠, 等. 1956–2013 年元江-红河流域径流变化及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1149–1159.]
- [17] Yang Mingjin, Zhang Bo, Wang Haiqing, et al. The study on the change of mountainous runoff in Heihe River basin from 1950 to 2004[J]. *Resources Science*, 2009, 31(3): 413–419. [杨明金, 张勃, 王海青, 等. 黑河流域 1950–2004 年出山径流变化规律分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 413–419.]
- [18] Hu Lili, Li Lingping, Guo Xiaoqin. Precipitation concentration degree and precipitation concentration period in the east Hexi Corridor in flood season[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(4): 758–765. [胡丽莉, 李玲萍, 郭小芹. 河西走廊东部汛期降水集中度和集中期特征分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 758–765.]
- [19] Xiong Xinzhi, Guo Qiaoling, Sun Bin. Change of annual runoff distribution in Beiniuchuan River basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(6): 335–340. [熊新芝, 郭巧玲, 孙斌. 牦牛川径流年内分配变化规律研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 335–340.]
- [20] Qiu Linjing, Zheng Fenli, Yin Runsheng. Trend analysis of precipitation and stream flow during 1952–2008 in Yanhe River basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 49–53. [邱临静, 郑粉莉, 尹润生. 1952–2008 年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 49–53.]
- [21] Kisi O, Ay M. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513(5): 362–375.
- [22] Liu Saiyan, Huang Qiang, Xie Yangyang, et al. Abrupt change and variation characteristics of runoff in the upper reaches of Datong River basin[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Sciences)*, 2016, 44(3): 219–226. [刘赛艳, 黄强, 解阳阳, 等. 大通河流域上游径流变化特征与突变分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 219–226.]
- [23] Guliziba Anwar, Mamattursun Eziz, Mireguli Anwar, et al. The seasonal runoff variation of Qingshui River in Yanqi Basin during period from 1956 to 2010 based on wavelet analysis[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 210–214. [古丽孜巴·艾尼瓦尔, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 米热古丽·艾尼瓦尔, 等. 基于小波分析 1956–2010 年焉耆盆地清水河径流量季节变化规律[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 210–214.]
- [24] Zeng Biao, Gao Wei, Yang Taibao. Spatial-temporal variations of MODIS-NDVI and its correlations with climate in Delingha region, Qaidam Basin[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2014, 50(1): 80–88. [曾彪, 高维, 杨太保. 柴达木盆地德令哈地区 MODIS-NDVI 时空变化及其与气候的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 80–88.]
- [25] Liu Xiaoxue, Wen Zhonghui, Shu Longcang, et al. Analysis of surface area changes of Keluke and Tuosu Lakes over past 40 years and influencing factors[J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(1): 28–33. [刘晓雪, 温忠辉, 束龙仓, 等. 近 40 年可鲁克湖-托素湖面积变化及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 28–33.]
- [26] Xia Zhihong, Liu Min, Wang Miao, et al. Quantitative identification of the impact of climate change and human activity on runoff in Lake Honghu basin since 1990s[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(4): 515–521. [夏智宏, 刘敏, 王苗, 等. 1990s 以来气候变化和人类活动对洪湖流域径流影响的定量辨识[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 515–521.]
- [27] Li Jisheng, Hu Xinglin, Huang Weidong, et al. Variation and trend prediction of the mountain runoffs of the trunk streams of the Shule River basin, Hexi Corridor[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 803–810. [李计生, 胡兴林, 黄维东, 等. 河西走廊疏勒河流域出山径流变化规律及趋势预测[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 803–810.]
- [28] Cheng Jianzhong, Lu Zhixiang, Zou Songbing, et al. Variation of the runoff in the upper and middle reaches of the main Heihe River and its causes[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 123–129. [程建忠, 陆志翔, 邹松兵, 等. 黑河干流上中游径流变化及其原因分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 123–129.]
- [29] Li Baofu, Chen Yaning, Chen Zhongsheng, et al. Why does precipitation in Northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010? [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 167: 275–284.
- [30] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152–164. [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): 152–164.]
- [31] Zhang Yurui, Ma Jinzhu, Qi Shi. Human activities, climate change and water resources in the Shiyang Basin[J]. *Resources*

Science, 2012, 34(10): 1922 – 1928. [张彧瑞, 马金珠, 齐识. 人类活动和气候变化对石羊河流域水资源的影响[J]. 资源科学, 2012, 34(10): 1922 – 1928.]

[32] Dong Weiwei, Ding Yongjian, Wei Xia. Variation of the base flow and its causes in the upper reaches of the Shule River in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 661 – 669. [董薇薇, 丁永建, 魏霞. 祁连山疏勒河上游基流变化及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 661 – 669.]

Response of runoff to climate change and human activity in the upper reaches of the Bayin River, Qaidam Basin, Qinghai Province

WEN Guangchao^{1,2}, WANG Wenke¹, DUAN Lei¹, LI Yiming¹, ZHAO Jiahui¹

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. School of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)

Abstract: Based on the measured monthly runoff and meteorological data in the upper reaches of the Bayin River basin during the period of 1959 – 2013, by using the methods of Mann-Kendall trend test, R/S analysis and the change rate of accumulation slope, monthly and annual variations of runoff, various trends and cycles were analyzed, the contribution rates of climate change and human activity on the run off were calculated. The results show that annual runoff had showed a significant increase trend from 1959 to 2013, with an increasing rate of $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ and a Hurst index of 0.78, the period of wet/normal/dry year was about 20 years, the river had experienced its high water period since the beginning of 21st century; the major periods of decadal runoff variation was 21 – 22 years, and the primary period of annual runoff variation was 10 – 11 years. Asymmetrical distribution feature of runoff within the year had displayed so that the runoff from June to November had accounted for 64.49% of the total, showing a single peak distribution, first increasing and then decreasing, the maximum monthly runoff had postponed since the beginning of the 21st century, with the annual distribution more concentrated; an abrupt change of runoff occurred in 2001; in the upstream of the Bayin River, climate change played dominant role, following by human activity, with the contribution ratio to runoff of 83.06% and 16.94%, respectively. This study could be useful for future water resource development and utilization and ecological environment protection in the Bayin River basin.

Key words: Bayin River; Delhi; runoff; climate change; human activity; impact factors

(本文编辑: 武俊杰)