

李艳丽,李永华,陈新均,等. 党河水库入库径流量的变化特征及对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 984-990, [LI Yanli, LI Yonghua, CHEN Xinjun, et al. Variation Characteristics of Runoff into Danghe Reservoir and Its Response to Climate Change[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(6): 984-990], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-06-0984

党河水库入库径流量的变化特征 及对气候变化的响应

李艳丽,李永华,陈新均,杨文斌

(中国林业科学研究院荒漠化研究所,北京 100091)

摘要:气候变化对陆地水文系统有着重大影响。利用1955—2015年我国西北干旱区党河水库入库流量资料,结合下游敦煌站1951—2015年平均气温与降水量逐月数据,采用线性趋势分析、滑动平均、Mann-Kendall法与R/S法等分析方法,分析了党河水库入库径流量及气温和降水量的变化特征,以及其未来可能变化趋势,并探讨了入库径流量对气温和降水量变化的响应关系。结果表明:(1)1955—2015年党河水库入库径流量年际变化大,丰枯水年出现频率符合正态分布特征,入库径流量呈显著增加趋势,其线性增加率为 $0.16 \text{ 亿 m}^3 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,且这种增加趋势在未来变化中持续性极强;(2)1951—2015年,敦煌地区年均气温与年降水量均呈上升趋势,显著升温 and 降水微弱增加的趋势在未来变化中持续性极强,且二者均发生突变,突变年前者是1997年前后,后者为1970年和1986年前后;(3)年入库径流量对年均温度和年降水量变化的响应分析发现,年均温度变化是导致党河水库入库径流量变化的主要因素,降水是次要因素。

关键词:党河水库;径流量;气候变化

文章编号:1006-7639(2017)06-0984-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-06-0984

中图分类号:P333.1

文献标志码:A

引言

《第三次气候变化国家评估报告》^[1]指出,近百年来中国陆地区域温度平均升高 $0.9 \sim 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$,虽然近15 a增温趋势有所减缓,但仍然处于百年来气温最高时期。然而,近百年中国平均降水量没有显著的趋势变化,但西部干旱区与半干旱区近30 a降水量呈持续增加趋势,可见降水量变化表现出明显的区域性。我国西北干旱区,属于气候变化敏感区,同时也是生态脆弱区,其气候变化(温度升高,降水量增加)正在影响着该区域的水文与生态系统^[2]。

敦煌绿洲地处我国西北干旱区,党河是敦煌绿洲的主要水源,对该地区区域发展发挥着至关重要的作用,其径流量大小与时空变化直接影响着敦煌绿洲的生态环境与社会经济发展。针对党河流域水文变化特征,已有学者作出分析。研究认为,在多种因素的综合作用下,近40 a党河流域径流量呈现出

波动上升趋势^[3]。针对这一现象,丁宏伟等^[4]基于1955—1999年党河水库入库平均流量资料,采用灰色系统理论建立了残差序列周期修正模型,预测21世纪开始的若干年内,党河水库入库径流量将呈现缓慢上升趋势。然而,距丁宏伟等^[4]研究使用的资料已过去近20 a,党河水库入库径流量的趋势变化是否与他预测一致?党河水库入库径流量对气候变化的响应及其未来变化趋势等综合分析仍需进一步深入开展。这将有助于了解西北干旱区与极端干旱区水文对气候变化的响应,对该地区有限水资源的合理利用、生态安全保障与可持续发展意义重大。

1 研究区域概况

党河流域位于 $93^\circ\text{E}-97^\circ 20'\text{E}$, $38^\circ 20'\text{N}-40^\circ 30'\text{N}$ 范围,上源由两条支流西流至盐池湾以上汇聚而成。其中,南源巴音泽尔肯郭勒,发源于党河南山的巴音

收稿日期:2017-06-06;改回日期:2017-08-30

基金项目:中央级公益性科研院所基金(CAFYBB2016MA012)和国家自然科学基金项目(41671049)共同资助

作者简介:李艳丽(1990—),女,博士生,研究方向为荒漠化防治。E-mail:1071232535@qq.com。

通信作者:杨文斌(1959—),男,研究员,主要从事干旱区林业及防沙治沙方面的研究。E-mail:nmlkyywb@163.com。

泽尔肯乌勒,河源高程4 657 m;北源克腾高勒,发源于疏勒南山的宰力木克,河源高程4 657 m。党河向西北流,经甘肃肃北蒙古族自治县、党河水库、敦煌市城区,于土窑墩汇入疏勒河,全程390 km,流域面积4.2万 km²。党河流域自上而下依次为上游祁连山区、中游沙漠戈壁区和下游走廊平原区。

党河水源由降水和冰川融水两部分组成。上游源头有冰川308条,冰川面积323.66 km²,冰川储量111.236亿 m³,年消融量1.23亿 m³,占年径流量的38.9%。党河水库以上流域为产流区,径流量在党城湾水文站达到最大。

党河流域上游气候高寒阴湿,上游年均气温6.3℃,极端最高气温34.6℃,极端最低气温-25.1℃,年平均降水量145.3 mm,年平均蒸发量1 227.9 mm,年均日照时数3 128 h;下游气候干燥少雨,年均气温9.3℃,极端最高气温44.1℃,年平均降水量39.9 mm,年平均蒸发量2 495.2 mm,年均日照时数3 246.7 h^[5-7]。

2 资料与方法

所用资料为党河水库1955—2015年逐月来水量和党河下游临近的甘肃敦煌气象站1951—2015年逐月气温与降水量。

目前针对水文与气候时间序列变化的分析方法主要有滑动 F 检验法、滑动 t 检验法^[8-9],R/S分析法^[10-11],Mann-Kendall^[12-13],Brown-Forsyth检验法^[14],Bayesian变点分析法^[15]等。本文将Mann-Kendall法与R/S(rescaled range analysis)分析法相结合,对流域气温、降水量、径流量进行突变检验,研究气温、降水量和径流量的持续性特征,并预测未来可能变化趋势,以达到定性、定量地获得水文与气候时间序列的变化特征^[16]。

此外,采用距平百分率法分析党河入库径流量

的变化趋势。采用《水文情报预报规范》(GB/T22482—2008)中的距平百分率 $P(\%)$ 作为划分径流丰、平、枯的标准(表1),其计算公式^[17]如下:

$$P = \frac{Q_i - Q_{\text{avg}}}{Q_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (1)$$

其中: Q_i 为 i 年的年径流量, Q_{avg} 为多年平均径流量,单位:亿 m³。

表1 党河水库入库径流量的丰平枯分类标准

Tab.1 Classification standard of annual runoff in more, normal and less water years in Dang river reservoir

分 类	距平百分率 P 值/%
特丰水年	(20, ∞)
偏丰水年	(10, 20]
平水年	(-10, 10]
偏枯水年	(-20, -10]
特枯水年	(-∞, -20]

3 结果与分析

3.1 党河水库入库径流量变化特征

图1是1955—2015年党河水库年入库径流量的变化。可以看出,党河水库入库径流量的年际变化较大,年入库径流量最大为4.71亿 m³(2010年),最小为2.60亿 m³(1976年),整体表现出阶段性增加趋势,其中1970年代以前年入库径流量小幅度波动,无明显变化趋势;1970—1990年代末整体较1970年代以前偏多,且波动幅度较大,前20 a升高、后10 a降低;1998年以后持续增加趋势明显[图1(a)]。距平百分率分析显示,61 a中党河水库入库径流量特丰水年有6 a(主要集中于2005—2015年)、偏丰水年5 a、偏枯水年15 a。总体上,党河水库入库径流量的丰枯水年出现概率大致相当,都比较少,平水年出现的概率较大,符合正态分布特征。

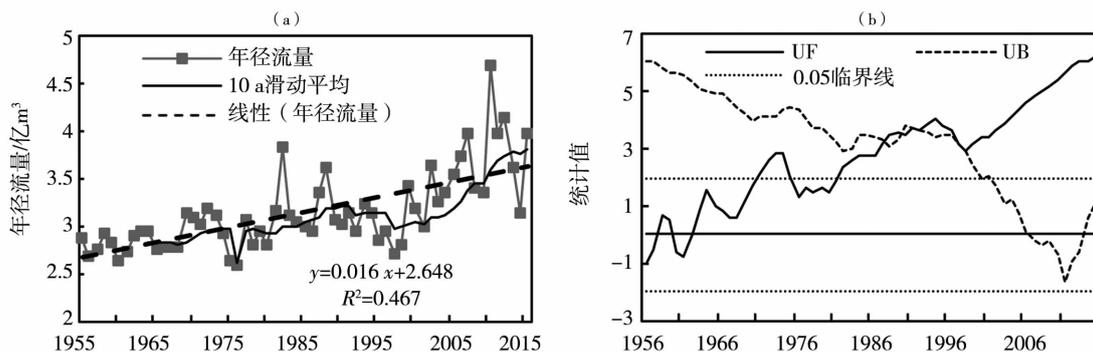


图1 1955—2015年党河水库入库径流量年际变化(a)及M-K检验(b)

Fig.1 Annual change of incoming runoff (a) in Danghe river reservoir and its M-K test (b) during 1955-2015

1955—2015 年党河水库入库径流量 M-K 检验结果[图 1(b)]显示:近 61 a 党河水库年入库径流量呈显著增加趋势($Z = 5.91, Z > 2.32 > 0$),线性增加率为 $0.16 \text{ 亿 m}^3 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。其中,1955—1962 年党河水库入库径流量趋势性不强,1962—2015 年入库径流量整体呈现增加态势,尤其是 1981—2015 年入库径流量整体达到极显著性增长。另外,UF 与 UB 两条曲线出现多个交点,但交点均落在 ± 1.96 临界线之外。结合 Yamamoto 法检验结果(图略),可以确定 1998 年为党河水库年入库径流量的突变年。

对党河水库 1955—2015 年入库径流量进行 R/S 趋势分析,发现入库径流量的 Hurst 指数为 0.86,位于 0.5~1 之间,表明入库径流量在未来仍保持持续增长的变化趋势。

党河水库的入库径流量具有明显的季节性,径流量夏季最大、冬季最小,春、夏、秋、冬季径流量分别占全年总流量的 29.86%、34.25%、22.01%、13.88%。

1981—2015 年党河水库年入库径流量处于显著增加态势,因此对比该时段四季入库径流量的变化趋势(图 2),发现党河水库各季入库径流量变化趋势一致,均呈增加趋势,且入库径流量较大的春季和夏季,其径流量增加幅度也较大,而入库径流量相对较小的秋、冬季,其入库径流量增加幅度也较小,春、夏、秋、冬季入库径流量的线性增加率分别为 $0.08、0.10、0.02、0.01 \text{ 亿 m}^3 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其中春、夏、秋季入库径流量的阶段性变化特征明显,即春季径流量在 1990 年代末之前变化趋势不明显,之后显著增加;而夏、秋季径流量在 1990 年代末之前下降明显,之后显著增加,与年径流量的阶段性变化特征相似。

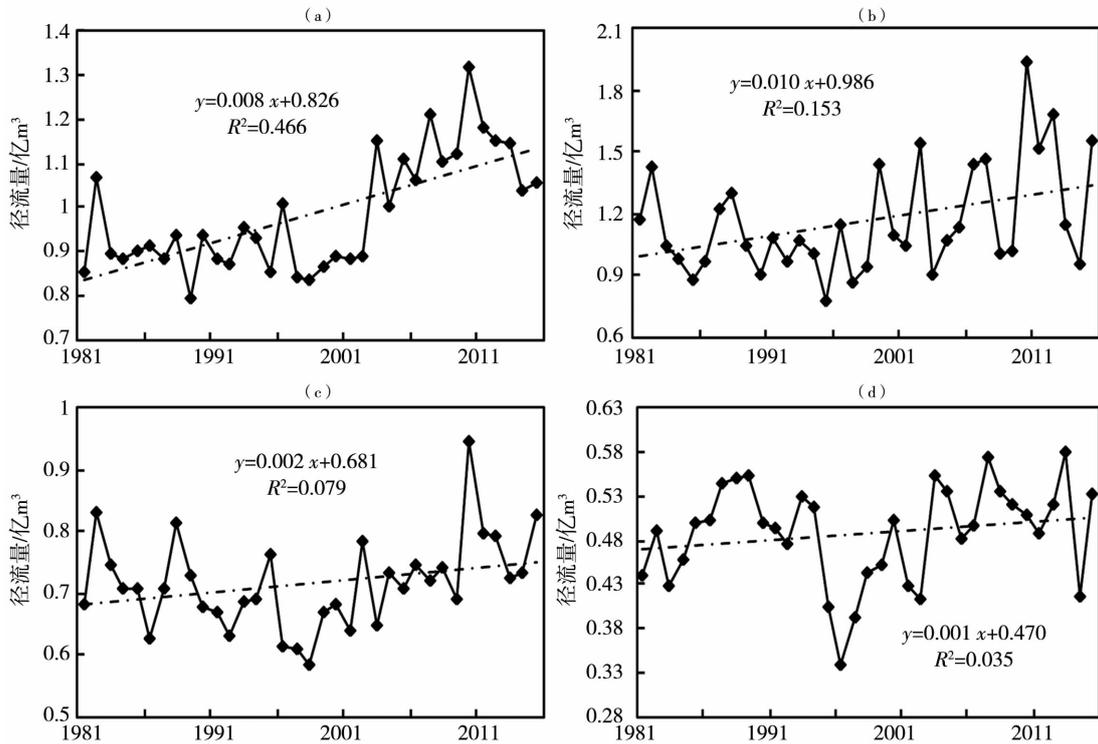


图 2 1981—2015 年党河水库四季入库径流量的变化趋势

(a) 春季;(b) 夏季;(c) 秋季;(d) 冬季

Fig. 2 The change trends of incoming runoff in four seasons in Danghe river reservoir during 1981 - 2015

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

另外,分别计算各季入库径流量与年入库径流量的相关系数,发现春、夏季入库径流量与年入库径流量关系密切,说明春、夏季入库径流量的变化对年入库径流量的影响更大。因此,春、夏季入库径流量的增加导致了党河年入库径流量的增加。

3.2 党河水库入库径流量变化影响因素

气候变化与人类活动是影响流域水文循环过程

和水资源演变规律的两大驱动因素。人类活动对流域水文的影响主要总结为 3 个方面^[18]: (1) 通过土地利用变化、水土保持工程和流域河道整治等改变流域的产汇流条件; (2) 通过跨流域调水及灌区引水工程和地下水开采等直接取水; (3) 通过修建水库、塘坝等蓄水工程影响河道的产汇流过程。党河上游为甘肃肃北蒙古族自治县和阿克塞哈萨克族自治

县,人口数量少,人口总数不超过3万,因此以上人类活动影响流域水文的3个方面都不存在,人类活动对党河水库入库径流量的影响可以忽略。可见,对党河水库入库径流量影响主要是气候因素,温度、降水等气候因子通过对陆地水循环的影响,进而影响河流的径流量^[19-21]。

研究指出,降水量的变化对径流量有显著影响,在干旱区流域径流对降水的响应一般会被放大^[22]。因此,对1955—2015年党河水库年径流量与年平均气温、年降水量进行相关性分析(表略),发现党河水库年径流量与年均气温、年降水量均呈现正相关关系,相关系数分别为0.424、0.525,达到极显著性($P < 0.01$),说明党河水库入库径流量受该地区气温与降水的影响。因此,下面对其下游的敦煌站1951—2015年气温与降水变化特征进行分析。

3.2.1 气温变化特征

对1951—2015年党河下游临近的敦煌站年均气温进行线性拟合与Mann-Kendall突变检验(图3),发现敦煌地区年均气温也表现出阶段性的变化特征,但整体呈显著上升趋势,线性增温率为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,其中1960年代中期以前年均气温波动变化,无明显变化趋势,而后开始波动下降,至1970年代中期以后开始逐渐升温,2000年代中期以后变化不明显[图3(a)]。经M-K检验分析,得到 $Z = 4.69$ ($Z > 2.32 > 0$),也表明敦煌地区年均气温呈显著上升趋势。由UF曲线[图3(b)]发现,1967年以前敦煌年平均气温波动变化,1968—1988年年平均气温呈下降趋势;1990年代中期以后年平均气温有一明显上升趋势,且2000年以后这种上升趋势超过了0.05显著性水平临界线,表明敦煌年平均气温上升趋势显著。另外发现,UF与UB于1997年相交,且交点位于 ± 1.96 临界线之间[图3(b)],说明敦煌地区年平均气温在1997年前

后发生了暖突变。

利用R/S分析法对敦煌1951—2015年年均气温进行未来趋势分析,得到Hurst指数为0.97 ($0.5 < H < 1$),表明敦煌年均气温在未来变化过程中该趋势持续性极强,未来一段时间内气温将保持持续上升。

由于1981—2015年党河水库入库径流量处于显著增加状态,为分析温度变化对其影响,将1981—2015年敦煌站春、夏、秋、冬季的气温分别进行线性拟合(图4)。可以看出,敦煌地区各季平均气温都有所上升,除冬季上升不明显外,其余季节气温均呈显著上升趋势,春、夏、秋季平均气温的线性增长率分别为 $0.66\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 、 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 、 $0.47\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。尽管冬季平均气温也有所增加,但整体在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,不影响冰川融化,对河川径流影响较弱。春、夏、秋季气温升高导致党河上游雪山融水增加,因此温度升高是引起党河水库入库径流量增加的主要因素之一。

3.2.2 降水量变化特征

降水直接影响党河的丰枯水平,比气温变化更为复杂。利用10 a滑动平均与M-K检验方法,对1951—2015年敦煌站年降水量进行趋势与突变分析(图5)。可以看出,敦煌地区年降水量整体呈不显著增加趋势($Z = 2.26, 2.32 > Z > 0$),线性增加率为 $2.48\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,且阶段性变化特征明显,其中1980年以前年降水量波动较大,表现出先减小后增加再减小的变化特征,1980年代以后有微弱增加趋势[图5(a)]。由UF曲线[图5(b)]看出,1970年以后敦煌年降水量有一明显增加趋势,其中1980年代中前期和2010年以后增加趋势显著。另外,UF与UB曲线相交于1970年和1986年,且位于两条临界线之间,说明1970、1986年敦煌年降水量发生了由少到多的突变。

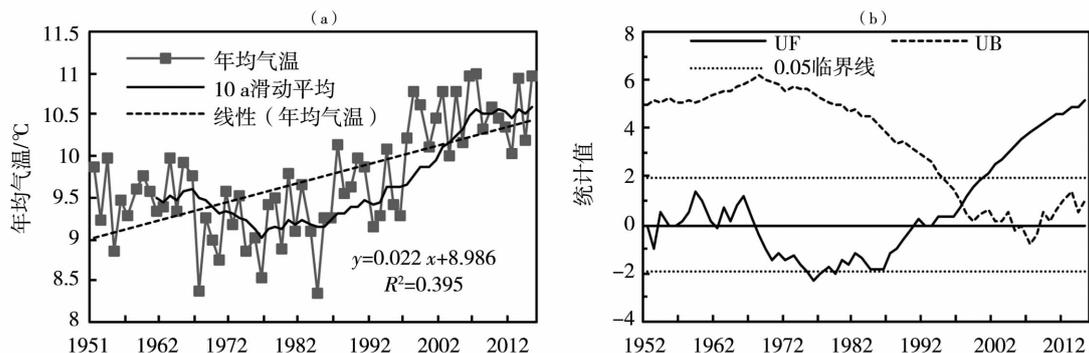


图3 1951—2015年敦煌站年均气温变化趋势(a)及其M-K检验(b)

Fig. 3 Change trend of annual average temperature (a) and its M-K test (b) in Dunhuang station during 1951–2015

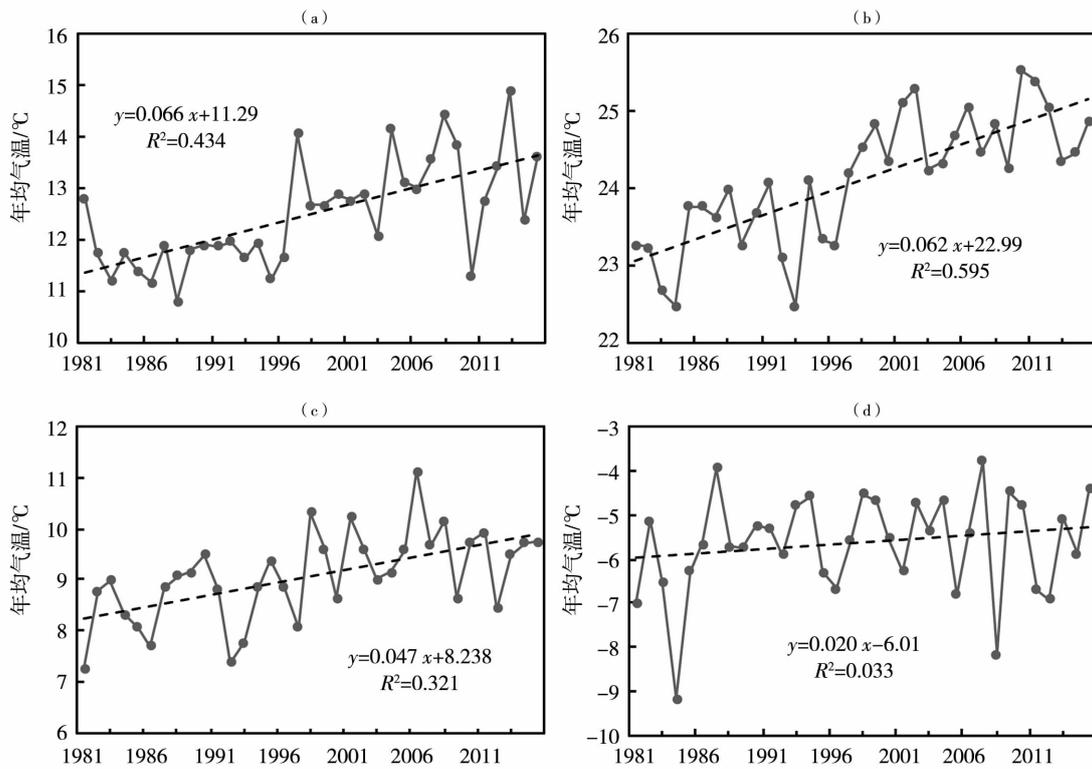


图4 1981—2015年敦煌站四季平均气温的变化趋势

(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季

Fig. 4 The change trends of seasonal average temperature in Dunhuang station during 1981 - 2015

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

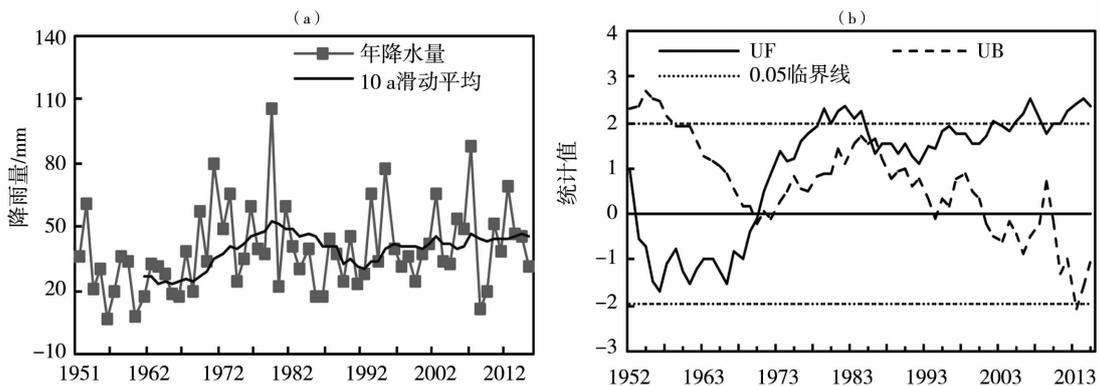


图5 1951—2015年敦煌站年降水量变化(a)及其M-K检验(b)

Fig. 5 The change of annual precipitation (a) and its M - K test (b) in Dunhuang station during 1951 - 2015

对 1951—2015 年敦煌年降水量进行 R/S 分析,得到 Hurst 指数为 0.69 ($0.5 < H < 1$),表明在未来变化中该趋势持续性极强,并在未来一段时间内敦煌年降水量将保持持续稳定增长。

为分析降水量变化对党河水库入库径流量的影响,对年入库径流量显著增加时段(1981—2015 年)敦煌站春、夏、秋、冬季的降水量分别进行线性拟合(图 6),发现各季降水量年际波动较大,总体趋势夏季降水量呈减少趋势,而春、秋、冬季降水量都呈增加趋势,但趋势均不显著。其中,春季降水量增幅最

大,秋季次之,夏季最小。

3.2.3 气温与降水量对党河水库入库径流量的影响

党河水库入库径流主要由上游冰川融水与降水形成,1981—2015 年党河水库入库径流量增加显著,且春、夏、秋、冬季的入库径流量均呈增加趋势,其中春季和夏季入库径流量增加幅度较大。因此,春、夏季是党河水库入库径流量增加的主要时段。结合该时段气温显著升高与降水量变化不明显的特征,春季入库径流量主要来源于上游冰川雪山融水补给,而夏季则由上游冰川融水和自然降水共同补

给,因此春、夏季入库径流量增加的主要原因是气温升高导致的冰川融水增加。

对党河水库 1981—2015 年入库径流量与年均气温、年降水量分别进行标准化处理,然后对入库径流量与年均气温、年降水量进行多元线性回归分析,

得到回归方程为 $Y = 0.561 x_1 + 0.314 x_2, R^2 = 0.424$ ($P < 0.05$),其中 Y 为年入库径流量; x_1 为年均气温; x_2 为年降雨量。经分析,年均气温的回归系数大于年降水量,表明年均气温变化是导致党河水库入库径流量变化的主要因素,降水是次要原因。

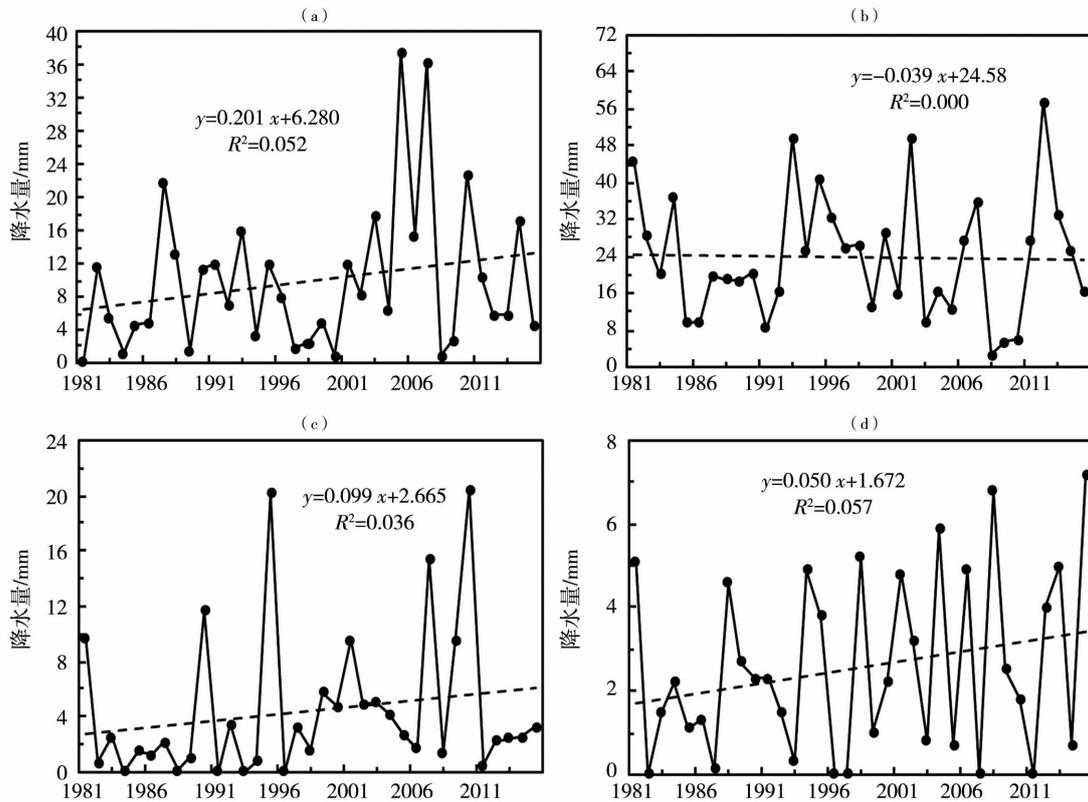


图 6 1981—2015 年敦煌站季节降水量的变化趋势

(a) 春季;(b) 夏季;(c) 秋季;(d) 冬季

Fig. 6 The change trends of seasonal precipitation in Dunhuang station during 1981 - 2015

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

4 结 论

(1)1955—2015 年党河水库入库径流量年际变化大,丰枯水年出现频率符合正态分布特征,入库径流量总体呈阶段性增加趋势,1980 年代以后尤为显著,且增加趋势在未来变化中持续性极强,未来仍保持一段时间的持续增加趋势。入库径流量季节变化明显,春、夏季入库径流量的增加是党河水库年入库径流量增加的主要时段。

(2)1951—2015 年敦煌站年均气温(通过显著性检验)与年降水量(未通过显著性检验)总体均呈上升趋势,Hurst 指数均在 0.5~1 之间,表明显著升温 and 降水量微弱增加的趋势在未来仍持续一段时间。此外,年均气温和年降水量均发生突变,前者突变年为 1997 年前后,后者突变年为 1970 年和 1986 年

前后。

(3)对党河水库年入库径流量、年均气温、年降水量进行多元线性拟合,得到年均气温变化是导致党河水库入库径流量变化的主要因素,降水是次要因素。

参考文献:

- [1] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [2] 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理,2012,35(1):1-9.
- [3] 程远顺,程宗杰. 党河流域近 40 年径流量特征与气候变化关系探究[J]. 中国水利,2015(13):52-55.
- [4] 丁宏伟,魏余广,范鹏飞,等. 党河水库入库径流量变化特征及趋势分析[J]. 中国沙漠,2001,21(增刊1):40-44.
- [5] 《中国河湖大典》编纂委员会. 中国河湖大典·西北诸河卷

- [M]. 北京:中国水利水电出版社,2014:260-264.
- [6] 赵玮,马金珠,何建华. 党河流域敦煌盆地地下水补给与演化研究[J]. 干旱区地理,2015,38(6):1133-1141.
- [7] 周长进,董锁成,张小军. 党河水环境特征与水资源可持续利用[J]. 水资源保护,2008,24(1):42-44.
- [8] 陈广才,谢平. 水文变异的滑动 F 识别与检验方法[J]. 水文,2006,26(2):57-60.
- [9] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 1 版. 成都:成都科技大学出版社,1988:55-56.
- [10] 王孝礼,胡宝清,夏军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析法[J]. 武汉大学学报(工学版),2002,35(2):10-12.
- [11] 周寅康,张捷,王腊春,等. 长江下游地区近五百年洪涝序列的 R/S 分析[J]. 自然灾害学报,1997,6(2):78-84.
- [12] 王艺璇,柴晓玲,胡彩虹,等. 宜昌站 1882—2007 年径流变化规律分析[J]. 气象与环境科学,2013,36(3):7-12.
- [13] 杨义,舒和平,马金珠,等. 基于 Mann-Kendall 法和小波分析中小尺度多年气候变化特征研究——以甘肃省白银市近 50 年气候变化为例[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(5):126-131.
- [14] 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.
- [15] 袁曾琼. 关于水文时间序列分析方法的研究[J]. 科技展望,2016(28):321.
- [16] 年雁云,王晓利,蔡迪花. 黑河流域下游额济纳三角洲气候及生态环境变化分析[J]. 干旱气象,2015,33(1):28-37.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 水文情报预报规范(GB/T 22482—2008)[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [18] 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.
- [19] REN G Y, GUO J, XU M Z, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005,63(6):942-956.
- [20] 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.
- [21] 刘闻,曹明明,邱海军. 气候变化和人类活动的水文水资源效应研究进展[J]. 水土保持通报,2012,32(5):215-219.
- [22] CHEW F H S, MCMAHON T A. Application of the daily rainfall-runoff model MODHYDROLOG to 28 Australian catchments[J]. Journal of Hydrology, 1994,153(1-4):386-416.

Variation Characteristics of Runoff into Danghe Reservoir and Its Response to Climate Change

LI Yanli, LI Yonghua, CHEN Xinjun, YANG Wenbin

(Institute of Desertification Studies, China Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Climate change plays an important role on land hydrologic system in the arid region of northwest China. Based on the flow into Danghe reservoir during 1955-2015 and the monthly average temperature and monthly precipitation at Dunhuang weather station during 1951-2015, the trend and possible change in the future of the runoff into Danghe reservoir and average temperature, precipitation were analyzed by using the methods of trend analysis, moving average, Mann-Kendall test and R/S analysis, etc. The relation between the runoff and temperature, precipitation was built by using multiple linear regression model. The results are as follows: (1) The change of annual runoff into Danghe river was large during 1955-2015, and the frequency of more and less rainfall years presented the normal distribution characteristics. The average increasing rate of the runoff was 16-million m³ per 10 year, and the increasing trend would still continue for some time in the future. (2) The annual average temperature and annual precipitation increased during 1951-2015 on the whole, but the increasing trend of temperature was highly significant, while that of precipitation wasn't significant, and the increasing trends would last for some time in the future. The annual average temperature and annual precipitation occurred the mutation, and the former was in 1997, while the later were in 1970 and 1986. (3) The linear regression equation between the runoff and temperature, precipitation during 1981-2015 showed that the annual average temperature change was main factor causing the change of runoff into Danghe reservoir, while the precipitation was secondary factor.

Key words: Danghe river reservoir; runoff; climate change