

气候变化对秃尾河流域径流量的影响

刘智勇¹, 张鑫^{1*}, 李小冰²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省地下水管理监测局, 陕西 西安 710003)

摘 要: 为探讨秃尾河流域径流量对气候变化的关系, 利用秃尾河流域 1970~2005 年 36 a 来的气温、降水和天然径流量数据, 对该流域气温、降水和径流量年际和季节性的变化特征及趋势进行了分析, 研究了气候因子与径流量的相关性。研究结果表明: 秃尾河流域年平均气温呈现明显升高趋势, 以冬季升温为主; 年降水表现为缓慢减少趋势, 降水减少主要表现在夏秋季节; 年径流量表现为显著减少趋势, 且以春夏季节减少为主; 年径流量与流域年平均气温呈显著的负相关性, 而与年降水呈相对较强正相关性, 同时径流量与气温、降水间的相关性在不同季节及中下游表现不同。

关键词: 气温; 降水; 径流量; 秃尾河

中图分类号: P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)06-0184-07

气候系统和水系统作为地球物理系统的重要组成部分, 两者相互作用、相互影响。气候变化对水系统的影响主要表现在降水、蒸发、土壤含水量、地表径流等方面^[1~3], 这些影响将导致水资源在时空上的重新分配, 并影响到水资源的供需, 进而影响到生态环境和社会经济的发展, 因而研究气候变化对水资源及径流量的影响具有重要意义^[4~7]。Hulme 等^[8]利用全球气候模型对人为气候变化与自然气候变异对年径流量的影响进行了研究。王国庆等^[9]基于月水文模型, 采取假定气候方案, 分析了黄河流域径流对气候变化的敏感性。游松财^[10]利用改进的水平平衡模型研究了在不同气候变化情景下中国未来地表径流的变化。

秃尾河流域处于我国西北内陆, 气候干燥, 水资源匮乏且生态环境脆弱。流域内矿产资源丰富, 能源工业发达。改革开放以来, 该流域内一些地区逐步建成为我国能源工业基地, 促进了地区经济的发展, 但大规模的资源开采, 已经致使河水断流、水质恶化, 大面积地下水位下降, 地表水入渗, 严重影响该流域的生态环境和整个地区经济的发展^[11, 12]。本文将依据秃尾河流域多年气温、降水及径流量观测资料, 结合趋势分析、相关性分析等方法研究该流域气温、降水及径流量变化趋势, 探讨气候变化对河川径流量的影响, 为全球气候变化背景下秃尾河流域水资源的合理规划、开发利用及生态环境保护提供科学依据。

1 流域概况及资料来源

秃尾河流域地处鄂尔多斯盆地东部, 位于东经 109°45′~110°35′, 北纬 38°10′~39°10′之间, 北部与窟野河流域相接, 南以佳芦河流域为界。秃尾河是黄河的一级支流, 河流全长 139.6 km, 流域总面积为 3 294 km²。秃尾河流域可分为北部风沙滩区和南部山丘区两大部分, 山丘区约占 50.2%, 风沙滩区为 49.8%, 地势由西部向东南倾斜, 平均海拔 1 000~1 200 m。

主要天然植被类型为沙生植被和沼泽性植被, 土壤类型以风沙土、黄绵土、黑垆土、新积土为主。整个流域地处中纬度大陆性季风气候区, 流域内光热资源丰富、水热组合较好, 但灾害性天气经常发生, 旱灾是发生频率最高、对农业危害最大的自然灾害。全流域年平均日照 2 871 h, 平均气温 8.5℃, 降水自东南向北和西北递减, 多年平均降水量 400 mm 左右, 大部分地区介于 375~425 mm 之间, 夏季流域降雨量较多, 6~9 月降水量占全年降水量的 60% 以上, 且夏季干燥炎热、蒸发能力较强, 多年平均水面蒸发量为 1 120 mm^[13, 14]。

本文气温数据采用国家气象数据网提供的秃尾河流域周边神木和榆林两个气象站的 1970~2005 年连续 36 a 的日平均气温观测资料。降水和经过还原计算的天然径流数据采用处于流域中游的高家堡站(集水面积 2 095 km²)和下游的高家川站(集水

收稿日期: 2011-05-06
基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(14110209); 国家重大科技支撑计划项目(2006BAD11B05); 西北农林科技大学博士科研启动基金项目(01140504); 西北农林科技大学科研专项(08080230)
作者简介: 刘智勇(1985—), 男, 湖南华容人, 硕士研究生, 主要从事水文学水资源方面研究。E-mail: zhiyonglau@gmail.com。
* 通讯作者: 张鑫(1968—), 男, 河南淅川人, 副教授, 博士, 主要从事水文学水资源方面的研究。E-mail: zhxm@163.com。
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

面积 3 253 km²) 两个具有代表性的水文站 1970~2005 年连续 36 a 的统计资料。

2 气候因子与径流量时间变化特征分析

2.1 气温年变化特征分析

气温的变化将影响研究流域总蒸散量和降水形态,也将影响流域下垫面条件,从而导致流域水分渗蓄情况发生改变和蒸发、下渗损耗的增加。随着气温的升高,流域的产流条件将发生改变,从而影响到地表径流的形成^[15~17]。气温观测资料分析表明(图 1,图 2):神木和榆林两个气象站 1970~2005 年 36 a 间气温表现出总体变化一致,两站年平均气温

变化曲线表现为统一的起伏趋势。其中神木站的年平均气温最大值(10.637℃)和最小值(7.285℃)分别出现在 1999 年和 1984 年,榆林站的年平均气温在 1998 年出现最大值(10.033℃),1984 年为最小值(7.146℃)。两站 5a 移动平均气温曲线表明在两站在 1984~1988 年的平均气温出现低谷。两站累计距平曲线清晰直观地展示出 36 a 该地区年平均气温出现了一次明显的波动,其中 1970~1996 年呈下降趋势,1997~2005 年呈现上升趋势。年平均气温变化曲线和 5 a 移动平均变化曲线都表明在 1970~2005 年间榆林和神木两站气温呈现总体震荡上升的趋势,且 1996 年后上升趋势尤为显著。

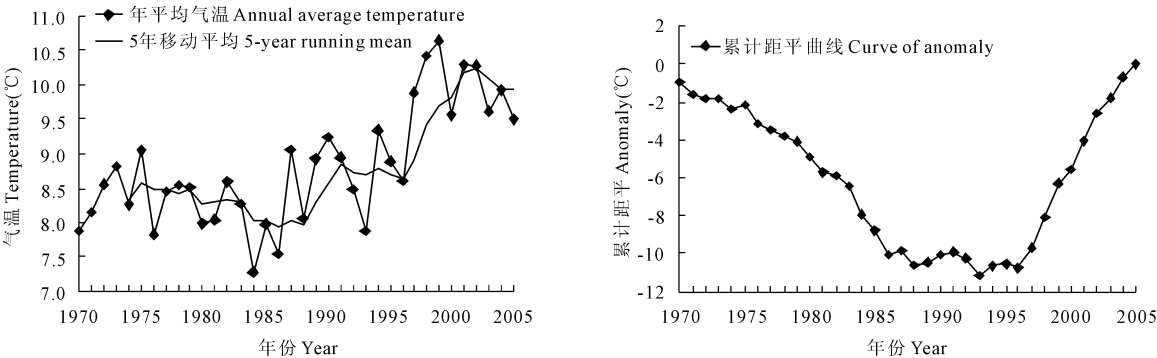


图 1 1970~2005 年神木站年平均气温变化、5 a 移动平均及气温累计距平曲线

Fig.1 Curves of annual average temperature, 5-year running mean and anomalies at Shenmu station from 1970~2005

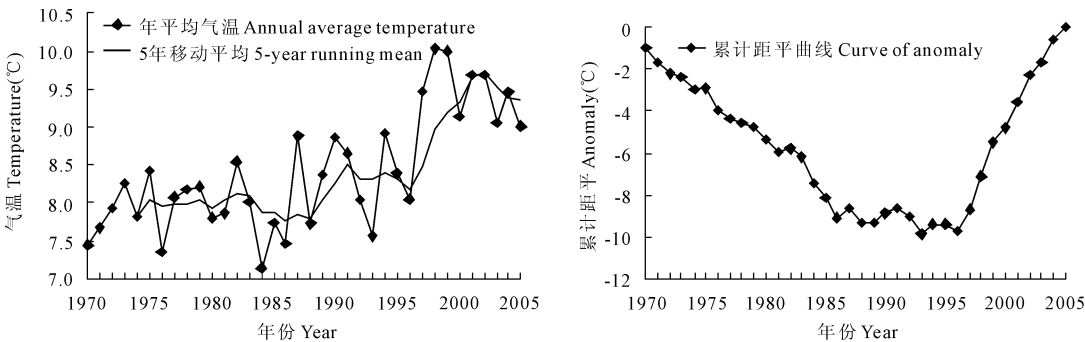


图 2 1970~2005 年榆林站年平均气温变化、5 a 移动平均及累计距平曲线

Fig.2 Curves of annual average temperature, 5-year running mean and anomalies at Yulin station from 1970~2005

2.2 气温季节性变化特征

从神木站和榆林站四季气温变化曲线(图 3)可以看出,两站各季节气温变化趋势均表现平缓的升高的趋势,且都以冬季升温为主,神木和榆林两站冬季升温速率分别为 0.0830℃/a 和 0.0828℃/a。1970~2005 年间神木冬季气温最大值(−3.55℃)和最小值(−9.94℃)分别出现在 2002 和 1984 年,榆林冬季气温同样于 2002 年和 1984 年出现最大值

(−3.80℃)和最小值(−10.21℃)。两站在春季、夏季和秋季气温变化不大,大多在平均值附近波动,其中神木站春、夏、秋三季的气温变化速率分别为 0.0580、0.0404、0.0432℃/a,而榆林站此三季的变化速率分别为 0.0557、0.0286、0.0441℃/a。

2.3 降水年变化特征分析

一般而言,降水的大小将决定秃尾河流域地表径流的丰枯水平,且比气温变化趋势更为复杂。从

图 4 和图 5 高家堡和高家川两站年降水和 5 a 移动平均变化曲线可知两站年降水随时间增加呈现多次波动,并总体为缓慢下降趋势。高家堡站年降水的最大值(576 mm)和最小值(204.9 mm)分别出现在 1971 年和 1989 年,该站 5a 移动平均曲线和累计距平曲线表明:在 20 世纪 70 年代初到 70 年代末,降水出现了一次明显的先增后减的交替变化过程,20 世纪 70 年代末到 80 年代中期降水出现明显下降趋势后于 80 年代末出现小幅上升,90 年代期间出现

了一次较大的波动,并在 90 年代中期达到低谷,之后到 21 世纪初降水呈现总体缓慢下降的波动变化趋势。而高家川站降水分别于 1992 年和 1999 年达到最大值(539.7 mm)和最小值(207.7 mm)。分析高家川站降水 5 a 移动平均曲线和累计距平曲线表明,该站降水从 70 年代初到 90 年代初与高家堡站变化趋势基本一致,但是该站于 90 年中期出现一次明显的峰值,之后开始显著下降并于 1999 年达到低谷,21 世纪初降水主要呈现缓慢上升趋势。

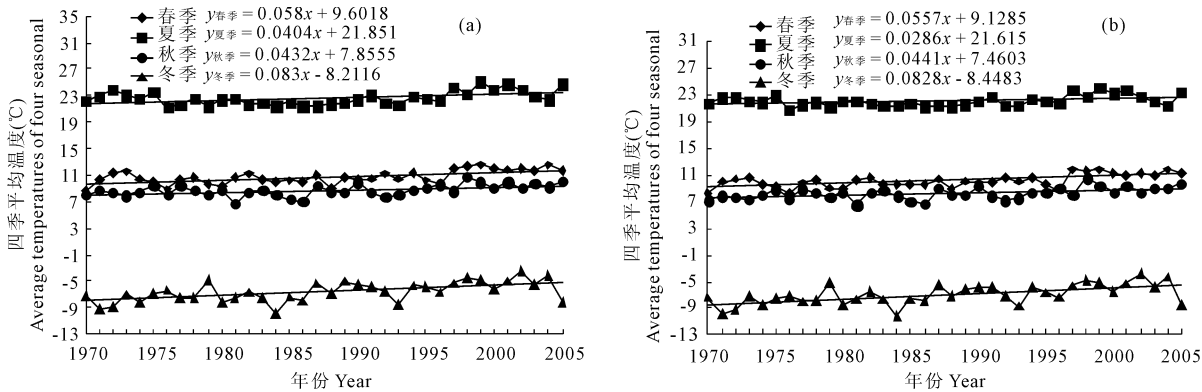


图 3 神木站(a)和榆林站(b)四季平均气温变化过程

Fig. 3 Variations of the four seasonal temperatures at Shenmu (a) and Yulin (b) stations

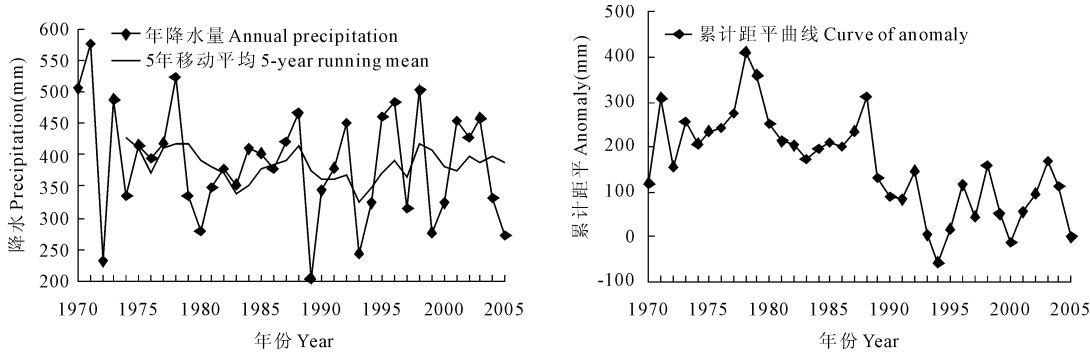


图 4 1970~2005 年高家堡站年降水变化、5 a 移动平均及累计距平曲线

Fig. 4 Curves of annual precipitation, 5-year running mean and anomalies at Gaojiabao station from 1970~2005

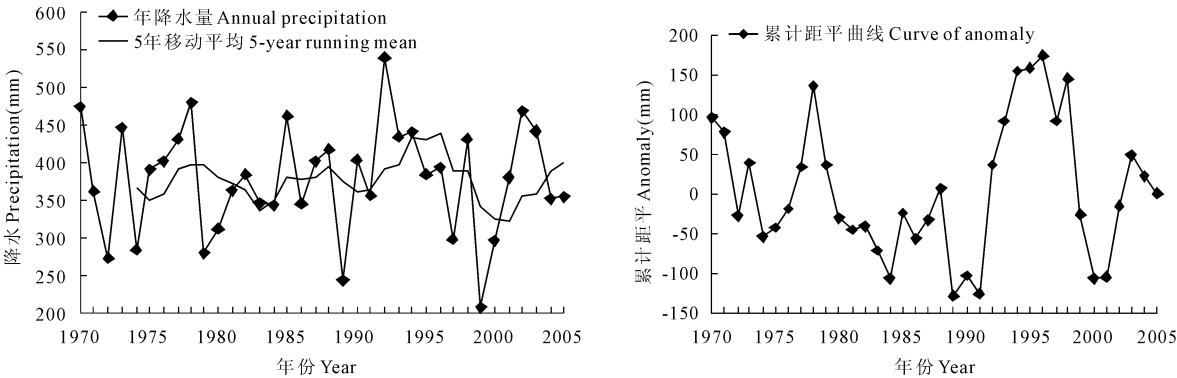


图 5 1970~2005 年高家川站年降水变化、5 a 移动平均及累计距平曲线

Fig. 5 Curves of annual precipitation, 5-year running mean and anomalies at Gaojiachuan station from 1970~2005

2.4 降水季节性变化特征

对高家堡和高家川两站 1970~2005 年四季降水进行线性拟合, 分析各季节降水变化趋势。图 6 表明高家堡站降水在夏季和秋季都表现下降趋势, 而冬季和春季呈现上升趋势。而高家川站在秋、夏、冬季表现下降趋势, 而只在春季表现为缓慢上升趋势

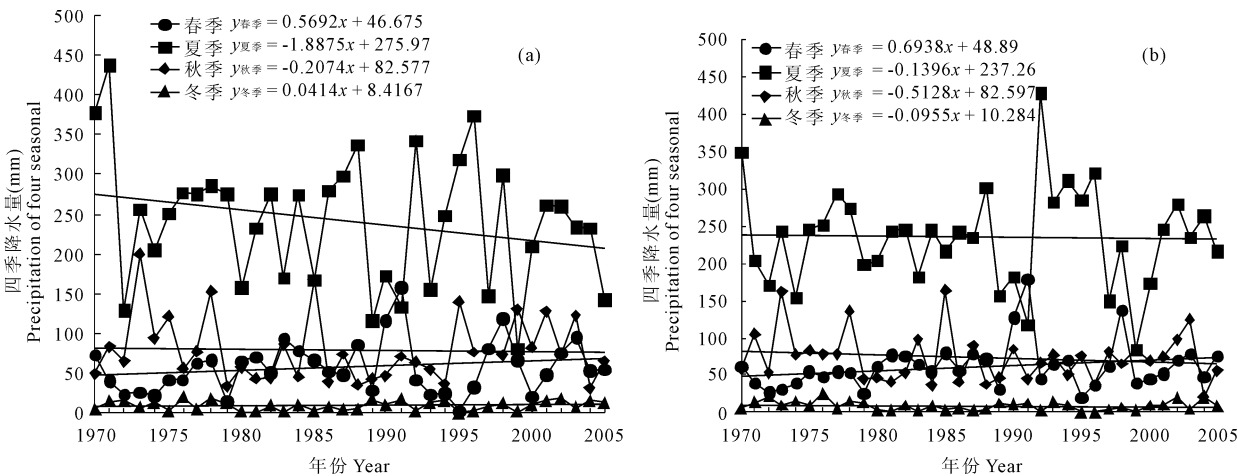


图 6 高家堡站(a)和高家川站(b)降水四季变化过程

Fig. 6 Variations of the four seasonal precipitations at Gaojiabao (a) and Gaojiachuan (b) stations

2.5 径流量年变化特征分析

对于年径流量, 高家堡和高家川两站均表现为总体波动减小趋势, 其变化特征基本一致。但由于所处流域出口断面的差异, 高家川站的径流总量要明显大于高家堡站(图 7、图 8)。高家堡站年径流量最大值(41 601.9 万 m³)出现在 1970 年, 并在 2005 年出现最小值(17 497.9 万 m³), 高家川站最大值(48 530 万 m³)也出现在 1970 年而最小值(19 370 万

势。其中高家堡站夏季降水下降趋势明显且波动较大, 变化率为-1.8875 mm/a, 秋、春、冬三季分别为-0.2074、0.5692、0.041 4 mm/a。而高家川站降水下降趋势最为明显的季节为秋季(-0.5128 mm/a), 夏、春、冬变化速率分别为-0.1396、0.6938、-0.0955 mm/a。

m³)则出现在 2000 年。分析两站 5a 移动平均曲线可以看出, 两站年径流量在 20 世纪 70 年代初到 80 年代初、90 年代中期到 21 世纪初保持了基本一致的变化趋势, 即 70 年代初到 80 年代初两站年径流量表现较为缓慢的下降而在 21 世纪初后下降趋势明显增快。两站累计距平曲线表明在 80 年代中期到 90 年代中期变化趋势均出现了小幅波动, 但高家川站变化幅度相对比较平缓。

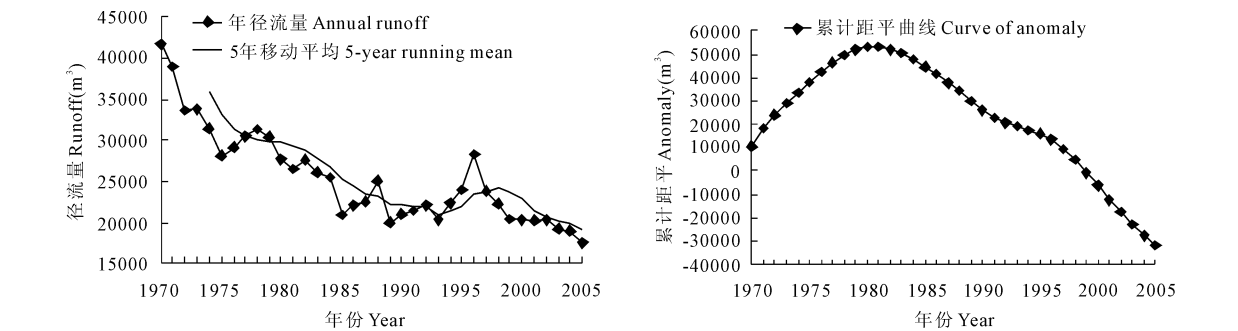


图 7 1970~2005 年高家堡站年径流量变化、5 a 移动平均及累计距平曲线

Fig. 7 Curves of annual runoff, 5-year running mean and anomalies at Gaojiabao station from 1970~2005

2.6 径流量的季节变化

从图 9 可以看出, 高家堡和高家川两站径流量在四季都呈现显著下降趋势, 且两站春季和夏季的变化趋势要大于秋季和冬季。其中高家堡站春季和夏季的变化速率分别为-44.174 万 m³/a 和-42.099

万 m³/a, 而高家川站春、夏两季变化速率则为-40.850 万 m³/a 和-68.881 万 m³/a。

3 气候因子与径流量相关性分析

本文依据神木和榆林两站月平均气温数据以及

高家堡和高家川两站月降水数据,采用分别取平均值的方法构建秃尾河流域月平均气温和月降水的时间序列。并采用 Pearson 相关分析方法^[16]来检验流域内平均气温、平均降水与高家堡和高家川两个水

文站点径流量之间的相关关系,进而定量识别影响径流量的主要气候影响因子。表 1、2 分别给出了流域内平均气温、降水与高家堡、高家川两站径流量年值和季节值的相关关系检验结果。

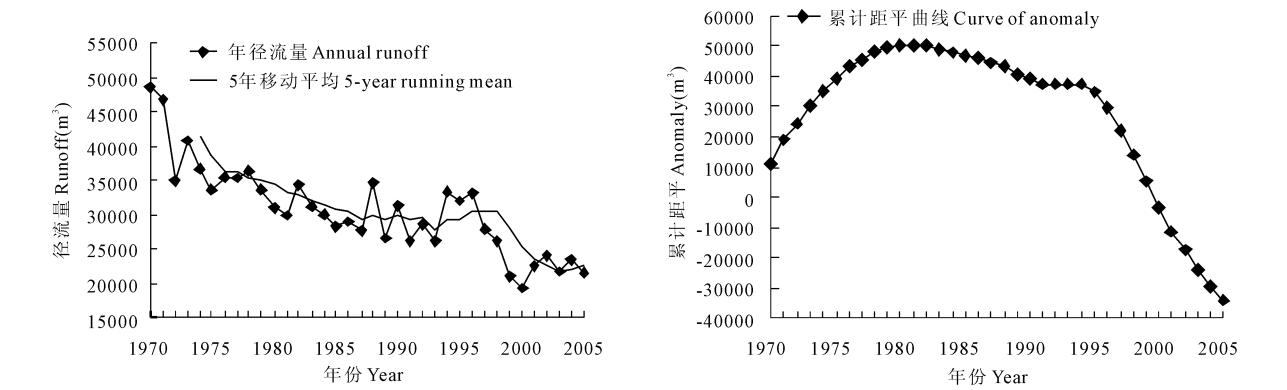


图 8 1970~2005 年高家川站年径流量变化、5 a 移动平均及累计距平曲线
Fig.8 Curves of annual runoff, 5-year running mean and anomalies at Gaojiachuan station from 1970~2005

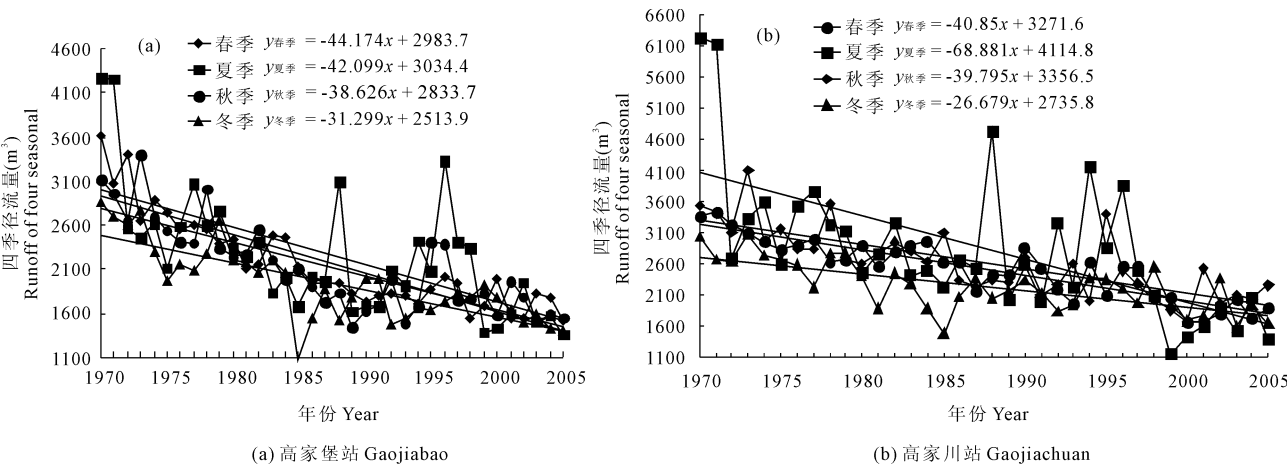


图 9 高家堡站(a)和高家川站(b)年径流量四季变化过程
Fig.9 Variations of the four seasonal runoffs at Gaojiabao (a) and Gaojiachuan (b) stations

表 1 年平均气温、年降水、年径流量相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient among temperature, precipitation and runoff				
各因子 Factor	流域年平均气温 Annual mean temperature	流域年降水 Annual precipitation	高家堡年径流量 Annual runoff of Gaojiabao	高家川年径流量 Annual runoff of Gaojiachuan
流域年平均气温 Annual mean temperature	—	−0.109	−0.523 **	−0.593 **
流域年降水 Annual precipitation	−0.109	—	0.270	0.385 *
高家堡年径流量 Annual runoff of Gaojiabao	−0.523 **	0.270	—	0.925 **
高家川年径流量 Annual runoff of Gaojiachuan	−0.593 **	0.385 *	0.925 **	—

注: *, ** 分别表示通过 0.05, 0.01 的显著性水平检验。

由表 1 可以看出,流域年平均气温与年降水表现为负相关,且未达到显著水平,而与高家堡和高家川站年径流量表现出明显的负相关,相关系数分别为−0.523 和−0.593,且都达到了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平。而高家堡和高家川两站年径流量与流域年

降水呈现为相对较强的正相关,且高家川站年径流量与年降水相关性系数达到了 $\alpha=0.05$ 的显著水平。高家堡和高家川站因为同为秃尾河流域水文站点,两站年径流量表现出显著的 ($\alpha=0.01$) 正相关性,相关系数为 0.925。根据表 2 的分析结果,流域

季节平均气温与高家堡站径流量在四季都表现为负相关性,且春季的相关系数达到 $\alpha=0.01$ 的显著性水平;流域季节平均气温与高家川站径流量在四季同样也存在负相关关系,且在春季相关性系数通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,在夏、秋两季也达到了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平。流域季节降水与高家堡站径流量在春季存在负相关关系,而在夏、秋、冬三

季表现为正相关性,并在夏、秋两季相关系数分别达到了 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ 的显著性水平;而流域季节降水与高家川站四季径流量的相关性基本与高家堡站基本一致,但与前者在秋季的相关系数达到了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平。此外,高家堡和高家川两站径流量之间在四季都表现为较强的正相关性,且都通过了 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验。

表 2 平均气温、降水、径流量季节相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient among temperature, precipitation and runoff in different seasons

因子 Factor	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
平均气温—高家堡径流量 Mean temperature — runoff of Gaojiabao	−0.505 **	−0.26	−0.326	−0.327
平均气温—高家川径流量 Mean temperature — runoff of Gaojiachuan	−0.594 **	−0.381 *	−0.362 *	−0.077
降水—高家堡径流量 Precipitation — runoff of Gaojiabao	−0.302	0.586 **	0.376 *	0.132
降水—高家川径流量 Precipitation — runoff of Gaojiachuan	−0.054	0.646 **	0.464 **	0.252
高家堡径流量—高家川径流量 Runoff of Gaojiabao — runoff of Gaojiachuan	0.824 **	0.933 **	0.881 **	0.781 **

注:*,**分别表示通过 0.05, 0.01 显著性水平检验。
Note: The * and ** mean significance at the levels of 0.05 and 0.01 respectively.

4 讨论与结论

1) 根据神木和榆林两个站 36 a (1970~2005 年)的观测资料分析表明,秃尾河流域气温呈现明显升高趋势,基本与全球气候变暖趋势一致,特别是 20 世纪 80 年代中期以来,气温升高的趋势更为明显,从气温的季节性特征分析中可以得知,气温升高主要以冬季升温为主。分别处于秃尾河中游和下游的高家堡和高家川两站降水数据表明,1970~2005 年秃尾河流域降水表现为波动且缓慢下降趋势,季节变化而言,主要表现为夏季和秋季降水的减少。高家堡和高家川两站 1970~2005 年径流量资料分析表明,秃尾河年径流量为显著下降趋势,表现为年际变化较大、年内分布比较均衡等特点,且径流量减少主要发生在春夏季节,主要原因为秋冬季节降水减少且河流开始冰冻,径流主要靠地下水补给,河川径流量相对比较稳定。

2) 分析秃尾河流域气温、降水及径流量三者之间的相关性表明,该流域年平均气温和年降水之间相关性不明显,而与该流域中游和下游的年径流量相关性明显,呈现显著的负相关 ($\alpha=0.01$),表明随着气温的升高,流域径流量将出现明显的减少,气温对径流量影响在不同季节存在差异,春季气温与径流量负相关性最为显著 ($\alpha=0.01$),说明春季气温变化对秃尾河径流量影响较大。流域年降水与下游

年径流量表现较为明显的正相关性 ($\alpha=0.05$),降水对中游和下游径流量的主要影响季节都为夏季和秋季(正相关性比较显著)。总体而言,由于气温的持续上升与主要产流区降水的减少,秃尾河径流量呈持续减少的趋势。此外,近年来,由于矿产资源的过度开发使该研究区域植被遭到严重破坏,瑶镇和采洹沟两座中型水库的建成以及大量的拦蓄汛期径流供农业灌溉和工业园区用水工程的建设等人类活动的影响,加速了秃尾河径流量的减少。

3) 农业在秃尾河流域占有重要地位,但得到有效灌溉耕地面积仅占耕地总面积的 35.4%。由于秃尾河径流量的持续减少以及大规模的煤层开发导致地下水位大范围下降,将加剧该地区耕地退化以及土地荒漠化,如果不及时采取合理有效的水资源开发利用措施,将严重影响当地农业生产活动。

参考文献:

[1] 宁金花,申双和.气候变化对中国水资源的影响[J].安徽农业科学,2008,36(4):1580—1583,1616.
[2] 任国玉,姜彤,李维京,等.气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J].水科学进展,2008,19(6):772—779.
[3] 张建云,王国庆.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京:科学出版社,2007:1—214.
[4] 王顺久.全球气候变化对水文与水资源的影响[J].气候变化研究进展,2006,2(5):223—227.
[5] Xu C Y, Vandewiele G L. Parsimonious monthly rainfall—runoff mod-

els for humid basins with different input requirements[J]. *Advances in Water Resource*, 1995, 18; 39—48.

[6] Ma Z M, Kang S Z, Zhang L, et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on stream flow for a river basin in arid region of northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(3—4); 239—249.

[7] 陆桂华, 何海. 全球水循环研究进展[J]. *水科学进展*, 2006, 17(3); 419—424.

[8] Hulme M, Barrow E M, Amell N W, et al. Relative impacts of human induces climate change and natural climate variability [J]. *Nature*, 1999, 397; 688—691.

[9] 王国庆, 王云璋, 康玲玲. 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(1); 117—121.

[10] 游松财, Kiyoshi T, Yuzuru M. 全球气候变化对中国未来地表径流的影响[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(2); 148—157.

[11] 高亚军, 赫晓慧, 徐建华. 秃尾河流域水沙特性变化分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2006, 17(3); 68—71.

[12] 杨泽元, 王文科, 王雁林, 等. 秃尾河流域表生生态环境评价指标体系研究[J]. *水资源保护*, 2006, 22(5); 22—27.

[13] 李小冰, 蔡焕杰, 张鑫, 等. 秃尾河流域降水量权马尔可夫链模型预测研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6); 252—256.

[14] 孙天青, 张鑫, 梁学玉, 等. 秃尾河径流特性及人类活动对径流的影响分析[J]. *人民长江*, 2010, 41(8); 47—50.

[15] 蓝永超, 文军, 赵国辉, 等. 黄河河源区径流对气候变化的敏感性分析[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1); 175—182.

[16] 王顺久. 岷江径流变化特征及其对青藏高原气候变化的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(8); 933—939.

Impact of climate change on natural runoff in Tuweihe basin

LIU Zhi-yong¹, ZHANG Xin^{1*}, LI Xiao-bing²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Groundwater Management and Monitoring Bureau of Shaanxi Province, Xi'an, Shannxi 710003, China)

Abstract: Based on the observation data from 1970~2005 of temperature, precipitation and runoff of Tuweihe basin, we analyzed the inter-annual and seasonal characteristics and trends of precipitation and runoff variation in the watershed of Tuweihe. The Pearson correlation method was used to analyze the correlation of temperature and precipitation. The results showed that: As the global warming, there was a significant increasing trend in the annual mean temperature, which primarily took place in winter; The annual precipitation experienced a weakly decreasing trend and the decline in summer and autumn was more obvious; The annual runoff of Tuweihe basin indicated a significant and continuous descend during the past 36 years and the descend mainly happened in summer and autumn; There was a significantly negative correlation between annual runoff and temperature while there was a weakly positive correlation between annual runoff and precipitation of the basin. The correlation between temperature, precipitation and runoff varied with different sections of Tuweihe and different seasons.

Keywords: temperature; precipitation; runoff; Tuweihe