

秃尾河流域径流对降水变化的响应特征

刘 晶, 严宝文, 王双银, 孙兆峰

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 利用双累积曲线法、相关分析法分别对年和季降水径流关系进行了分析, 探讨了径流与不同时段降水的响应关系, 并通过多元线性回归法定量分析了径流对降水变化的响应程度。结果表明: (1) 秃尾河流域年径流呈显著减少, 年降水呈先减少后增加的趋势。 (2) 秃尾河流域四季径流均显著减少, 夏季径流变化与年径流变化趋势一致; 降水量则春季增加, 夏季减少, 而秋季和冬季降水先减少后增加, 年降水变化主要受夏季和秋季降水变化的影响。 (3) 秃尾河流域夏季径流对同期降水的相关程度最强, 冬季最弱; 年径流与最大一个月降水的相关程度最高, 其次为夏季。 (4) 相比于基准期, 水土保持效应时期(1978—1998 年), 径流对降水变化的响应比重为 27.4%, 人类活动等其他因素的比重为 72.6%, 其中取用水比重为 13.9%; 资源开发期(1999—2000 年), 年径流对降水的响应比重为 21.4%, 人类活动等其他因素比重 78.6%, 其中取用水活动比重为 17.4%。自人类大规模活动以来, 人类活动始终是径流减少的主要影响因素, 其中取用水比重有所增加; 降水因素对径流减少的作用减小。

关键词: 径流; 降水变化; 响应特征; 秃尾河

中图分类号: P333 **文献标志码:** A

Response characteristics of runoff to precipitation variation in Tuwei river basin

LIU Jing, YAN Bao-wen, WANG Shuang-yin, SUN Zhao-feng

(College of water resources and architectural engineering, Northwest A&F university, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the response characteristics of runoff to precipitation in Tuwei river basin, the response of runoff to precipitation at different length of time was explored on the basis of the relationship analysis of annual and seasonal rainfall-runoff obtained through double mass curve and correlation analysis, and a quantitative analysis was made on the degree of the response of runoff to precipitation changes with multiple linear regression method. Results showed: (1) Annual runoff decreased significantly, while the annual precipitation decreased at first and then increased. (2) Seasonal runoff significantly decreased, and the variation of annual runoff was in accord with summer runoff. Precipitation in spring increased, decreased in summer, decreased at first and increased then in autumn and winter. Variation of annual precipitation was mainly affected precipitation in summer and autumn. (3) The correlation between runoff in summer and precipitation in summer was the most significant, and the weakest in winter. Annual runoff was relevant most to the maximum precipitation of one month, which was followed by summer. (4) Compared to the baseline period, during soil and water conservation effect period (1978—1998) response proportion of runoff to precipitation change was 27.4%, and human activities and other factors accounted for 72.6%, 13.9% of which was water intake. In resources development period (1999—2000), response proportion of annual runoff to precipitation was 21.4%, and human activities and other factors accounted for 78.6%, 17.4% of which was water intake. Human activities were the major factor accounting for runoff reduction since the large-scale activities of human beings. The proportion of water taking increased, and the effect of rainfall on runoff decreased.

Keywords: runoff; precipitation variation; response characteristics; Tuwei river

收稿日期: 2016-05-20

基金项目: 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金(QN2009088); 陕西省水利科技计划项目“陕北秃尾河流域水资源演变情势研究”(2010-3)

作者简介: 刘 晶(1990—), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与保护。E-mail: liujing111201@163.com。

通信作者: 严宝文(1970—), 男, 陕西汉中人, 教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事水资源与水环境保护方面的研究工作。E-mail: yanbaowen@nwsuaf.edu.cn。

径流是水文循环的重要环节,也是水文研究的重要变量之一。径流的形成是一个复杂而连续的过程,开始于降水过程,结束于流域出口断面的流量过程^[1]。天然径流是降水与流域下垫面条件共同作用的产物^[2]。降水的时空分配变化会直接影响径流的变化,汛期径流集中洪峰过大而造成洪灾,非汛期径流量减少以致断流而形成旱灾^[3]。随着人类活动的加剧,一方面改变了径流形成的物理条件,另一方面影响着水量平衡要素在时间、空间和数量上的变化^[4]。降水是径流的主要来源,研究径流对降水变化的响应规律,为开展径流预报和进行流域水资源开发利用奠定了基础。

秃尾河流域位于黄土高原北部,地处干旱半干旱地区,属于大陆季风气候。气候干燥,水资源短缺且生态环境脆弱。流域内能源工业发达,榆神煤化学工业区贯穿流域中部,是我国陕北能源化工基地的重要组成部分。近年来,随着流域经济迅速发展,大规模的矿产开发、水利工程建设等改变了流域的下垫面条件,在引起流域内产汇流过程发生变化的同时,取用水也大大增加,从而导致径流减少速率增大。此外流域内水土流失严重,在 20 世纪 70 年代末开展了大规模的水土流失治理,截至 2010 年底,已治理水土流失面积 953 km²,治理度为 28.9%。本文研究的秃尾河流域径流对降水变化的响应可理解为由于降水因素变化导致流域出口断面实测径流的减少量。高亚军等^[5]基于秃尾河流域降水、径流和泥沙资料分析了各水文要素在 20 世纪 70 年代前后的变化。杨筱筱^[6]等采用水文变异诊断系统分析了秃尾河流域径流变异特征。孙天青^[7]、邵肇悦^[8]采用滑动平均法、Mann-Kendall 检验分析了秃尾河流域年径流的变化趋势,并通过年内特征指标分析了年内分配特征;刘智勇等^[9]采用趋势分析及相关分析方法分析了秃尾河流域内水文要素的年际和季节性变化特征及气候因子与径流量的相关性。目前已有的研究主要集中在年径流变化趋势及原因分析,而对年内径流变化及原因分析较少,尤其是年径流对降水的响应特征研究较少。笔者根据 1956—2010 年秃尾河流域逐月降水和径流实测资料,分析年和季节降水径流变化特征,探讨了径流对不同时段降水变化的响应特征,并定量分析了径流对降水变化的响应程度,为合理开发利用水资源提供参考依据。

1 研究区概况

秃尾河为黄河中游右岸一级支流,位于窟野河和佳芦河之间。秃尾河流域位于黄土高原北部,流域总面积为 3 294 km²。流域地处中纬度干旱半干

旱地区,属于大陆性季风气候区^[5]。由于受地形和季风环流的制约,流域四季分明。流域降水量自东南向北和西北递减,多年平均年降水量约 397 mm,汛期(6—10 月)降水量为全年降水量的 80.5%,年内分配极不均匀。流域内光热资源丰富,旱灾发生频率高,“十年九旱”是该流域气候的主要特点。流域具有明显的沙漠河流水文特征,降水被流域内沙漠容纳调节,主要以地下潜流的形式补给河流,多年平均径流量为 3.3 亿 m³,变差系数(CV)为 0.26,径流年际变化不大,年内分配相对比较均匀。

2 资料来源与研究方法

本研究所采用的数据均来自黄河水利委员会整编资料。秃尾河流域现设有 10 个雨量站,站点位置分布见图 1,选取位于流域上游的圪丑沟站、中游的高家堡站和下游高家川站三个雨量站 1956—2010 年的逐月降水资料,三个雨量站空间分布相对均匀,基本能够反映全流域的降水情况。采用算数平均法计算流域面平均降水量。

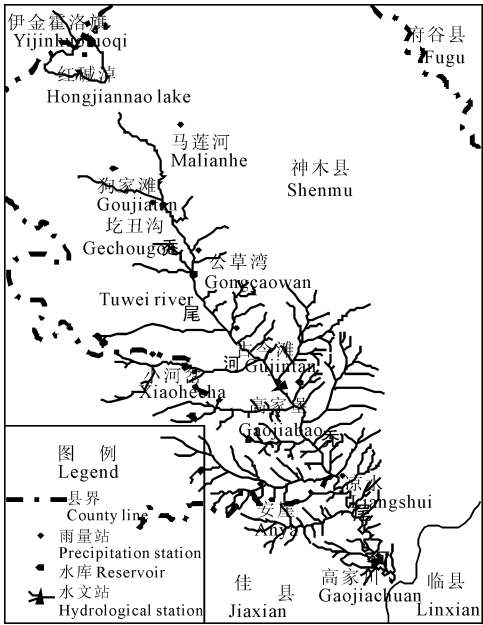


图 1 秃尾河雨量站分布

Fig.1 Location of precipitation station in Tuwei river

选用靠近流域出口处的高家川水文站 1956—2010 年逐月实测径流资料。其控制流域面积为 3 253 km²,占全流域面积的 98.8%,可以反映全流域的径流变化规律。

双累积曲线^[11]是目前在水文气象要素一致性和长期演变趋势分析中应用最广泛且简单直观的常用方法,河川径流受气候因素和人类活动因素等的影响,如果人类活动干扰较小时,径流主要随着降水

的变化而变化,因此采用双累积曲线法对年降水径流一致性进行分析,可反映出人类活动对径流趋势及变化强度的影响。采用相关分析法对流域降水径流进行相关性分析,可以定性得出降水径流变化特征关系,根据多元线性回归法对降水径流关系的拟合,定量得出秃尾河流域径流对降水的响应程度。

3 降水径流变化规律分析

3.1 降水 - 径流关系一致性分析

由 1956—2010 年秃尾河流域年降水量与实测年径流深双累积曲线(图 2)看出秃尾河流域年降水 - 径流关系曲线斜率发生了两次变化,突变点分别为 1978 年和 1998 年。

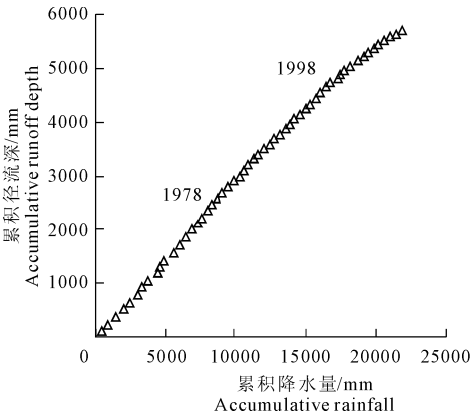


图 2 降水 - 径流双累积曲线

Fig.2 Double mass curve of annual precipitation and runoff depth

采用有序聚类分析法和滑动 T 检验法^[6]对实测径流序列进行分析,发现径流在 1978 年发生显著变异,根据滑动 T 检验分析得 1998 年统计量值 $T = 7.088$,通过了显著水平为 0.05 的显著性检验。由于有序聚类分析法是以最优原则识别突变点,可能会遗漏掉其他可能突变点,因此以 1978 年为分界点,采用有序聚类分析法对 1978—2010 年径流序列进一步分析得出,1998 年发生变异。由此说明秃尾河流域径流在 1978 年和 1998 年发生了两次显著性变异。

20 世纪 70 年代末流域内水土保持面积为 2.29 万公顷,为 50 年代末对应面积的 8.2 倍,到 20 世纪 90 年代末水土保持面积达到 7.67 万公顷,截至 2010 年,水土保持面积为 9.49 万公顷,是 20 世纪 90 年代末对应面积的 1.2 倍,说明 20 世纪 70 年代末的流域下垫面条件已经和 50 年代末的下垫面条件之间有显著差异,从而改变了径流变化特性。20 世纪 90 年代末以后,流域水土保持面积变化为 24%,秃尾河流域煤矿开采力度不断加大,流域内生产生活用水急剧上升。为了满足人类生活的需求,人类

对天然径流的调节强度逐渐增大,从而影响了原来的河流量及补给状态,进而改变了地表水资源的时空分布。

因此,分别以 1978 年和 1998 年为分界点,将径流序列分为近似天然条件下的基准期(1956—1978 年)、水土保持效应期(1979—1998 年)和资源开发期(1999—2010 年)。

3.2 年降水径流变化规律

为了更好地分析出年降水和年径流变化趋势,对流域年降水和年径流序列进行 Z - score 标准化处理。根据年降水和年径流过程线(图 3)分析年降水和年径流的变化趋势。

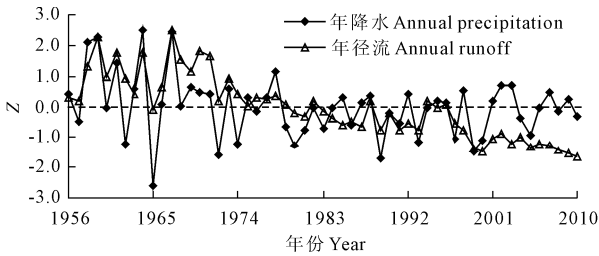


图 3 秃尾河流域年降水径流过程

Fig.3 Variation of annual precipitation and runoff

整个研究期年降水和年径流均存在下降趋势,20 世纪 70 年代末之前,降水年际波动比较大,极大值和极小值均出现在这个时期,径流波动规律及下降趋势基本与年降水一致,降水径流关系比较稳定;80 年代初到 90 年代末,降水年际波动变小,并表现出上升趋势,径流则依然表现为下降趋势;90 年代末以后年降水依然表现出增加趋势,年径流则表现出明显下降趋势。由此可见,虽然年降水整体上有弱下降趋势,但实际上年降水经历了一个先减少后增加的过程,而年径流则表现出显著的下降趋势,并且在 20 世纪 90 年代末之后,径流减少幅度增大。说明在 20 世纪 80 年代初之前,年径流主要受年降水的影响,随着人类活动的不断加剧,降水不再是径流变化的主要影响因素。

3.3 季节降水径流变化规律

秃尾河流域四季分明,季节划分以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月到次年 2 月为冬季,分别对降水和径流的季节变化规律进行分析。

3.3.1 季降水变化规律 全流域多年平均降水量为 397 mm,其中夏季降水最多,多年平均值为 243.2 mm,占年降水量的 61.3%;其次为秋季,占年降水量的 21.2%;冬季降水最少,只占年降水量的 2.2%。由秃尾河流域四季降水量过程线(图 4)可以看出,春季和冬季降水有弱增加趋势,夏季和秋季有减少

趋势,其中夏季减少最明显,减少速率为 $12.4\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。经 Kendall 秩次检验,得统计量值分别为 0.93 、 -1.01 、 -1.39 、 1.15 ,均未通过显著水平为 0.05 的显著性检验。

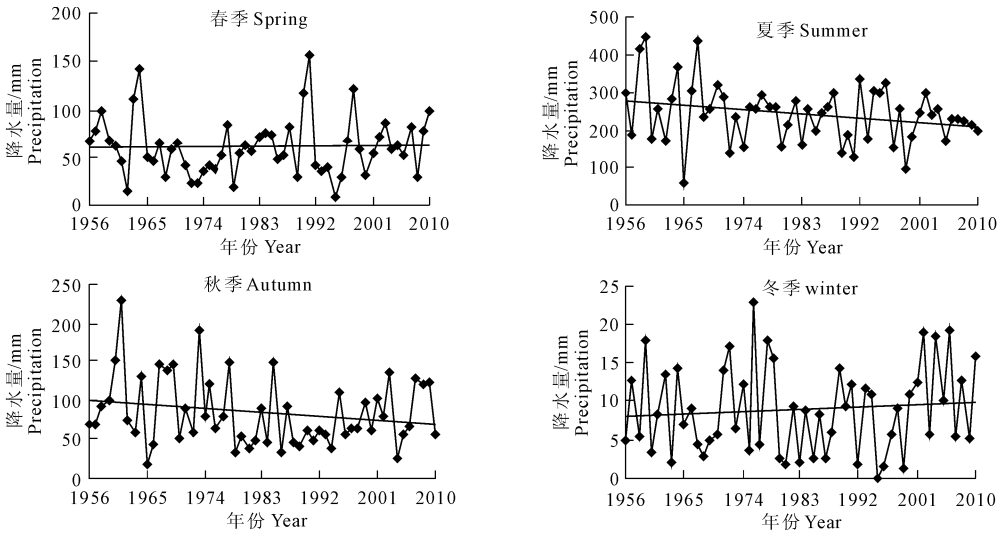


图 4 秃尾河流域四季降水量过程

Table 4 Variation of spring, summer, autumn and winter precipitation in Tuwei river basin

表 1 秃尾河流域降水量变化

Table 1 The variation of precipitation in Tuwei river basin

时段 Period	全年/mm Whole year	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
		降水量	比例	降水量	比例	降水量	比例	降水量	比例
		Precipitation /mm	Proportion /%	Precipitation /mm	Proportion /%	Precipitation /mm	Proportion /%	Precipitation /mm	Proportion /%
1956—1978	434.9	58.0	13.3	265.8	61.2	101.8	23.4	9.3	2.1
1979—1998	363.4	61.9	17.0	233.3	64.2	61.4	16.9	6.8	1.2
1999—2010	380.4	63.1	16.6	216.4	56.9	87.4	23.0	11.3	3.0
1956—2010	397.0	60.5	15.3	243.2	61.3	84	21.2	8.8	2.2

相比于基准期(1956—1978 年),水土保持效应期(1979—1998 年)年降水平均减少速率为 $3.5\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$,其中春季平均增加速率 $0.2\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$,夏、秋、冬季平均减少速率分别为 1.6 、 2.0 、 $0.1\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$ 。夏季和秋季变化量占年变化量比重最大。资源开发期(1999—2010 年)年降水平均增加速率为 $1.3\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$,春、夏季平均减少速率 0.1 、 $1.4\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$,秋、冬季平均增加速率 2.2 、 $0.4\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$ 。在整个研究期春季和冬季降水变化较小,秋季变化最大。年降水变化主要受夏季和秋季降水变化的影响,秋季降水所占比例波动较大,在资源开发期夏季降水所占比例显著下降。

3.3.2 季径流变化规律 全流域多年平均径流深为 104.2 mm ,其中春、夏、秋、冬季径流深多年平均值分别为 25.4 、 30.9 、 27.0 、 20.9 mm ,分别占年径流深的 24.4% 、 29.7% 、 25.9% 、 20.0% 。由秃尾河流

根据秃尾河流域不同季节降水量变化过程(见表 1)知秃尾河流域降水量春季增加,夏季减少,秋季和冬季则出现先减少后增加趋势。

域四季径流过程(图 5)可以看出,四季均表现出显著下降趋势,经 Kendall 秩次检验,得统计量值分别为 -7.50 、 -5.98 、 -6.58 、 -5.02 ,均通过了显著水平为 0.01 的显著性检验。在整个研究期春季和冬季径流波动幅度较小,20 世纪 70 年代之前和 80 年代中期到 90 年代中期夏季径流波动幅度较大,在 1998 年出现极小值,秋季径流则在 20 世纪 70 年代之前波动幅度较大,其余时段波动幅度较小。

根据秃尾河流域径流量变化过程(见表 2)知,相比于基准期,水土保持效应期(1979—1998 年)。年径流平均减少速率 $1.5\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$,春、夏、秋、冬季分别为 0.3 、 0.6 、 0.4 、 $0.2\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$,占年径流减少量的比例分别为 20.0% 、 40.0% 、 26.7% 、 13.3% 。资源开发期(1999—2010 年)年径流平均减少速率为 $1.7\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$,春、夏、秋、冬季分别为 0.4 、 0.7 、 0.2 、 $0.4\text{ mm}\cdot \text{a}^{-1}$,占年径流减少量的比例分别为 23.5% 、

41.2%、11.8%、23.5%。夏季径流减少量最多,占年径流减少量比重最大。春季、夏季和冬季径流变化速率增大,秋季减小。夏季径流占年径流比例也有所下降,秋季所占比例增加,春冬季节基本不变。在整个研究期内夏季径流变化与年径流变化趋势一致,并且夏季径流变化速率占年径流变化速率比重最稳定,说明年径流变化主要受夏季径流变化的影响。

在不同时期,四季径流量均明显减小,并且趋向四季分配均匀,其中在资源开发期(1999—2010 年),夏季径流量明显减小,秋季径流量达年内最大。秃尾河流域径流年内过程是双峰型^[8],虽然总体上年

径流呈减小趋势,但由于流域整体气温上升,冬季尤为明显^[9],同时春季和冬季降水增加,从而使得冰雪融水补给增加,春季和冬季径流有所增加。另一方面人类活动的加剧导致地下水减少^[10],使得整个研究期春季和冬季径流比较稳定。在夏秋季,径流的主要来源为降水,由于夏季降水减少较多,以及流域内水利工程的调蓄作用,使得夏季径流减少明显;秋季降水先减少后增加,且变化速率最大,综合人类活动的效应,秋季径流变化较小,截至 2010 年,所占年径流比例达到最大。秃尾河流域径流年内分配趋向均匀。

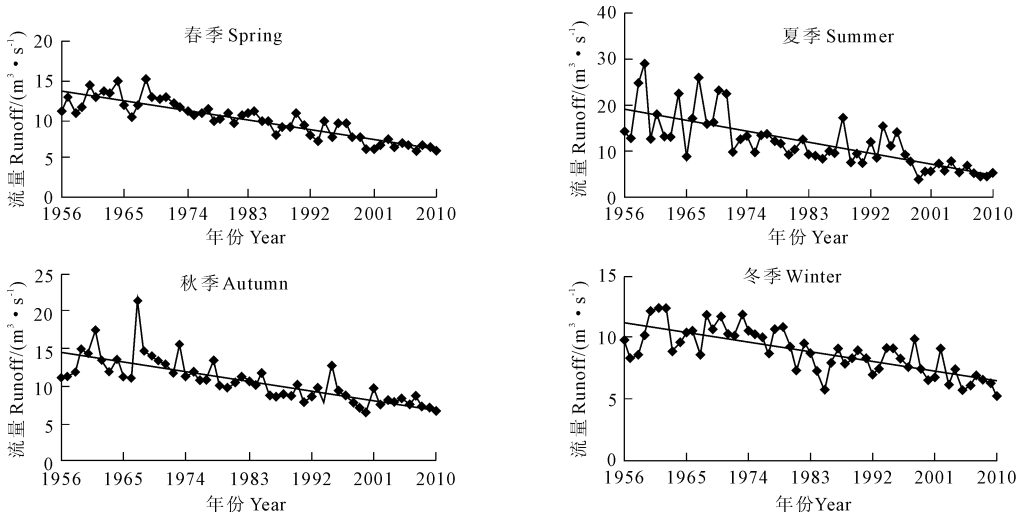


图 5 秃尾河流域四季径流过程

Table 5 Variation of spring, summer, autumn and winter runoff in Tuwei river basin

表 2 秃尾河流域径流量变化

Table 2 The variation of runoff in Tuwei river basin

时段 Period	全年/mm Whole year	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
		流量 Runoff /mm	比例 Proportion /%	流量 Runoff /mm	比例 Proportion /%	流量 Runoff /mm	比例 Proportion /%	流量 Runoff /mm	比例 Proportion /%
1956—1978	126.6	29.8	23.5	40.2	31.8	32.0	25.3	24.5	19.4
1979—1998	96.1	24.1	25.1	27.6	28.7	24.5	25.4	19.8	20.6
1999—2010	76.0	19.0	25.0	19.0	25.0	22.3	29.3	15.7	20.7
1956—2010	104.2	25.4	24.4	30.9	29.7	27.0	25.9	20.9	20.0

4 径流对降水响应关系分析

4.1 季径流对同期降水响应关系分析

由季降水－径流相关系数(表 3)可以看出,在整个研究期(1956—2010 年)内,夏、秋季降水量与径流量呈显著正相关,相关系数分别为 0.719、0.587,均通过了置信水平 $\alpha = 0.001$ 的检验;春季和冬季降水径流相关系数分别为 0.016、0.098。说明夏、秋季降水量的变化在很大程度上决定着同期径流量的变

化,春季和冬季降水径流相关性很弱,未能通过显著性检验。

基准期(1956—1978 年),夏、秋季降水径流均呈显著正相关,相关系数分别为 0.843、0.717,均通过了置信水平为 $\alpha = 0.001$ 的检验,而春季和冬季降水径流相关性较差,未能通过显著性检验。

水土保持效应期(1979—1998 年),夏季降水径流仍表现出显著正相关,相关系数为 0.721,通过了较高置信水平($\alpha = 0.001$)的检验,而秋季相关系数

为 0.521,只通过了较低置信水平($\alpha = 0.05$)检验,说明在这段时期秋季降水径流关系减弱,春季和冬季相关性仍未通过显著性检验。

表 3 不同时段季降水径流相关系数

Table 3 Correlation coefficient of seasonal precipitation and runoff in the different periods				
时段 Period	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
1956—1978	0.133	0.843***	0.717***	-0.002
1979—1998	0.190	0.721***	0.521*	0.335
1999—2010	-0.018	0.577***	0.273	0.320
1956—2010	0.016	0.719***	0.587***	0.098

注:*,**,*** 分别表示相关系数通过了置信水平为0.05, 0.01,0.001 的检验,下同。

Note: *, ** and *** indicates relative correlation is at the significance level of 0.05, 0.01, 0.001 respectively, the same below.

资源开发期(1999—2010 年),只有夏季降水径

流相关关系通过了较高置信水平($\alpha = 0.001$)检验,春季降水径流呈负相关,冬季相关系数大于秋季。

这可能由于随着人类活动的不断加剧,对秋季降水径流关系的干扰增大,使得秋季降水径流相关性显著减小。秃尾河流域属于超渗产流地区,径流受降雨强度的影响较大。一般夏季降水量和降雨强度均较大,使得夏季降水径流关系最显著且比较稳定,且夏季径流与同期降水的响应关系最稳定。

4.2 年径流对不同时间尺度降水变化的响应关系分析

根据不同时间尺度降水和年径流相关性分析(见表 4)可以看出,在整个研究期(1956—2010 年)内,年径流与年降水、夏季降水、最大一个月降水以及主汛期(7—9 月)降水量均呈显著正相关,其中年径流与最大一个月降水相关系数最大,为 0.848,说明年径流与最大一个月降水量相关性最强,其次为主汛期降水。

表 4 不同时间尺度降水量与年径流相关系数

Table 4 Correlation coefficient of precipitation in the different time period and annul runoff							
时段 Period	全年 Whole year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	降水量最大一个月 Maximum precipitation of one month	主汛期 Major flood period
1956—1978	0.699***	0.198	0.665***	0.446*	-0.057	0.848***	0.794***
1979—1998	0.268	-0.313	0.525*	-0.178	-0.128	0.542*	0.479*
1999—2010	0.603*	-0.052	0.619*	-0.127	0.418	0.631*	0.418
1956—2010	0.537***	-0.048	0.531***	0.330*	-0.051	0.658***	0.615***

基准期(1956—1978 年),年径流与夏季、最大一个月降水和主汛期降水相关性均通过了较高置信水平($\alpha = 0.001$)检验。

水土保持效应期(1979—1998 年),年径流与夏季、最大一个月降水以及主汛期降水相关性均只通过了较低置信水平($\alpha = 0.05$)检验,说明在这段时期年径流与不同时段降水量的相关程度均有所减弱,但是与最大一个月降水的相关性最稳定,其次为夏季降水,与年降水相关性减弱最明显,不能通过显著性检验。

资源开发期(1999—2010 年),年径流与年降水、夏季降水和最大一个月降水相关关系通过了较低置信水平($\alpha = 0.05$)检验,说明在 20 世纪 90 年代末以后年降水径流关系出现了新的稳定,但是年径流仍然与最大一个月降水变化关系最稳定。由此说明,随着人类活动的不断加剧,年径流对最大一个月降水的相关关系最稳定,其次为夏季降水。

5 径流对降水变化的响应程度分析

在天然时期年径流的变化主要受降水的影响,

降水的变化和径流的变化应是一致的,秃尾河流域最大一个月降水与年径流相关性最强。秃尾河流域位于黄土高原地区,一场降雨产生径流的多少,受降雨强度的影响很大,因此认为最大一个月降水的变化规律可以近似反映流域天然降水的变化特征。

考虑秃尾河流域径流年内过程呈“双峰型”,春季径流与前一年枯季(10—12 月)降水或降雪有关,基于近似天然条件下的基准期实测降水径流资料,尝试以年径流为因变量,同期最大一个月降水和前一年枯季降水为自变量建立多元线性回归方程:

$$R_t = 0.0302P_{1(t-1)} + 0.0261P_{2t} + 7.684$$
 相关系数 0.893

式中, R_t 为当年年平均径流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); $P_{1(t-1)}$ 为前一年枯季降水量(mm); P_{2t} 为当年最大一个月降水量(mm)。

以基准期的最大一个月降水和前一年枯季降水为输入因素,得到近似天然径流,以 1998 年为分界,分别计算不同时期径流的变化量(见表 5)。

表 5 秃尾河流域径流对降水响应

Table 5 Response of runoff to precipitation variation in Tuwei river basin

项目 Items	时段 Period		
	1956—1978	1979—1998	1999—2010
径流量 Runoff(×10 ⁴ m ³)	实测值 Measured value	41325	30059
	计算值 Calculated value		38234
	还原用水后 Reduction water usage		31622
	总减少量 Total reduction		11265
降水因素 Precipitation actor	影响量 Influence quantity/×10 ⁴ m ³	3091	4340
	影响比重 Proportion/%	27.4	21.4
人类活动等因素 The humanity actor	影响量 Influence quantity/×10 ⁴ m ³	8175	15906
	影响比重 Proportion/%	72.6	78.6
	其中:用水量 Water usage/×10 ⁴ m ³	1562	3519
	影响比重 Proportion/%	13.9	17.4

由表 5 看出,相比基准期,水土保持效应期(1978—1998 年)径流总减少量为 11 265 万 m³,降水因素对径流的减少量为 3 091 万 m³,影响比重为 27.4%;人类活动等因素对径流的减少量为 8 175 万 m³,影响比重为 72.6%,其中由于取用水活动对径流的影响比重为 13.9%。资源开发期(1999—2000 年)径流总减少量达到 20 246 万 m³,减少了 49.0%。降水因素和人类活动等因素对径流减少的影响比重分别为 21.4%和 78.6%,其中取用水活动对径流的影响比重为 17.4%。可见,人类活动等因素是径流减少的主要原因。

在水土保持时期,大规模开展水土保持治理活动,改变了下垫面条件,增大了对降水的截留、下渗,使得相似降雨条件下产流量减小^[12]。在资源开发期,生产生活用水增加,致使地下水严重超采,地下水位持续下降,使得基流减少,同时为了满足用水需求,修建水利工程,截至 2010 年底,秃尾河流域分别于 2003 年和 2008 年建成了瑶镇和采兔沟两座中型水库,对河道径流起到了调蓄作用,拦截汛期径流^[10],进而使得流域出口断面处流量大大减小。

6 结 论

- 1) 秃尾河流域年径流显著减少,年降水则呈先减少后增加的趋势。年降水径流关系分别在 1978 年和 1998 年发生了两次显著突变,受人类活动影响,降水不再是径流变化的主要影响因素。
- 2) 秃尾河流域四季径流均显著减少,夏季径流变化与年径流变化趋势一致。降水量则春季增加,夏季减少,而秋季和冬季降水先减少后增加,其中春季和冬季降水变化较小,秋季降水变化最大,年降水变化主要受夏季和秋季降水变化的影响。
- 3) 秃尾河流域夏季径流对同期降水的相关程度最高,其次为秋季、春季,冬季最弱。年径流则对

- 最大一个月降水的相关程度最高,其次为夏季。
- 4) 对秃尾河流域最大一个月降水和前一年枯季降水与年径流作多元线性回归拟合,得出相比于基准期,水土保持效应时期(1978—1998 年)径流对降水变化的响应比重为 27.4%,人类活动等其他因素的比重为 72.6%,其中取用水比重为 13.9%;资源开发期(1999—2000 年),年径流对降水的响应比重为 21.4%,人类活动等其他因素比重 78.6%,其中取用水活动比重为 17.4%。自人类大规模活动以来,人类活动始终是径流减少的主要影响因素,其中取用水比重有所增加;降水因素对径流减少的作用减小。

参 考 文 献:

[1] 胡彩虹,王纪军,王 灏,等.沁河流域实测径流对环境变化的定量响应分析[J].气候变化研究进展,2012,8(3):213-219.

[2] 王 勇,许红梅,程炳岩,等.1951—2012 年降水变化对涪江流域径流的影响[J].气候变化研究进展,2014,10(2):127-134.

[3] 郭宗锋,马友鑫,李红梅,等.1959—2000 年流沙河流域降水与径流变化研究[J].水土保持研究,2006,13(4):150-153,157.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 杨筱筱,王双银,王建莹,等.秃尾河年径流变异点综合诊断研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):234-238.

[7] 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.

[8] 邵肇悦,管仪庆,张丹蓉,等.秃尾河 1967—2007 年径流变化特性分析[J].人民黄河,2013,35(5):18-21.

[9] 刘智勇,张 鑫,李小冰.气候变化对秃尾河流域径流量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):184-190.

[10] 白 乐,李怀恩,何宏谋.降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J].自然资源学报,2014,29(12):2078-2088.

[11] 穆兴民,张秀勤,高 鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.

[12] 白 桦,穆兴民,王双银.水土保持措施对秃尾河径流的影响[J].水土保持研究,2010,17(1):41-44.