

降水和人类活动对三岔河上游径流量变化的贡献

田仁伟, 赵翠薇, 贺中华, 徐志荣, 李爽
(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:以黔中水利枢纽工程水源区——三岔河上游为研究对象,采用累积距平法分析了该流域1990-2016年降水量和径流量的变化趋势,揭示了降水量变化过程中存在2001和2013年两个突变点,而径流量变化过程中只存在2001年1个突变点。运用累积量斜率变化率比较法,定量估算不同时期降水和人类活动对三岔河上游径流量变化的贡献率。结果表明:以1990-2001年作为基准期,2002-2013年降水和人类活动对径流量减小的贡献率分别为59.37%和40.63%;2014-2016年降水和人类活动对径流量减小的贡献率分别为50.82%和49.18%。表明降水是三岔河上游径流量变化的主要影响因素,而人类活动对径流量变化的影响在增加。

关键词:径流量;降水量;气候变化;人类活动;贡献率;三岔河上游

中图分类号:TV12;P333 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2019)06-0123-07

The impacts of climate change and human activities to the streamflow in the Upper Reach of Sanchahe River Basin

TIAN Renwei, ZHAO Cuiwei, HE Zhonghua, XU Zhirong, LI Shuang

(College of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The accumulative anomaly analysis method was used to analyze the changing trends of the precipitation and runoff from 1990 to 2016 in the upper Sanchahe River Basin, the water source area of the Qianzhong Hydraulic Project. Two mutational points in the process of precipitation change in the upper Sanchahe River Basin in 2001 and 2013 were detected. However, there was only one abrupt point in 2001 in the process of runoff change. The slope change ratio of cumulative quantity was adopted to estimate the contribution rates of the precipitation and human activities to the runoff change in different time periods. The results showed: taking 1990-2001 as the base period, the contribution of precipitation and human activities to the decreased runoff were 59.37% and 40.63% in 2002-2013, while the contribution rates of precipitation and human activities to the reduction of runoff from 2014 to 2016 were 50.82% and 49.18%, respectively. This study have shown that precipitation was the main influencing factor to runoff change in the upper Sanchahe River Basin, and the influence of human activities to runoff change was increasing.

Key words: runoff; precipitation; climate change; human activities; contribution rate; upper Sanchahe River Basin

1 研究背景

河川径流作为自然界水循环过程中的一个重要环节,对区域自然环境保护和社会发展具有重要意义^[1-4]。近年来,针对河川径流的研究已经成为国内外水文科学研究的重点^[5]。在过去,河川径流变

化主要受气候变化的影响,而随着人类活动的加强,河川径流发生了明显的变化^[6]。刘剑宇等^[7]通过研究发现,1980-2000年,中国南方流域气候变化对年径流的影响以增加作用为主,而北方流域气候变化对年径流的影响以减少作用为主。王随继等^[8]研究1950-2009年黄河中游区间径流变化规

收稿日期:2019-05-23; 修回日期:2019-08-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41471032、u1612441)

作者简介:田仁伟(1995-),男,贵州平塘人,硕士研究生,主要从事土地利用与生态环境保护方面的研究。

通讯作者:赵翠薇(1968-),女,贵州大方人,博士,教授,硕士生导师,主要从事土地利用与生态环境保护方面的研究。

律和影响因素,发现1971-1985年和1986-2009年降水量对区间产流量减小的贡献率分别为25.94%和25.13%,而人类活动的贡献率分别为74.06%和74.87%。穆兴民等^[9]研究1952-2000年黄河中游河口镇到龙门区间降水量变化和人类活动对径流变化的影响,发现降水对径流减少的贡献率为29%,人类活动对径流减少的贡献率为71%。

三岔河上游作为中国西南典型喀斯特山地小流域,地处长江流域和珠江流域分水岭河源地带,是贵州省石漠化和水土流失较严重的地区之一^[10-12]。从乌江上游三岔河取水所修建的黔中水利枢纽工程——平寨水库,对于缓解黔中地区缺水问题和社会发展意义重大^[13-15]。目前针对三岔河上游的研究主要有:生态系统产流服务特征研究^[16]、降水径流时空变化分析^[17]、水化学特征研究^[18]及碳汇效应研究^[19]等,在研究降水和人类活动对径流量变化的贡献方面相对较少。因此,以黔中水利枢纽工程水源区——三岔河上游为研究对象,分析1990-2016年降水量和径流量的年际变化特征,运用累积量斜率变化率比较法(SCRCQ)定量估算降水和人类活动对径流量变化的贡献率,以期为流域水资源的利用与开发以及黔中水利枢纽工程水资源的调配提供一定的参考依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

三岔河为乌江南源一级支流,发源于贵州省西部高原乌蒙山脉东麓威宁县盐仓区花渔洞,东南流经二塘进入水城县和天生桥伏流一段,经大河向东流入纳雍县境内,经阳长镇沿织金县、六枝特区边界,始称三岔河。河流全长325.6 km,流域面积7 264 km²,天然落差1 398.5 m,河流平均比降为4.3%。地貌类型以山地和丘陵为主,其中高原山地约占流域面积的80%,高原丘陵占15%。除西北部的威宁县因地势较高属于暖温带气候之外,其他地区均属于亚热带季风性湿润气候,全年气候温和湿润,雨量充沛^[20-21]。

三岔河上游位于104°19'~105°31'E,26°11'~27°00'N之间,面积4 077.31 km²。河流为西北—东南走向,地势西北高东南低,平均海拔1 868.34 m。行政区划包括威宁彝族回族苗族自治县、赫章县、水城县、纳雍县、织金县、钟山区、六枝特区7个县(区)。流域土地类型以林地、耕地、草地为主^[22]。三岔河上游位置与范围及水文、雨量站分布见图1。

2.2 数据来源

降水量数据来源于流域内3个雨量站(二塘站、南开站、付家寨站)和3个水文站(向阳站、阳长站、龙场桥站)提供的1990-2016年实测逐月平均降水资料,根据均值法计算出整个流域的年平均降水量,因为3个水文站和3个雨量站覆盖整个三岔河上游,所选用的资料能够反映整个流域的降水变化情况^[4]。

以三岔河上游出水口处龙场桥水文站提供的1990-2016年实测逐月平均径流资料作为整个流域的径流量数据,以年平均径流深表示年平均径流量的大小。

2.3 研究方法

2.3.1 Mann-Kendall秩次相关法 Mann-Kendall法是通过计算统计量 τ 和标准化变量 U 来判断离散数据点变化趋势显著性的一种方法^[23]。对于变化趋势显著性的检验,通常取显著性水平 $\alpha = 0.05$,则相应的检验系数临界值 $U_{(0.05,2)} = 1.96$ 。若所计算的检验系数 $|U| > 1.96$,说明变化趋势显著;反之,若检验系数 $|U| < 1.96$,则说明变化趋势不显著。

2.3.2 累积距平法 降水—径流的双累积曲线被广泛用于研究水资源的演变过程,并能够判断出降水或径流是否有趋势性变化,但该方法主要依靠人为划分变化趋势的拐点,划分的结果难免存在一定的误差^[24-26]。Mann-Kendall检验法作为长时间序列水文突变分析的一种常用方法,具有计算简便以及受异常值影响较小的优点,但也存在一定的局限性^[27-28]。因此,本文采用累积距平法来判定降水量和径流深变化过程中的突变年份^[29],其原理是根据降水量或径流深累积距平值的变化趋势来判断变化过程中的转折点,累积距平值的计算公式为:

$$X_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: X_t 为降水量或径流量在某一时刻的距平累积值,mm; x_i 为降水量或径流深在 i 时刻的大小,mm; \bar{x} 为降水量或径流深的多年平均值,mm。

2.3.3 累积量斜率变化率比较法(SCRCQ) 累积量斜率变化率比较法广泛运用于定量估算各种因素对径流量变化的贡献率^[8,30-31]。其原理是在确定累积降水量和径流深变化过程中的突变年份后,通过绘制突变年份前后两个时期累积降水量与年份之间的线性关系图,以及累积径流深与年份之间的线性关系图,可得到累积降水量和径流深与年份的线

性关系斜率。然后根据突变年份前后两个时期累积降水量和径流深与年份之间线性关系的斜率,计算累积降水量和径流深斜率的变化率。累积降水量斜率的变化率计算公式为:

$$R_{SP} = 100 \times (S_{pb} - S_{pa}) / S_{pa} = 100 \times (S_{pb} / S_{pa} - 1) \quad (2)$$

式中: R_{SP} 为累积降水量斜率的变化率,%; S_{pa} 和 S_{pb} 分别为突变年份前后两个时期累积降水量与年份之间线性关系式的斜率,mm/a。

累积径流深斜率的变化率计算公式为:

$$R_{SR} = 100 \times (S_{Rb} - S_{Ra}) / S_{Ra} = 100 \times (S_{Rb} / S_{Ra} - 1) \quad (3)$$

式中: R_{SR} 为累积径流深斜率的变化率,%; S_{Ra} 和 S_{Rb} 分别为突变年份前后两个时期累积径流深与年份之间线性关系式的斜率;mm/a。

最后根据累积降水量和径流深斜率的变化率,计算出降水对径流深变化的贡献率 C_p (单位:%) 和人类活动对径流深变化的贡献率 C_H (单位:%),

计算公式分别为:

$$C_p = 100 \times R_{SP} / R_{SR} = 100 \times (S_{pb} / S_{pa} - 1) / (S_{Rb} / S_{Ra} - 1) \quad (4)$$

$$C_H = 100 - C_p - C_A \quad (5)$$

式中: C_p 为降水对径流量变化的贡献率,%; C_H 为人类活动对径流量变化的贡献率,%; C_A 为蒸散发对径流量变化的贡献率,%。

由于流域内多年平均气温变化不明显,与其他因素相比,气温对径流量变化的影响相对较小,加上多年蒸散发资料的获取困难,本研究不考虑气温对径流量变化的影响,所以将影响径流量变化的主要气候因素确定为降水量。

人类活动包括土地利用变化、水土保持措施以及水利工程建设等,由于各种人类活动相关资料收集难度较大,所以本研究所讨论的人类活动对径流量变化的贡献率实际上是最大限度的影响。则公式(5)可化简为:

$$C_H = 100 - C_p \quad (6)$$

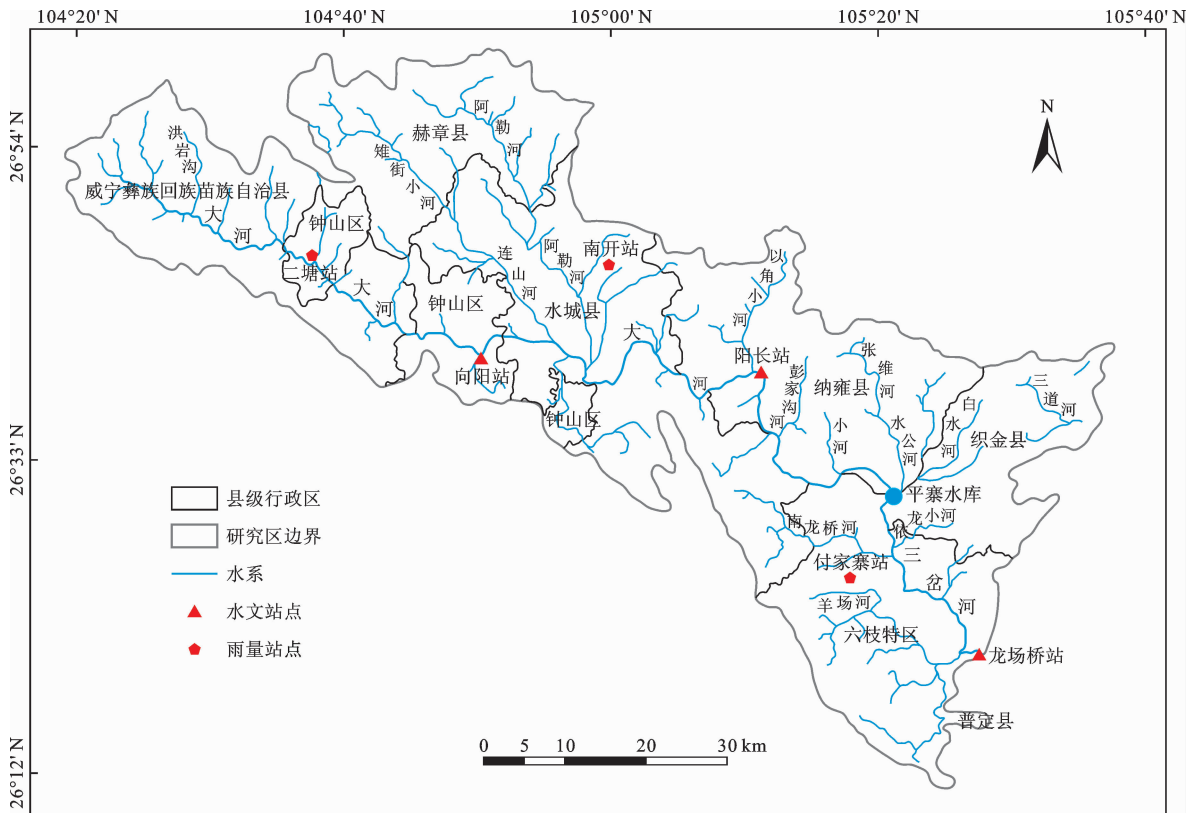


图 1 三岔河上游位置与范围及水文、雨量站分布

3 结果分析

3.1 降水量和径流深的基本变化特征

根据三岔河上游 1990 - 2016 年降水量和径流

深年际变化特征(图 2)可知,1990 - 2016 年平均降水量为 1 084.25 mm,平均径流深为 931.35 mm。降水量在 811.67 ~ 1 316.41 mm 之间变化,而径流深在 531.33 ~ 1 296.09 mm 之间变化,由此可见径流

深的变化幅度比降水量大。通过线性趋势分析可知,降水量和径流深均呈现波动减小的趋势,其中降水量的减小速率为 3.1 mm/a,而径流深的减小速率为 14.54 mm/a,说明径流深减小速率大于降水量。此外,通过 Mann - Kendall 秩次相关法的检验可知,降水量的检验系数 $|U_p| = 1.024 < U_{(0.05,2)}$,说明下降趋势不显著;而径流深的检验系数 $|U_Q| = 2.817 > U_{(0.05,2)}$,说明下降趋势显著。

通过 5a 滑动变化趋势线可知,2001 年之前降水量呈微弱的上升趋势,2001 年之后呈显著下降趋势,而 2013 年之后又出现上升趋势。降水量的最大和最小值分别为 1 341.40 mm(2014 年)和 831.15 mm(2011 年)。径流深在 2001 年之前也是呈微弱的上升趋势,与降水量的变化趋势基本一致,2001 年之后呈持续下降趋势。径流深的最大和最小值分别为 1 296.09 mm(1991 年)和 531.33 mm(2016 年)。

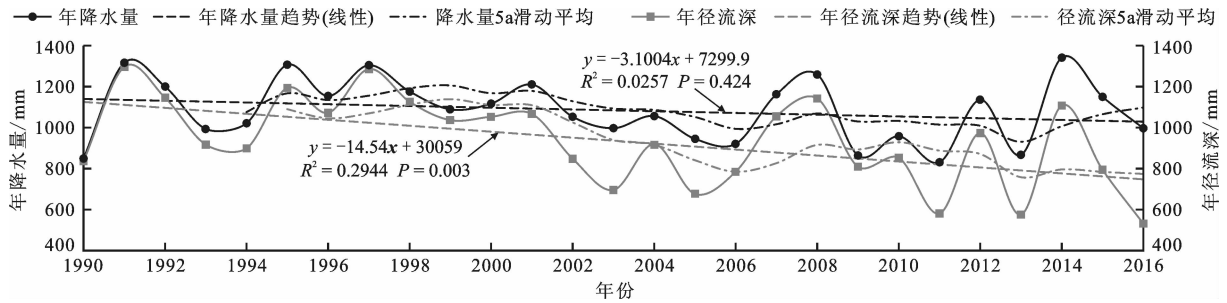


图 2 1990 - 2016 年三岔河上游降水量和径流深的年际变化过程

3.2 降水量和径流深的距平百分率变化

根据三岔河上游 1990 - 2016 年降水量和径流深的距平百分率年际变化特征(图 3)可知,1990 - 2016 年降水量和径流深的正负距平百分率交替出现,变化剧烈。降水量距平百分率的最大值和最小值分别为 23.55% (2014 年)和 -23.82% (2011 年),径流深距平百分率的最大值和最小值分别为 38.91% (1991 年)和 -43.18% (2016 年)。

3.3 降水和径流变化过程突变年份的判定

根据三岔河上游 1990 - 2016 年降水量和径流深的累积距平值年际变化特征(图 4)可知,在 2001 年前后降水量的累积距平值呈前期增加后期减少的特点,可判定 2001 年为该时段降水量变化发生突变的一个年份;2001 - 2016 年降水量的累积距平值呈先减少后增加趋势,可判定 2013 年为降水量变化过程的另一个突变年份。相对于降水量的变化,1990 - 2016 年径流深累积距平值的变化特征表现为:2001 年之前呈增加趋势,2001 年后呈减少趋势,可判定 2001 年为该时段径流深变化发生突变的唯一年份。

总体而言,降水量与径流深的变化趋势基本一致,但降水量的变化幅度小于径流深,说明降水量是径流深变化的主要影响因素。由于降水量的变化会被放大到径流深的变化中去,而径流深距平百分率差值的最大值为 82.09%,要明显高于降水量距平百分率差值的最大值 47.37%,说明除降水量对径流深变化产生影响外,“退耕还林”政策的实施以及黔中水利枢纽工程平寨水库的修建等人类活动也对径流变化产生了重要影响,造成部分降水量高于平均值的年份(2015 年)而径流深也低于平均值。

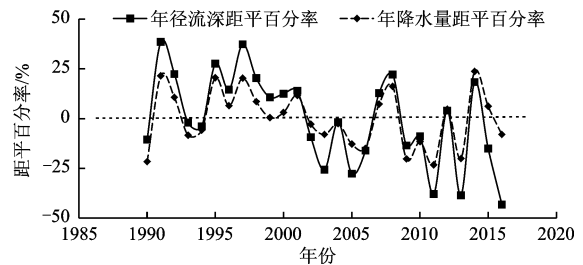


图 3 1990 - 2016 年降水量和径流深的距平百分率变化

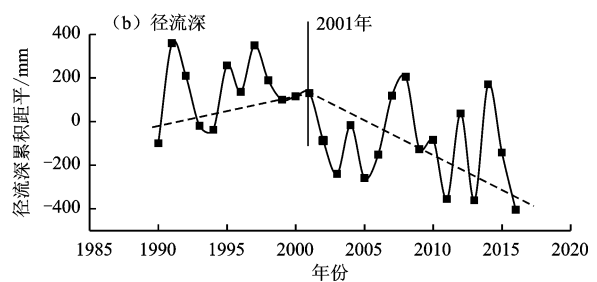
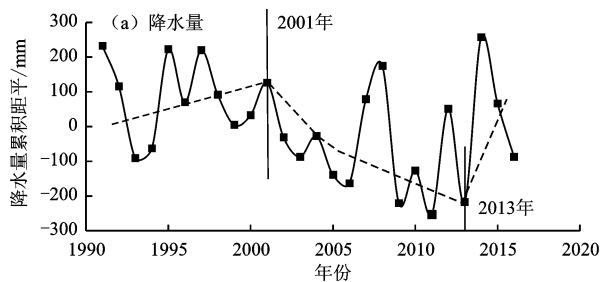


图 4 三 1990 - 2016 年岔河上游降水量和径流量累积距平值的变化特征

综上所述,降水量变化过程有两个突变年份,分别为 2001 和 2013 年;径流深的变化过程只有一个突变年份,为 2001 年。2001 年之前,人类活动相对较弱,降水量是径流量变化的主要影响因素,因此将 1990 - 2001 年作为降水和径流演变过程的基准期。在 2001 年之后,人类活动的加强对径流量变化产生了重要影响。在 2013 年后,降水量变化出现增加的趋势,而径流深却在减少,反映出人类活动对径流量变化的影响在进一步增加。

3.4 降水和人类活动对径流的贡献分析

根据降水量变化过程中的两个突变年份(2001 年和 2013 年)可将累积降水量的演变过程划分为 3 个时段:A1:1990 - 2001 年,A2:2002 - 2013 年,A3:2014 - 2016 年,并对累积降水量和年份进行线性回归分析,如图 5(a)所示。由图 5(a)可知,3 个时段的累积降水量的线性回归方程关系式决定系数 R^2 均大于 0.99,置信度 P 除第 3 个时段因只有 3 个年份数据导致置信度 P 为 0.017,其他时期置信度 P 均小于 0.001,说明相关性很高。

同理,根据径流深变化过程中的唯一突变年份(2001 年)将累积径流深的演变过程划分为两个时段:A1:1990 - 2001 年;A2:2002 - 2016 年,并对累积径流深与年份进行线性回归分析,结果如图 5(b)所示。由图 5(b)可知,累积径流深的线性回归方程决定系数 R^2 均大于 0.99,置信度 P 都小于 0.001,说明其相关性非常高。

根据公式(2)计算出累积降水量的斜率及变化率,如表 1 所示。由表 1 可知,A2 与 A1 时期相比,累积降水量斜率减少 153.09 mm/a,减少率为 13.34%;A3 与 A2 时期相比,累积降水量斜率增加 21.98 mm/a,增加率为 2.21%;A3 与 A1 时期相比,累积降水量斜率减少 131.11mm/a,减少率为 11.42%。

根据公式(3)计算出累积径流深的斜率及变化率,如表 2 所示。由表 2 可知,A2 时期累积径流深的斜率比 A1 时期减少 245.06 mm/a,减少率为 22.47%;A3 与 A2 时期的累积径流深斜率相等,无明显变化。

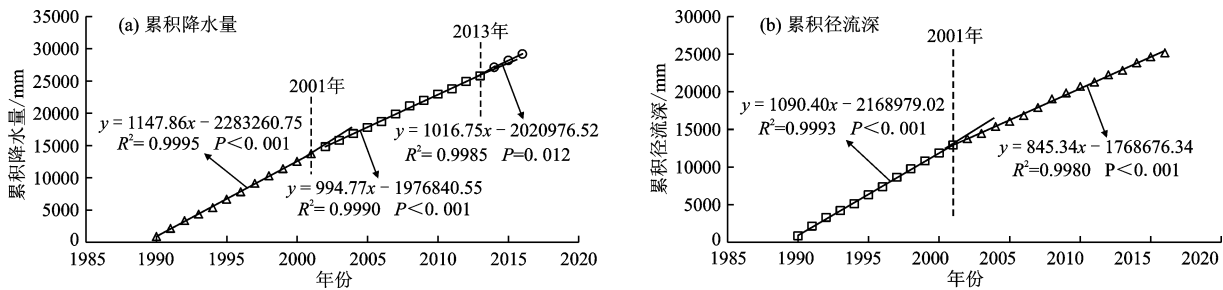


图 5 1990 - 2016 年三岔河上游累积降水量和累积径流深与年份的关系

表 1 三岔河上游累积降雨量斜率及变化率

时段	累积降水量与年份线性关系式斜率/(mm · a ⁻¹)	A2、A3 与 A1 时段斜率相比		A3 时段与 A2 时段斜率相比	
		变化量/(mm · a ⁻¹)	变化率/%	变化量/(mm · a ⁻¹)	变化率/%
A1:1990 - 2001 年	1147.86				
A2:2002 - 2013 年	994.77	-153.09	-13.34		
A3:2014 - 2016 年	1016.75	-131.11	-11.42	21.98	2.21

表 2 三岔河上游累积径流深斜率及变化率

时段	累积径流深与年份线性关系式斜率/(mm · a ⁻¹)	A2、A3 与 A1 时段斜率相比		A3 时段与 A2 时段斜率相比	
		变化量/(mm · a ⁻¹)	变化率/%	变化量/(mm · a ⁻¹)	变化率/%
A1:1990 - 2001 年	1090.40				
A2:2002 - 2013 年	845.34	-245.06	-22.47		
A3:2014 - 2016 年	845.34	-245.06	-22.47	0	0

根据公式(4)和(6)计算出三岔河上游不同时期降水和人类活动对径流量变化的贡献率,如表 3

所示。由表3可知,A2与A1时期相比,降水对径流量变化的贡献率为59.37%,而人类活动对径流量变化的贡献率为40.63%,表明2002-2013年径流量变化主要受降水的影响。A3与A2时期相比,累积降水量斜率增加21.98 mm/a,增加率为2.21%,而累积径流深的斜率不变,说明人类活动影响了径流量的变化,通过计算可知降水对径流量变化的贡献率为0,在不考虑气温影响的情况下,人类活动对

径流量变化的贡献率近似为100%。

A3与A1时期相比,累积降水量的斜率减少131.11 mm/a,减少率为11.42%,而累积径流深的斜率减少率为22.47%,径流深的减少率明显大于降水量,表明人类活动进一步影响了径流量的变化。通过计算可知,降水对径流量变化的贡献率为50.82%,而人类活动对径流量变化的贡献率为49.18%。

表3 三岔河上游降水和人类活动对径流量变化的贡献率

时段	降水量 斜率	径流深 斜率	A2、A3时段与A1时段斜率相比		A3时段与A2时段斜率相比	
			降水贡献 C_p /%	人类活动 C_H /%	降水贡献 C_p /%	人类活动 C_H /%
A1:1990-2001年	1147.86	1090.40				
A2:2002-2013年	994.77	845.34	59.37	40.63		
A3:2014-2016年	1016.75	845.34	50.82	49.18	0	100

综上所述,1990-2016年降水是三岔河上游径流量变化的主要影响因素,但降水对径流量变化的贡献在逐渐减弱,而人类活动对径流量变化的贡献在逐渐增加。1990-2001年人类活动相对较弱,对径流量变化影响较小,降水是径流量变化的主要影响因素,而降水总体上是以增加年径流量为主,这与刘剑宇等^[7]的研究结果基本一致。2002-2013年降水量和径流量总体呈下降趋势,通过计算可知降水对径流量变化的贡献率为59.37%,可见降水主要以减少径流量为主,与此同时,随着“退耕还林”和水土保持等工作的开展,人类活动对径流量变化的影响增加,通过计算可知人类活动对径流量减小的贡献率为40.63%。2014-2016年降水量的变化有明显增加趋势,而径流量仍然保持下降趋势,表明人类活动对径流量变化的影响在进一步加强。这一时期降水对径流量减小的贡献率为50.82%,而人类活动对径流量减小的贡献率为49.18%,说明降水仍是径流量变化的主要影响因素,但贡献作用在逐渐减弱,而人类活动对径流量变化的影响在逐渐增加,也反映出近年来流域开展的“退耕还林”及水土保持等工作成效明显。

3.5 讨论

需要说明的是,本文所计算的降水和人类活动对径流量变化的贡献率是对实际发生变化部分径流量的贡献率,而不是对总径流量变化的贡献率。由于所收集的气象数据(降水量)和水文数据(径流量)年份有限,不能更准确地表征长时间内降水和径流的变化规律。在缺少气温变化数据的情况

下,忽略了气温变化对径流量变化产生的影响,造成计算结果相对增加了人类活动对径流量变化的贡献率,所探讨的人类活动对径流量变化的贡献率实际上是最大限度的贡献。此外,虽然气温变化会影响蒸散发的强度,但短时间内气温变化幅度不大,对径流量变化产生的影响不明显,所以此方法所计算出的结果是基本准确的,对定量分析各类因子对径流量变化的影响具有重要参考价值。

4 结论

(1)1990-2016年,三岔河上游降水量和径流深均呈波动下降趋势,降水量在831.15~1341.40 mm之间变化,而径流深在531.33~1296.09 mm之间变化,表明径流深的变化幅度大于降水量,且经检验得出径流深减小趋势较降水量显著。此外,在降水量的变化过程中存在2001和2013年两个突变年份,而径流深的变化过程只存在2001年1个突变年份。

(2)以1990-2001年为基准期(该时期人类活动影响较弱,可以忽略不计)。在不考虑蒸散发可能带来的影响下,2002-2013年降水和人类活动对径流量减小的贡献率分别为59.37%和40.63%,而在2014-2016年降水和人类活动对径流量减小的贡献率分别为50.82%和49.18%。由此可见,1990-2016年间降水是径流量变化的主要影响因素,但随着人类活动的不断增加,降水对径流量变化的影响在逐渐减弱,而人类活动对径流量变化的影响在逐渐增加。

参考文献:

- [1] 赵晨宇,王应祥,温珍珠,等. 泾河平凉市区段径流量变化特征及其影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(3):36-41.
- [2] 夏伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对沔河流域径流量影响的定量评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(6):47-52.
- [3] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010,467(7311):43-51.
- [4] 樊晶晶,黄强,刘登峰,等. 人类活动和气候变化对北洛河径流变化的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016,44(2):221-227+234.
- [5] 胡珊珊,郑红星,刘昌明,等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012,67(1):62-70.
- [6] 王彦君,王随继,苏腾. 降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J]. 自然资源学报, 2015,30(2):304-314.
- [7] 刘剑宇,张强,陈喜,等. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J]. 地理学报, 2016,71(11):1875-1885.
- [8] 王随继,李玲,颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率[J]. 地理研究, 2013,32(3):395-402.
- [9] 穆兴民,巴桑赤烈,ZHANG Lu,等. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J]. 泥沙研究, 2007(2):36-41.
- [10] 李晨,熊康宁,李晓娜,等. 贵州喀斯特生态脆弱区生态恢复响应[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2011,29(2):19-23.
- [11] 颜萍,熊康宁,檀迪,等. 喀斯特石漠化治理不同水土保持模式的生态效应研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2016,34(1):1-7+21.
- [12] 戴明宏,张军以,王腊春,等. 岩溶地区土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 生态科学, 2015,34(3):189-196.
- [13] 孟碟. 黔中水利枢纽工程水资源调配与经济核算研究[D]. 天津:天津大学, 2013.
- [14] 蒋翼,周忠发,黄登红. 黔中水利枢纽区植被覆盖度时空变化及驱动力分析——以平坝为例[J]. 水土保持研究, 2018,25(6):221-227.
- [15] 赵翠薇. 基于生态补偿的水库征地补偿研究——以黔中水利枢纽工程为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012,37(3):53-59.
- [16] 侯文娟,高江波,戴尔阜,等. 基于SWAT模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异[J]. 地理学报, 2018,73(7):1268-1282.
- [17] 张一鸣,田雨,雷晓辉,等. 三岔河上游近50年降水径流变化特征分析[J]. 水文, 2016,36(5):79-84.
- [18] 侯祎亮,安艳玲,吴起鑫,等. 贵州省三岔河流域水化学特征及其控制因素[J]. 长江流域资源与环境, 2016,25(7):1121-1128.
- [19] 焦树林,刘丽,孙婷,等. 三岔河流域水文特征与化学风化碳汇效应[J]. 地理研究, 2013,32(6):1025-1032.
- [20] 刘丽,梁虹,焦树林,等. 基于GIS的喀斯特流域土壤侵蚀敏感性研究——以贵州省三岔河流域为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2015,33(2):12-17.
- [21] 焦树林,罗福家,梁虹,等. 乌江源区阳长流域化学侵蚀作用的碳汇效应[J]. 水土保持学报, 2012,26(5):44-47.
- [22] 田仁伟,赵翠薇,贺中华,等. 1995-2016年三岔河上游土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2019,39(3):12-18.
- [23] 李丽娟,郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例[J]. 地理学报, 2000,55(3):309-317.
- [24] 孙宁,李秀彬,李子君,等. 潮河上游土地利用/覆被变化对年径流影响模拟[J]. 北京林业大学学报, 2008,30(S2):22-30.
- [25] 刘芳,熊伟,王彦辉,等. 基于LUCC的泾河流域景观格局与径流的响应关系[J]. 干旱区资源与环境, 2019,33(1):137-142.
- [26] 黄锡荃,李惠明,金伯欣. 水文学[M]. 北京:高等教育出版社, 2003:69.
- [27] 陈昌春,张余庆,项瑛,等. 土地利用变化对赣江流域径流的影响研究[J]. 自然资源学报, 2014,29(10):1758-1769.
- [28] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992,16(4):482-493.
- [29] RAN L S, WANG S J, FAN X L. Channel change at Toudaoguai station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010,20(2):231-247.
- [30] 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——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012,67(3):388-397.
- [31] WANG S J, YAN M, YAN Y X, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River[J]. *Quaternary International*, 2012,282(12):66-77.