

降水和人类活动对乌江上游径流变化的影响分析

肖杨, 周旭, 蒋啸, 杨大方, 李洪广

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳550025)

摘要: 径流量变化与气候和人类活动密切相关,其相互作用使得流域水循环发生变化,对气候变化和人类活动进行定量分析,可为流域调控水资源效率、协调农业发展等提供参考。以乌江上游为例,基于鸭池河水文站和流域内及周边共12个气象站,根据1960–2013年长时间序列实测径流与气象资料,利用Mann–Kendall法、累积距平法判断流域降水量和径流量的突变时间,用Morlet小波法对径流量进行周期变化分析,重点分析乌江上游流域降水与人类活动对径流量变化的贡献率。结果表明:1960–2013年间,径流量与降水量无显著增加趋势;径流量和降水量在此期间存在1986和2002年两个突变点,且突变特征和阶段特征同步;径流量与降水量的共振周期为18~19 a及19~20 a,流域径流量对降水量变化具有一定滞后作用,滞后时间为1~2 a;以1960–1986年为基准期,1987–2002年降水和人类活动对径流的贡献率分别为50.93%和49.70%,2003–2013年降水和人类活动对径流的贡献率分别为49.30%和50.70%。降水对径流变化的影响程度在降低,而人类活动对径流变化的作用在增大,因此,未来流域水资源管理应重视良性人类活动的构建与调控。

关键词: 径流变化; 降水; 人类活动; 累积量斜率变化率比较法(SCRCQ); 乌江上游

中图分类号:TV121⁺.2; P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0091-08

Impact of precipitation and human activities on the change of runoff in the upper reaches of Wujiang River

XIAO Yang, ZHOU Xu, JIANG Xiao, YANG Dafang, LI Hongguang

(School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Runoff change is closely related to climate and human activities, and the interaction between them changes the water cycle of the basin. So the quantitative analysis of climate change and human activities can serve as a reference for the regulation of water resources efficiency and the coordination of agricultural development in the basin. Taking the upper reaches of Wujiang River as the research object, based on the long-term series of measured runoff and meteorological data from 1960 to 2013 of Yachi River Hydrological Station and a total of 12 weather stations in the basin and its periphery, the abrupt changes of precipitation and runoff were recognized using Mann–Kendall and cumulative anomaly method, and the characteristics of the periodic change of runoff was analyzed using Morlet wavelet method with the emphasis on the effects of human activities and precipitation on runoff change in the upper reaches of Wujiang River. The results indicated that from 1960 to 2013, there was no significant increase in runoff and precipitation, two abrupt changes of both occurred in 1986 and 2002 with synchronized characteristics and phases during this period. The resonant periods of runoff and precipitation were 18–19 a and 19–20 a respectively. The runoff of the basin had a certain lagging effect on precipitation changes, and the lag time was 1 to 2 a. Taking 1960–1986 as the base period, the contribution of precipitation and human activities on runoff from 1987 to 2002 was 50.93% and 49.70%, whereas it was 49.30% and 50.70% from 2003 to 2013, respectively. The impact of precipitation on runoff was decreasing whereas

收稿日期:2020-08-31; 修回日期:2020-12-16

基金项目:贵州省科学技术项目(黔科合基础[2017]1131);贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2017]2855)

作者简介:肖杨(1994-),男,贵州铜仁人,硕士研究生,研究方向为土地利用变化与生态水文。

通讯作者:周旭(1981-),男,四川古蔺人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为遥感水文与流域管理。

that of human activities was increasing. Therefore, the water resources management should focus on the construction and regulation of benign human activities in the future.

Key words: runoff change; precipitation; human activity; slope change ratio of cumulative quantity (SCRCQ); upper reaches of Wujiang River

1 研究背景

全球气候变化和人类活动加速了全球水文循环并改变了降水和蒸发的时空模式^[1-3],径流是水文循环的重要组成部分,对自然生态环境和人类生存发展至关重要^[4]。气候变化和人类活动是影响径流变化的重要因素,对区域水文过程产生强烈影响,并影响区域水资源分配与利用^[5]。已有研究表明全球较多河流的径流量为显著减少趋势,这极大地威胁着全球水安全^[6]。因此,开展气候变化和人类活动对径流变化的影响研究,对区域水资源管控及分配等具有重要意义^[7]。

关于气候与人类活动共同影响径流变化的研究,在水文学研究中已成为热点课题^[8-9]。从流域视角出发,Buendia 等^[10]分析比利牛斯盆地中部 3 个子流域气候变化和森林覆盖对观测到的径流变化的相对贡献,表明降水量与径流量之间存在非线性关系,从而说明土地利用因子的主导影响。Zhao 等^[11]研究长江流域 1953–2010 年气候变化和人类活动对径流量和泥沙量随时间变化的影响,人类活动的贡献也从 71% 增加到了 92%,人类活动对沉积物负荷的影响远大于对长江流域排水的影响。Kong 等^[12]对黄河流域展开研究,发现黄河每个子流域的年净径流量均呈明显的下降趋势,对于整个黄河流域,基线的净径流量变化的 91.7% 归因于人类活动,这表明人类活动已成为黄河流域净径流变化的主要因素。从研究方法角度来看,最常用的方法包括统计分析方法^[13]、弹性系数法^[14]、Budyko 水热耦合^[15]、水文模型法^[16]。一般来说,统计方法方便有效,但不能反映实际的水文过程,并且倾向于将影响因子和径流之间的关系描述为简单的线性关系;弹性系数法计算气候对径流变化的影响,而不模拟适时径流,虽然这种方法需要较少的数据,但其准确性需要提高;Budyko 水热耦合平衡理论相较于其他方法,可分别估算出气候变化或人类活动对径流变化的贡献程度,但忽略了流域水利工程对径流的拦蓄,且下垫面参数的物理意义和数学表达尚不准确。水文模型具有良好的物理基础,但其结构和参数敏感性具有若干不确定性^[17],尤其是喀斯特流域地质结构的特殊性和复杂性,致使水文模型的实际

应用受到很大限制。累积量斜率变化率比较法 (slope change ratio of cumulative quantity, SCRCQ)^[18]的优点是利用自变量与因变量之间的相互关系,加上累积量能较好地减少实际资料年际变化影响,从而增大了年份和累积量之间的相关性^[19-20]。SCRCQ 方法与其他方法相比简单且有效,能够更加明晰地表述流域径流的变化机理。

乌江上游位于贵州省西部,是长江上游生态屏障保护区、乌江重要水源保护区和黔中水利枢纽工程水源区,对整个乌江流域和贵州省乃至长江流域的环境、农业和经济具有至关重要的意义。该区为喀斯特山区,其自然基地的异质性和生态环境的脆弱性使得流域径流量受地表、地下二元水文地质结构的影响,使其水文过程与非喀斯特地区有显著差异,再加上人类活动的影响,喀斯特流域水文过程更为复杂^[21]。当前针对该地区径流变化过程对气候和人类活动的响应机制尚不明确。因此,本文以乌江上游流域为研究对象,利用 Mann-Kendall 方法、累积距平法和 Morlet 小波分析,研究流域 1960–2013 年降水量和径流量的年际变化特征,并用经验性统计方法分析降水和人类活动对径流变化的贡献率,可为流域水土资源管理、生态环境建设和可持续发展决策等提供依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

乌江是贵州省内第一大河,也是长江上游南岸的最大支流。乌江北源发育于贵州省赫章县辅处乡,南源发育于贵州省威宁县盐仓镇,南北两源在化屋基汇合后流入乌江干流。鸭池河水文站以上的乌江上游流域面积为 18 138 km²,占全流域总面积的 20.63%^[22],是乌江乃至长江上游十分重要的水源涵养区、生态屏障区和集中连片贫困区,乌江上游流域概况及水文站和气象站分布见图 1。2018 年研究区总人口约 705.63 × 10⁴ 人,平均人口密度约 389.03 人/km²。区内地表破碎,岩溶峡谷广泛发育,喀斯特面积占 72.14%,非喀斯特面积占 27.86%,是典型的喀斯特江河源区。地势西高东低,海拔介于 840~2 888 m,平均海拔 1 675.79 m。地貌类型以山地和丘陵为主,山地面积占 83.06%,

丘陵面积占14.13%。气候为亚热带温湿季风气候,年平均气温 13.49℃,年均降水量 1 155.98 mm。降水较为丰富,但由于喀斯特独特的二元水文结构,地表崎岖破碎,土壤保水保肥能力差,水土流失严重,又因人口密度较大和长期落后的农业耕作方式等,导致乌江上游人水矛盾突出,所以乌江上游是开展喀斯特水文与水资源研究不可或缺的典型区域。

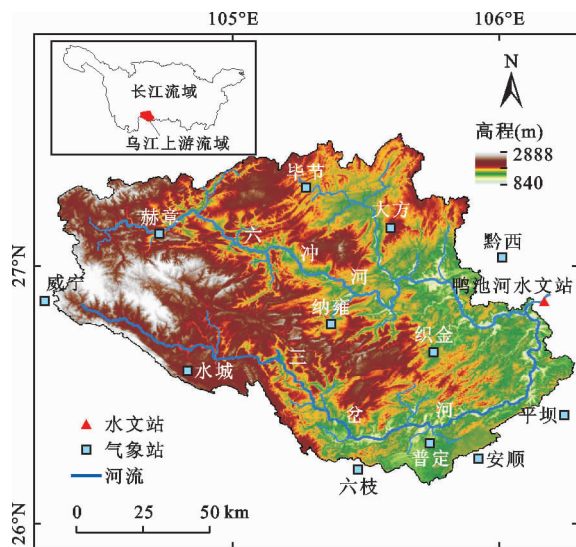


图1 乌江上游流域概况及水文站和气象站分布

2.2 数据来源

径流数据来自中国水文年鉴汇编资料,选择鸭池河水文站 1960–2013 年共 54 a 径流观测数据。气象数据在中国气象数据网上获取,采用均值法计算流域内及其周边的年均降水量,共有 12 个气象站覆盖整个流域(图1),能够反映流域的降水变化特征^[23]。

2.3 研究方法

2.3.1 Mann–Kendall 方法 Mann–Kendall 检验一般多用于气象数据的趋势检验分析^[24]。本文将该方法主要用于研究时段内乌江上游流域降水与径流系列趋势的突变检验。

2.3.2 累积距平法 累积距平法可以较为直观地反映年降水量与年径流量在不同时期的阶段变化,本文根据流域降水量与径流量各自的累积距平值变化趋势,综合判断变化过程中出现的突变年份^[25]。并结合 Mann–Kendall 检验法与累积距平法进行相互论证^[26],能够保证突变点选择的准确性。

2.3.3 小波分析法 小波分析法能够揭示不同时间和尺度上变量的变化状况,其多用于气象、水文要素的多时间变化分析^[27]。对研究区的年径流数据进行周期性检验,结合小波方差来确定一个时间序列中存在的主周期。

2.3.4 累积量斜率变化率比较法 (SCRCQ)

SCRCQ 分析法原理在相关文献有详细介绍^[18,20]。

假设:突变前后的累积径流量方程斜率分别为 S_{R1} 、 S_{R2} ;基准期和突变期的累积降水量方程斜率分别为 S_{P1} 、 S_{P2} ;突变前后的累积潜在蒸散发方程斜率分别为 S_{E1} 、 S_{E2} ,则累积径流量斜率变化率 $R_{SR}(\%)$ 为:

$$R_{SR} = \frac{(S_{R2} - S_{R1})}{S_{R1}} \times 100\% = \left(\frac{S_{R2}}{S_{R1}} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

累积降水量斜率变化率 $R_{SP}(\%)$ 为:

$$R_{SP} = \frac{(S_{P2} - S_{P1})}{S_{P1}} \times 100\% = \left(\frac{S_{P2}}{S_{P1}} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

累积潜在蒸散发斜率变化率 $R_{SE}(\%)$ 为:

$$R_{SE} = \frac{(S_{E2} - S_{E1})}{S_{E1}} \times 100\% = \left(\frac{S_{E2}}{S_{E1}} - 1 \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:若 R_{SR} 、 R_{SP} 、 R_{SE} 为正,则斜率变大,表示径流量、降水量、潜在蒸散量呈增大趋势;若为负,则斜率变小,表示径流量、降水量、潜在蒸散量呈减少趋势。

根据公式(1)~(3),基于基准期,变异期内降水量变化对径流量变化的贡献率 $C_P(\%)$ 为:

$$C_P = \frac{R_{SP}}{R_{SR}} \times 100\% \quad (4)$$

变异期内潜在蒸散发对径流量变化的贡献率 $C_E(\%)$ 为:

$$C_E = \frac{R_{SE}}{R_{SR}} \times 100\% \quad (5)$$

则人类活动对径流量变化的贡献率 $C_H(\%)$ 可表示为:

$$C_H = 1 - C_P - C_E \quad (6)$$

乌江上游流域平均海拔在贵州省处于最高值,年气温变化不显著,对蒸散发影响很小^[28],对于径流量变化的影响相对其他因素来讲比较有限。因此选取对径流量影响最大的降水量因子,则公式(6)可简化为:

$$C_H = 1 - C_P \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 降水量和径流量变化特征分析

乌江上游 1960–2013 年平均降水量与年径流量变化特征如图2所示。由图2可见,研究时段内年均降水量为 1 155.98 mm,在 750~1 500 mm 之间波动,降水量集中在 950~1 300 mm 之间,最大降水

量出现在1983年,为1469.36 mm,大于多年平均降水量,最小降水量出现在2011年,为796.66 mm。1960–2013年乌江上游年降水量总体呈减少趋势,其中,1960–1983年年降水量无显著变化,降水量大小属于自然波动;1984–2013年降水量变化震荡程度较大,呈波动减小和增大交替趋势,2008年出现该阶段降水量最大值,为1392.19 mm,之后2011年和2013年年降水量出现大幅度减小。以1983年为分界点,1983年径流量最大。1960–1983年呈波动增大趋势,1984–2013年呈现先波动减小后增大又减小的总趋势,径流量与降水量的变化特征相似,表明降水变化对径流量变化影响较大。

研究区径流总量与降水量变化值基本保持相对应关系,且变化程度具有较好的一致相关性,可得出

乌江上游的径流量与降雨量具有密切的响应关系。

3.2 降水量和径流量突变特征分析

1960–2013年乌江上游年降水量突变检验见图3;1960–2013年乌江上游鸭池河水文站年径流量突变检验见图4。

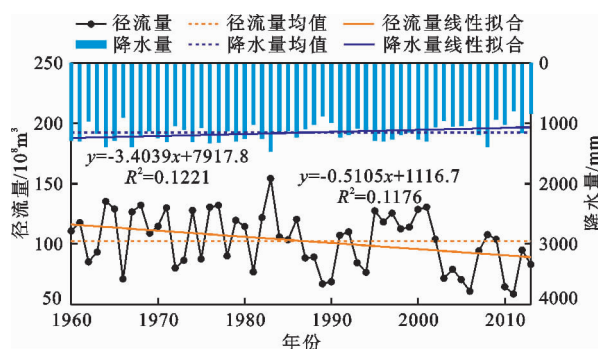


图2 1960–2013年乌江上游径流量及降水量年际变化特征

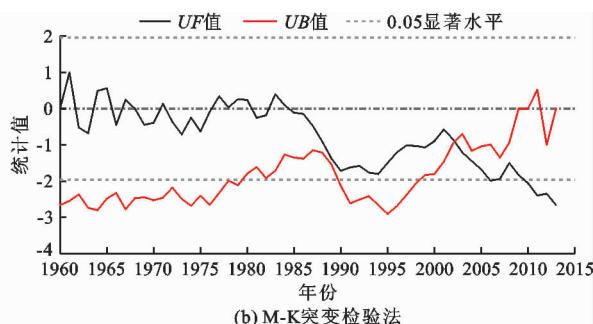
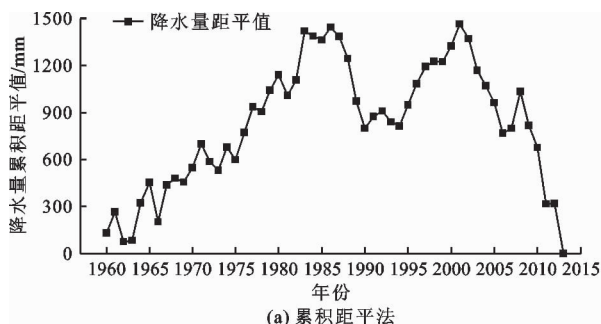


图3 1960–2013年乌江上游年降水量突变检验

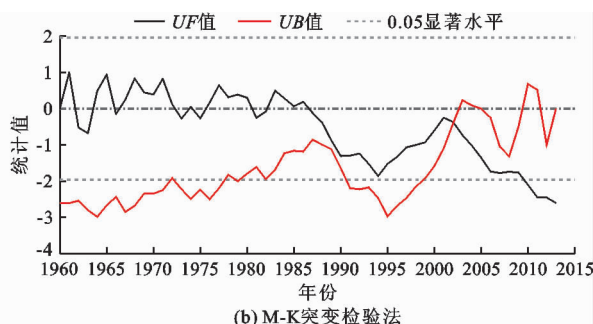
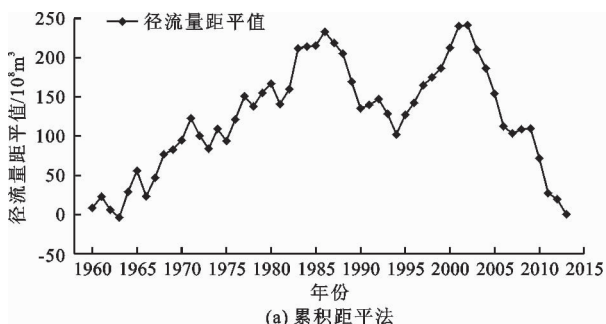


图4 1960–2013年乌江上游鸭池河水文站年径流量突变检验

由图3(a)累积距平法检验结果可看出,乌江上游年降水量累积距平值在1960–1986年呈波动增大趋势,1986年出现年降水量累积距平最大值,可认定该时段中1986年为1个突变点年份;1987–2001年年降水量累积距平值呈先减小后增大的趋势,2001年为该时段最大值和突变点年份;2001年后年降水量累积距平值呈减少趋势。由图3(b)M–K突变检验法检验结果可看出,1960–2001年年降水量呈现增加和减少波动交替变化的特征,2001年前后存在突变点,在2001年后呈减少趋势。结合累积距平法分析

结果来看,年降水量出现的突变年份应该是1986和2001年前后,2001与2002年时间相近,故选取2002年为突变年份,所以1960–2013年乌江上游年降水量突变年份为1986和2002年。

由图4(a)累积距平法检验结果可看出,乌江上游鸭池河水文站年径流量存在显著的阶段性特征。径流量在1971年出现一次增大趋势的突变,径流量累积距平值分别在1986、2002年达到最大值并迅速减少,径流量的可能突变年份为1986、2002年。由图4(b)M–K突变检验法检验结果可看出,乌江上

游径流量总体呈线性减少的趋势, UB 和 UF 变化曲线在 2002 年左右相交, 舍去 95% 置信区间点, 则鸭池河水文站径流量可能突变年份为 2002 年, 这与吴晓玲等^[29] 研究结果基本一致。通过上述两种检验方法的对比分析, 确定 1986 和 2002 年为乌江上游径流量突变年份。

3.3 降水量和径流量的周期性分析

1960–2013 年乌江上游降水序列小波系数和小波方差见图 5; 1960–2013 年乌江上游鸭池河水文站径流序列小波系数和小波方差见图 6。

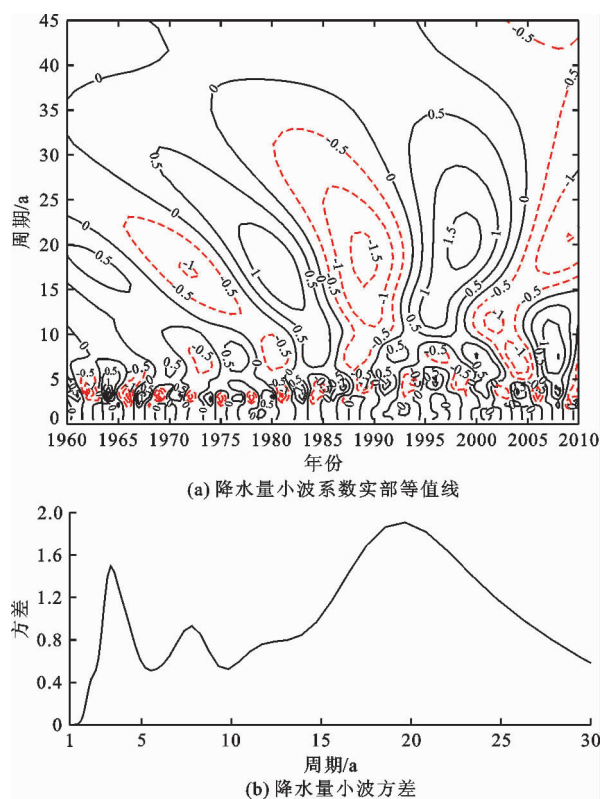


图5 1960–2013 年乌江上游降水序列小波系数和小波方差

由图 5(a) 可知, 1960–2013 年乌江上游流域降水的主周期为 19 a, 在此时间尺度上降水量模方震荡能量最强, 其丰、枯年经历了多—少—多—少—多—少 6 个交替变换, 其中正相位为丰水年, 分别为 1978–1986 年、1995–2004 年; 而负相位年份为 1970–1976 年、1987–1994 年、2005–2013 年, 此时期年份为枯水年。且根据时间序列周期变化趋势分析, 2013 年之后流域的降水量等值线为未封闭状态, 即流域降水量未来可能呈减少趋势。由图 5(b) 降水量小波方差分析可知, 研究区降水序列的第一、第二、第三周期分别为 3、8 和 19 a, 且在 19 a 时间尺度上为最大峰值, 为研究区降水量变化的主周期。

由图 6(a) 可知, 鸭池河水文站径流序列的周期

性变化特征存在 3、8、18 a 共 3 个控制周期, 其中 18 a 时间尺度下的震荡特征最为强烈, 径流量变化也是经历正、负相位交替和枯、丰年的转换, 周期变化上显示为多—少—多—少—多—少 6 个交替变换特征, 再根据小波实数分析可得出丰水期为 1960–1972 年、1981–1986 年、1993–2004 年; 枯水期为 1973–1980 年、1987–1992 年、2005–2013 年。根据流域的径流量小波系数实部等值线为虚线且未封闭状态, 可判定在 2013 年之后, 径流量变化与降水量变化周期一致, 且均为减少趋势。由图 6(b) 径流量小波方差分析可知, 流域径流量同样存在 3、8、18 a 的周期变化, 在 18 a 左右震荡最为明显, 小波方差极值最大, 因此, 径流量变化的主周期为 18 a。

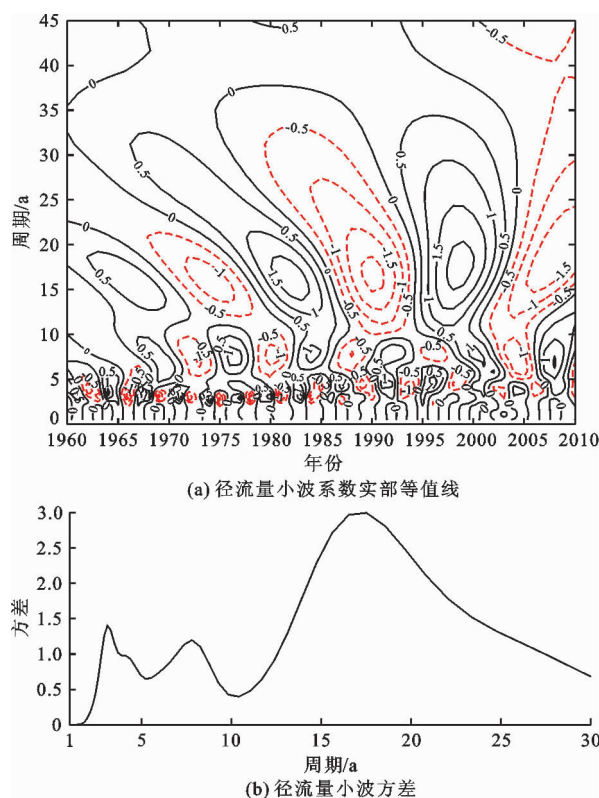


图6 1960–2013 年乌江上游鸭池河水文站径流序列小波系数和小波方差

径流的形成受到流域内的气候和下垫面的共同影响, 是流域内自然地理要素的综合产物^[9]。乌江上游流域径流对降水的主周期具有 1~2 a 的滞后期, 是由于研究区地处喀斯特地区, 径流受“二元水文”地质结构影响, 使其水文过程与非喀斯特地区有显著差异^[21], 加剧了水文过程的复杂性。另外研究区有多个水电站对径流进行拦截, 加上人类活动频繁导致地表覆被改变, 均对径流的分配造成了影响, 这些因素可能导致了径流对降水的滞后^[30]。

3.4 降水和人类活动对径流的贡献率分析

根据突变分析结果,将 1986 和 2002 年作为研究期内乌江上游降水量和径流量变化的突变年份,将累积降水量的变化过程划分为 3 个不同时段,即 1960 - 1986 年(基准期)、1987 - 2002 年(变化 I 期)、2003 - 2013 年(变化 II 期),且对累积降水量和累积径流量与年份的关系进行线性回归分析,结果见图 7。由图 7 可看出,3 个时段的累积降水量和累积径流量的线性回归方程 R^2 值均大于 0.99,表明年降水量与年径流量在各时段的相关性极好。

1960 - 2013 年不同时段乌江上游流域累积降水量斜率及其变化率如表 1 所示。由表 1 可知,B 与 A 时段相比,累计降水量斜率减小 29.3 mm/a,减

小率为 2.43%;C 与 A 时段相比,累计降水量斜率减小 151.0 mm/a,减小率为 12.51%;C 与 B 时段比较,累计降水量斜率减小 121.7 mm/a,减小率为 10.33%。总体上研究期内降水量处于减少趋势,C 时段的年降水量与 A 时段相比减少幅度最大。

1960 - 2013 年不同时段乌江上游累积径流量斜率及其变化率如表 2 所示。由表 2 可知,B 与 A 时段相比,累计径流量斜率减小 $5.29 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,减小率为 4.76%;C 与 A 时段相比,累计径流量斜率减小 $28.17 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,减小率为 25.37%;C 与 B 时段相比,累计径流量斜率减小 $22.88 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,减小率为 21.64%。可看出径流量变化趋势与降水量变化相似,C 时段的径流量与 A 时段相比减少幅度最大。

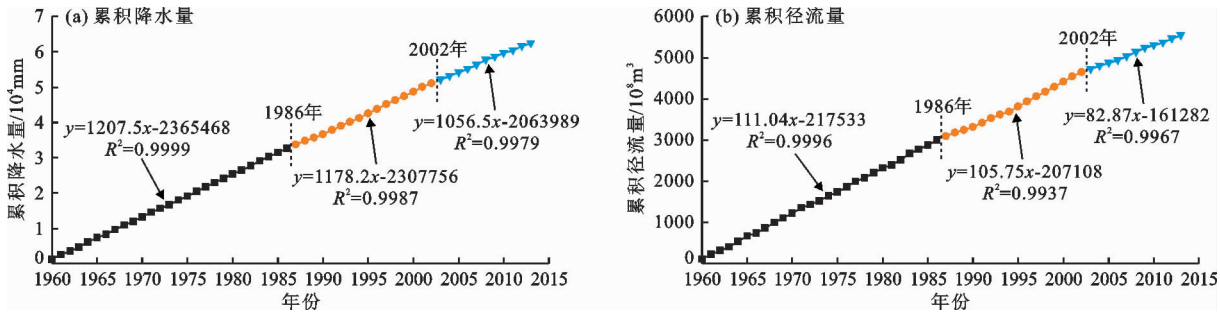


图 7 1960 - 2013 年不同时段乌江上游累积降水量和累积径流量与年份的线性关系

表 1 1960 - 2013 年不同时段乌江上游流域累积降水量斜率及其变化率

时段	累积降水量线性变化 斜率/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	B、C 时段与 A 时段斜率相比		C 时段与 B 时段斜率相比	
		变化量/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	变化率/%	变化量/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	变化率/%
A:1960 - 1986 年	1207.5				
B:1987 - 2002 年	1178.2	-29.3	-2.43		
C:2003 - 2013 年	1056.5	-151.0	-12.51	-121.7	-10.33

表 2 1960 - 2013 年不同时段乌江上游累积径流量斜率及其变化率

时段	累积径流量线性变化 斜率/ $10^8 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	B、C 时段与 A 时段斜率相比		C 时段与 B 时段斜率相比	
		变化量/ $10^8 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	变化率/%	变化量/ $10^8 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	变化率/%
A:1960 - 1986 年	111.04				
B:1987 - 2002 年	105.75	-5.29	-4.76		
C:2003 - 2013 年	82.87	-28.17	-25.37	-22.88	-21.64

1960 - 2013 年不同时段降水与人类活动对径流量变化的贡献率计算结果如表 3 所示。由表 3 可知,以 A 时段为基准期,B 时段降水和人类活动对径流量变化的贡献率分别为 50.93% 和 49.07%,C 时段降水和人类活动对径流量变化的贡献率分别为 49.30% 和 50.70%,说明人类活动对径流量变化的影响在逐渐增强;C 时段与 B 时段相比,降水量对径流量变化的贡献率减小至 47.75%,人类活动对径

表 3 1960 - 2013 年不同时段乌江上游降水和人类活动对径流量变化的贡献率

时段	B、C 时段与 A 时段相比		C 时段与 B 时段相比	
	降水贡献率 C_P / %	人类活动贡献率 C_H / %	降水贡献率 C_P / %	人类活动贡献率 C_H / %
A:1960 - 1986 年				
B:1987 - 2002 年	50.93	49.07		
C:2003 - 2013 年	49.30	50.70	47.75	52.25

流量变化的贡献率增大至 52.25%,说明该时段人类活动已成为影响径流量变化主要因素。

综上所述,1960–1986 年时段,降水是影响乌江上游径流量变化的主要因素,该时段经济欠发达,人类活动影响程度相对较小。1987–2002 年时段,乌江上游降水量和径流量整体均呈减少趋势,降水对径流量变化的贡献率为 50.93%,降水在一定程度上增加了径流量。2003–2013 年时段,流域的人类活动和降水对径流量的影响发生了变化,前者在逐渐增强,后者在逐步减弱,也验证了贵州省从 2000 年后实施的“退耕还林”政策和水土保持等相关工作发挥了保护作用。

4 讨论

径流量发生变化的影响因素主要有两个方面,首先是诸如降水和蒸发等气候因素变化对径流量产生的影响,其次是人类活动等直接改变了下垫面状态,从而使流域的产汇流机制发生变化^[31]。气候变化对径流量有重要影响,主要是由于降水和气温的变化导致径流量的变化,考虑到乌江上游平均海拔较高,年气温变化不显著,对径流量变化的影响甚微,故本次研究不考虑气温蒸发因素。降水在产流中起着至关重要的作用,产流是径流补给的主要来源。对图 2 中乌江上游 12 个气象站的年降水量数据进行分析可知,全流域各年代的降水量差异不大,研究区降水量和径流量呈正相关关系,基本符合降水多则径流大的规律。

水利工程措施也是人类活动影响径流变化的直接因素,乌江上游已建成多个水电站,其中三岔河上有普定水电站(建于 1995 年)、引子渡水电站(建于 2003 年),六冲河上有洪家渡水电站(建于 2004 年),流域出口处有东风水电站(建于 1994 年),这些水利工程具有储蓄径流和泥沙的作用,通过对上游来流进行调蓄,削减洪峰流量,减小了对下游的危害,在一定程度上也改善了年径流量分配的不均衡性^[31]。洪家渡水电站是整个乌江流域对水量具有调节作用的“龙头”电站,能够对整个上游流域的多年径流量进行分配利用,其在 2001 年开始建设并截流,在 2004 年建成运行;鸭池河水文站径流量的突变年份为 2002 年,恰好证明此突变年份是水电站建设对径流量造成的影响。受东风水电站建设影响,1994 年鸭池河水文站径流量也开始出现减少趋势,据统计,1960–1994 年该水文站多年平均径流量为 $105.30 \times 10^8 \text{ m}^3$,1995–2013 年多年平均径流量为

$97.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

本文采用经验性统计方法(SCRCQ)计算 1960–2013 年乌江上游气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率,由于忽略了蒸散发和地下水变化可能造成的影响,因而其计算结果存在一定误差。本研究以降水作为气候因素、以人类活动等综合行为代表所有非自然因素,来识别分析对径流变化的影响,因此仅探讨了降水和人类活动对径流量变化的综合而非具体的影响。未来应进一步定量分析其他气象因素对径流量变化的影响,采用适于喀斯特山区的水文模型来研究气候变化和人类活动对径流量变化的影响,并对未来降水量和径流量做出变化趋势预测分析。

5 结论

本文利用乌江上游 1960–2013 年径流和降水资料,通过 Mann–Kendall 方法、累积距平方法、Morlet 小波分析法讨论该流域径流量和降水量的演变趋势和变化周期,采用 SCRCQ 法计算乌江上游气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率,得出以下结论:

(1)1960–2013 年,乌江上游降水量和径流量整体呈波动减少趋势,在未来时期,该流域径流量和降水量变化趋势将表现为弱持续性特征。

(2)1960–2013 年,乌江上游降水量和径流量表现出相似的突变特征和阶段特征,而降水量的突变时间比径流量的整体变化时间提前 1~2 a。

(3)径流量的周期性变化特征与降水量相似,径流量与降水量的共振周期为 18~19 a 和 19~20 a。

(4)研究时段内 1960–1986 年为基准期,该时期人类活动影响较弱,降水量是影响径流量变化的主要因素;1987–2002 年降水量与径流量整体均呈减少趋势,降水对径流量变化的贡献率为 50.93%。2003–2013 年人类活动对径流量的影响增强,降水对径流量的影响逐渐减弱。

参考文献:

- [1] AMIN M Z M, SHAABAN A J, ERCAN A, et al. Future climate change impact assessment of watershed scale hydrologic processes in Peninsular Malaysia by a regional climate model coupled with a physically-based hydrology model [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 12–22.
- [2] XU Chongyu, CHEN Hua, GUO Shenglian. Hydrological modeling in a changing environment: Issues and challenges [J]. Journal of Water Resources Research, 2013, 2(2): 85–95.

- [3] LIU Meixian, XU Xianli, SUN A Y, et al. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes? [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9 (6): 064002.
- [4] LI Erhui, MU Xingmin, ZHAO Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919 – 2010 [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 155 – 163.
- [5] ZHENG Hongxing, ZHANG Lu, ZHU Ruirui, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 641 – 648.
- [6] WANG Suiji, YAN Min, YAN Yunxia, 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: 66 – 77.
- [7] ZHANG Hongbo, HUANG Qiang, ZHANG Qiang, et al. Changes in the long-term hydrological regimes and the impacts of human activities in the main Wei River, China [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(6): 1054 – 1068.
- [8] YUAN Yujie, ZHANG Chang, ZENG Guangming, et al. Quantitative assessment of the contribution of climate variability and human activity to streamflow alteration in Dongting Lake, China [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(12): 1929 – 1939.
- [9] LI Jianzhou, ZHOU Shuhua. Quantifying the contribution of climate-and human-induced runoff decrease in the Luanhe River Basin, China [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2016, 7(2): 430 – 442.
- [10] BUENDIA C, BATALLA R J, SABATER S, et al. Runoff trends driven by climate and afforestation in a Pyrenean basin [J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(3): 823 – 838.
- [11] ZHAO Yifei, ZOU Xinqing, GAO Jianhua, et al. Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: A case study of the Yangtze River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 803 – 812.
- [12] KONG Dongxian, MIAO Chiyuan, WU Jingwen, et al. Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River Basin from 1951 to 2012 [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 566 – 573.
- [13] 王庆, 马倩倩, 夏艳玲, 等. 最近 50 年来山东地区夏季降水的时空变化及其影响因素研究 [J]. *地理科学*, 2014, 34(2): 220 – 228.
- [14] ZHAN C S, JIANG S S, SUN F B, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Wei River Basin, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 118(2): 2149 – 2175.
- [15] 张丽梅, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别 [J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7607 – 7617.
- [16] 曾思栋, 夏军, 杜鸿, 等. 生态水文双向耦合模型的研究与应用: I 模型原理与方法 [J]. *水利学报*, 2020, 51(1): 33 – 43.
- [17] LEAVESLEY G H. Modeling the effects of climate change on water resources—A review [J]. *Climatic Change*, 1994, 28(1): 159 – 177.
- [18] 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.
- [19] 王赛男, 李建鸿, 蒲俊兵, 等. 气候和人类活动对典型岩溶地下河系统径流年际变化的影响 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 759 – 770.
- [20] 班璇, 朱碧莹, 舒鹏, 等. 汉江流域气象水文变化趋势及驱动力分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(12): 2817 – 2829.
- [21] 田义超, 王世杰, 白晓永, 等. 桐梓河流域径流对气候和人类活动的响应 [J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 76 – 82.
- [22] 黄健民. 乌江流域研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 田仁伟, 赵翠薇, 贺中华, 等. 降水和人类活动对三岔河上游径流量变化的贡献 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6): 123 – 129.
- [26] 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.
- [27] 桑燕芳, 王栋, 吴吉春, 等. 水文时间序列小波互相关分析方法 [J]. *水利学报*, 2010, 41(11): 1272 – 1279.
- [28] 黄小燕, 韦杰. 长江上游流域降雨侵蚀力变化对河流输沙量的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(9): 1606 – 1612.
- [29] 吴晓玲, 张欣, 向小华, 等. 乌江流域上游水沙特性变化及其水电站建设的影响 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(3): 642 – 650.
- [30] 罗玉, 秦宁生, 周斌, 等. 长江源区沱沱河流域 1961 – 2011 年径流特征及其对降水的滞后效应 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 22 – 28.
- [31] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰. 1960 – 2010 年洮河流域径流变化趋势及影响因素 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(1): 38 – 43.