

桐梓河流域径流对气候和人类活动的响应

田义超^{1,2,3,4}, 王世杰², 白晓永², 张强¹, 陶进¹,
张亚丽¹, 梁铭忠⁴, 周国清⁵, 劳燕玲¹

(1. 中国科学院 地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 北部湾大学 资源与环境学院, 广西 钦州 535000;

3. 钦州市海洋地理信息资源开发利用重点实验室, 广西 钦州 535000;

4. 北部湾大学 广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室, 广西 钦州 535000;

5. 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:径流量变化受到气候变化和人类活动两大因素共同驱动,定量剖析气候变化和人类活动对其影响成为变化环境下水文循环研究的核心科学问题。以桐梓河流域为研究对象,基于二郎坝水文站 1975—2015 年长时间序列的水文和气象监测数据,通过累积距平和滑动 T 检验分析方法诊断了流域径流量的突变特征,并应用累积量斜率变化率比较法定量评估了流域气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率。结果表明:(1)流域多年径流量和降水量均呈现出减少趋势,减少的速率分别为 0.05 亿 m³/a 和 -3.10 mm/a。(2)流域多年径流量的突变年份为 2003 年,其中 1975—2003 年为丰水年(多年平均径流量为 15.26 亿 m³),而 2003—2015 年为枯水年(多年平均径流量为 12.44 亿 m³),突变年份后径流量较突变年份前减少了 18.48%。(3)径流量与降水量通过 95% 的红噪声验证的共振周期为 0.8~2.8 年以及 3.8~6.5 年,流域径流对降水的变化具有一定的滞后作用,滞后作用的时间尺度为 1~2 年。(5)以 1975—2003 年为基准期,降水量和人类活动对桐梓河流域径流量的贡献在 TB(2004 年,2015 年)时期分别达到 43.42% 和 56.58%;如果考虑蒸发量对桐梓河流域径流量的影响,则人类活动对桐梓河流域径流量变化的贡献率在 TB 时期会增加到 86.83%。该项研究可为定量化评估喀斯特典型流域气候变化和人类活动对径流量的贡献率提供方法上的借鉴。

关键词:径流; 气候变化; 人类活动; 响应与贡献率; 桐梓河流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0076-07

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2020.03.012

Response of Runoff to Climate and Human Activities in Tongzi River Basin

TIAN Yichao^{1,2,3,4}, WANG Shijie², BAI Xiaoyong², ZHANG Qiang¹, TAO Jin¹,
ZHANG Yali¹, LIANG Mingzhong⁴, ZHOU Guoqing⁵, LAO Yanling¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. College of Resources and Environment, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi 535000, China; 3. Qinzhou Key Laboratory of Marine Geographic Information Resources Development and Utilization in the Beibu Gulf, Qinzhou, Guangxi 535000, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Marine Biodiversity Conservation in Beibu Gulf, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi 535000, China; 5. Guangxi Key Laboratory for Geospatial Informatics and Geomatics Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Runoff change is driven by climate change and human activities. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on runoff change has become a core scientific issue in the study of hydrological cycle under changing environment. Based on the long time series hydrological and meteorological monitoring data of Erlangba Hydrological Station from 1975 to 2015, the catastrophic characteristics of runoff in Tongzi River Basin were diagnosed by the method of cumulative anomaly and sliding T test, and the contribution rate of climate change and human activities to runoff change was quantitatively evaluated by the

收稿日期:2019-02-26

修回日期:2019-06-30

资助项目:国家重点研发计划(2016YFC0502300);广西自然科学基金联合资助培育项目(2018JJA150135);广西教育厅基金项目(ZD2014138);广西创新驱动发展专项(AA18118038);广西本科高校特色专业及试验实训教学基地建设项目(桂教高教[2018]52号)

第一作者:田义超(1986—),男,陕西西安人,副教授,博士,研究方向为资源环境遥感与 GIS 及海岸带生态环境监测。E-mail:tianyichao1314@yeah.net

通信作者:白晓永(1978—),男,河北石家庄人,研究员,博士,主要从事岩溶生态环境研究。E-mail:baixiaoyong@126.com

method of cumulative slope change rate comparison. The results indicated that: (1) the annual runoff and precipitation in the region showed a decreasing trend, and the decreasing rates were 0.05 billion m^3 /year and -3.10 mm/year, respectively; (2) the abrupt change year of multi-year runoff was the year of 2003, years of abundant water covered the period from 1975 to 2003 (the average annual runoff was 1.526 billion m^3), and the years of scarce water covered the period from 2003 to 2015 (the average annual runoff was 1.244 billion m^3), the runoff decreased by 18.48% after mutation year compared with that before mutation year; (3) there was no significant decrease in the annual runoff in the basin over the years; the cycle period of runoff in autumn was 24-year, that of spring was 7-year, and that of winter and summer did not exist; (4) the resonance periods of runoff and precipitation verified by 95% red noise were 0.8~2.8-year and 3.8~6.5-year; runoff in the river basin had a certain lag effect on precipitation change, and the lag time scale was between 1~2 years; (5) based on the period from 1975 to 2003, the contribution of precipitation and human activities to the runoff of Tongzi River Basin reached up to 43.42% and 56.58%, respectively, in the period of TB from 2004 to 2015; if the influence of evaporation on the runoff of tongzi river basin is taken into account, the contribution of human activities to the change of runoff of Tongzi Rver Basin will increase to 86.83% in the period of TB. This study can provide a method reference for the quantitative assessment of the contribution rate of climate change and human activities to runoff in the typical Karst basin.

Keywords: runoff; climate change; human activities; response and contribution rates; Tongzi River Basin

气候变化和人类活动对全球以及区域的水资源以及水文循环产生的影响是水文科学中研究的热点问题,国内外学者针对水文与水资源开展了大量的研究工作并取得了丰硕的成果。如联合国教育、科学及文化组织于1964年批准的第十三次大会国际水文计划,该计划于1965年1月1日开始实施,其研究的重点在于研究人类活动、水资源与自然环境之间的相互关系^[1]。1980年由世界气象组织(WMO)、国际科学理事会(ICSU)以及联合国教育、科学及文化组织共同建立的世界气候研究计划(WCRP),该计划主要研究气候变化和人类活动在多大程度上影响全球气候变化,并且在多大程度上可以预测气候变化对人类所带来的影响^[2-4]。1996年开展的全球水系统项目,重点研究水循环、环境和资源问题,其中,“变化环境下的水文循环研究”是全球水系统(GWSP)的核心科学问题^[5-6],而定量评估水文过程对气候变化和人类活动的响应成为全球水系统研究的热点和前沿内容。

流域水文循环要素一般受到气候变化和人类活动的共同影响。在较长时间尺度上,气候变化是影响流域水文过程的主要因素之一,而在较短时段内,土地利用格局演变、城市化进程、产业格局变化与土地规划等人类活动是导致流域水文过程变化的主要原因^[7-8]。气候变化主要是由降水、气温、蒸散以及地表湿度等因素的改变从而对陆地生态系统水文循环过程产生影响。人类活动通过改变地表蒸发、截留、填洼及下渗等水文过程从而对流域水文水资源过程产生影响^[9-10]。径流量变化受到年际降水量的影响,降水较少的年份与降水较多的年份相比,人类活动对地表径流变化的贡献率明显提高^[11],而人类活动如修

建水利设施对地表径流的年内分配也起到一定的调节作用。在喀斯特地区,流域径流量受到地表地下二元水地质结构的影响,径流表现出显著的时空不均一性,其变化趋势以及变化过程与非喀斯特流域存在着巨大的差异。因此,查明喀斯特流域径流量变化趋势和突变特征,量化气候变化和人类活动对地表径流变化的影响对喀斯特流域合理规划水资源工程、石漠化治理以及流域水资源保护具有重要的意义。

桐梓河流域是赤水河流域最大的支流,属于典型的喀斯特流域。近年来周边人类活动对流域进行陡坡开荒、乱砍乱伐导致水土流失,区域的景观格局发生了显著的变化,直接影响着流域的水文循环过程,但是目前针对该流域径流量变化过程对气候变化的响应机制与机理目前尚不清晰,同时该流域气候变化和人类活动对径流量的贡献率目前也未见报道。大部分的研究成果集中在黄河流域^[12]、渭河流域^[13]、黑河流域^[14]以及其他典型非喀斯特流域^[15-16]。而对于地表径流偏枯形势更为严峻的中国南方典型喀斯特流域研究较少,对喀斯特流域水资源问题仅有的研究也只侧重于水资源利用技术研发^[17]、径流模拟^[18]及水土流失等方面^[19],而很少研究气候因素和人类活动对径流量变化的影响。喀斯特流域径流量的变化过程是水—岩石—土壤—气候—生物等自然因素、气候因素和人类活动共同作用的结果,具有高度的非线性和随机性特征,但是对于喀斯特流域水文过程的对气候和人类活动的响应鲜有文献报道。基于此,本文以典型喀斯特流域桐梓河流域为研究对象,基于二郎坝水文监测断面的长时间序列水文气象监测资料,通过累积距平和滑动T检验方法诊断流域径流量的突变特征,并应用累积量斜率变化率比较法定量评估流域气候

变化和人类活动对径流量变化的贡献率。本研究对于认识变化环境背景下喀斯特流域水文水资源演变过程具有重要意义,也可作为流域新时期水土保持工作,生态环境建设、水资源可持续利用以及流域生态系统可持续性管理等工作的开展提供科技支撑。

1 研究区概况和数据来源

桐梓河流域(图 1)是赤水河最大的支流,属长江水系支流。流域海拔高程介于 484~1 843 m,面积 3 348 km²,发源于桐梓楠牛石大火土。流域气候类型属中亚热带季风性湿润气候,气候垂直变化明显,温和且湿润,雨量较丰沛,降水分布不均。冷暖气流常被海拔高的山脉阻挡,局部地区形成强对流天气。多年平均气温 17.7℃,极端最高气温 39.9℃,极端最低气温 -2.7℃,平均全年积温 5 392℃。桐梓河属于典型的雨源型山区河流,径流的时空分布变化与降水基本一致,年际变化较大,年内分配不均匀。流域内人类活动主要包括水土资源的开发利用、植被恢复、水利工程建设等方面,人类活动的变化规律可归结为土地利用的变化,并被认为是人类活动的主要表现形式。

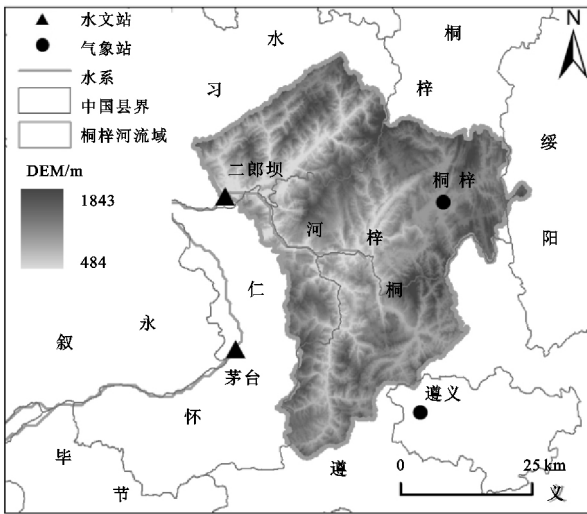


图 1 桐梓河流域地理位置

本文选用 1975—2015 年桐梓河流域二郎坝水文站月实测径流量为水文数据源,径流数据的原始数据单位为 m³/s,本文将其乘以每年的总时间数值可以得到不同年份的径流量,其单位为 m³,数据来源于贵州省水利厅下属的事业单位水文水资源局。由于桐梓河流域气象站点十分稀少,本研究选用的气象数据来源于桐梓国家基本气象站资料,气象数据包括流域的月降水量和月蒸散量数据,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),为了确保分析结果的一致性和连续性,气象数据中的降水和蒸发量数据的时间跨度与径流量保持同步,为 1975—2015 年。

2 研究方法

2.1 累积距平法和滑动 T 检验法

本研究首先采用累积距平法识别桐梓河流域径流量的突变年份,该方法中距平表示变量偏离平均值的量,将距平作为时间序列,计算出累积距平值,通过累积距平值曲线的拐点识别突变年份^[20]。在上述计算时间序列突变点的方法中,为了更进一步确定时间序列的突变点。本研究采用了另外一种方法对桐梓河流域的径流长时间序列数据的突变点进行了甄别,即滑动 T 检验方法^[21]。

2.2 小波分析与交叉小波凝聚谱分析^[22]

研究两个水文要素之间的关系,侧重点往往不是它们在某一尺度上同位相之间的关系如何,而是要综合的了解整个尺度上两者之间的总体关系,以及它们之间的位相变化情况。交叉小波变换可以反映出水文要素与气象要素长时间序列之间共同的高能量区以及位相关系,通过小波凝聚谱可以量度时频范围内两者之间局部相关的密切程度。本研究运用交叉小波变化(XWT)和小波相干谱(WTC)探讨降水与径流之间的多时间尺度相关关系。

2.3 径流量对气候变化和人类活动响应及其贡献率识别方法

本文采用累积量斜率变化率分析方法^[23]计算桐梓河流域气候变化和人类活动对径流的贡献率。该方法以径流量年份数据为自变量,各因子如降水量和蒸发量的累积量为因变量进行斜率变化率分析。假设流域的降水量为 P ,累积降水量与年份之间的一次线性回归方程在突变前后的斜率分别为 S_{pa} 和 S_{pb} ,其单位为 mm/a;流域的蒸发量为 E ,累积蒸发量与年份之间的一次线性回归方程在突变点前后的斜率分别为 S_{ea} 和 S_{eb} ,其单位为 mm/a;流域的径流量为 R ,累积输沙量与年份之间的一元线性回归方程在突变前后的斜率分别为 S_{ra} 和 S_{rb} ,其单位为 m³/a。则降水量对径流量变化的贡献率为 C_p ,单位为%,计算方法如下:

$$C_p = 100 \times (|S_{pa}/S_{pb}| - 1) / (|S_{ra}/S_{rb}| - 1) \quad (1)$$

蒸散发量对径流量的变化的贡献率 C_e ,单位为百分比,公式可表述为:

$$C_e = 100 \times (|S_{ea}/S_{eb}| - 1) / (|S_{ra}/S_{rb}| - 1) \quad (2)$$

则人类活动对流域径流的贡献率为:

$$C_h = 100 - C_p - C_e \quad (3)$$

3 结果与分析

3.1 桐梓河流域年降水量和径流量变化特征

由桐梓河流域 1975—2015 年降水量的变化曲线(图 2)可知,二郎坝水文站自 20 世纪 70 年代以来多

年平均降水量呈现出减少趋势,减少的速率为 -3.10 mm/a ,20 世纪 90 年代桐梓河流域的多年平均降水量多高于平均值,90 年代之后降水量变幅较小,1990 年以前多年平均降水量波动幅度较大,1999 年之后多年平均降水量波动幅度较小。1990 年的流域降水量达到了多年降水量的最大值,而 1993 年降水量为多年的最小值。根据桐梓流域多年径流量变化曲线

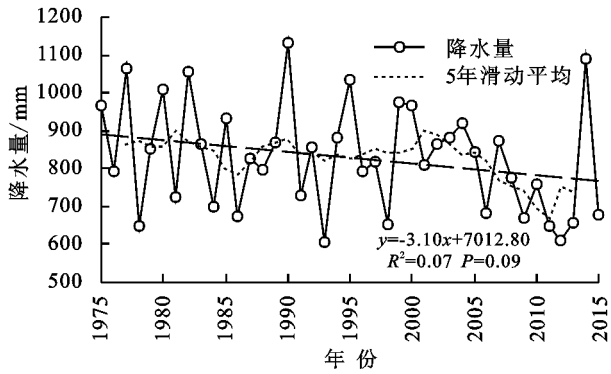


图 2 桐梓河流域降水量和径流量年际变化趋势及其阶段性特征

3.2 桐梓河流域径流量突变特征

由于在分析流域气候变化和人类活动对径流量的影响时,突变年份的选择至关重要,因此本研究分别采用累积距平法和滑动 T 检验法分别诊断流域径流量的突变年份。根据桐梓河流域多年径流量的累积距平曲线(图 3)可知,流域多年径流量的变化具有明显的阶段性特征。径流量累积距平值在 2003 年达到最大值,表明流域的累积距平值在 2003 年发生突变,由此可知桐梓河流域的降



水—径流关系在 2003 年可能发生了改变,因此本研究将流域的径流量分为两个阶段,分别为 1975—2003 年丰水年阶段(多年平均径流量为 15.26 亿 m^3)和 2003—2015 年的枯水阶段(多年平均径流量为 12.44 亿 m^3),突变年份后径流量较突变年份前减少了 18.48%。本研究为了更好的验证径流量的突变年份,采用滑动 T 检验方法对桐梓河流域的径流量进行了滑动 T 检验,从滑动 T 检验所甄别出的突变点可知,滑动 T 检验的突变年份也为 2003 年。

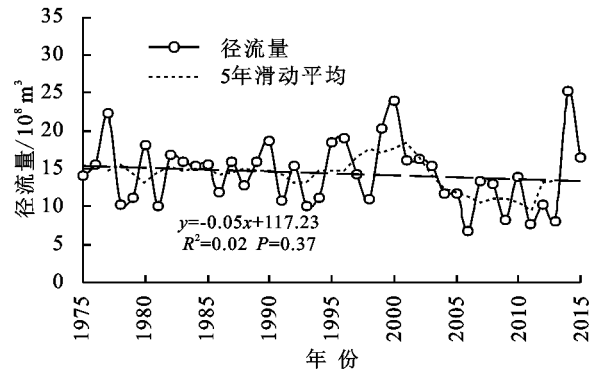


图 3 年平均径流径流量突变特征

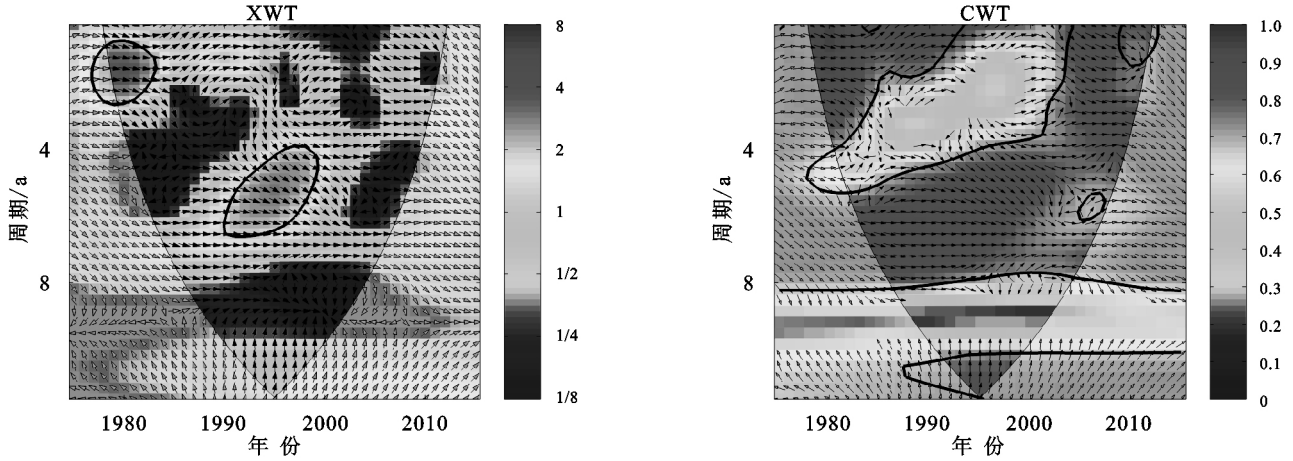
3.3 径流量和降水量交叉小波功率谱与凝聚谱分析

该研究借助 Matlab 软件,基于交叉小波变换(XWT)以及小波相干(CWT)方法对桐梓河流域的径流与降水之间的关系进行了定量分析。交叉小波变换可以表征两个时间序列数据之间在共同的高能量区之间的耦合关系以及位相关系,但是对于低能量区的甄别上存在着缺陷,而小波相干方法能很好的弥补这个缺陷。图 4 中黑色粗实线所包围的范围代表通过了显著性水平为 0.05 的红噪声标准谱检验。气候因子与径流之间的相位关系用箭头表示,从左到右

表示降水与径流之间同相位,代表两者之间存在着正相关关系;从右到左表示降水和径流之间反相位,代表两者之间存在负相关关系,垂直向下的箭头代表气象因子比径流的变化过程超前 90° ;而垂直向上的箭头代表气象因子比径流的变化过程之后 90° 。从桐梓河流域二郎坝水文站降水和径流的关系 XWT 中可以看出,降水和径流之间的交叉小波功率谱主要集中在 $0.8 \sim 2.8 \text{ a}$ 以及 $3.8 \sim 6.5 \text{ a}$ 的时间尺度,即降水与径流之间的交互作用这两个时间尺度上达到了显

著性水平为 0.05 的检验,其中最强的相关性出现在 3.8~6.5 年,主要集中在 1990—1998 年,而 0.8~2.8 年尺度上降水和径流的相关性比较弱。从降水和径流的 WTC 小波凝聚谱上可以看出,降水和径流之间

的关系在 1978—2005 年变化比较复杂,主要以正相位为主,但是降水量 P 和径流量 R 之间的相位大体在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 进行波动,表明降水对径流的变化具有超前作用,超前作用的时间尺度大体在 1~2 a。



注:黑色细实线为小波边界效应影响锥,粗黑实线表示通过置信水平为 95% 的红噪声检验。

图 4 桐梓河流域降水与径流交叉小波变换(XWT)以及小波相干(CWT)

3.4 气候变化和人类活动对桐梓河流域二郎坝径流的作用辨析

以桐梓河流域径流的突变点 2003 年为界限将桐梓河流域产流量过程、降水量过程以及蒸散量变化过程分别划分为两个时期:1975—2003 年(TA)和 2004—2015 年(TB),突变年份前 TA 时期桐梓河流域径流量基本受制于气候因素的控制,该时期为基准期,而 TB 时期的径流量变化则属于变化期,该时期径流量变化受到气候变化和人类活动的共同制约。由表 1 可知,变化期 TB 与基准期 TA 时段相比,流

域年份—累积径流量关系式斜率减少了 3.34,减少率为 22.33%;流域年份—累积降水量关系式斜率减少了 115.84,减少率为 13.55%;而流域年份—累积降水量关系式斜率减少了 67.54,减少率为 9.69%。如果不考虑蒸发量,降水量和人类活动对桐梓河流域径流量的贡献在 TB 时期分别达到 43.42% 和 56.58%;如果考虑蒸发量对桐梓河流域径流量的影响,则人类活动对桐梓河流域径流量变化的贡献率在 TB 时期会增加到 86.83%。由此可知桐梓河流域径流量减少的主要原因与人类活动有关。

表 1 气候变化和人类活动对桐梓河流域径流量变化的贡献率

时期	时间	变化斜率			$C_p/\%$	$C_e/\%$	$C_e+C_h/\%$	$C_h/\%$
		径流量	降水量	蒸发量				
基准期 TA	1975—2003	14.96	854.66	696.75				
变化期 TB	2004—2015	11.62	738.82	629.21				
TB—TA 变化量		-3.34	-115.84	-67.54	43.42	-43.41	56.58	86.83
TB—TA 相对量/%		-22.33	-13.55	-9.69				

4 讨论

喀斯特地区占地球陆地面积的 7%~12%,为世界近 25% 的人口提供饮用水源^[24]。由于特殊的地质条件,喀斯特地区表层土壤浅薄,入渗能力强,地形复杂,其水文过程与非喀斯特地区有很大差异,因此,喀斯特和非喀斯特地区的气候和人类活动对水文过程中的径流量影响也可能不同。黄河流域作为中国第二大河流,该流域属于典型的非喀斯特流域,径流量自 20 世纪 70 年代以来出现大幅度的衰减,有观点认为该流域的径流量在 90 年代早期或者中期发生突

变,其中降水量的减少是该流域径流量减少的主要原因^[25]。但是根据王随继等在黄河流域的研究结果显示,在忽略蒸散量的影响后,变异期降雨量和人类活动对皇甫川流域径流量减小的贡献率分别为 36.43% 和 63.57%,在措施期分别为 16.81% 和 83.19%^[4]。在对黄河流域中游区间的相关研究中,王随继认为如果不考虑蒸散量的影响,降雨量、蒸发和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率在变异期分别为 25.94%, -17.68% 和 74.06%,在措施期分别为 25.13%, -18.54% 和 74.87%;如果考虑蒸散量的影响,则人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率在变异

期和措施期分别增大到 91.74%和 93.41%^[23]。导致这种原因一方面与拦蓄滞留改变流域的蒸散量从而使流域的径流量发生改变有关,另一方面则与该时期大规模的生态修复工程有关。

针对于中国南方流域而言,该区域既有喀斯特地区又有非喀斯特地区,不同区域径流量对气候变化和人类活动的响应和贡献率存在着显著的不均一性。有研究表明中国南方的珠江流域以气候变化影响为主,气候变化的影响值为 92.0%,而长江流域和东南诸河则以人类活动影响为主,人类活动影响量分别为 60.9%和 84.8%^[26]。这与本研究的研究结果保持一致,本文中的桐梓河流域属于赤水河流域(长江流域支流)最大的支流,同时也属于典型的喀斯特流域,本研究认为如果考虑蒸发量对桐梓河流域径流量的影响,则人类活动对桐梓河流域径流量变化的贡献率在 TB 时期会增加到 86.83%。这与该流域位于亚热带喀斯特地区,表层土壤稀薄,且表层岩溶带发育,渗透率极高的特性有关^[27],这种特征与非喀斯特地区显著不同,在喀斯特地区只有当土壤和碳酸盐岩裂缝和裂缝完全被水饱和时,才会发生地表径流。大多数降雨通过碳酸盐岩裂缝和裂缝输送到地下水系统,而少量则以地表径流形式输送。由于岩溶碳酸盐岩裂缝和裂缝具有较大的储存能力和较高的入渗率,土—表层岩溶系统在径流产生中起着重要作用,这与本研究中降水在 1975—2015 年下降不显著也可能有一定的关系,因此,这种特殊的土壤—表层岩溶构造是造成喀斯特和非喀斯特地区气候和人类活动对流域径流量影响的主要原因。

20 世纪 80 年代中国逐渐实施了西南喀斯特地区石漠化工程,包括“长防”和“长治”工程、“珠治”试点工程在内的一系列生态工程^[28]。由于此类生态工程项目的大量实施,加强了地表坡面水土保持措施,实现了生态恢复,地表植被覆盖呈现出显著增加的趋势,根据 MODIS13Q1 植被 NDVI 的监测结果(图 5 和图 6)可知,流域植被 NDVI 呈现出增加趋势,增加的速率为 0.107/10 a,且在空间上增加的区域所占的面积达到 78.20%。石漠化工程的实施减缓了区域的水土流失速率,使得流域径流量呈现出减少趋势,另外该流域近年来通过坡改梯、堤坝建设、植林种草、引水灌溉等各种形式拦蓄滞留了地表大量径流量,而且随着人口不断增加和经济的快速发展,城市生活、工矿企业等对用水量的需求量也日益渐增,径流耗水量大大增加。另外,由于桐梓河流域的天门河水库、九盆水水库、火石水库以及高坎水库等中小型水库的修建致使流域径流量呈现出减少趋势。即人类活动对

喀斯特流域径流量变化的影响主要是通过通过在喀斯特坡面的拦—蓄—引—用等形式拦截减小了坡面产流量,导致径流集流面积大大减小,河道汇流效率降低。相对于非喀斯特流域,喀斯特流域人类活动对径流量变化的影响作用相对较弱,因而贡献率稍有偏低,但却与非喀斯特流域呈现共同的增强趋势。

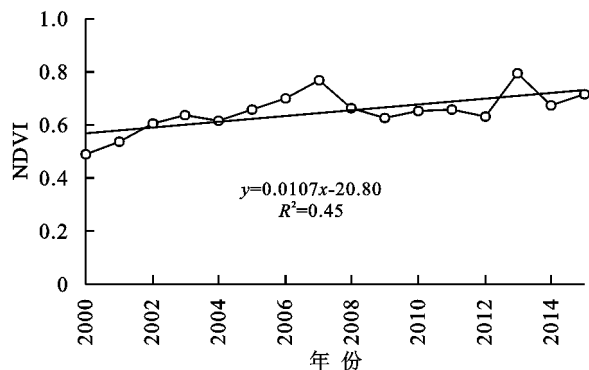


图 5 桐梓河流域 NDVI 年际变化趋势及其阶段性特征

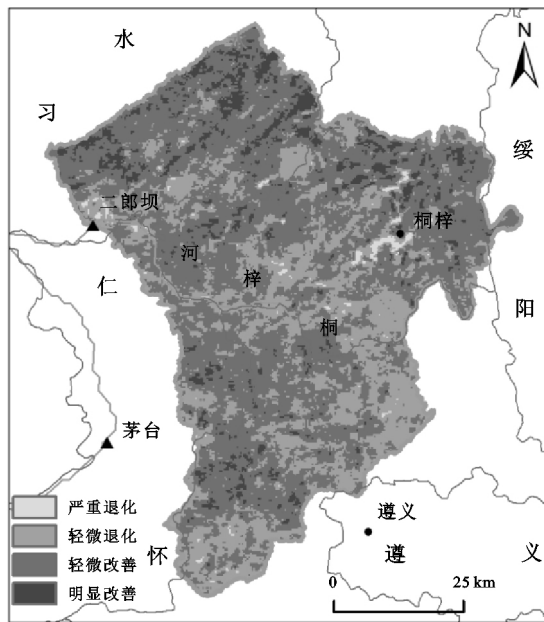


图 6 桐梓河流域 NDVI 空间变化趋势

5 结论

- (1) 1975—2015 年流域径流量和降水量均呈先出减少趋势,减少的速率分为 0.05 亿 m³/a 和 -3.10 mm/a。
- (2) 由径流量累积距平和滑动 T 检验方法可知,两种方法所诊断出的径流量突变年份均为 2003 年,其中 1975—2003 年为丰水年阶段(多年平均径流量为 15.26 亿 m³)和 2003—2015 年为枯水年阶段(多年平均径流量为 12.44 亿 m³),突变年份后径流量较突变年份前减少了 18.48%。
- (3) 降水和径流之间的交叉小波功率谱主要集中在 0.8~2.8 年以及 3.8~6.5 年的时间尺度,其中最强的相关性出现在 3.8~6.5 年,主要集中在

1990—1998 年,而 0.8~2.8 年尺度上降水和径流的相关性比较弱。降水对径流的变化具有超前作用,超前作用的时间尺度大体在 1~2 a。

(4) 以 1975—2003 年为基准期,降水量和人类活动对桐梓河流域径流量的贡献在 2003—2015 年时期分别达到 43.42%和 56.58%;如果考虑蒸发量对桐梓河流域径流量的影响,则人类活动对桐梓河流域径流量变化的贡献率在 2003—2015 年时期会增加到 86.83%。

参考文献:

- [1] 徐宗学,李景玉.水文科学研究进展的回顾与展望[J].水科学进展,2010,21(4):450-459.
- [2] 傅国斌,刘昌明.全球变暖对区域水资源影响的计算分析:以海南岛万泉河为例[J].地理学报,1991,46(3):277-288.
- [3] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响[J].干旱区地理,2007,30(6):896-901.
- [4] 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.
- [5] 黄斌斌,郝成元,李若男,等.气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J].自然资源学报,2018,33(5):899-910.
- [6] 梁国付,丁圣彦.气候和土地利用变化对径流变化影响研究:以伊洛河流域伊河上游地区为例[J].地理科学,2012,32(5):635-640.
- [7] Kok K, Veldkamp A. Evaluating impact of spatial scales on land use pattern analysis in Central America[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2001, 85(1/3):205-221.
- [8] Claessens L, Schoorl JM, Verburg PH, et al. Modeling interactions and feedback mechanisms between land use change and landscape processes[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129(1):157-170.
- [9] 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.
- [10] Huntington T G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis[J]. Journal of Hydrology, 2006, 319(1):83-95.
- [11] 刘佳凯,张振明,鄢郭馨,等.潮白河流域径流对降雨的多尺度响应[J].中国水土保持科学,2016,14(4):50-59.
- [12] Wang S, Li Y. Channel variations of the different channel pattern reaches in the lower Yellow River from 1950 to 1999[J]. Quaternary International, 2011, 244(2):238-247.
- [13] Huang S, Liu D, Huang Q, et al. Contributions of climate variability and human activities to the variation of runoff in the Wei River Basin, China[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2016, 61(6):1026-1039.
- [14] Luo K, Tao F, Moiwu J P, et al. Attribution of hydrological change in Heihe River Basin to climate and land use change in the past three decades[J]. Scientific Reports, 2016, 6:33704.
- [15] 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.
- [16] Zare M, Samani A A N, Mohammady M. The impact of land use change on runoff generation in an urbanizing watershed in the north of Iran[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(18):1279.
- [17] Qin L, Bai X, Wang S, et al. Major problems and solutions on surface water resource utilisation in karst mountainous areas [J]. Agricultural Water Management, 2015, 159:55-65.
- [18] Meng X, Yin M, Ning L, et al. A threshold artificial neural network model for improving runoff prediction in a karst watershed [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(6):1-10.
- [19] 黄承标,谭卫宁,覃文更,等.木论喀斯特森林水土流失规律研究[J].水土保持研究,2012,19(4):34-37.
- [20] 史雯雨,李增永,李娜,等.金沙江流域 1957—2016 年气温时空变化特征[J].水土保持研究,2019,26(1):162-167.
- [21] 付建新,曹广超,李玲琴,等.1960—2014 年祁连山南坡及其附近地区降水时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(4):152-161.
- [22] 任秀真,徐光来,刘永婷,等.安徽省近 56 年气候要素时空演变特征[J].水土保持研究,2018,25(5):297-304.
- [23] 王随继,李玲,颜明.气候和人类活动对黄河中游区区间产流量变化的贡献率[J].地理研究,2013,32(3):395-402.
- [24] 刘梅先,徐宪立.气候变化及人为活动驱动下的西南喀斯特生态水文研究评述[J].农业现代化研究,2018,39(6):42-48.
- [25] 李春晖,郑小康,杨志峰,等.黄河天然径流量变化趋势及其影响分析[J].北京师范大学学报:自然科学版,2009,45(1):80-85.
- [26] 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.
- [27] 王世杰,李阳兵,李瑞玲.喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J].第四纪研究,2003,23(6):657-666.
- [28] 张军以,戴明宏,王腊春,等.西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性[J].地球与环境,2015,43(3):269-278.