

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0114

彭涛,梅子祎,董晓华,等.基于Budyko假设的汉江流域径流变化归因[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1114-1124. PENG T, MEI Z Y, DONG X H, et al. Attribution of runoff changes in the Hanjiang River basin based on Budyko hypothesis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1114-1124. (in Chinese)

基于 Budyko 假设的汉江流域径流变化归因

彭涛^{1,2,3}, 梅子祎¹, 董晓华^{1,2,3}, 王继保¹, 刘冀^{1,2,3}, 常文娟^{1,2,3}, 王高旭⁴

- (1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072;
3. 三峡库区生态环境教育部工程教育中心, 湖北 宜昌 443002;
4. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

摘要:利用1964—2015年汉江流域气温、降雨和径流等资料,采用线性倾向估计与滑动平均法分析白河和沙洋站水文气象要素的变化趋势,通过Mann-Kendall检验和Pettitt检验确定2个站径流序列的突变年份,基于Budyko水热耦合平衡理论,计算径流量对各影响因子的弹性系数,并采用互补关系法进行归因分析。结果表明:白河与沙洋站年径流量均呈现下降趋势,变化速率分别为 -2.797 mm/a 和 -1.875 mm/a ,并在1991年发生突变;白河与沙洋站变化期(1992—2015年)径流对降雨、潜在蒸散发和下垫面的弹性系数分别为1.79、 -0.79 、 -0.64 和2.07、 -1.07 、 -0.71 ,表明2个站的径流量均对降雨最为敏感,对下垫面最不敏感;下垫面变化是汉江流域径流量减少的主要因素,其对白河、沙洋站径流量变化的贡献量分别为74.67%、76.37%;变化期的NDVI较基准期整体增加,植被变化是导致汉江流域径流量整体下降的重要原因。

关键词:Budyko假设;归因分析;径流变化;气候变化;人类活动;汉江流域

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



水循环作为连接海洋、陆地和大气三者间的关键纽带,对全球气候和自然环境的变化有着重要意义,而气候变化和人类活动又是影响降水、径流和蒸发等水循环主要环节的两大因素。在全球气候变暖背景下,降雨、蒸发以及径流时空分布发生明显变化^[1-2],人类活动则通过河道外取用水、水利工程建设、城市扩张等方式改变了流域产汇流条件,对河川径流产生显著影响^[3]。因此,变化环境下流域径流变化及归因成为国内外学者研究的热点领域。

目前已有许多学者对径流变化进行归因分析,主要包括流域对比分析法^[4]、水文模型法^[5-6]、统计分析法^[7]和基于Budyko假设的弹性系数法^[8-11]等。

流域对比分析法通过比较与参照流域的水文过程差异,进而分析人类活动对径流变化的影响,该方法物理意义明确,但仅适合小流域;水文模型法具有较强的物理机制,但模型参数与结构存在较大的不确定性^[12],因此结果可能产生较大误差;统计分析法计算简便,但需要长序列实测资料,且缺乏对流域水文过程物理机制的分析;基于Budyko假设的弹性系数法参数易获取,是研究长时间尺度下流域径流变化的有效方法,目前已被许多学者^[13-16]应用于流域径流归因研究;弹性系数法虽然应用广泛,但其偏导部分计算方法多样,导致偏导值不一,因此计算结果会产生一定误差^[17]。Zhou等^[18]提出基于Budyko假设的互补关系法能够将径流变化的影响因子准确

收稿日期:2021-04-09 修回日期:2021-08-05 网络出版时间:2021-08-16

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210816.1354.004.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401005;2016YFA0601703);国家自然科学基金项目(51709151);宜昌市自然科学基金项目(A21-3-004)

作者简介:彭涛(1973—),男,湖南保靖人,副教授,博士,主要从事水文水资源与生态水文研究。E-mail:pengtao306@163.com

通信作者:梅子祎(2000—),女,湖北武汉人,主要从事水文水资源研究。E-mail:1847816379@qq.com

地划分为降雨、蒸散发和下垫面变化,且不存在计算误差,因此本文采用互补关系法进行汉江流域径流变化的归因分析。当前,已有众多学者^[19-22]采用弹性系数法、水文模拟法等对汉江上游流域径流变化驱动因素进行研究,但针对全流域径流变化归因的研究则较少。

汉江上游是我国南水北调中线工程的水源地,汉江中下游则是我国重要粮棉生产基地。由于河道外取用水量大幅增加,加之全球气候变暖影响,流域径流过程发生明显变化,汉江流域水资源供需矛盾日益突出。因此,开展汉江流域径流变化归因分析,对于流域水资源合理配置与可持续利用具有重要现实意义。本研究应用 Budyko 理论的互补关系法分

离量化气候变化和下垫面变化对汉江流域径流变化的贡献率,旨在为流域水资源规划管理和河流生态系统保护提供理论依据。

1 研究区域与资料来源

1.1 研究区域概况

汉江流域发源于陕西省西南部秦岭与米仓山之间的宁强县蟠冢山,流域范围为 $106^{\circ}12'E\sim 114^{\circ}14'E$, $30^{\circ}08'N\sim 34^{\circ}11'N$,流域面积 15.9 万 km^2 。干流全长 1577 km,涉及鄂、陕、川、渝、甘等 5 省。汉江流域属于亚热带季风区,气候温和湿润,多年平均降水量为 873 mm,但年际分配不均匀。研究区域气象和水文监测站点分布位置见图 1。

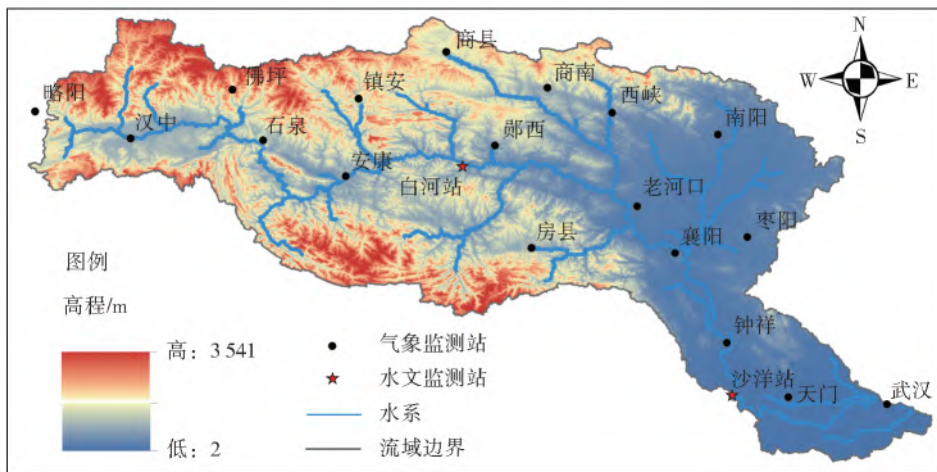


图 1 研究区域气象和水文监测站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological and hydrological monitoring stations in the study area

1.2 数据来源

采用 1964—2015 年汉江流域 18 个气象站点的气象数据,包括平均气温、最高和最低气温、降雨量、平均风速、日照时数、相对湿度等,均来自中国气象科学数据共享服务网(<https://www.nmic.cn/>),部分所缺的站点气象资料利用邻近站点资料进行线性插补。潜在蒸散发量采用联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐的 Penman-Monteith 公式计算,流域面降水量和潜在蒸散发量采用泰森多边形法计算。1964—2015 年汉江流域控制水文站白河与沙洋站的径流资料来源于长江水利委员会水文局。DEM 数据来自地理数据空间云(<http://www.gscloud.cn/>)。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据来自美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的 1982—2015 年 GIMMS NDVI 数据集(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/>

<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/>gimms/),空间分辨率为 $8\text{ km}\times 8\text{ km}$,时间分辨率为 15 d。

2 研究方法

2.1 趋势和突变分析

采用线性倾向估计法和滑动平均法对 1964—2015 年汉江流域的降雨量、潜在蒸散发量和径流进行趋势分析。线性倾向估计法通过建立一元线性回归方程反映气象与水文要素随时间的变化趋势。滑动平均法相当于低通滤波,滤去序列高频分量而突出长期变化趋势。

利用 Mann-Kendall(M-K)和 Pettitt 突变检验法分析汉江流域白河和沙洋站年径流序列的突变点。M-K 检验法由 Mann 提出^[23],该方法在气候和水文序列趋势和突变分析中应用广泛^[24-25]。Pettitt 突变检验法是一种非参数检验方法^[26],其原理是对气候序列对应的的秩序列构建统计量,统计量最大值对应的时间为可能的突变点。

2.2 径流变化归因分析

2.2.1 Budyko 假设

Budyko 理论^[27]以水量平衡方程为基础,表达式为

$$R=P-E-\Delta S \quad (1)$$

式中: R 为多年平均径流深,mm; P 为多年平均降雨量,mm; E 为多年平均实际蒸散发量,mm; ΔS 为流域蓄水量变化量,mm。

经过多年的研究,Budyko 认为决定长时间尺度下某一流域多年蒸散发速率是由潜在蒸散发和降水量决定,因此 Budyko 假设可以简单表示为

$$\frac{E}{P}=f\left(\frac{ET_0}{P}\right) \quad (2)$$

式中: ET_0 为流域多年平均潜在蒸散发量,mm。

Choudhury^[28]和 Yang 等^[8]基于 Budyko 假设提出了流域水热耦合平衡方程,并认为其具有普适性,即

$$E=\frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (3)$$

式中: n 为流域下垫面特征参数,主要包括地形、土壤和植被等^[10]。一般认为,在研究长时间水文序列的闭合流域时,流域蓄水量 ΔS 可以忽略不计^[29],即在假定流域蓄水量不变的前提下将式(1)和式(3)联立,则水量平衡方程可以表示为

$$R=P-\frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (4)$$

式中:已知径流量 R 、降雨量 P 和潜在蒸散发 ET_0 ,可推求出流域的下垫面参数 n 。

2.2.2 径流对气候和下垫面的弹性系数

认为式(4)中 P 、 ET_0 、 n 为相互独立的变量,结合水量平衡方程,年径流量可以表示为全微分的形式,其表达式为

$$dR=\frac{\partial R}{\partial P}dP+\frac{\partial R}{\partial ET_0}dET_0+\frac{\partial R}{\partial n}dn \quad (5)$$

径流量 R 对各影响因子的敏感性可以用弹性系数 ϵ 表示,其被定义为单位气候要素的变化引起的流域径流量的变化程度^[30],如年潜在蒸散发量增加 1% 导致年径流量相对于多年平均值的变化百分比,其表达式为

$$\epsilon_x=\frac{\partial R}{\partial x} \frac{x}{R} \quad (6)$$

式中: ϵ_x 为径流量对影响因子 x 的敏感性, x 可以为 P 、 ET_0 和 n ,其中 P 、 ET_0 均为流域多年平均值。

将式(5)除以多年平均径流深 R 可得

$$\frac{dR}{R}=\epsilon_P \frac{dP}{P}+\epsilon_{ET_0} \frac{dET_0}{ET_0}+\epsilon_n \frac{dn}{n} \quad (7)$$

令 $\varphi=\frac{ET_0}{P}$,根据式(6)可以求出径流量的降水

弹性系数 ϵ_P 、潜在蒸散发弹性系数 ϵ_{ET_0} 和下垫面弹性系数 ϵ_n ,分别为

$$\epsilon_P=\frac{(1+\varphi^n)^{1/n+1}-\varphi^{n+1}}{(1+\varphi^n)[(1+\varphi^n)^{1/n}-\varphi]} \quad (8)$$

$$\epsilon_{ET_0}=\frac{1}{(1+\varphi^n)[1-(1+\varphi^{-n})^{1/n}]} \quad (9)$$

$$\epsilon_n=\frac{\ln(1+\varphi^n)+\varphi^n \ln(1+\varphi^{-n})}{n[(1+\varphi^n)-(1+\varphi^{-n})^{1/n+1}]} \quad (10)$$

2.2.3 气候和下垫面对径流变化的贡献率

采用基于 Budyko 假设的互补法定量区分各因子对径流变化的贡献率。Zhou 等^[18]基于弹性系数的互补关系,假设 P 和 ET_0 相互独立,提出分离气候变化与下垫面变化对径流变化贡献的互补方程,该方法在理论计算上没有误差,互补关系式为

$$\frac{\partial R/R}{\partial P/P}+\frac{\partial R/R}{\partial ET_0/ET_0}=1 \quad (11)$$

由于气候与下垫面条件的不确定性,基于 Budyko 假设的互补关系权重因子法引入权重因子 α 表征不同的变化路径,经过代数恒等式推导,提出归因径流(潜在蒸散)变化的互补法,互补方程为

$$\Delta R=\alpha\left[\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_1 \Delta P+\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0}\right)_1 \Delta E_0+P_2 \Delta\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)+ET_{0,2} \Delta\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0}\right)\right]+(1-\alpha)\left[\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_2 \Delta P+\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0}\right)_2 \Delta E_0+P_1 \Delta\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)+ET_{0,1} \Delta\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0}\right)\right] \quad (12)$$

其中, α 的取值范围为 $[0,1]$,本文采用 Zhou 等^[18]推荐的 0.5。基于上式,径流变化可以分割为

$$\Delta R=\Delta R_{P+ET_0}+\Delta R_n \quad (13)$$

$$\Delta R_p=\alpha\left[\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_1 \Delta P\right]+(1-\alpha)\left[\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_2 \Delta P\right] \quad (14)$$

$$\Delta R_{ET_0}=\alpha\left[\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0}\right)_1 \Delta ET_0\right]+(1-\alpha)\left[\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0}\right)_2 \Delta ET_0\right] \quad (15)$$

$$\Delta R_n=\alpha\left[P_2 \Delta\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)+ET_{0,2} \Delta\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0}\right)\right]+(1-\alpha)\left[P_1 \Delta\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)+ET_{0,1} \Delta\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0}\right)\right] \quad (16)$$

式中: ΔR_p 为降雨变化对径流变化的贡献量; ΔR_{ET_0} 为潜在蒸散发变化对径流变化的贡献量; ΔR_n 为下垫面变化对径流变化的贡献量。

每个影响因子对径流变化的贡献率为

$$C_x=\frac{\Delta R_x}{\Delta R} \times 100\% \quad (17)$$

式中: x 表示 P 、 ET_0 或 n , C_x 表示各影响因子对径

流变化的贡献率。

3 结果与讨论

3.1 汉江流域水文气象要素变化特征

3.1.1 径流、降雨和潜在蒸散发趋势变化

利用线性倾向估计法和滑动平均法分析1964—2015年白河、沙洋站径流深、降雨量和潜在蒸散发量的变化趋势,见图2。由图2可知:白河站年径流深和潜在蒸散发总体呈下降趋势,下降速率分别为 -2.797 mm/a (图2(a))和 -1.403 mm/a

(图2(c)),年降雨量则呈小幅上升趋势,增幅为 0.080 mm/a (图2(b)),均未通过显著性水平检验,说明下降趋势不显著;沙洋站的年径流深、降雨量及潜在蒸散发量总体均呈下降趋势,下降速率分别为 -1.875 mm/a (图2(d))、 -0.652 mm/a (图2(e))和 -1.793 mm/a (图2(f)),径流和降雨序列下降趋势不显著,而潜在蒸散发量显著性水平达到了0.05,下降趋势显著。这与陈华等^[31]1951—2003年汉江流域径流变化趋势研究结果基本一致,但近10余年来径流有波动上升的趋势。

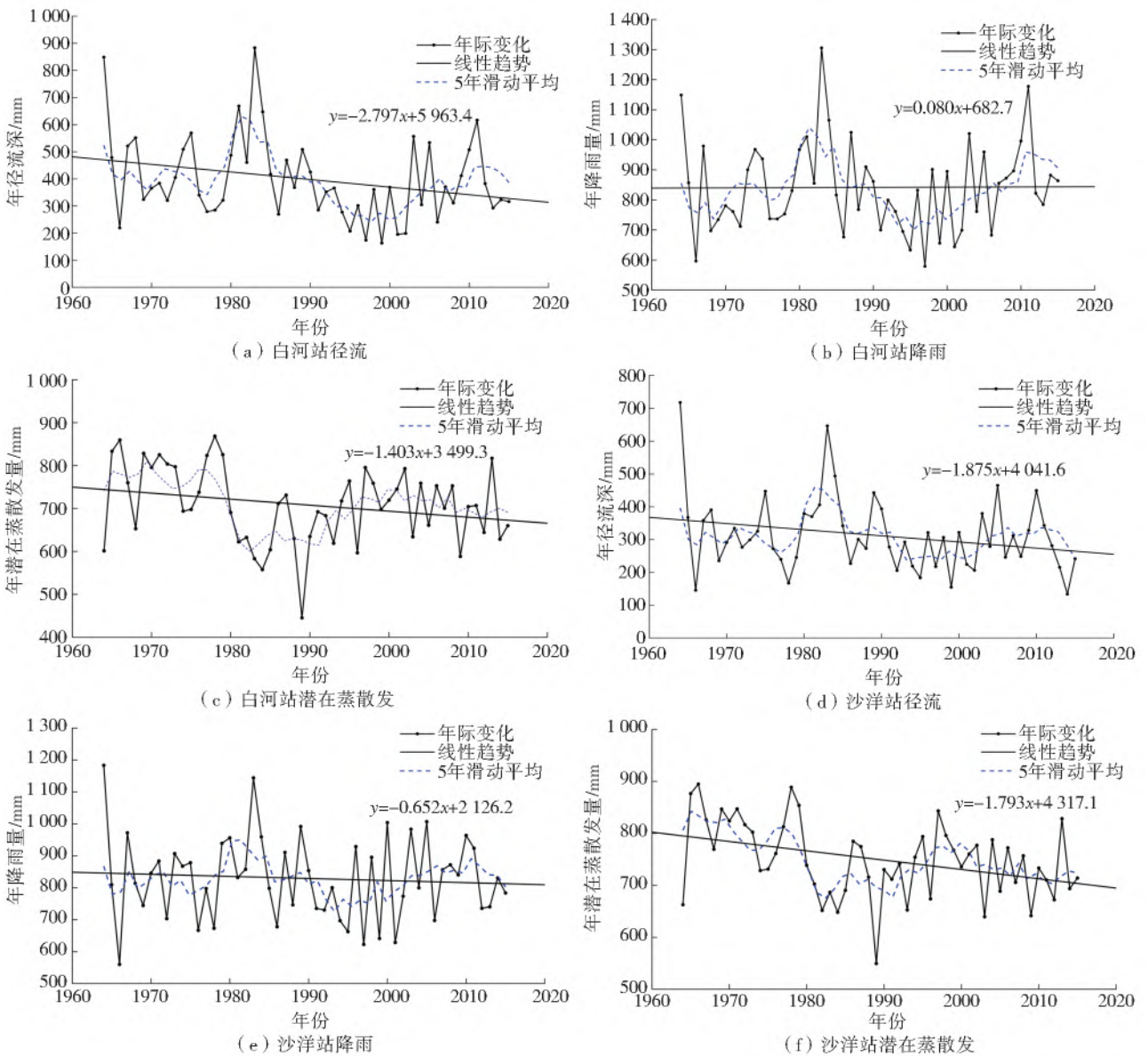


图2 1964—2015年白河和沙洋站径流深、降雨量及潜在蒸散发量年际变化特征

Fig.2 Interannual variation characteristics of runoff, rainfall and potential evapotranspiration at Baihe and Shayang stations from 1964 to 2015

3.1.2 径流突变检验

采用M-K突变检验分别对1964—2015年白河和沙洋站径流序列进行突变检测,见图3。在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下,白河站UB和UF曲线存在多

个交点,对应年份为1966、1967、1972、1977、1979、1985和2011年,见图3(a);沙洋站的UB和UF曲线在0.05显著水平下同样出现多个交点,对应年份为1965、1967、1969、1972、1973、1979、1988、1991和

2003 年,见图 3(b)。

为进一步确定突变年份,采用 Pettitt 检验法对 2 个站年径流序列进行突变检验:白河站的 Pettitt 统计量在 1991 年之前波动上升,1991 年后波动下降,且达到了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,表明白河站径流在 1991 年发生了显著突变,见图 3(c);沙洋站的 Pettitt 的统计量变化趋势虽与白河站相同,但并不

显著,见图 3(d)。对 2 个站降雨序列进行突变分析,发现降雨量在 1991 年前呈上升趋势,1991 年后逐渐减小。综合 2 种突变分析方法的检测结果,最终确定将 1991 年作为 2 个站年径流序列的突变年份。这与钟华昱等^[32]采用累积距平法、有序聚类法及 M-K 突变检验法对汉江径流进行突变分析的结果基本一致。

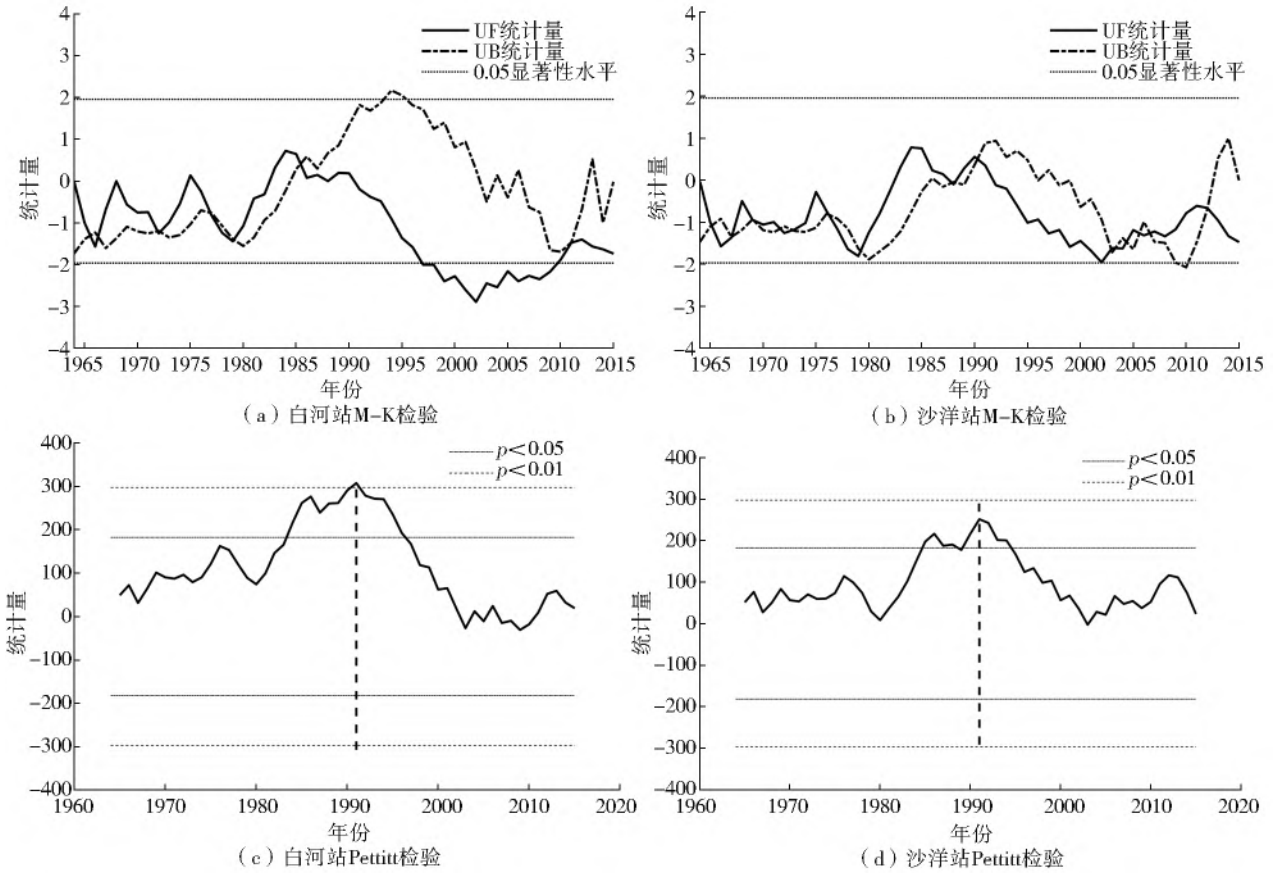


图 3 白河、沙洋站年径流序列突变检验

Fig. 3 Test of abrupt changes in the annual runoff series at Baihe and Shayang stations

3.2 径流对气候要素和下垫面的弹性分析

根据突变分析结果,将研究序列划分为基准期(1964—1991 年)和变化期(1992—2015 年)。根据 2 个站基准期与变化期的多年平均潜在蒸散发量、

多年平均径流深以及多年平均降雨量,利用式(4)计算各时期相应的下垫面参数 n ,结合式(8)~(10)计算各站基准期与变化期对应的弹性系数 ϵ_P 、 ϵ_{ET_0} 和 ϵ_n ,结果见表 1。

表 1 汉江流域水文气象特征值

Tab. 1 Hydrometeorological characteristic values in the Hanjiang River basin

水文站	时期	ET_0/mm	R/mm	P/mm	n	R/P	ET_0/P	ϵ_P	ϵ_{ET_0}	ϵ_n
白河	1964—1991	712.1	450.4	860.3	1.08	0.52	0.83	1.50	-0.50	-0.58
	1992—2015	704.2	338.9	819.7	1.53	0.41	0.86	1.79	-0.79	-0.64
沙洋	1964—1991	761.7	345.2	846.9	1.48	0.41	0.90	1.78	-0.78	-0.68
	1992—2015	735.0	274.0	809.2	1.91	0.34	0.91	2.07	-1.07	-0.71

由表 1 可知:白河与沙洋站变化期的 P 、 ET_0 较基准期有所下降,下降速率分别为 4.72%、1.11% 和 4.45%、3.5%, n 较基准期均呈现上升趋势,增长

速率分别为 41.67%和 29.05%;2 个站的干燥指数 (ET_0/P)较基准期有所升高,而径流系数(R/P)则略有减小。其中:白河站变化期径流对各影响因子

的弹性系数 ϵ_P 、 ϵ_{ET_0} 和 ϵ_n 分别为 1.79、-0.79 和 -0.64,表明 P 、 ET_0 和 n 增加 1% 时,引起径流深分别增加 1.79%、减少 0.79% 和减少 0.64%;沙洋站变化期的 ϵ_P 、 ϵ_{ET_0} 和 ϵ_n 则分别为 2.07、-1.07 和 -0.71。由此可知,白河与沙洋站径流深的变化均与降雨量呈正相关,与潜在蒸散发、下垫面变化呈负相关。由于弹性系数的绝对值大小反映了径流量对各影响因子的敏感程度,因此综合分析可知,白河与沙洋站均对降雨量最敏感,对下垫面变化最不敏感。

3.3 径流变化归因分析

汉江流域各影响因子对径流变化归因分析结果

表 2 汉江流域径流变化归因分析结果

Tab. 2 Attribution analysis of runoff change in the Hanjiang River basin

水文站	基准期	变化期	ΔR_P /mm	ΔR_{ET_0} /mm	ΔR_n /mm	ΔR /mm	C_P /%	C_{ET_0} /%	C_n /%
白河	1964—1991	1992—2015	-30.99	2.76	-83.25	-111.48	27.80	-2.47	74.67
沙洋	1964—1991	1992—2015	-26.89	10.05	-54.43	-71.27	37.73	-14.10	76.37

对比以往研究结果,本文所得下垫面变化对汉江流域径流变化贡献率有所不同。如:李凌程等^[19]基于敏感性分析法得到下垫面变化对汉江上游在变异 I 和 II 期径流变化的贡献率分别为 51.9%、79.7%;杨娜等^[20]采用气候弹性模型得到下垫面变化对丹江口水库入库径流变化的影响度为 25%;夏军等^[21]利用弹性系数法估算得到下垫面变化对汉江上游径流变化的贡献率达到 56.5%;班璇等^[33]采用累积量斜率变化率法计算得出人类活动对汉江上游和全流域在变异 I 期径流变化的贡献率分别为 73.9%、66.2%,在变异 II 期分别为 80.7%、56.3%。上述研究结果的差异可能由于研究时段、研究范围

见表 2。由表 2 可知:降雨量引起白河和沙洋站径流的变化量分别为 -30.99、-26.89 mm;潜在蒸散发量导致白河站、沙洋站径流深的分别增加 2.76、10.05 mm;下垫面导致白河站、沙洋站径流分别减少 83.25、54.43 mm;下垫面变化对白河和沙洋站径流变化的贡献率最大,分别为 74.67%、76.37%,降雨量对白河站、沙洋站径流变化的贡献率次之,分别为 27.80%、37.73%,潜在蒸散发量对 2 个站径流变化均起负贡献作用,且贡献率最低,分别为 -2.47% 和 -14.10%。因此,下垫面变化是导致 2 个站径流减少的主要因素,降雨量的影响其次,潜在蒸散量的影响最小。

及研究方法等不同所致。但是已有研究^[33-34]表明,下垫面变化对汉江流域径流的影响总体呈现显著增强的趋势。

3.4 讨论

3.4.1 气候因素对径流的影响

图 4 为白河和沙洋站降雨-径流双累积曲线。一般地,降雨-径流双累积曲线为一条直线,如果下垫面条件改变,则该曲线将会发生偏移。由图 4 可知,相对于基准期,白河和沙洋站变化期的斜率均表现为减小趋势,即降雨-径流双累积曲线向下发生偏移,说明相同降雨量下径流减小,流域下垫面受人类活动影响发生变化。

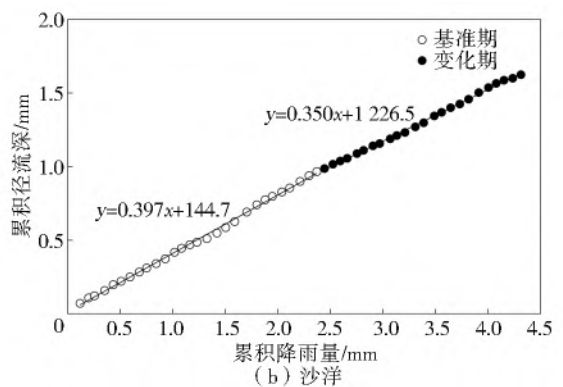
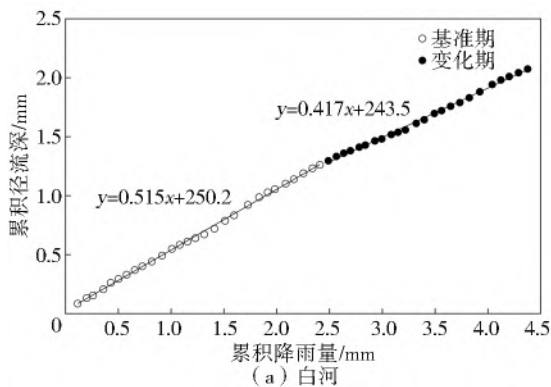


图 4 白河、沙洋站降雨-径流双累积曲线

Fig. 4 Attribution analysis of runoff change at Baihe and Shayang stations

采用线性倾向估计法计算 1964—2015 年汉江流域各个气象站的逐年干燥指数及其倾向率,并利用克里金空间插值方法分析干燥指数倾向率的空间变化趋势,见图 5(a)。由图 5(a)可知,除了郧西和

襄阳气象站周边的干燥指数总体呈上升趋势以外,汉江流域绝大部分地区总体表现为不同程度的减小趋势,流域湿润程度呈现增加趋势。图 5(b)为变化期干燥指数相对于基准期变化量的空间分布。由图

5(b)可知,除汉江上游部分地区干燥指数较基准期增加以外,汉江源区和汉江中下游地区干燥指数较基准期减少,湿润程度增加。前述研究表明,近 50

年来汉江流域年径流整体呈现减少趋势,这与流域气候暖湿化趋势并不一致,说明气候因素对流域径流的影响处于次要地位。

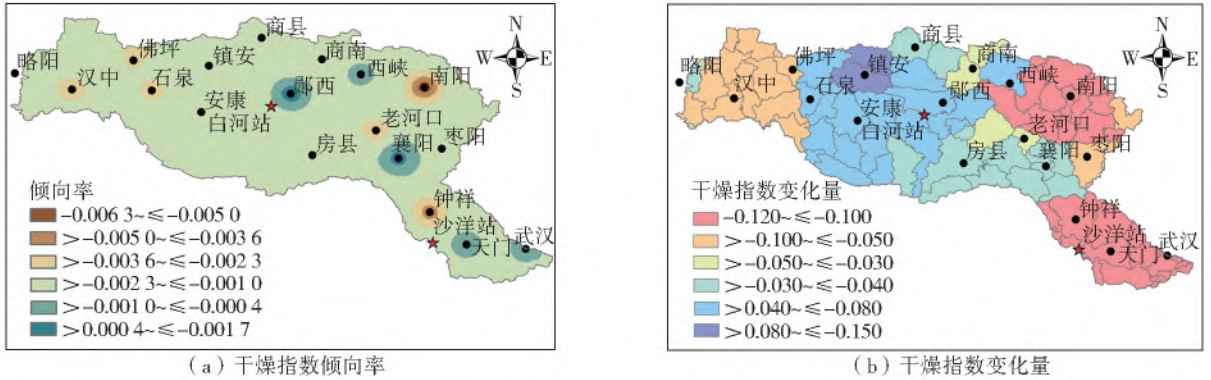


图 5 汉江流域干燥指数倾向率(a)和干燥指数变化量(b)的空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of the aridity index tendency rate (a) and the aridity index change (b) in the Hanjiang River basin

3.4.2 下垫面变化对径流的影响

研究^[10]表明,流域下垫面参数 n 主要与土壤、地形和植被等因素有关。在长时间尺度下,流域的土壤与地形等因素基本稳定,流域下垫面参数的变化主要与植被的变化有关。因此,为进一步研究汉江流域下垫面变化对径流的影响,利用 NDVI 来分析流域植被覆盖变化。

由 1982—2015 年汉江流域 NDVI 指数的变化趋势(图 6)可知,NDVI 值在基准期呈现略微升高的趋势,上升速率为 0.017/(10 a),在变化期上升速率

减至 0.016/(10 a),并于 2015 年达到了最大值 0.86,与 2009 年相同。其中,基准期与变化期 NDVI 的变化趋势显著,均达到了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平。图 7 为变化期与基准期 NDVI 差值的空间分布。由图 7 可知,变化期 NDVI 较基准期整体升高,表明汉江流域的植被覆盖整体增加。植被可以阻滞地面径流,增加下渗时间,同时也可以改良土壤,使土壤质地更疏松,增加下渗量,导致径流减少^[35]。研究^[36]显示,我国一系列的生态恢复政策使得植被覆盖增加,成为我国诸多流域径流减少的重要原因之一。

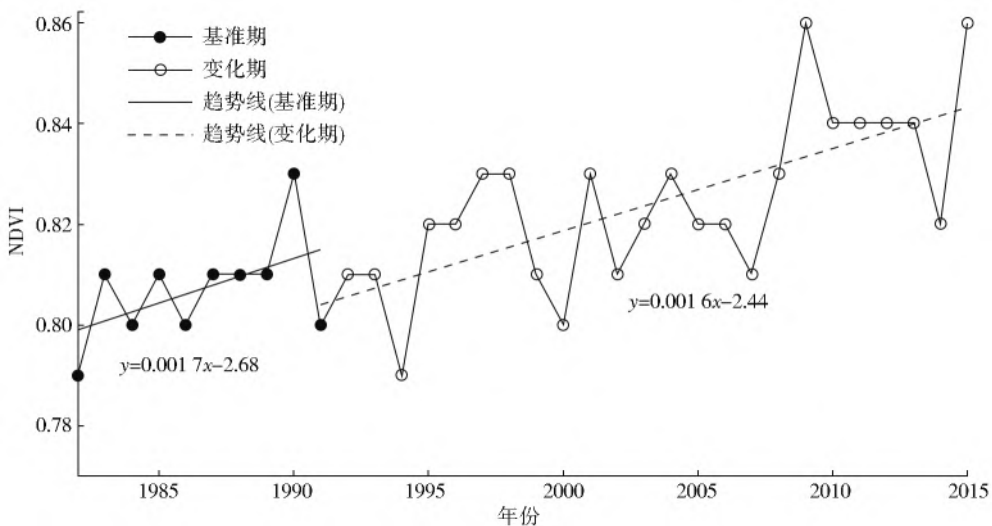


图 6 1982—2015 年汉江流域 NDVI 变化趋势

Fig. 6 Variation trend of NDVI in the Hanjiang River basin from 1982 to 2015

4 结论

利用 1964—2015 年汉江流域水文气象资料,采用线性倾向估计、M-K 检验、Pettitt 检验等方法分析水文气象要素的趋势和突变特征,运用 Budyko

水热耦合平衡方程的互补法定量区分气候和下垫面变化对汉江流域径流变化的影响,主要结论如下。

(1)1964—2015 年白河和沙洋水文站径流整体呈下降趋势,变化率为分别为 -2.797 mm/a 和 -1.875 mm/a 。20 世纪 60 年代至 21 世纪初,汉江

上游地区径流总体呈显著下降趋势,但 21 世纪近 15 年来,汉江流域径流有缓慢波动上升趋势。白河站降雨量整体呈上升趋势,变化率为 0.080 mm/a,

沙洋站则表现为下降趋势,变化率为 -0.652 mm/a。2 个站的潜在蒸散量均呈下降趋势,变化率分别为 -1.403 mm/a 和 -1.793 mm/a。

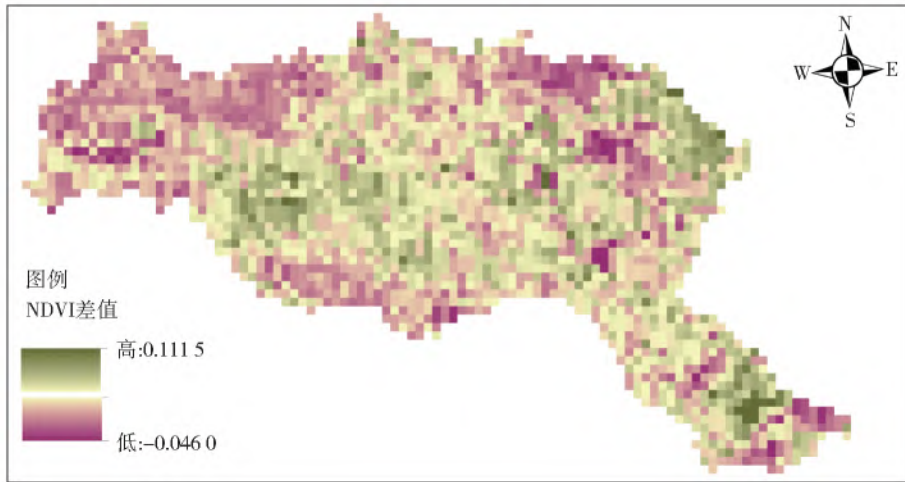


图 7 汉江流域变化期与基准期 NDVI 差值的空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of NDVI difference between change period and base period in the Hanjiang River basin

(2)白河和沙洋 2 个站的径流序列突变点为 1991 年,据此设定 1964—1991 年为基准期,1992—2015 年为变化期。

(3)根据 Budyko 水热平衡方程计算径流对各影响因子的弹性系数,结果显示径流对降水量最为敏感。利用弹性系数互补法计算得到各个影响因子对径流变化的相对贡献率,下垫面变化是汉江流域径流减少的主要因素,对白河、沙洋水文站径流变化的贡献量分别为 74.67%、76.37%,其中流域变化期较基准期 NDVI 整体上升,植被覆盖度增加,成为汉江流域径流减少的重要原因,气候因素的影响相对较小。

参考文献(References):

- [1] 苏布达,孙赫敏,李修仓,等. 气候变化背景下中国陆地水循环时空演变[J]. 大气科学学报, 2020, 43 (6): 1096-1105. (SU B D, SUN H M, LI X C, et al. Impact of climate change on terrestrial water cycle in China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43 (6): 1096-1105. (in Chinese)) DOI: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20201014001.
- [2] MENGISTU D, BEWKET W, DOSIO A, et al. Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River basin, Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2021. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2020. 125614.
- [3] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44 (7): 779-790. (SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities

on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (7): 779-790. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2013. 07. 001.

- [4] ZHAO F F, ZHANG L, XU Z X, et al. Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate variability on streamflow[J]. Water Resources Research, 2010, 46. DOI: 10. 1029/2009WR007702.
- [5] 杨倩,刘登峰,孟宪萌,等. 环境变化对汉江上游径流影响的定量分析[J]. 水力发电学报, 2019, 38 (12): 73-84. (YANG Q, LIU D F, MENG X M, et al. Quantitative analysis of impacts of environment changes on runoff in upper Hanjiang River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (12): 73-84. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/slf dx b. 20191208.
- [6] 陈利群,刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学, 2007 (4): 559-565. (CHEN L Q, LIU C M. Influence of climate and land-cover change on runoff of the source regions of Yellow River [J]. China Environmental Science, 2007 (4): 559-565. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-6923. 2007. 04. 026.
- [7] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水 and 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. (WANG S J, YAN Y X, YAN M, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity[J]. Acta Geographica Sinica,

- 2012, 67 (3): 388-397. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/xb201203010.
- [8] YANG H B, YANG D W, LEI Z D, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44 (3): 893-897. DOI: 10. 1029/2007WR006135.
- [9] XU X Y, YANG D W, YANG H B, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 530-540. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2013. 12. 052.
- [10] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45 (10): 1024-1034. (YANG D W, ZHANG S L, XU X Y. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River basin during past fifty years based on Budyko hypothesis[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2015, 45 (10): 1024-1034. (in Chinese)) DOI: 10. 1360/N092015-00013.
- [11] 周金玉, 张璇, 许杨, 等. 基于 Budyko 假设的滦河流域上游径流变化归因识别[J]. *南水北调与水利科技*, 2020, 18 (3): 15-30, 47. (ZHOU J Y, ZHANG X, XU Y, et al. Attribution identification of runoff changes based on the Budyko hypothesis in the upper reaches of the Luan River basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18 (3): 15-30, 47. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2020. 0047.
- [12] LEAVESLEY G H. Modeling the effects of climate change on water resources: A review [J]. *Climatic Change*, 1994, 28 (1/2): 159-177. DOI: 10. 1007/BF01094105.
- [13] NING T T, LI Z, LIU W Z. Separating the impacts of climate change and land surface alteration on runoff reduction in the Jing River catchment of China[J]. *Catena*, 2016, 147: 80-86. DOI: 10. 1016/j. catena. 2016. 06. 041.
- [14] SHEN Q, CONG Z T, LEI H M. Evaluating the impact of climate and underlying surface change on runoff within the Budyko framework: A study across 224 catchments in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017: 251-262. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2017. 09. 023.
- [15] 李秋菊, 李占玲, 王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17 (3): 31-39. (LI Q J, LI Z L, WANG J. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17 (3): 31-39. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0057.
- [16] 黄蓉, 张建梅, 林依雪, 等. 新安江上游流域径流变化特征与归因分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34 (8): 1771-1781. (HUANG R, ZHANG J M, LIN Y X, et al. Variation of streamflow and its drivers in Xin'anjiang River basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34 (8): 1771-1781. (in Chinese)) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20190816.
- [17] YANG H B, YANG D W, HU Q F. An error analysis of the Budyko hypothesis for assessing the contribution of climate change to runoff[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50 (12): 9620-9629. DOI: 10. 1002/2014WR015451.
- [18] ZHOU S, YU B F, ZHANG L, et al. A new method to partition climate and catchment effect on the mean annual runoff based on the Budyko complementary relationship[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52 (9): 7163-7177. DOI: 10. 1002/2016WR019046.
- [19] 李凌程, 张利平, 夏军, 等. 气候波动和人类活动对南水北调中线工程典型流域径流影响的定量评估[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10 (2): 118-126. (LI L C, ZHANG L P, XIA J, et al. Quantitative assessment of impacts of climate variability and human activities on runoff in typical basins of the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Climate Change Research*, 2014, 10 (2): 118-126. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1719. 2014. 02. 006.
- [20] 杨娜, 赵巧华, 闫桂霞, 等. 气候变化和人类活动对丹江口入库径流的影响及评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25 (7): 1129-1134. (YANG N, ZHAO Q H, YAN G X, et al. Quantitative assessment of climate change and human activity impact on inflow decrease of Danjiangkou reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25 (7): 1129-1134. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201607015.
- [21] 夏军, 马协一, 邹磊, 等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15 (1): 1-6. (XIA J, MA X Y, ZOU L, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff change in the upper reaches of Hanjiang River[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15 (1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 01. 001.
- [22] 杨倩. 汉江上游径流演变规律和实际蒸散发变化分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (YANG Q. Analysis

- of runoff evolution law and actual evapotranspiration change in the upper reach of Hanjiang River[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [23] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945. DOI: 10. 2307/1907187.
- [24] BURN D H, EINUR M. Detection of hydrologic trends and variability[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 255 (1/4): 107-122. DOI: 10. 1016/S0022-1694(01)00514-5.
- [25] HAMED K H. Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 365 (1/2): 86-94. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2008. 11. 024.
- [26] PETTITT A. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 1979, 28 (2): 126-135. DOI: 10. 2307/2346729.
- [27] BUDYKO M I. *Climate and life*[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [28] CHOUDHURY B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 216 (1/2): 99-110. DOI: 10. 1016/S0022-1694(98)00293-5.
- [29] 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. (ZHANG L M, ZHAO G J, MU X M, et al. Attribution of runoff variation in the Weihe River basin based on the Budyko hypothesis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (21): 7607-7617. (in Chinese)) DOI: 10. 5846 /stxb201710121828.
- [30] SCHAAKE J S. From climate to flow, in climate change and US water resources[M]. New York: John Wiley, 1990, 177-206.
- [31] 陈华, 闫宝伟, 郭生练, 等. 汉江流域径流时空变化趋势分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2008 (3): 49-53. (CHEN H, YAN B W, GUO S L, et al. Temporal and spatial trends analysis of the runoff in Hanjiang River basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008(3): 49-53. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2008. 03. 015.
- [32] 钟华昱, 黄强, 杨元园, 等. 变化环境下汉江径流时空演变规律分析[J]. *人民珠江*, 2020, 41 (5): 123-131. (ZHONG H Y, HUANG Q, YANG Y Y, et al. Spatial-temporal evolution rule analysis of runoff of Hanjiang River under changing environment [J]. *Pearl River*, 2020, 41 (5): 123-131. (in Chinese)) DOI: 10. 3969 /j. issn. 1001-9235. 2020. 05. 017.
- [33] 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. (BAN X, ZHU B Y, SHU P, et al. Trend and driving force of climate and hydrological process in Hanjiang River basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27 (12): 2817-2829. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201812018.
- [34] 孙瑜. 变化环境下流域水文模型参数动态规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2015. (SUN Y. Time instability of hydrological model parameters under changing environment[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.)
- [35] 罗伟祥, 白立强, 宋西德, 等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. *水土保持学报*, 1990 (1): 30-35. DOI: 10. 13870/j. cnki. stbxb. 1990. 01. 006. (LUO W X, BAI L Q, SONG X D, et al. Runoff and souring amount in forest and grass land with different over rate[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990 (1): 30-35. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stbxb. 1990. 01. 006.
- [36] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26 (5): 605-613. (ZHANG S L, YANG D W, YANG H B, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960-2010[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26 (5): 605-613. (in Chinese)) DOI: 10. 1402/j. cnki. 32. 1309. 2015. 05. 001.

Attribution of runoff changes in the Hanjiang River basin based on Budyko hypothesis

PENG Tao^{1,2,3}, MEI Ziyi¹, DONG Xiaohua^{1,2,3}, WANG Jibao¹, LIU Ji^{1,2,3}, CHANG Wenjuan^{1,2,3}, WANG Gaoxu⁴
(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China;

3. Engineering Education Center of Ecological Environment of the Three Gorges Reservoir Area,

Ministry of Education, Yichang 443002, China; 4. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In recent decades, global climate change, especially anthropogenic activities such as land use change and reservoir con-

struction have led to profound changes in hydrological processes in basins. Therefore, runoff change and attribution analysis under changing environment have become a hot research area among domestic and overseas scholars. The elastic coefficient method based on Budyko hypothesis is an effective method for the attribution analysis of runoff change, but its calculation results have some errors. Therefore, the Hanjiang River basin, which is sensitive to climate change and where human activities are intense is selected as the research object. The contribution rate of climate change and underlying surface change to runoff variability was quantitatively decomposed by the complementary relationship method of Budyko hypothesis, to provide a scientific basis for water resources management and sustainable utilization.

The linear trend estimation and the moving average method were used to analyze the change trends of hydrometeorological elements at Baihe and Shayang stations in the Hanjiang River basin based on the hydrometeorological data such as temperature, precipitation and runoff from 1964 to 2015. Mann-Kendall test and Pettitt test were used to detect the abrupt change points in the annual runoff series at two stations. Based on Budyko's hydro-thermal coupling equilibrium theory, the elastic coefficients of runoff were calculated, and the complementary relationship method was used to quantitatively distinguish the contribution rate of each influencing factor to runoff change. Finally, the influence of climate and vegetation cover change on runoff change was discussed.

From 1964 to 2015, the runoff of Baihe and Shayang stations showed a decreasing trend, with the change rate of -2.797 mm/a and -1.875 mm/a, respectively. The overall precipitation of Baihe station displayed an upward trend with a change rate of 0.080 mm/a, while that of Shayang station showed a downward trend with a change rate of -0.652 mm/a. The potential evapotranspiration exhibited a decreasing trend with the change rates of -1.403 mm/a and -1.793 mm/a, respectively. The abrupt change point of the annual runoff sequence at Baihe and Shayang stations was 1991, thus the period was divided into the base period (1964-1991) and the change period (1992-2015). Compared with the base period, the decreasing rates of rainfall and potential evapotranspiration in the change period of Baihe station was 4.72% and 1.11% , respectively, and those in Shayang station was 4.45% and 3.5% , respectively. The underlying surface parameters showed an upward trend compared with the base period, with an increased rate of 41.67% and 29.05% , respectively. The elastic coefficients of runoff to rainfall, potential evapotranspiration and underlying surface at Baihe station in the change period was 1.79 , -0.79 , -0.64 , respectively, and those in Shayang station was 2.07 , -1.07 , -0.71 , respectively, which indicated that the runoff at both stations is most sensitive to precipitation and least sensitive to an underlying surface. The underlying surface changes were the main factor of runoff change in the Hanjiang River basin, and its contribution rate to the runoff change at Baihe and Shayang stations was 74.67% and 76.37% , respectively; The contribution rate of precipitation to the runoff change at Baihe and Shayang stations took second place, and the contribution rate was 27.80% and 37.73% , respectively. Potential evapotranspiration had a negative contribution to runoff change at both stations, and the contribution rate was the lowest.

The increasing annual precipitation at Baihe station, the hydrometeorological elements in the Hanjiang River basin generally showed a decreasing trend from 1964 to 2015. The underlying surface changes were the major controlling factor of runoff reduction in the Hanjiang River basin, and the normalized difference vegetation index in the change period was increased as a whole compared with the base period. The vegetation change was an important reason for the overall decrease of runoff in the Hanjiang River basin, and the influence of climate factors was relatively small. The complementary relationship method based on Budyko's hydro-thermal coupling equilibrium equation is simple and practical, but the physical meaning and quantitative expression of the underlying surface parameter in this equation need to be further clarified.

Key words: Budyko hypothesis; attribution analysis; runoff change; climate change; human activity; Hanjiang River basin