

DOI: 10.5846/stxb202007221924

杨林, 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 高鹏, 孙文义, 张丽梅. 基于 Budyko 假设的洮河与大夏河径流变化归因识别. 生态学报, 2021, 41(21): 8421-8429.

Yang L, Zhao G J, Mu X M, Tian P, Gao P, Sun W Y, Zhang L M. Attribution of runoff variations in Tao River and Daxia River based on Budyko Hypothesis. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8421-8429.

## 基于 Budyko 假设的洮河与大夏河径流变化归因识别

杨 林<sup>1</sup>, 赵广举<sup>1,2,\*</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 田 鹏<sup>3</sup>, 高 鹏<sup>1,2</sup>, 孙文义<sup>1,2</sup>, 张丽梅<sup>1</sup>

1 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

3 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

**摘要:** 受气候变化和人类活动的影响, 世界许多河流水文过程发生了显著的变化。研究河川径流变化特征及其原因对流域水资源管理和规划有十分重要的意义。以黄河上游支流洮河、大夏河为研究对象, 采用 Mann-Kendall 趋势检验法、突变分析等方法探究河川径流的趋势变化、阶段特征, 并采用 Budyko 水热耦合平衡方程定量评估径流变化影响因素的贡献率。研究发现洮河与大夏河流域年径流深均呈显著减少趋势, 减少速率为:  $-1.85 \text{ mm/a}$ 、 $-1.36 \text{ mm/a}$  ( $P \leq 0.01$ )。通过突变检验可将洮河的径流序列分为基准期 1961—1987 年, 剧烈人类活动期 1988—2017 年, 而大夏河的基准期为 1961—1985 年, 人类活动期 1986—2017 年。洮河、大夏河流域下垫面变化对径流变化的贡献率超过 60%, 降雨次之, 潜在蒸散发最弱, 约贡献 10%。流域下垫面改变是引起研究区河川径流变化的主要因素。

**关键词:** 洮河; 大夏河; Budyko 水热耦合平衡方程; 人类活动; 径流变化

## Attribution of runoff variations in Tao River and Daxia River based on Budyko Hypothesis

YANG Lin<sup>1</sup>, ZHAO Guangju<sup>1,2,\*</sup>, MU Xingmin<sup>1,2</sup>, TIAN Peng<sup>3</sup>, GAO Peng<sup>1,2</sup>, SUN Wenyi<sup>1,2</sup>, ZHANG Limei<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

**Abstract:** Catchment hydrological progress has been greatly influenced under the background of intensive variability in precipitation, temperature, and land cover/land use due to climate changes and human activities. It is desired to explore the causes of hydrological changes in the basin to achieve sustainable management of water and soil resources. This paper employed Mann-Kendall trend test and Mann-Kendall abrupt point test to analyze the temporal variation of runoff in the Tao River and the Daxia River. Results showed that annual runoff had a significant decreasing trend with a rate of  $-1.85 \text{ mm/a}$  in Tao River and  $-1.36 \text{ mm/a}$  in Daxia River during the past 57 years (1961—2017). We analyzed the breakpoint of the annual runoff of the two rivers and split the whole period into two sub-periods at the breakpoint (period 1: before the breakpoint; period 2: after the breakpoint). The annual runoff in the Tao River can be divided into the base period from 1961 to 1987 and the human activity affected period from 1988 to 2017, whereas the base period is 1961—1985 and the human activity influenced period is 1986—2017 in the Daxia River. In order to detect the major cause for the runoff decline, the elasticity of runoff from the Choudhury-Yang equation that is a water-energy balance equation based on Budyko

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA20040202); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402401)

收稿日期: 2020-07-22; 网络出版日期: 2021-07-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn

hypothesis was applied. The change of annual runoff from period-1 to period-2 was the catchment hydrological response of the change to the precipitation, potential evaporation and land use/cover (represented by  $\Delta P$ ,  $\Delta ET_0$ ,  $\Delta\omega$ ), and we calculated the runoff change based on the elasticity of runoff. Elasticities of runoff were calculated in the two rivers based on their climate condition (represented by the aridity index,  $ET_0/P$ ) and landscape condition (represented by the parameter,  $\omega$ ). The results indicated that land use/cover was the dominant factor accounting for more than 60% of runoff variation in the Tao and Daxia catchments, followed by precipitation, and the weakest was potential evapotranspiration, accounting for approximately 10%. The impact of land use/cover change mainly came from vegetation increase due to reforestation during soil and water conservation practices in the past 30 years and also partially due to climate variability especially temperature increase. In a word, the underlying surface changes are the main factors causing the change of runoff in the study area. It can be predicted the runoff change in the two catchments under the future climate scenario without direct human impact based on elasticity of runoff from historical hydroclimatic data.

**Key Words:** Tao River; Daxia River; Budyko water-energy equation; human activity; runoff change

日趋剧烈的人类活动深刻改变流域下垫面,进而影响流域的产汇流机制,导致河流的径流量等水文要素变化,从而影响水循环过程和水量平衡<sup>[1-2]</sup>。近几十年来,我国在黄河上中游地区实施了大规模的水土保持措施,建设了众多水利工程。截止 2011 年,累积建设梯田超过 4.5 万 km<sup>2</sup>,淤地坝 5.5 万座,植被覆盖度由 20 世纪 80 年代的 28% 增长到近年的 63%<sup>[3-4]</sup>。这些措施极大的改变了黄河干支流水文过程,由此导致径流输沙急剧锐减<sup>[5-8]</sup>。黄河水沙变化规律及其归因识别已引起相关行业部门的极大关注。定量分析其变化的原因,对深入理解流域水文演变机理和规律具有重要的科学意义,对流域水资源科学管理具有现实意义。

针对河川径流变化影响因素的评估方法已有较多研究,如广泛应用的水文模型法、水文统计法等<sup>[9-10]</sup>。基于 Budyko 假设的水热耦合平衡方程可以定量评估气候变化和人类活动对径流的敏感性和贡献量<sup>[11-13]</sup>,目前,已有许多研究学者利用黄河流域的气象资料和水文资料拟合水热关系,证实了 Budyko 水热耦合平衡方程理论的适用性<sup>[14-16]</sup>。

洮河、大夏河作为黄河上游区重要的一级支流,受气候变化和人类活动双重作用,河川径流发生显著的变化<sup>[17-18]</sup>。径流的丰枯变化必定影响区域的水源供水格局,进而牵动区域内的社会经济的发展<sup>[19-20]</sup>。目前,针对洮河、大夏河流域的水文研究多集中在水文气象要素变化特征方面,而对其径流变化归因分析研究较少,且多集中在 2015 年之前<sup>[20-23]</sup>。鉴于此,本文以洮河、大夏河流域为研究区域,采用 Budyko 水热耦合平衡方程理论量化降雨、潜在蒸散发、下垫面特征系数对径流变化的影响程度,识别引起流域径流变化的原因,对深刻理解水循环过程和改善流域水资源管理措施具有理论和实践意义。

## 1 研究区概况和数据来源

### 1.1 研究区概况

洮河流域位于甘肃省西部,介于 101°36'—104°20'E, 34°06'—36°01'N(图 1),发源于西倾山北麓,由西向东依次经过碌曲、卓尼、岷县,岷县受阻后北拐穿过九甸峡和海甸峡,经东乡、临洮等地,在永靖注入黄河。流域总面积 24973 km<sup>2</sup>,干流全长 673.2 km,流域以白石山、太子山一线为界,分为青藏高原和黄土高原两大地貌单元,地貌单元间地理—生态格局天然分异,由地势平缓的草原区、高山耸立的森林草原区向植被稀疏、水土流失严重的黄土区过渡。红旗水文站是洮河流域的把口站,多年平均径流量为 46.8 亿 m<sup>3</sup>。

大夏河发源于甘南高原,河源由夏河和咯河(又名:德乌鲁河)两大支流组成(图 1)。大夏河流经夏河县、合作市、临夏、东乡县注入刘家峡水库,流域面积 6808 km<sup>2</sup>,主河道长 201.9 km,流域内多年平均降水量 630 mm,平均蒸发量 705.8 mm。折桥水文站是大夏河流域的把口站,多年平均径流量为 4.479 亿 m<sup>3</sup>。

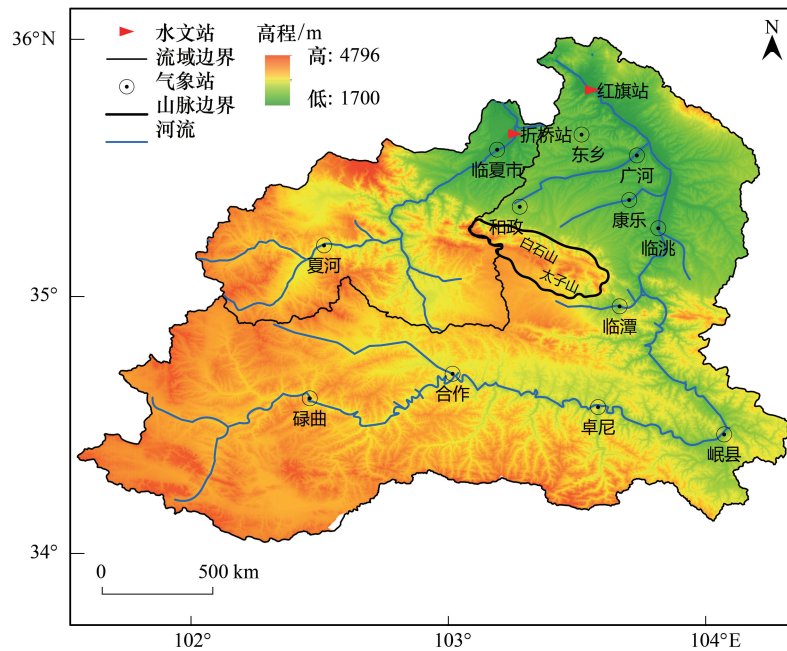


图 1 研究区水文、气象站点空间分布

Fig.1 Locations of hydro-climatic stations in the study area

## 1.2 数据来源与处理

本文选择洮河流域的红旗水文站和大夏河流域的折桥水文站(图 1),通过黄河水文年鉴、《黄河泥沙公报》及黄土高原数据中心(<http://loess.geodata.cn/hyd/inedx.jsp>)获取两个水文站的月径流数据。通过中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn>)下载获得流域范围内 12 个气象站点 1961—2017 年的基础气象数据,包括最高温度、最低温度、平均温度、日照时数、平均相对湿度、日降雨量、平均风速。采用世界粮农组织(FAO)修正的 Penman-Monteith 公式获取研究区的潜在蒸散发,该方法充分考虑了作物地表特征和空气动力学的参数的变化<sup>[24]</sup>,广泛应用于蒸散发计算中<sup>[25-26]</sup>,计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中, $ET_0$ 为潜在蒸散量( $\text{mm/d}$ ); $\Delta$ 为饱和水汽压曲线斜率( $\text{kPa/}^\circ\text{C}$ ); $R_n$ 为太阳净辐射( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $G$ 为土壤热通量( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $\gamma$ 为干湿常数( $\text{kPa/}^\circ\text{C}$ ); $U_2$ 为 2 m 高处的风速( $\text{m/s}$ ); $T$ 为平均气温( $^\circ\text{C}$ ); $e_s$ 为平均饱和水汽压( $\text{kPa}$ ), $e_a$ 为实际水汽压( $\text{kPa}$ ), $(e_s - e_a)$ 为饱和水汽压差( $\text{kPa}$ )。

## 2 研究方法

### 2.1 Mann-Kendall 趋势检验和突变检验

Mann-Kendall(MK)趋势检验和 Mann-Kendall 突变检验分析是水文时间序列常用的方法,能够很好地反映河川径流变化发展规律,具有精确度高、不受异常值干扰、适用于非正态分布数据的优点。计算方法详见参考文献<sup>[8, 27]</sup>。

### 2.2 径流变化归因识别

基于 Budyko 水热耦合平衡理论量化气候变异和人类干扰对径流变化的敏感性和贡献率,能够准确、快速识别引导径流变化的主导因素,在研究气候变化和下垫面变化对径流影响程度分析中广泛应用<sup>[15, 28]</sup>。

### 2.2.1 敏感性分析

基于 Budyko 水热耦合平衡方程计算长时间尺度下的实际蒸散发<sup>[29]</sup>,其方程基本形式为:

$$ET = \frac{P \times ET_0}{(P^\omega + ET_0^\omega)^{1/\omega}} \quad (2)$$

式中:  $ET$  表示流域年实际蒸散发 (mm),  $P$  表示年降雨量 (mm),  $ET_0$  表示年潜在蒸散发 (mm), 参数  $\omega$  代表流域的下垫面参数 (无量纲), 与土壤性质、地形和植被相关<sup>[30-31]</sup>。

在多年尺度上, 闭合流域满足水量平衡关系, 即:

$$R = P - ET \quad (3)$$

式中,  $R$  为多年平均径流深 (mm);  $P$  为多年平均降雨量 (mm);  $ET$  为多年平均实际蒸散量 (mm)。将方程 (2) 代入方程 (3) 可以得到:

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

假设  $P$ 、 $ET_0$  和  $\omega$  是独立的变量, 公式 (3) 可以改写为  $R = f(P, ET_0, \omega)$ , 径流深可以表达为:

$$dR = \frac{\partial f}{\partial P} dP + \frac{\partial f}{\partial ET_0} dET_0 + \frac{\partial f}{\partial \omega} d\omega \quad (5)$$

定义  $\varepsilon_p = \frac{dR/R}{dP/P}$  为径流的降雨弹性系数; 类似的, 径流的潜在蒸散发弹性系数为:  $\varepsilon_{ET_0} = \frac{dR/R}{dET_0/ET_0}$ , 径流的下垫面系数弹性系数为:  $\varepsilon_\omega = \frac{dR/R}{d\omega/\omega}$ , 表达式为:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_p \frac{dP}{P} + \varepsilon_{ET_0} \frac{dET_0}{ET_0} + \varepsilon_\omega \frac{d\omega}{\omega} \quad (6)$$

进一步推导, 各弹性系数表达式为 ( $\theta = ET_0/P$ ):

$$\varepsilon_p = \frac{(1+\theta^\omega)^{1/\omega+1} - \theta^{\omega+1}}{(1+\theta^\omega) [(1+\theta^\omega)^{1/\omega} - \theta]} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1+\theta^\omega) [1 - (1+\theta^{-\omega})^{1/\omega}]} \quad (8)$$

$$\varepsilon_\omega = \frac{\ln(1+\theta^\omega) + \theta^\omega \ln(1+\theta^{-\omega})}{\omega(1+\theta^\omega) [1 - (1+\theta^{-\omega})^{1/\omega}]} \quad (9)$$

降雨、潜在蒸散发、下垫面的径流弹性系数由 (7) — (9) 式求得, 弹性系数的正负表示径流与该因子的正负相关关系, 弹性系数的绝对值大小表示该因子对径流变化的影响程度。

### 2.2.2 径流变化的贡献率分析

如果径流发生显著性变化, 基于突变点, 研究时期分为基准期和若干人类活动期, 基准期和人类活动期的径流深变化为  $\Delta R$ , 理论上径流深变化可以归因于降雨、潜在蒸散发、下垫面状况改变三方面, 由公式 (10) 计算单个因素引起的径流深变化表达为:

$$\Delta R_i = \varepsilon_i \frac{R}{i} \Delta i \quad (10)$$

式中  $i$  代表降雨  $P$ 、潜在蒸散发  $ET_0$ 、下垫面系数  $\omega$ 。

通过计算可以分别获得人类活动期降雨、潜在蒸散发、下垫面系数相对基准期引起的径流深变化为  $\Delta R_p$ 、 $\Delta R_{ET_0}$ 、 $\Delta R_\omega$ , 从而计算单个因素对径流变化贡献率为:

$$\eta_i = \Delta R_i / \Delta R \times 100\% \quad (11)$$

其中  $\eta_i$  表示降雨、潜在蒸散发、下垫面系数对径流变化的贡献率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 水文气象要素特征

洮河和大夏河流域的径流特征如表 1 所示,结果表明:洮河流域的多年平均径流深为 177.71 mm,是大夏河 121.49 mm 的 1.41 倍。大夏河年际径流深极值比为 22.66,是洮河的 5—6 倍,表明大夏河年际径流深差异明显,这主要与大夏河南北地域差异性和季风性气候引起的降雨时空分布有关。采用非参数 MK 趋势检验流域径流深的变化趋势可知:洮河、大夏河流域的径流深均呈现减少趋势,显著性超过 99%。图 2 为流域年径流深的线性拟合,由此可知,洮河、大夏河 1961—2017 年径流深减少速率分别为  $-1.85 \text{ mm/a}$ 、 $-1.36 \text{ mm/a}$ 。Mann-Kendall 突变点检验发现,洮河、大夏河径流突变分别发生在 1987、1985 年,突变之后人类活动期径流相对变化率超过 30%。

表 1 流域水文气候变化特征

Table 1 Hydrological and climatic change characteristics of basins

流域 Basin	站点 Station	集水面积/km <sup>2</sup> Catchment area	径流深 Runoff depth/mm			年降雨量 MK 检验	年潜在蒸散发 MK 检验
			平均值	极值比	MK 检验	Annual precipitation test	Annual potential evapotranspiration test
洮河	红旗	24973	177.71	4.32	-3.69 ***	-1.20	2.42 ***
大夏河	折桥	6808	121.49	22.66	-2.77 ***	-0.048	4.69 ***

\*\*\* 显著性水平达 0.01

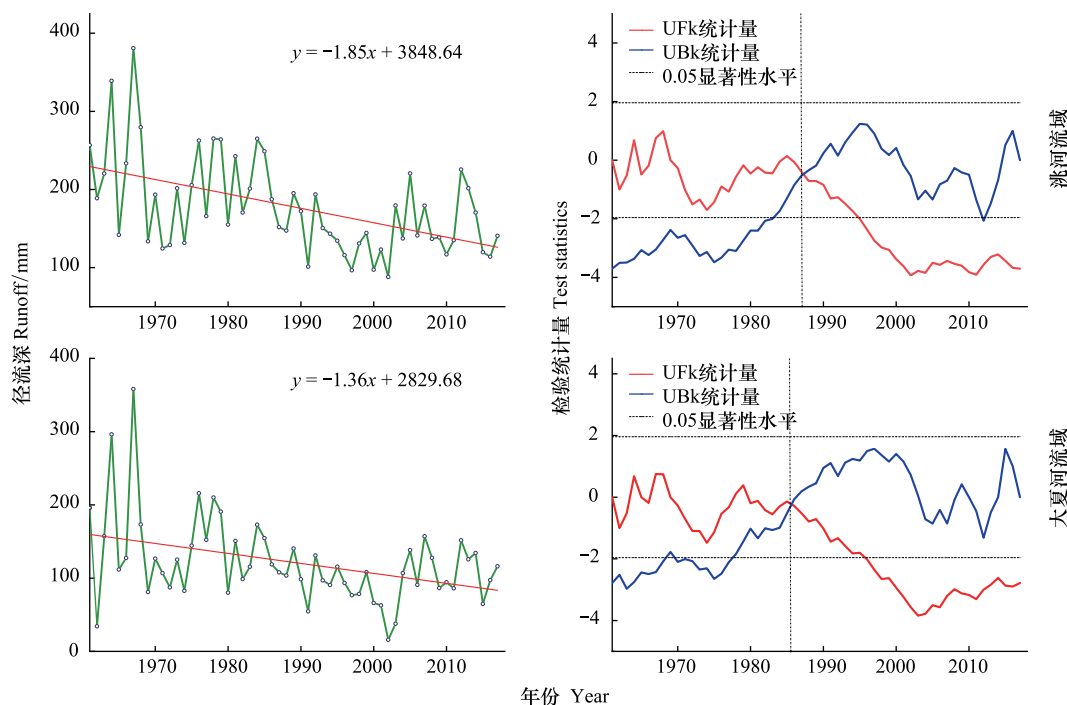


图 2 径流变化趋势和突变检验

Fig.2 Runoff changing trends and abrupt changes

UFk:MK 正序检验统计量 MK normal series test statistics; UBk:MK 逆序检验统计量 MK inverse series test statistics

流域降雨、蒸发等气象因素直接影响着河川径流变化。采用 MK 趋势检验分析研究区降雨、潜在蒸散发变化特征发现(表 1),洮河、大夏河年降雨量无显著的变化趋势,年降雨量变化速率分别为  $-1.08$ 、 $0.005 \text{ mm/a}$ (图 3);而洮河和大夏河流域年潜在蒸散发显著增长( $P \geq 0.01$ ),增长速率分别为  $0.6$ 、 $1.46 \text{ mm/a}$ ,2000 年之

后年潜在蒸散发均超过 850 mm,这与黄河流域整体增温变暖一致。

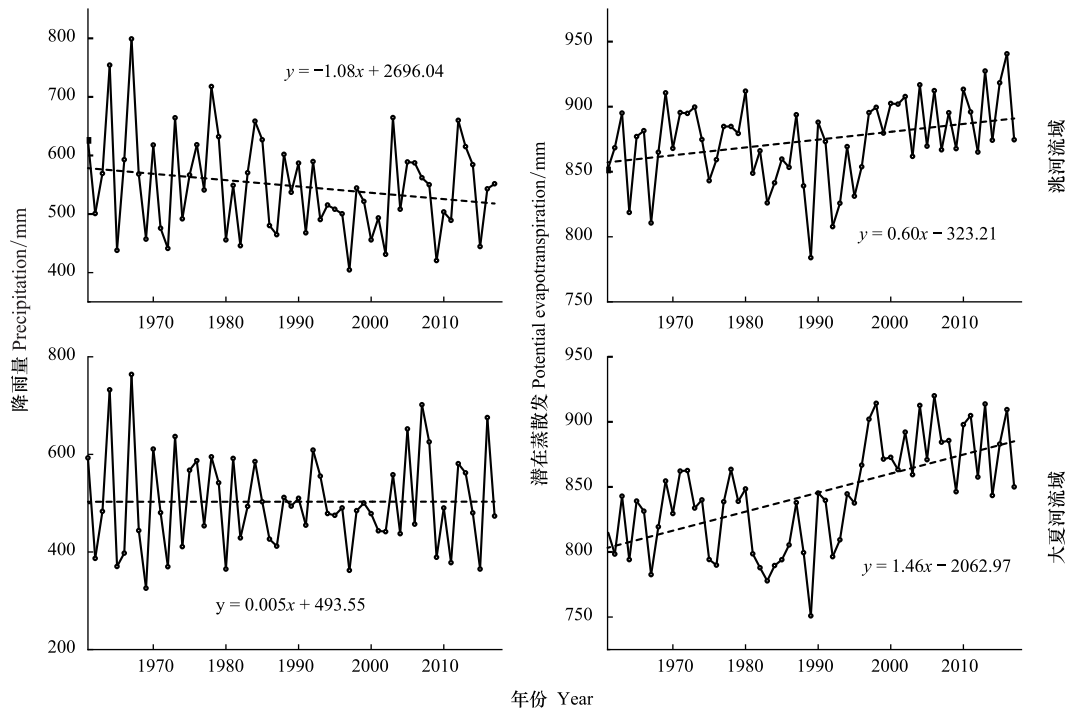


图3 研究区气象变化趋势

Fig.3 Climate changing trends in the study area

### 3.2 径流变化归因分析

#### 3.2.1 径流对气候和下垫面变化的敏感性分析

基于 Budyko 水热耦合平衡方程理论计算洮河流域和大夏河流域各时段水文特征以及径流对降雨量、潜在蒸散发、下垫面参数的弹性系数(表 2)。分析发现:洮河、大夏河流域在人类活动期降雨量、径流深相对基期均减少,年潜在蒸散发增加,径流系数减少,降雨转换为蒸散发的比例增加。

表 2 气象水文变量特征

Table 2 Statistics in hydro-climatic variables of the basin

流域 Watershed	时期 Period	P/mm	R/mm	ET <sub>0</sub> /mm	ω	R/P	ET <sub>0</sub> /P	弹性系数 Elasticity coefficient		
								ε <sub>P</sub>	ε <sub>ET0</sub>	ε <sub>ω</sub>
洮河	1961—1987	567.52	212.56	869.01	1.05	0.37	1.53	1.67	-0.67	-1.08
	1988—2017	530.71	146.36	878.62	1.25	0.28	1.66	1.92	-0.92	-1.31
大夏河	1961—1985	508.68	149.98	821.13	1.25	0.29	1.61	1.92	-0.92	-1.10
	1986—2017	498.58	99.19	862.12	1.57	0.20	1.73	2.31	-1.31	-1.60

ET<sub>0</sub>: 年平均潜在蒸散 Annual average potential evapotranspiration; R: 平均径流深 Average runoff depth; P: 平均降水量 Average precipitation; ω: 下垫面特征参数 Underlying surface feature parameters; R/P: 径流系数 Runoff coefficient; ET<sub>0</sub>/P: 干旱指数 Drought index; ε<sub>P</sub>: 降雨弹性系数 Elasticity coefficient of precipitation; ε<sub>ET0</sub>: 潜在蒸散发弹性系数 Elasticity coefficient of potential evapotranspiration; ε<sub>ω</sub>: 下垫面特征参数的弹性系数 Elasticity coefficient of underlying surface feature parameter

总体而言,洮河、大夏河流域径流变化与 ET<sub>0</sub>、ω 呈负相关,与 P 呈正相关。对比突变点前后的两个时段,洮河流域的降雨弹性系数由 1961—1987 年的 1.67,增加到 1988—2017 年的 1.92,说明同样的降水增加 10% 时,1987 年以前会使洮河径流增加 16.7%,则会使 1987 年之后增加 19.2%,表明降水对径流的影响程度进一步加强;同理,潜在蒸散发或者下垫面参数 ω 增加 10% 时,1987 年以前分别会使洮河径流减少 6.7% 或者 10.8%,1987 年之后分别会使径流减少 9.2% 或者 13.1%。同理,大夏河流域的降雨、潜在蒸散发、下垫面特征

参数分别增加 10%,1985 年以前分别会使大夏河径流增加 19.2%、减少 9.2%、减少 11%,1985 年之后径流分别增加 23.1%、减少 13.1%、减少 16%。通过对比降雨、潜在蒸散发、下垫面参数  $\omega$  弹性系数绝对值大小,降雨弹性系数最大,下垫面次之,潜在蒸散发最小,揭示了洮河、大夏河对降雨补给最敏感,降水量的增减,直接决定流域水量的多少;下垫面对流域降水拦蓄截留,改变产流过程的填注、下渗和土壤蓄水能力,汇流过程中的地表糙率、河流水文路径等水文过程。

图 4 反映了洮河、大夏河流域 1961—2017 年干旱指数( $ET_0/P$ )和降雨、潜在蒸散发、下垫面弹性系数的年际变化趋势,干旱指数呈现上升趋势,流域内暖干化现象显著,降雨、潜在蒸散发弹性系数绝对值呈现显著的上升趋势( $P<0.01$ ),反映了流域径流变化对气象要素的敏感性增强。

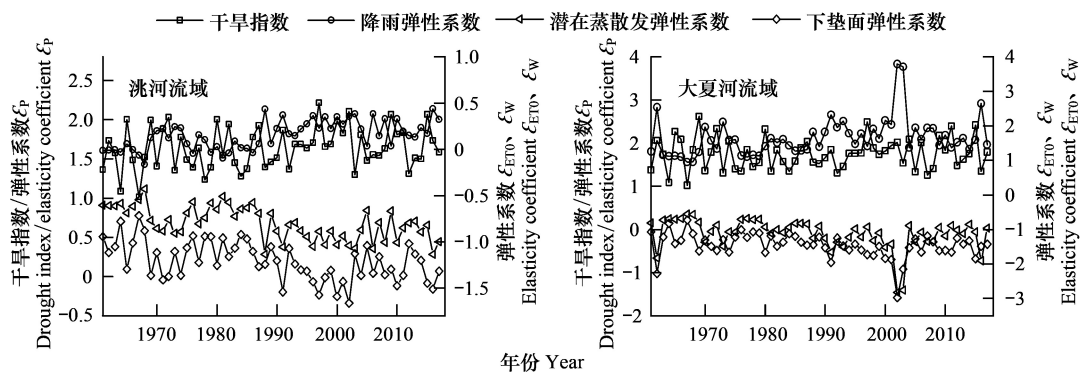


图 4 干旱指数、弹性系数年际变化

Fig.4 Interannual changes of drought index and elasticity coefficients

### 3.3 径流变化的归因识别

基于 Budyko 水热耦合平衡方程理论量化气候变化和下垫面条件对径流过程的影响程度(表 3)。由表可知,理论计算的径流深变化( $dR$ )和实际径流深变化( $dR'$ )数值接近(二者误差的绝对值  $\delta < 5$ ),表明本研究评估径流变化归因的方法是可行的。洮河流域和大夏河流域人类活动期相对于基准期,降雨、潜在蒸散量和下垫面状况对径流的贡献有较大差异。与基准期相比,洮河流域的径流减少 31%,下垫面变化对径流减少的贡献占比最高(63.68%),其次为降雨,贡献 33.99%,潜在蒸散发贡献最小。大夏河流域人类活动期相比于基准期,下垫面变化对径流贡献为 76.87%,降雨和潜在蒸散发贡献接近,分别贡献 10.50%和 12.63%。

综上,下垫面条件是引起洮河、大夏河流域径流减少的主要因素,降雨次之,潜在蒸散发影响程度最小。流域 2000 年之后降水颇丰,但径流深基本保持在 150 mm 左右,可见下垫面状况的改变对流域的产汇流过程产生了深刻的影响。

表 3 径流变化归因识别

Table 3 Contributions of hydro-climatic variables to runoff changes

流域 Basin	人类活动期 Human activity period		$dR_p/mm$	$dR_{ET0}/mm$	$dR_\omega/mm$	$dR/mm$	$dR'/mm$	$\delta/mm$	$C_p/\%$	$C_{ET0}/\%$	$C_\omega/\%$
	基准期 Base period										
洮河	1961—1987	1988—2017	-23.06	-1.58	-43.21	-67.85	-66.20	-1.65	33.99	2.33	63.68
大夏河	1961—1985	1986—2017	-5.70	-6.86	-41.74	-54.30	-50.79	-3.51	10.50	12.63	76.87

$dR_p$ : 降雨引起的径流变化 Runoff changes caused by precipitation;  $dR_{ET0}$ : 潜在蒸散发引起的径流变化 Runoff changes caused by potential evapotranspiration;  $dR_\omega$ : 下垫面引起的径流变化, Runoff changes caused by underlying surface;  $dR$ : 计算求得的径流深变化 Runoff depth changes by calculated;  $dR'$ : 径流深之差 Runoff depth difference;  $\delta$ :  $dR'$ 与 $dR$ 的差值 Difference between  $dR'$  and  $dR$ ;  $C_p$ : 降雨对径流变化的贡献率 The contribution of precipitation to runoff changes;  $C_{ET0}$ : 潜在蒸散发对径流变化的贡献率 The contribution of potential evapotranspiration to runoff changes;  $C_\omega$ : 下垫面对径流变化的贡献率 The contribution of underlying surface to changes in runoff

## 4 讨论

### 4.1 流域特征参数 $\omega$ 的含义

Budyko 方程的唯一参数  $\omega$ , 是一个区域下垫面特征综合体现, 一般认为主要受地形、土壤、植被因素的影响。已有学者针对人类活动影响较弱的地区建立了区域相对入渗能力、相对土壤水储量、平均坡度三者的函数求解  $\omega$  的关系<sup>[14]</sup>, 研究发现流域在较短时间内地形和土壤性质的变异性相对较弱, 参数  $\omega$  主要反映下垫面植被的变化。20 世纪末, 黄土高原实施退耕还林(草)、荒山造林等一系列大规模生态修复工程, 植被状况显著改善, 覆盖度由上世纪 80 年代的 28% 增加至近年的 63%<sup>[21]</sup>。同时, 学者针对洮河流域内 1980—2010 年归一化植被指数(NDVI) 研究分析发现, 春、秋季植被生长旺盛, 流域范围内 NDVI 显著增加<sup>[32]</sup>。洮河、大夏河流域范围内梯田的修建、植被覆盖的增加深刻地改变了流域下垫面的状况, 人类活动期的下垫面参数  $\omega$  相比于基准期分别增长了 19.05%、25.6%, 表明流域中降水转化为蒸散发的比例增加, 这与流域中植被覆盖度变化密切相关, 植被覆盖度的增加导致冠层截留增加, 同时改变了产流过程中的填洼、下渗和土壤蓄水能力和汇流过程中地表糙率、地表蓄水量、河道汇水路径等水文过程, 延长产汇流时间, 增加了蒸散发。1990 年之后径流减少 30% 以上, 植被变化是控制流域的下垫面状况的主导因素, 但是流域中植被变化驱动的水文过程变化机理研究相对较少, 后期需要进一步加强。

### 4.2 河川径流变化主要驱动因素

采用 Budyko 水热耦合平衡方程理论对径流影响因素的弹性系数进行分析发现, 气候因子的弹性系数绝对值最大, 表明气候变化直接影响着流域水文循环过程。洮河、大夏河流域人类活动期的径流较基准期均呈显著减少, 尽管下垫面的弹性系数介于 1—1.3 之间, 但下垫面状况的改变对径流深变化的贡献率超过了 60%, 与已有的研究结果一致<sup>[23]</sup>。流域内降雨年际变化不均匀, 平水年和枯水年交替出现, 洮河、大夏河流域在 2003 年之后, 降水量相对颇丰, 但径流深分别减少 26.08%、28.61%, 表明流域内径流的改变与降雨变化不同步, 因此, 流域下垫面变化是河川径流锐减的主导因素。统计研究区的治理措施发现, 20 世纪 70 年代末, 洮河、大夏河流域均实施小流域综合治理, 修筑梯田、淤地坝等水土保持措施, 并于 1999 年开展退耕还林草工程, 截止 2015 年, 洮河流域修筑梯田 2116 km<sup>2</sup>, 退耕还林面积达 561 km<sup>2</sup>, 修建水利水电工程及水库 62 座, 中型淤地坝 6 座, 灌溉面积达到 6.03 万 hm<sup>2</sup><sup>[23, 33]</sup>; 大夏河流域至 2010 年底, 兴修梯田 2.11 万 hm<sup>2</sup>, 营造林草面积 2.41 万 hm<sup>2</sup>, 修建谷坊 380 座、淤地坝 7 座, 水土流失治理率初步达到 43.5%<sup>[34]</sup>, 这些举措深刻地改变了流域下垫面条件, 影响了产汇流机制, 由此可以看出, 研究区下垫面的变化深刻地改变了流域的水文过程。

## 5 结论

本文以黄河上游支流洮河、大夏河流域为研究对象, 采用 Mann-Kendall 趋势检验、突变等方法分析流域 1961—2017 年径流序列变化, 基于 Budyko 水热耦合方程理论量化气候变化和人类活动对径流变化的贡献, 主要结论如下:

洮河流域、大夏河流域径流深均显著减少, 变化速率分别为 -1.85 mm/a、-1.36mm/a。两个流域的年降雨量未发生显著变化, 但年潜在蒸散发量显著增加 ( $P < 0.01$ )。采用 Mann-Kendall 突变检验识别洮河、大夏河年径流阶段变化特征, 人类活动影响较小的时期分别为 1961—1987、1961—1985 年, 人类活动影响剧烈期为 1988—2017 年、1986—2017 年。

依据 Budyko 水热耦合平衡方程识别径流变化的主导因素, 研究发现人类活动引起的洮河、大夏河流域下垫面变化是径流变化的主要因素, 分别贡献 63.68% 和 76.87%。洮河、大夏河流域的径流减少主要受下垫面变化的控制, 降雨量次之, 潜在蒸散发影响最弱。

### 参考文献 (References):

[1] 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 李帅. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展. 水科学进展, 2012, 23(2): 278-285.



- [ 2 ] 王文,王靖淑,陶奕源,程慧. 人类活动对水文干旱形成与发展的影响研究进展. 水文, 2020, 40(3): 1-8.
- [ 3 ] 李宗善,杨磊,王国梁,侯建,信忠保,刘国华,傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [ 4 ] 姚文艺,冉大川,陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616.
- [ 5 ] 许文龙,赵广举,穆兴民,高鹏,孙文义. 近 60 年黄河上游干流水沙变化及其关系. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 38-47.
- [ 6 ] 姚文艺,高亚军,张晓华. 黄河径流与输沙关系演变及其相关科学问题. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 1-11.
- [ 7 ] 刘晓燕,杨胜天,王富贵,何兴照,马红斌,罗娅. 黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析. 水利学报, 2014, 45(11): 1293-1300.
- [ 8 ] 赵广举,穆兴民,田鹏,王飞,高鹏. 近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析. 资源科学, 2012, 34(6): 1070-1078.
- [ 9 ] 韩京成,黄国和,李国强,李薇. 基于贝叶斯理论的 SLURP 水文模型参数不确定性评估及日径流模拟分析. 水电能源科学, 2013, 31(12): 13-17.
- [ 10 ] 林若兰,卓文珊,高延康,高艺桔,符洪恩,刘祖发. 基于 SWAT 模型的北江流域生态径流调节服务评估. 水资源保护, 2020, 36(6): 131-136.
- [ 11 ] 曹文旭,张志强,查同刚,王盛萍,郭军庭,许行. 基于 Budyko 假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究. 生态学报, 2018, 38(16): 5750-5758.
- [ 12 ] 刘剑宇,张强,陈喜,顾西辉. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究. 地理学报, 2016, 71(11): 1875-1885.
- [ 13 ] Ning T T, Liu W Z, Li Z, Feng Q. Modelling and attributing evapotranspiration changes on China's Loess Plateau with Budyko framework considering vegetation dynamics and climate seasonality. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34(8): 1217-1230.
- [ 14 ] Yang D W, Sun F B, Liu Z Y, Cong Z T, Ni G H, Lei Z D. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis. Water Resources Research, 2007, 43(4): W04426.
- [ 15 ] 孙福宝,杨大文,刘志雨,丛振涛. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究. 水利学报, 2007, 38(4): 409-416.
- [ 16 ] 张连鹏,刘登峰,张鸿雪,黄强,孟宪萌. 气候变化和人类活动对北洛河径流的影响. 水力发电学报, 2016, 35(7): 55-66.
- [ 17 ] 王汉卿. 大夏河流域地表水资源演变趋势及预测分析. 甘肃农业, 2011, (12): 12-14.
- [ 18 ] 朱佳君,张钰,唐颖丰,何彬. 洮河干流径流量变化趋势分析. 水土保持研究, 2011, 18(3): 110-115, 120-120.
- [ 19 ] 刘启宁,辛卓航,韩建旭,孙艳,张晓静,张弛. 变化环境下东北半干旱地区径流演变规律分析——以洮儿河流域为例. 水力发电学报, 2020, 39(5): 51-63.
- [ 20 ] 葛志楠,郝洁,鞠琴,董小涛,郝振纯. 渭河流域土地利用变化对径流的影响. 人民黄河, 2020, 42(6): 7-12, 17-17.
- [ 21 ] 易浪,任志远,张翀,刘雯. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系. 资源科学, 2014, 36(1): 166-174.
- [ 22 ] 李常斌,杨林山,杨文瑾,王帅兵. 洮河流域土地利用/土地覆被变化及其驱动机制研究. 地理科学, 2014, 34(7): 848-855.
- [ 23 ] 史银军. 气候变化和人类活动对洮河流域径流影响评估. 甘肃水利水电技术, 2020, 56(4): 5-8.
- [ 24 ] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [ 25 ] 刘昌明,张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588.
- [ 26 ] 张颖,郝兴明,花顶,孙海涛,李玉朋. 潜在蒸散发估算的简化方法及其在干旱区研究中的应用. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1431-1439.
- [ 27 ] Modarres R, Sarhadi A. Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D3): D03101.
- [ 28 ] 黄蓉,张建梅,林依雪,卜添荟,王鑫,薛紫月,李艳忠,马变铤,于志国,白鹏. 新安江上游流域径流变化特征与归因分析. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1771-1781.
- [ 29 ] 张丽梅,赵广举,穆兴民,高鹏,孙文义. 基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别. 生态学报, 2018, 38(21): 7607-7617.
- [ 30 ] Yang H B, Yang D W, Lei Z D, Sun F B. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation. Water Resources Research, 2008, 44(3): W03410.
- [ 31 ] Xu X Y, Yang D W, Yang H B, Lei H M. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin. Journal of Hydrology, 2014, 510: 530-540.
- [ 32 ] 杨林山. 气候变化与人类活动对洮河流域水文过程的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [ 33 ] Sun L, Wang Y Y, Zhang J Y, Yang Q L, Bao Z X, Guan X X, Guan T S, Chen X, Wang G Q. Impact of environmental change on runoff in a transitional basin: Tao River Basin from the Tibetan Plateau to the Loess Plateau, China. Advances in Climate Change Research, 2019, 10(4): 214-224.
- [ 34 ] 马俊龙. 大夏河流域综合治理情况分析. 农业科技与信息, 2016, (4): 58-59.