

## 专栏:黄河流域生态保护

## 黄河上游流域径流变化特征与归因分析研究

姬广兴<sup>1</sup>,高慧珊<sup>1</sup>,黄珺嫦<sup>1</sup>,杨旭<sup>2</sup>,张亚丽<sup>1</sup>

(1.河南农业大学 资源与环境学院,郑州 450046;2.河南省科学院地理科学研究所,郑州 450052)

**摘要:**基于黄河上游头道拐水文站 1982—2015 年的月尺度径流量数据,采用累积距平值方法识别径流突变年份,继而分析研究区生态水文气象要素的年内变化规律,然后采用多元线性回归方法,评估了气候变化和人类活动对黄河上游植被变化的贡献率。最后,运用 Budyko 假设方法计算了人类活动引起的植被变化和气候因子(包括降水、蒸发和气候变化引起的植被变化)对黄河上游径流变化的贡献率。结果表明:(1)头道拐水文站的年径流量存在着明显减小的趋势,并且年内分配更加均匀;(2)归一化植被指数、年平均降雨量和年平均参考蒸散发量均呈现逐渐增长的趋势;(3)人为因素在黄河上游植被覆盖率增长方面发挥了主要作用,贡献率为 75.02%;(4)气候因子(包括降水、蒸发和气候变化引起的植被变化)和人类活动引起的植被变化对头道拐水文站径流变化的贡献率分别为 36.81% 和 63.19%。

**关键词:**气候变化;植被变化;径流变化;人类活动;黄河上游

**中图分类号:**P333;TV121

**文献标志码:**A

许多研究表明全球气候正在变暖,环境也正在变化<sup>[1]</sup>。环境变化可分为两类:气候因素变化和人为因素变化,前者包括气温和降水的变化,温度和降水量变化会影响蒸散速率、土壤湿度和径流状况,后者包括河道筑坝、生活用水量和工业用水量的变化<sup>[2-3]</sup>。环境变化加剧了人水之间的供需矛盾,进一步扩大了水资源时空分布的差异,导致极端水文事件频率和频次日益增长<sup>[4]</sup>。

黄河上游的产水量提供了黄河流域 57% 以上的径流<sup>[5]</sup>,是黄河流域的主要产水区。近几十年来,黄河上游流域气温和蒸发量日益上升,人口增长和经济快速发展导致该区域生活和生产用水量剧增,直接导致黄河上游径流量呈逐渐减少的趋势,对黄河流域的生态安全和经济发展造成了严重危害<sup>[6]</sup>。因此,定量评价气候因素和人类活动对黄河上游径流变化的影响机制,可以为应对黄河流域水资源供需矛盾提供科学依据。

Budyko 假设方法是定量计算气候因素和人类活动对径流变化影响程度的有效方法,已被广泛应用<sup>[7-11]</sup>,在黄河流域也是适用的<sup>[12]</sup>。近年来,一些学者使用该方法定量计算了气候变化和人类活动对黄河上游径流变化的影响程度。ZHENG 等<sup>[13]</sup>利用 Budyko 公式计算了 1961—2010 年气候和下垫面变化对唐乃亥水文站径流变化的贡献率,发现气候因素是导致唐乃亥水文站径流变化的主要因素,贡献率在 60%~70% 之间。LIU 等<sup>[14]</sup>利用 Budyko 公式量化了 1964—2011 年间气候变化和人类活动对黄河上游十大流域径流

**收稿日期:**2022-04-08;**修回日期:**2022-04-23。

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2021YFD1700900);国家自然科学基金青年项目(42001220);2022 年河南省高等学校智库研究项目(2022ZKYJ07);河南省青年骨干教师计划项目(2019GGJS048);河南科技智库调研课题(HNKJZK-2022-04C);河南农业大学拔尖人才项目(30501031)。

**作者简介:**姬广兴(1990—),男,河南商丘人,河南农业大学讲师,博士,研究方向为变化环境下生态水文响应,E-mail:guangxingji@henau.edu.cn。

**通信作者:**张亚丽(1976—),女,河南南阳人,河南农业大学教授,研究方向为资源评价与规划,E-mail:skyali@henau.edu.cn。

变化的影响程度,发现人类活动是黄河流域十大沟流域年径流量减少的主要驱动因素,气候变化和人类活动对年径流变化的贡献率分别为 22%~32%和 68%~78%。

在 Budyko 假设中,径流变化主要受降水量( $P$ )、参考蒸发量( $ET_0$ )和下垫面参数( $\omega$ )的影响。 $\omega$  的数值大小取决于土壤类型、地形因素和土地覆被类型。土壤类型和地形因素一般不发生变化,因此  $\omega$  的数值大小主要与土地覆被类型有关。然而,已有研究往往将土地覆被变化都归因于人类活动。事实上,土地覆被变化受气候变化和人类活动的双重影响。因此,已有的研究往往低估了气候变化对径流变化的影响<sup>[15-16]</sup>。为了准确评估气候变化和人类活动对黄河上游径流变化的贡献率,必须区分自然因素和人为因素对黄河上游土地覆被类型变化的影响。黄河上游的建设用地面积约占 2%,因此黄河上游土地覆盖变化主要表现为植被覆盖变化,NDVI(Normalized Difference Vegetation Index,归一化植被指数)数据能够有效地反映植被的变化,故本文利用 NDVI 变化来表征土地类型的变化。

基于上述分析,本文首先采用累积距平值方法判断头道拐水文站 1982—2015 年径流数据的突变年份,然后使用多元线性回归方法计算了气候因素和人类活动对头道拐水文站集水区植被变化的贡献率,最后使用 Budyko 假设方法定量计算了气候因素和人类活动对头道拐水文站径流变化的贡献率。

## 1 区域概况和数据来源

### 1.1 研究区域概况

黄河上游流域是指河口镇以上的河段,位于 32°~42°N 和 95°~112°E 之间,河流总长度为 3 472 km,约占黄河流域总河长的 61%,流域面积 38.6×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占黄河流域总面积的一半以上。黄河兰州以上区域的产水量提供了黄河流域 57%以上的径流,是黄河流域的主要产区。该区域大部分位于西北半干旱区,地形起伏较大,总体呈现为西高东低,气候复杂多样,降水量分布极不均匀。

### 1.2 数据来源

黄河上游流域内及周边的 71 个气象站点逐日气象数据来自中国气象局网站(<http://www.cma.gov.cn>),包括平均气温、最高和最低气温、降水量、平均风速、日照时数、相对湿度等,时间范围为 1982—2015 年。每个气象站点的参考蒸散发量采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式计算得出。首先利用 Penman-Monteith 方程计算了 71 个气象站的日参考蒸散发量,计算了 71 个气象站的月降水量和参考蒸散发量。然后,在 ArcGIS 软件中使用 Kriging 插值方法获得黄河上游流域月降水量和参考蒸散发量的栅格数据。最后,利用 ArcGIS 软件提取得到黄河上游月尺度和年尺度降水量和参考蒸散发量。

黄河上游头道拐水文站月尺度径流观测数据来源于黄河水利委员会(<http://www.yrcc.gov.cn/>)和黄河水资源公报,时间范围为 1982 年至 2015 年;NDVI 数据来源于美国国家海洋和大气管理局 2016 年最新发布的 GIMMS NDVI3g version1 数据集(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>),时间范围为 1981 年 7 月到 2015 年 12 月,空间分辨率为 0.083 3°,时间分辨率为 15 d,NDVI 数据的预处理包括格式和坐标转换、数据裁剪、NDVI 真值计算。NDVI 真值是将 NDVI 数据的初始像素值乘以 0.000 1。最后采用平均值合成法提取得到黄河上游流域的月尺度和年尺度 NDVI 数值,NDVI 数值范围在 -1 和 1 之间。

## 2 研究方法

### 2.1 累积距平值方法

为了识别径流量时间序列的突变年份,本文采用累积距平值方法作为识别突变年份的方法,该方法为识别气候要素时间序列数据突变年份常用的方法之一,得到了广泛的应用<sup>[17-18]</sup>。该方法原理简单,根据气候要素累积距平值的变化趋势识别其突变年份,当曲线中某一时刻累积距平值的变化趋势发生改变并且趋势会持续较长一段时间,则表明该时刻就是发生突变的时间。

### 2.2 趋势分析方法

本研究采用 Mann-Kendall 趋势分析方法对研究时间段内径流量、降水量、参考蒸发量和 NDVI 的变化趋势进行分析。Mann-Kendall 趋势分析方法是一种非参数统计检验方法,不受少数异常值的影响,适用性

强,计算简便,是分析气象水文要素变化趋势最常用的方法之一。

### 2.3 多元线性回归方法

本文使用多元线性回归方法定量分析气候因素和人为因素对植被变化的贡献率,同时使用  $NDVI$  数据表征植被变化情况<sup>[19-20]</sup>.利用该方法定量计算不同因素对植被变化贡献率时,有两个前提假设:(1)假设人类活动与气候因素互不影响,除气候因素外,其他影响植被变化的因素都归类为人类活动.(2)假设基准期的植被变化只受气候因素的影响,不受人类活动的影响。

为了评估气候因素和人为因素对植被变化的影响,将  $NDVI$  时间序列数据分为两部分:基准期( $T_1$ )和变化期( $T_2$ )。

$$\Delta \overline{NDVI} = \overline{NDVI}_{T_2} - \overline{NDVI}_{T_1}$$

其中, $\Delta \overline{NDVI}$ 为两个时期的年平均  $NDVI$  的变化值, $\overline{NDVI}_{T_1}$ 和 $\overline{NDVI}_{T_2}$ 分别为基准期和变化期的平均  $NDVI$  值.而  $NDVI$  的变化值可归因于气候因素和人为因素的影响 ( $\Delta \overline{NDVI} = \Delta \overline{NDVI}_C + \Delta \overline{NDVI}_H$ ).

利用基准期( $T_1$ )的  $NDVI$ 、降水量和参考蒸发量数据建立多元线性回归方程:

$$NDVI_{T_1} = a * P_n + b * ET_{0T_1} + c,$$

$a$  和  $b$  分别表示回归方程系数, $c$  表示常数项。

把变化期的降水量和参考蒸发量数据代入多元线性回归方程,可以计算得到仅在气候因素影响下的  $T_2$  时期  $NDVI$  模拟值( $NDVI_{T_2,s}$ ),

$$NDVI_{T_2,s} = a * P_{T_2} + b * ET_{0T_2} + c.$$

人类活动和气候变化对  $NDVI$  变化的贡献率可分别计算得到:

$$\Delta \overline{NDVI}_H = \overline{NDVI}_{T_2} - \overline{NDVI}_{T_2,s}, \Delta \overline{NDVI}_C = \overline{NDVI}_{T_2,s} - \overline{NDVI}_{T_1},$$

$$\eta NDVI_H = \Delta \overline{NDVI}_H / \Delta \overline{NDVI}, \eta NDVI_C = \Delta \overline{NDVI}_C / \Delta \overline{NDVI},$$

其中, $\overline{NDVI}_{T_2,s}$ 表示仅在气候因素影响下的  $T_2$  时期的  $NDVI$  模拟值的多年平均值. $\eta NDVI_H$  和  $\eta NDVI_C$  分别表示人类活动和气候因素对植被变化的贡献率。

### 2.4 Budyko 假设

黄河上游流域的多年水量平衡方程的公式为: $R = P - ET$ . $R$ 为(径流深/mm); $P$ (降水量/mm); $ET$ (实际蒸发量/mm).可根据 Choudhury-Yang 公式计算得到<sup>[21-22]</sup>,  $ET = \frac{P \times ET_0}{(P^\omega + ET_0^\omega)^{1/\omega}}$ , $\omega$ 表示下垫面参数; $ET_0$ (参考蒸发量/mm).可用 Penman-Monteith 公式计算得到  $R = P - \frac{P \times ET_0}{(P^\omega + ET_0^\omega)^{1/\omega}}$ ,其中, $\epsilon_P, \epsilon_{ET_0}, \epsilon_\omega$ 分别表示降水、参考蒸发量和下垫面参数对径流量的弹性系数,计算公式如下:

$$\epsilon^P = \frac{(1 + (\frac{ET_0}{P})^\omega)^{1/\omega+1} - (\frac{ET_0}{P})^{\omega+1}}{(1 + (\frac{ET_0}{P})^\omega)[(1 + (\frac{ET_0}{P})^\omega)^{1/\omega} - (\frac{ET_0}{P})]} , \epsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1 + (\frac{ET_0}{P})^\omega)[1 - (1 + (\frac{ET_0}{P})^{-\omega})^{1/\omega}]},$$

$$\epsilon_\omega = \frac{\ln(1 + (\frac{ET_0}{P})^\omega) + (\frac{ET_0}{P})^\omega \ln(1 + (\frac{ET_0}{P})^{-\omega})}{\omega(1 + (\frac{ET_0}{P})^\omega)[1 - (1 + (\frac{ET_0}{P})^{-\omega})^{1/\omega}]}$$

以径流量的突变年份为基础,将径流量时间序列数据分为两部分:基准期( $T_1$ )和变化期( $T_2$ ), $T_1$ 时期的多年平均径流深为  $R_1$ , $T_2$ 时期多年平均径流深为  $R_2$ .可计算得到年平均径流深的变化量  $\Delta R = R_2 - R_1$ .

径流变化归因于气候变化( $\Delta R_C$ )和土地覆被变化( $\Delta R_L$ ).黄河上游流域的城镇建设用地只占总面积的 2%左右,因此土地覆被变化主要反映在植被的变化. $\Delta R_L$ 可分为两部分,一部分是由气候变化引起的( $\Delta R_{LC}$ ),另一部分是由人为因素引起的( $\Delta R_{LH}$ ).

$$\Delta R = \Delta R_C + \Delta R_L = \Delta R_P + \Delta R_{ET_0} + \Delta R_{LC} + \Delta R_{LH},$$

$$\Delta R_P = \frac{\partial R}{\partial P} \times \Delta P, \Delta R_{ET_0} = \frac{\partial R}{\partial ET_0} \times \Delta ET_0, \Delta R_\omega = \frac{\partial R}{\partial \omega} \times \Delta \omega,$$

式中,  $\Delta P, \Delta ET_0, \Delta \omega$  分别表示从  $T_1$  时期到  $T_2$  时期流域年平均降水量、参考蒸发量和土地覆盖状况的变化量。 $\Delta R_P, \Delta R_{ET_0}, \Delta R_\omega$  分别表示降水、参考蒸发量和下垫面参数变化导致的径流变化。

在此基础上,气候变化( $\eta_{RC}$ )和人类活动( $\eta_{RH}$ )对径流变化的贡献率可使用以下公式计算得到: $\Delta R = \Delta R_P + \Delta R_{ET_0} + \eta_{NDVIC} \cdot \Delta R_L + \eta_{NDVIH} \cdot \Delta R_L, \eta_{RC} = (\Delta R_P + \Delta R_{ET_0} + \eta_{NDVIC} \cdot \Delta R_L) / \Delta R \times 100, \eta_{RH} = \eta_{NDVIH} \cdot \Delta R_L / \Delta R \times 100.$

### 3 结果和分析

#### 3.1 径流变化突变分析

从图 1 可以发现,虽然 1982 至 1990 年头道拐水文站径流的累积距平值的变化趋势在 1986—1988 年发生了一些波动,但时间间隔较短,这一时期内径流累积距平值总体变化趋势是增加的。从 1991—2015 年水文站径流的累积距平值的变化趋势在 2012 年和 2014 年出现了一些波动,但都是短期波动,其总体趋势呈现出下降,可以看出头道拐水文站径流的累积距平值在 1990 年有显著性的转折,本文认为 1990 年是头道拐水文站径流发生突变的转折年份。

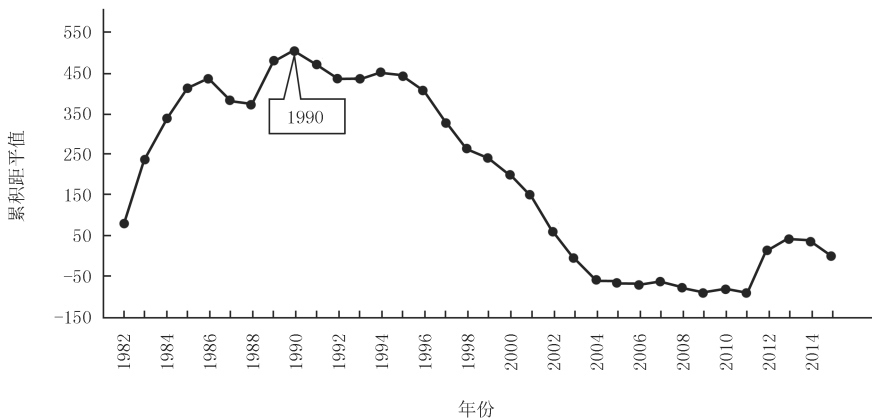


图 1 头道拐水文站 1982—2015 年径流的累积距平值方法突变分析结果

Fig.1 Mutation analysis results of cumulative anomaly method of runoff at toudaogui hydrologic station from 1982 to 2015

#### 3.2 生态气象水文要素趋势分析及年内变化特征

黄河上游流域径流量、NDVI、平均降水量和平均参考蒸发量的年际变化趋势的 Mann-Kendall 检验结果如表 1 所示。结果表明,头道拐水文站的年径流量从 1982 年到 2015 年表现为径流量不显著减少的趋势,而黄河上游年平均降水量从 1982 年到 2015 年呈现出不显著增长的趋势,黄河上游参考蒸发量和 NDVI 数值从 1982 年到 2015 年呈现出显著增长的趋势,NDVI 平均每年增长了 0.000 6,参考蒸发量平均每年增长 1.168 5 mm。

表 1 黄河上游生态气象水文要素的 Mann-Kendall 趋势检验结果

Tab. 1 Mann-Kendall trend test results of eco meteorological and hydrological elements in the upper reaches of the Yellow River

变量	$\beta$	Z	显著性	变量	$\beta$	Z	显著性
径流量	-1.567 8	-1.512 1	不显著	参考蒸发量	1.168 5	2.698 0	显著
降水量	0.089 9	0.059 3	不显著	NDVI	0.000 6	4.417 7	显著

黄河上游流域径流量、NDVI、平均降水量和平均参考蒸发量的年内变化情况如图 2 所示。由图 2(a)可知,基准期内黄河上游径流量 1 至 3 月在不断增加,4 至 5 月呈下降趋势,6 至 8 月又呈快速增加趋势,到

8月达到峰值,8至12月呈阶梯状下降趋势;突变期内径流量1至3月处于上升趋势,4至5月呈急速下降趋势,5至9月不断增加并达到峰值,10至12月又呈下降趋势.整体来看,突变期与基准期相比,在1至12月中,除3月以外,相较于基准期径流量高,其他月份都处于下降状态.黄河上游大部分流经半干旱地区,是我国青海、宁夏、甘肃和内蒙古农业用水的主要来源,因此可能是由于流经省份对农业用水的需求,导致该流域在4至5月径流量急速下降的主要原因.

由图2(b)可知,基准期和突变期内黄河上游NDVI在1至8月不断增加,8至12月又呈下降趋势;突变期内NDVI值较高于基准期NDVI值,主要可能是在气候变化和人类活动双重驱动下促使NDVI不断上升的主要原因.由图2(c)可知,基准期内黄河上游降水量1至8月在不断增加,并在8月达到峰值为75.67 mm,8至12月呈快速下降趋势;突变期内径流量1至7月呈快速上涨趋势,到7月增加到最大值为79.78mm.突变期内1月、7月、9月、11月和12月的降水量比基准期内降水量多.由图2(d)可知,基准期和突变期内黄河上游参考蒸发量1至7月在不断增加,并在7月达到峰值.7至12月又呈下降趋势;整体来看,在每个月份中,突变期参考蒸发量相较于基准期参考蒸发量高,主要可能是在气候变暖和NDVI的不断加双重作用加持下,进而导致参考蒸发量不断上升.

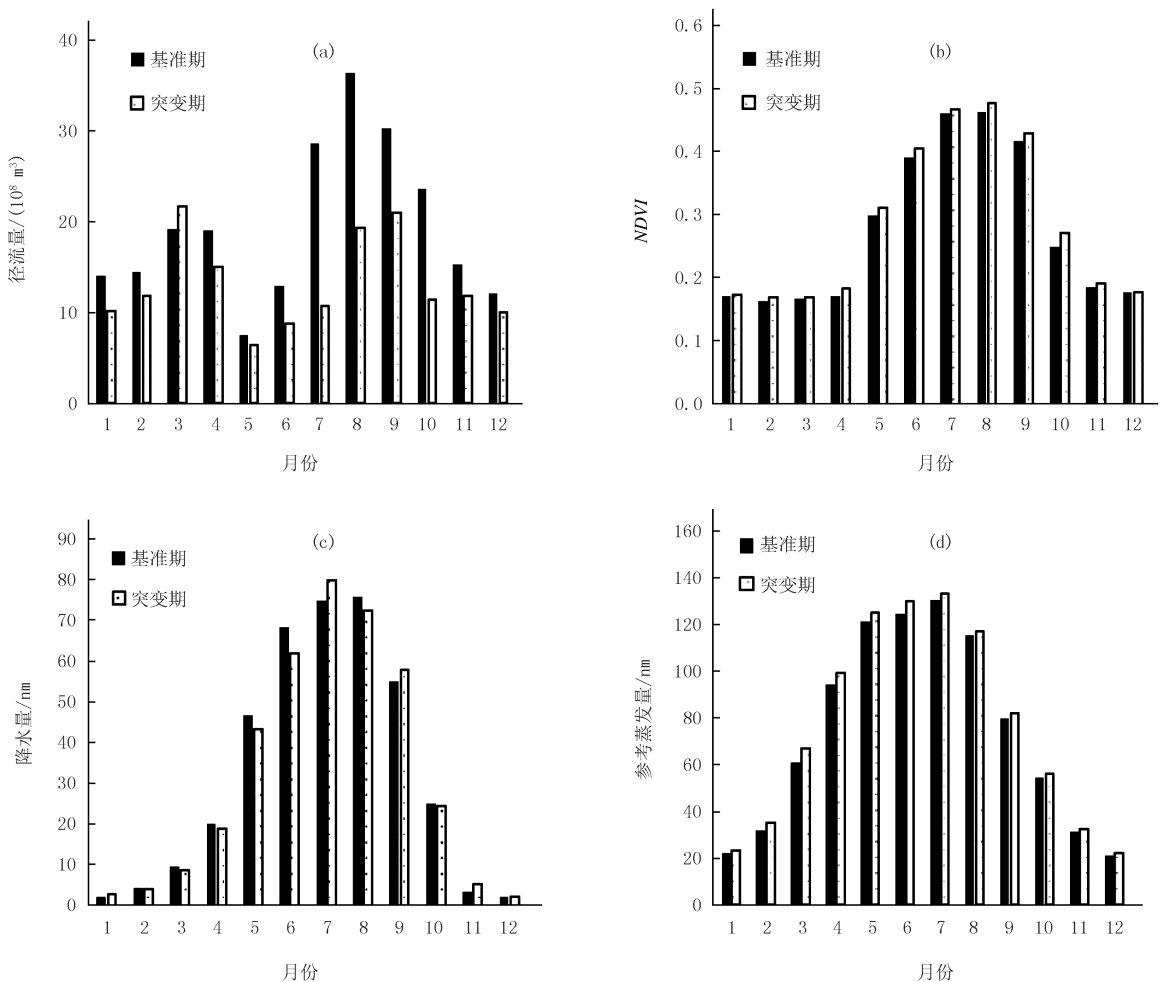


图2 黄河上游流域径流量(a)、NDVI(b)、平均降水量(c)和平均参考蒸发量(d)的年内变化情况

Fig. 2 Intra-annual Changes of Runoff(a), NDVI(b), Precipitation(c) and Reference Evaporation(d) in the Upper Yellow River Basin

### 3.3 气候和植被变化对径流变化影响的贡献率计算

根据3.1节的突变分析结果,将头道拐水文站1982—2015年径流数据划分为2个时期: $T_1$ 时期(1982至1990年)和 $T_2$ 时期(1991至2015年).已有研究发现NDVI与气候因素密切相关,并且可以利用多元线性回归方法定量评估自然因素和人为因素对土地覆盖变化(NDVI变化)的影响程度<sup>[23-24]</sup>,因此本文首先



建立了  $T_1$  时期  $NDVI$  与降水和参考蒸发量的关系函数(表 2),然后计算得到气候变化和人为因素对  $NDVI$  变化的贡献率(表 2).结果发现对于黄河上游流域,人为因素在增加植被覆盖率方面发挥了主要作用,贡献率超过了 75%.

基准期和变化期径流深( $R$ )、降雨( $P$ )、潜在蒸散发( $ET_0$ )及下垫面参数( $\omega$ )的统计值见表 3.基于黄河上游基准期和变化期年均降雨、年均潜在蒸散发及下垫面弹性系数的值,求得的弹性系数,然后分别计算由于三者驱动引起的径流变化量和贡献率(表 4).

表 2 黄河上游流域植被变化的归因分析

Tab. 2 Attribution analysis of vegetation changes in the Upper Yellow River Basin

水文站	拟合方程	$\Delta \overline{NDVI}$	$\overline{NDVI}_{T_1}$	$\overline{NDVI}_{T_{2,S}}$	$\overline{NDVI}_{T_2}$	$\eta_{NDVI_C}/\%$	$\eta_{NDVI_H}/\%$
头道拐	$NDVI = 3.652 \times 10^3 P + 8.405 \times 10^{-6} ET_0 + 0.1572 (R^2 = 0.86)$	0.009 7	0.275 2	0.277 6	0.284 9	24.98	75.02

表 3 黄河上游不同时期的水文变量特征值

Tab. 3 Hydrologic variables characteristic values in different periods in the Upper Yellow River

水文站	时期	$ET_0/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$P/\text{mm}$	$\omega$
头道拐	$T_1$	906.51	63.31	391.26	1.46
	$T_2$	929.40	43.64	386.63	1.70
	$\Delta$	22.89	-19.67	-4.63	0.24

从表 3 和表 4 可以看出,相对于基准期,黄河上游流域突变期多年平均降雨量减少了 4.63 mm,导致径流深减少了 1.38 mm,贡献率约为 7.54%;潜在蒸散量增加了 22.89 mm,致使径流深减少了 1.65 mm,贡献率约为 9.03%;而人类活动引起的下垫面改变,导致变化期下垫面特征参数  $\omega$  增加了 0.24,致使径流量减少了 15.25 mm.地表覆盖变化引起的径流变化可分为自然因素引起的径流变化和人为因素引起的径流变化两部分,其贡献比例可由表 2 获得.

结果表明,气候变化和人为因素对头道拐水文站点径流变化的贡献率分别为 36.81%和 63.19%.总体而言,人类活动导致的土地利用/覆盖变化(主要指植被变化)在减少径流方面发挥了至关重要的作用.

表 4 头道拐水文站径流变化的归因分析

Tab. 4 Attribution analysis of runoff change at toudaoguai hydrologic station

$\epsilon_P$	$\epsilon_{ET_0}$	$\epsilon_\omega$	$\Delta R_P$	$\Delta R_{ET_0}$	$\Delta R_{LC}$	$\Delta R_{LH}$	$\eta_{RP}$	$\eta_{RET_0}$	$\eta_{RNDVI}$	$\eta_{RH}$
2.41	-1.41	-2.15	-1.38	-1.65	-3.81	-11.44	7.54%	9.03%	20.84%	62.59%

## 4 结论与讨论

本文首先利用累积距平值方法作为识别突变年份的方法,将头道拐水文站的径流时间序列数据划分为多个时期,然后分析了 1982 年至 2015 年黄河上游流域年径流量, $NDVI$ ,平均降水量和平均参考蒸发量的时间变化趋势及年内变化特征,然后定量评估了气候因素和人类活动对黄河上游植被变化的贡献率,最后利用 Budyko 假设方法分别定量计算了气候因素和 LULC(主要是植被变化)对头道拐水文站径流变化的影响.研究结果如下:

(1)头道拐水文站的年径流量存在着明显减小的趋势,并且年内分配更加均匀,这可能是人类活动、气候变化和该地区植被覆盖状况的改善共同导致的.

(2) $NDVI$ 、年平均降雨量和年平均参考蒸散发量均显现为逐渐增长的趋势.

(3)采用了累积距平值方法作为识别突变年份的方法,发现头道拐水文站径流变化的基准期为 1982—1990 年.相较于基准期,人为因素在头道拐水文站集水区域的植被覆盖率增长方面发挥了主要作用,影响因素所占比例超过了 75%.

(4)气候因素(降水、蒸发以及气候变化引起的植被变化)和人为因素导致的植被变化对黄河上游径流变

化的贡献率,分别为 36.81%和 63.19%。总体而言,人类活动导致的土地利用/覆盖变化(主要指植被变化)是致使黄河上游流域径流减少的主导因素。政府部门应高度重视植被快速生长对径流衰减的影响,并积极应对植被恢复不当造成的水资源减少问题,可以根据实际情况划分为重点保护区和植被恢复区。重点保护区以优化植被结构为主,植被恢复区应进行适当的人工植被恢复。

本文定量计算了气候和植被变化对头道拐水文站径流变化的贡献率,尽管本研究对数据进行了严格的控制,但仍然存在一些不确定因素。(1)虽然本文利用空间插值方法对气象站点的降水和参考蒸发量进行了处理,但无法完全精确地表达出黄河上游降水和参考蒸发量的实际分布状况。(2)本研究计算气候和植被变化对径流变化的贡献率,是以“基准期径流未受到或较少受人类行为的影响”为假设进行的,这一假设会对研究结果产生一些不确定性影响。(3)虽然黄河上游建设用地面积约占 2%,占比较少,但利用 *NDVI* 数据表征土地类型变化会对研究结果产生一些不确定性影响。

## 参 考 文 献

- [1] KANG S, ELTAHIR E A B. North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2894.
- [2] JI G X, LAI Z Z, XIA H B, et al. Future runoff variation and flood disaster prediction of the Yellow River Basin based on CA-Markov and SWAT[J]. *Land*, 2021, 10(4): 421.
- [3] JI G X, SONG H Y, WEI H J, et al. Attribution Analysis of Climate and Anthropogenic Factors on Runoff and Vegetation Changes in the Source Area of the Yangtze River from 1982 to 2016[J]. *Land*, 2021, 10(6): 612.
- [4] MANGINI W, VIGLIONE A, HALL J, et al. Detection of trends in magnitude and frequency of flood peaks across Europe[J]. *Hydrological sciences journal*, 2018, 63(4): 493-512.
- [5] ZHANG H, SINGH V, ZHANG Q, et al. Variation in ecological flow regimes and their response to dams in the upper Yellow River basin[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11): 923-938.
- [6] LYU J, ZHANG Z, SHEN B. Impacts of climate change on runoff in the Yellow River, China[J]. *Journal-American Water Works Association*, 2014, 106(5): 225-232.
- [7] LIU H, WANG Z, JI G X, et al. Quantifying the impacts of climate change and human activities on runoff in the Lancang river basin based on the Budyko hypothesis[J]. *Water*, 2020, 12(12): 3501.
- [8] YAN D, LAI Z, JI G X. Using Budyko-Type Equations for Separating the Impacts of Climate and Vegetation Change on Runoff in the Source Area of the Yellow River[J]. *Water*, 2020, 12(12): 3418.
- [9] ZHANG X, DONG Q J, CHENG L, et al. A Budyko-based framework for quantifying the impacts of aridity index and other factors on annual runoff[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124224.
- [10] WANG T H, YANG H B, YANG D W, et al. Quantifying the streamflow response to frozen ground degradation in the source region of the Yellow River within the Budyko framework[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 301-313.
- [11] LIU J Y, ZHANG Q, SINGH V P, et al. Contribution of multiple climatic variables and human activities to streamflow changes across China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 545: 145-162.
- [12] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(4): 409-416.  
SUN F B, YANG D W, LIU Z Y, et al. Study on coupled water-energy balance in Yellow River Basin based on Budyko Hypothesis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(4): 409-416.
- [13] ZHENG Y T, HUANG Y F, ZHOU S, et al. Effect partition of climate and catchment changes on runoff variation at the headwater region of the Yellow River based on the Budyko complementary relationship[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 1166-1177.
- [14] LIU T, HUANG H Q, SHAO M G, et al. Integrated assessment of climate and human contributions to variations in streamflow in the Ten Great Gullies Basin of the Upper Yellow River, China[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2020, 68(3): 249-259.
- [15] 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 Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 530-540.
- [16] LIANG W, BAI D, WANG F Y, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [17] 王彦君, 王随继, 苏腾. 1955—2010 年松花江流域不同区段径流量变化影响因素定量评估[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(1): 65-75.  
WANG Y J, WANG S J, SU T. Quantification of impacts of precipitation and human activities on runoff changes in different sections of Songhua River during 1955-2010[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(1): 65-75.
- [18] 田蕾, 王随继. 近 60 年来辽河流域径流量变化及其主控因素分析[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 153-159.  
TIAN L, WANG S J. Analysis of the runoff change and main influencing factors in the Liaohe River Basin[J]. *Research of Soil and Water*

- Conservation, 2018, 25(1): 153-159.
- [19] LI J J, PENG S Z, LI Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 260-270.
- [20] JI G X, HUANG J C, GUO Y L, et al. Quantitatively calculating the contribution of vegetation variation to runoff in the middle reaches of Yellow River using an adjusted budyko formula[J]. Land, 2022, 11(4): 535.
- [21] 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.
- [22] 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): W03410
- [23] GAO J B, JIAO K W, WU S H. Investigating the spatially heterogeneous relationships between climate factors and NDVI in China during 1982 to 2013[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(10): 1597-1609.
- [24] GUO L H, ZUO L Y, GAO J B, et al. Revealing the fingerprint of climate change in interannual NDVI variability among biomes in Inner Mongolia, China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(8): 1332.

## Study on the characteristics and attribution of runoff change in the upper Yellow River Basin

Ji Guangxing<sup>1</sup>, Gao Huishan<sup>1</sup>, Huang Junchang<sup>1</sup>, Yang Xu<sup>2</sup>, Zhang Yali<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;

2. Institute of Geographical Sciences, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Based on the monthly runoff data of Toudaoguai hydrological station from 1982 to 2015, the cumulative anomaly method was used to identify the mutation year of runoff, and the intra-annual variation law of ecological hydro-meteorological elements in the upper reaches of Yellow River was analyzed. Next, the contribution rates of climate factors and human activities to the vegetation change in the upper reaches of Yellow River were calculated with a multiple linear regression method. Finally, the Budyko hypothesis was applied to calculate the contribution rates of climatic factors (including precipitation, potential evaporation, and subsequent vegetation changes) and vegetation changes caused by human activities on the runoff in the Tangnaihaidrometric station. The results showed that: (1) The annual runoff of Toudaoguai hydrological station has an obvious decreasing trend, and its intra-annual distribution is more uniform; (2) Precipitation, potential evaporation and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) all showed an increasing trend; (3) Human factors played a major role in the growth of vegetation coverage in the upper reaches of the Yellow River, with a contribution rate of 75.02%; (4) The contribution rates of climatic factors (including precipitation, potential evaporation, and subsequent vegetation changes) and vegetation changes caused by human activities to the runoff change at Tangnaihaidrometric Station are 36.81% and 63.19% respectively.

**Keywords:** climate change; vegetation change; runoff variation; human activities; the upper reaches of Yellow River

[责任编辑 陈留院 赵晓华]