

嘉陵江上游径流变化及其影响因素归因分析

师卫钊^{1,2}, 何毅^{1,2,4}, 邵祎婷³

(1.西北大学城市与环境学院,西安 710127;

2.陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,西安 710127;3.浙江水利水电学院水利与环境工程学院,杭州 310018;4.中国科学院水利部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,陕西 杨凌 712100)

摘要:近年来,受气候变化与人类活动的双重影响,许多国内外河流的河川径流都受到强烈影响。以嘉陵江上游西汉水的礼县水文站控制流域为研究区,在对 1960—2016 年研究区年径流量进行突变点分析和趋势分析的基础上,使用 8 种基于 Budyko 假设的气候弹性系数法的水量平衡方程式进行流域径流变化归因分析。结果表明:(1)研究区潜在蒸散发呈显著增加趋势($p < 0.01$),径流量呈显著减小趋势($p < 0.01$),降水量呈不显著减少趋势($p > 0.1$),径流量的突变点发生在 1994 年,并以此为界,把研究时段划分为基准期和变化期;(2)8 种基于 Budyko 假设的方法得出的气候变化对于径流减少的贡献率为 40%~50%,人类活动贡献率为 50%~60%,占主导作用。在气候变化中,8 种方法得出的流域降水的敏感性系数为 2~3,流域蒸散发的敏感性系数为 -1~-3;(3)人类活动对于径流减少的主要作用形式是通过改变下垫面来表现的。由于植被保护措施实施,1990—2010 年研究区域的林地面积增加 68.42 km²,在所有土地类型中变化最大,表明人类活动对于下垫面的影响显著。

关键词:嘉陵江上游;径流变化;Budyko;归因分析;下垫面变化

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)03-0124-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.017

Attribution Analysis of Runoff Change and Its Influencing Factors in the Upper Reaches of Jialing River

SHI Weizhao^{1,2}, HE Yi^{1,2,4}, SHAO Yiting³

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127;

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127;

3. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In recent years, due to the dual impact of climate change and human activities, the runoff in many domestic and foreign rivers has been strongly affected. The control basin of Lixian Hydrologic Station in the Xihanshui River basin of the upper reaches of Jialing River was taken as the study area. On the basis of abrupt change point analysis and trend analysis of annual runoff from 1960 to 2016, eight water balance equations of climate elasticity based on the Budyko frame were used to analyze the attribution of runoff changes. The results showed that: (1) The potential evapotranspiration in the study area showed a significant increasing trend ($p < 0.01$), the runoff showed a significant decreasing trend ($p < 0.01$), and the precipitation showed a non-significant decreasing trend ($p > 0.1$). The abrupt change of runoff occurred in 1994, and the study period was divided into the base period and the change period. (2) The contribution rate of climate change to runoff reduction by 8 methods based on Budyko hypothesis ranged from 40% to 50%, the contribution of human activities is between 50% and 60%, taking the leading role. In climate change, the sensitivity coefficient of precipitation obtained by the eight methods is between 2 and 3, and the sensitivity

收稿日期:2022-09-24

资助项目:中国南北过渡带综合科学考察项目(2017FY100904);中国博士后科学基金项目(2018M633602);陕西省博士后科研项目(2017BSHEDZZ144)

第一作者:师卫钊(2001—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事生态水文与水土保持研究。E-mail:202221174@stumail.nwu.edu.cn

通信作者:何毅(1985—),男,广西梧州人,副教授,硕士生导师,主要从事生态水文与水土保持研究。E-mail:yihe@nwu.edu.cn

coefficient of evapotranspiration is between -1 and -3 . (3) The main effect of human activities on the reduction of runoff is represented by changing the underlying surface. Due to the implementation of vegetation protection measures, the forest area in the study area increased by 68.42 km^2 from 1990 to 2010, the largest change among all land types, indicating that the significant impact of human activities on the underlying surface.

Keywords: the upper reaches of Jialing River; runoff change; Budyko; attribution analysis; underlying surface change

在全球变化背景下,气候变化和人类活动成为影响河川径流的两大因素。近年来,国内外学者针对嘉陵江流域径流变化及其影响因素做了大量研究。Shao 等^[1]利用水平衡方程、双累积曲线和线性回归分析对长江上游径流量进行研究,发现研究区径流量呈减少趋势,人类活动和气候变化是流域径流变化显著的 2 个原因,其中气候因素是主导因素,其影响率逐年递增。范利杰等^[2]利用水文统计学方法揭示,嘉陵江上游水沙关系正在逐步改善,主要影响因素由自然原因转为人为原因,人类活动占主导因素。嘉陵江流域径流减少除气候因素外,也是人类活动因素所导致的。某些区域人类活动对生态环境的破坏严重,尤其是对流域上游下垫面的破坏,使得流域水环境受到破坏,甚至出现枯水期径流量为零的场景。宫渊波等^[3]利用 GIS 分析功能对嘉陵江降水—径流关系进行分析,流域的径流不仅受流域面积和降水的作用,还受到流域下垫面的作用。流域的下垫面特征,特别是植被因子,是影响径流的主要因素,植被恢复会减少径流。密度较高的森林或者是密闭度高的森林都能有效地增大水分向地下渗入,使地面水流减小。关春晖^[4]对于嘉陵江上游流域进行研究,表明,嘉陵江上游区域的各个水文参数都有负向的趋向,原因是人类活动导致的全球变化和对于流域下垫面的影响。

近年来,针对径流变化归因分析的方法主要有传统的水文统计方法、水文模型方法、基于 Budyko 假设的水文敏感性分析方法。基于 Budyko 假设的水文敏感性分析方法受到许多国内外学者的应用,由于其参数少,处理过程较为简便,准确率以及稳定性高,且比较适用于流域径流的长序列尺度分析。目前,此种方法已被应用于各大尺度流域的径流分析,叶婷等^[5]利用 Budyko 框架下的 Choudhury-Yang 公式对淮河中上游径流变化进行归因分析得出,气候变化和人类活动使得大部分径流特征值呈下降趋势,其中,人类活动为主导因素。杜嘉妮等^[6]利用 Budyko-Fu 公式对于湟水流域进行径流归因分析表明,湟水年径流量呈不显著减少趋势,1981—1990 年降水是影响径流增加的主要因素,1990 年后下垫面是导致径流减少的主要因素。

目前,在研究嘉陵江流域径流变化时,重点研究嘉陵江流域径流特征、水资源开发利用与生态环境变

化、发展特点及成因、气候变化与径流的关系以及它们之间的响应关系等。且大部分是基于单个水文模型或者水文统计等方法得出的结果,较少有基于多种 Budyko 假设水量平衡方程进行对比计算,导致结果存在一定的偶然性和不确定性,而采用多种方法进行径流变化归因分析,所得结果可以相互对比印证,增加结果的可信度。因此,基于 1960—2016 年嘉陵江上游礼县站的径流资料,使用 8 种基于 Budyko 假设的水量平衡方程进行对比计算,并结合植被和土地利用数据进行归因分析,以揭示嘉陵江上游近 60 年来径流变化及其影响因素,为该流域进一步开发和流域水资源可持续利用提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究流域与数据

嘉陵江是长江的一级支流,流域面积 16 万 km^2 ,流经三省一市(陕西省、甘肃省、四川省和重庆市),最终汇入长江,干流全长 $1\,345 \text{ km}$,流域面积 3.92 万 km^2 ^[7]。

西汉水是嘉陵江上游的支流之一,西汉水流域不仅是嘉陵江流域唯一一片黄土区,也是嘉陵江流域中水土流失较严重的区域^[8]。研究区位于甘肃省礼县,为西汉水礼县(原名为顺利峡)水文站($105^{\circ}11'18''\text{E}$, $34^{\circ}11'02''\text{N}$)以上的控制面积约 $3\,000 \text{ km}^2$,1960—2016 多年平均径流量为 2.57 亿 m^3 ,多年平均降水量为 541 mm ,多年平均蒸散发量为 895 mm ,图 1 为西汉水礼县水文站控制区的数字高程模型(DEM)。西汉水发源于天水齐寿山西麓,年平均径流量约为 16 亿 m^3 ,而含沙量却是嘉陵江含沙量的 9 倍,年平均输沙量 $2\,190 \text{ 万 t}$,侵蚀模数 $2\,290 \text{ t}/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ ^[9]。

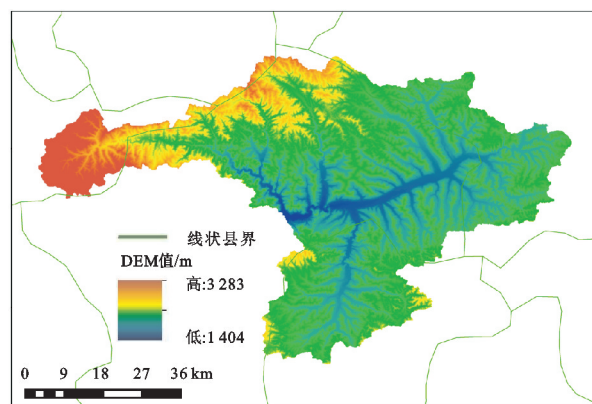


图 1 研究区域 DEM

从甘肃省水文水资源局收集到西汉水礼县水文站 1960—2016 年的径流量数据,从资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)获得研究区及其周边 8 个气象站逐日的降水、平均气温、最高气温、最低气温、平均气压、日照时间、日平均相对湿度和平均风速等气象数据,西汉水流域 DEM 数据,甘肃省土地利用数据,全国 NDVI 数据。利用反距离加权插值法,通过 ArcGIS 10.8 软件提取研究区域的平均年降雨量和潜在蒸散量值,之后通过 Budyko 方程式进行计算并对比分析。

1.2 研究方法

1.2.1 潜在蒸散发计算方法 潜在蒸散发方法为 FAO(food and agriculture organization)56 推荐的 Penman-Monteith 公式的计算获得^[10],公式为:

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

式中: R_n 为地面净辐射 $[\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$; G 为土壤热通量 $[\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$; γ 为干湿计常数 $(\text{kPa}/^\circ\text{C})$; T_{mean} 为日平均温度 $(^\circ\text{C})$; U_2 为 2 m 高度处的风速 (m/s) ; e_s 为饱和水汽压 (kPa) ; e_a 为实际水汽压 (kPa) ; Δ 为水汽压曲线斜率 $(\text{kPa}/^\circ\text{C})$ 。

1.2.2 基于 Budyko 假设的径流变化归因方法 对于 1 个已知的流域,依据水量平衡原理,可以得到:

$$P = E + Q + \Delta S$$

式中: P 为研究区降水量 (mm) ; Q 为研究区径流深度 (mm) ; E 为研究区实际蒸散量 (mm) ; ΔS 为流域内水储量的变化量,长时间尺度可忽略不计。作为潜在蒸散量和降水量比值的干旱指数 $(\Phi = E_0 / P)$ 可以反映 1 个流域内部的干湿状况,若流域干旱指数小于 1,说明流域蒸发能力小于降水能力,流域较为湿润;如果流域干旱指数大于 1,说明流域的降水能力小于流域的蒸发能力,流域较为干旱。因此,多年平均干旱指数反映流域气候变化之间相互作用的代表性指标,表现 1 个区域的干旱或湿润程度。基于干旱指数,至今已有多数 Budyko 公式以及平衡方程来描述 Budyko 假设,基于这些方法已有较多的研究。8 种 Budyko 方程中后 4 个方程是参数方程,得出的结果较前 4 个无参数方程有更大的精准性和灵活性。

依据流域水热平衡理论,在特定研究流域的自然环境状况下,长时间序列的流域水文气候特性符合水分和能量平衡原理,即 Budyko 假设。其认为流域长期的年均蒸散发 (E) 与年均降水 (P) 比率由流域水热平衡决定,与流域干旱指数 (E/P) 存在函数关系 (f) ,表达式为:

$$E/P = f(E_0/P) = f(\Phi)$$

式中: E_0 为多年流域平均的年潜在蒸散发量 (mm) ; E 为流域多年平均的年实际蒸散发量 (mm) ; P 为流域多年平均的降雨量 (mm) ; Φ 为干旱指数 $(\Phi = E_0 / P)$,可以反映流域的气候水分状况。结合流域长期平均水量平衡方程 $(P = E + Q + \Delta S)$,可以求解。

表 1 中后 4 个方程中的参数 (m, ω, n, ∂) 反映流域特征,是植被类型、土壤性质和地形特征的函数,也称为人类活动特征参数,或下垫面参数。做长时间序列分析时,则假定流域内水储量的变化量为 0,则后 4 个 Budyko 型方程中的参数可由 E_0 、 P 、 Q 来进行计算求得。

表 1 8 种基于 Budyko 假设的方程式

类型	$f(\Phi)$
Schreiber ^[11]	$f(\Phi) = 1 - e^{-\Phi}$
Oldelkop ^[12]	$f(\Phi) = \Phi \tan h(1/\Phi)$
Budyko ^[13]	$f(\Phi) = (\Phi \tan h(1/\Phi) - e^{-\Phi})^{1/2}$
Pike ^[14]	$f(\Phi) = 1 / \sqrt{1 + \Phi^{-2}}$
Fu 等 ^[15]	$f(\Phi) = 1 + \Phi - (1 + \Phi^m)^{1/m}$
Zhang 等 ^[16]	$f(\Phi) = (1 + \omega\Phi) / (1 + \omega\Phi + 1/\Phi)$
Choudhury ^[17]	$f(\Phi) = 1 / ((1/\Phi)^n + 1)^n$
Wang 等 ^[18]	$f(\Phi) = (1 + \Phi - \sqrt{(1 + \Phi)^2 - 4\partial(2 - \partial)\Phi}) / 2\partial(2 - \partial)$

1.2.3 趋势与突变检验方法 选用 Mann—Kendall 趋势检验法分析礼县水文站控制流域 1960—2016 年径流的变化趋势。此检验法是国内外众多学者使用的一种非参数检验方法,该方法不需要样本遵循一定分布且不受其他异常值的干扰,具有很高的准确性以及数学意义^[19],若标准化检验统计量 $Z > 0$,表明数据呈增加的趋势,若 $Z < 0$,表明数据呈减少的趋势。 $|Z| \geq 1.96, 2.58$ 时,表示通过置信度为 95%, 99% 显著性检验。检测径流序列变化的突变点的方法是 Pettitt 突变检验法^[20],Pettitt 突变检验法是研究气候变化和人类活动对于流域径流变化影响的水文统计方法之一,突变点检测方法是基于非参数检测 1 个序列的突变点。计算较简便,可以明确数据变化的时间,并能够很好地检测出数据中的突变点。

1.2.4 基于 Budyko 假设的气候弹性系数计算 Schaaake 等^[21]在 1990 年第 1 次提出气候弹性因子的理念,定义为径流的变化程度,而变化的程度受单位气候要素影响;Arora 等^[22]提出一种基于 Budyko 假设的综合方法,用于分析潜在蒸散发和降水的长期变化对径流变化的影响,具有计算流域径流量和能量平衡的物理现实基础,可用于评价水文特征对环境因素的响应。结合表 1 所列的公式,假设降水量 (P) 和潜在蒸发量 (E_0) 是流域尺度上的自变量。因此,气候变化引起的径流变化可表示为:

$$d\bar{Q}_c = (\partial f / \partial P) dP + (\partial f / \partial E_0) dE_0$$

根据流域弹性因子公式 $(\epsilon = (\partial Q / Q) / (\partial X / X))$

可简化上式为:

$$d\overline{Q_c}/Q=\epsilon_P dP/P+\epsilon_{E_0} dE_0/E_0$$

式中: ϵ_P 为流域降水的弹性因子系数; ϵ_{E_0} 为流域的蒸散发弹性因子系数。

$$\epsilon_P=1+\Phi f'(\Phi)/(1-f(\Phi)), \epsilon_P+\epsilon_{E_0}=1$$

根据 ϵ_P 和 ϵ_{E_0} 得出降水和蒸散发的弹性系数之后, 利用已知降水和蒸散发的数据, 计算准确的只针对于气候变化的径流变化值 $\Delta \overline{Q_c}$ (mm):

$$\Delta \overline{Q_c}=(\epsilon_P \Delta P/P+\epsilon_{E_0} \Delta E_0/E_0)Q$$

式中: ϵ_P 、 ϵ_{E_0} 、 P 、 Q 和 E_0 均为已知数据。

1.2.5 径流变化归因分析方法 为了区分气候变化和人类活动对径流变化的影响程度, 整个研究时间段被划分为基准和变化 2 个时期, 基准期被定义为人类活动少的时期, 变化期则相反。通过 Pettitt 突变检验法检测研究区的径流量数据, 进行突变点的分析得出, 1994 年是突变点(图 3)。据此, 以 1960—1994 年为基准期, 以 1995—2016 年为变化期。因此, 径流的总变化可以计算为:

$$\Delta \overline{Q_t}=\Delta \overline{Q_a}-\Delta \overline{Q_b}$$

式中: $\Delta \overline{Q_t}$ 为流域总径流变化 (mm), 随着人类活动和自然因素对径流影响的变化而变化; $\Delta \overline{Q_a}$ 为基准期的径流 (mm); $\Delta \overline{Q_b}$ 为变化期的径流 (mm); 对于 1 个给定的流域, 其总径流的变化 $\Delta \overline{Q_t}$ (mm) 为:

$$\Delta \overline{Q_t}=\Delta \overline{Q_c}-\Delta \overline{Q_h}$$

式中: $\Delta \overline{Q_t}$ 为总的径流变化 (mm); $\Delta \overline{Q_c}$ 是流域气候变化导致的径流变化 (mm); $\Delta \overline{Q_h}$ 为人类活动所导致的径流变化 (mm)。在已知气候、人类活动导致的径流变化和总径流变化的数据后, 可以进行因子贡献率的计算:

$P_c=(\Delta \overline{Q_c}/\Delta \overline{Q_t})\times 100\%$, $P_h=(\Delta \overline{Q_h}/\Delta \overline{Q_t})\times 100\%$
式中: P_c 为气候变化的贡献率 (%); P_h 为人类活动的贡献率 (%)。最后, 将 8 种 Budyko 方程进行计算得出的贡献率和径流变化值进行对比。

1.2.6 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵根据区域内部不同时间点土地类型的转换变化情况而得出的转移矩阵, 由此可分析研究区域不同时间各种土地类型的转出转入情况、具体的面积变化情况^[23]。之后通过 ArcGIS 10.8 软件等工具将土地利用数据进行处理得到 1990—2000 年和 2000—2010 年的土地利用转移矩阵。

2 结果与分析

2.1 气候与径流变化趋势分析

由图 2 可知, 1960—2016 年西汉水礼县站 56 年的年径流系列, 通过径流趋势线及 5 年滑动平均分析得出, 年径流量呈现递减趋势, 经过 Mann-Kendall (M-K)

检验, $Z=-4.013\ 3$, $|Z|>2.32$, 通过了 0.01 的显著性水平检验。通过径流量 Pettitt 突变检验法分析(图 3), 年径流量在 1980 年后有明显的减少趋势, 年径流量在 1994 年发生突变, 并通过 0.01 的显著性水平检验, 因此, 将 1994 年设置为突变点。据此, 在进行后续径流特征研究时, 将 1960—1994 年划分为基准期, 将 1995—2016 年划分为变化期(基准期表示没有人类活动或人类活动较少的时期、变化期表示人类活动比较频繁的时期)。

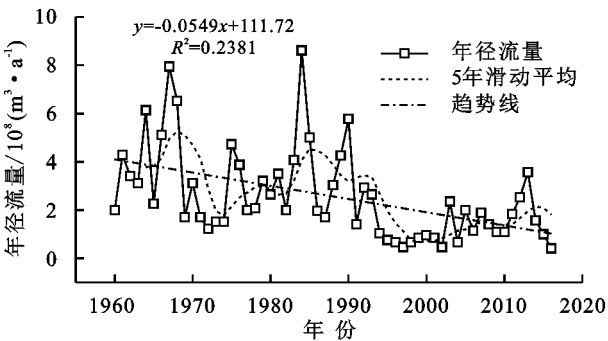


图 2 径流变化趋势及 5 年滑动平均值

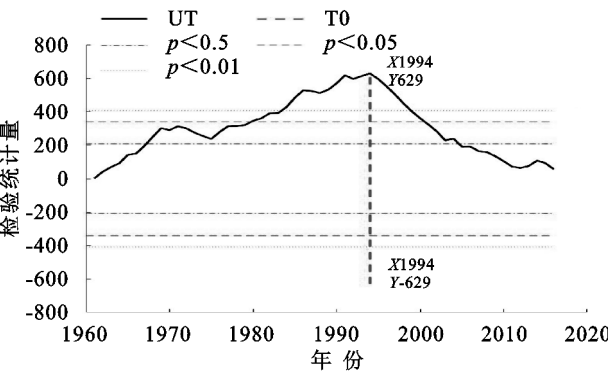


图 3 基于 Pettitt 法突变点检验

由表 2 可知, 基准期和变化期年径流深的平均值分别为 98.10, 37.30 mm, 径流深减少 60.80 mm, 变化期与基准期的径流深变化明显, 减少相对于变化期整个平均径流深的深度。除此之外, 基准期的干旱指数为 1.61, 变化期的干旱指数为 1.90, 变化期相对于基准期的干旱指数是增加的, 基准期较变化期较为湿润。年潜在蒸散量呈波动正向增大(图 4), 并且 $Z=3.558\ 9$, $|Z|>2.32$, 通过了 0.01 的显著性水平检验, 由此可知, 区域潜在蒸散量对于径流的变化是负效应的。年降水量的趋势呈波动负向减小(图 5), $Z=-1.190\ 9$, $|Z|<2.32$, 减小的趋势并不显著, 区域降水量对于径流变化的影响是正效应。

表 2 流域不同时段径流深、降水量、蒸散发量和干旱指数

参数	Q/mm	P/mm	E_0/mm	干旱指数(Φ)
总时段(1960—2016)	74.64	540.53	894.80	1.72
基准期(1960—1994)	98.10	559.42	867.95	1.61
变化期(1995—2016)	37.30	510.48	937.57	1.90
变化量	-60.80	-48.95	69.61	0.29

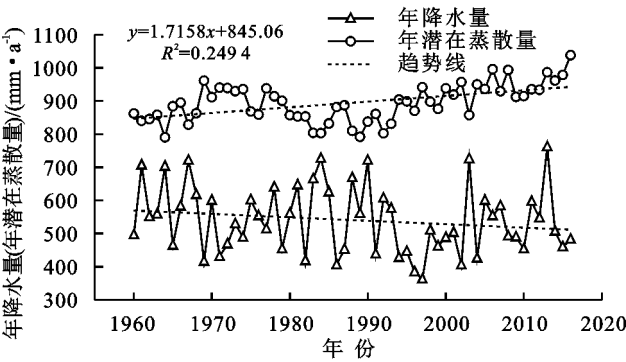


图 4 流域多年平均降水量、潜在蒸散量变化趋势

2.2 径流的敏感性分析

径流大幅减小、降水减少、蒸发增加都是由于自然因素与人类活动因素共同造成的。由礼县站的基础数据可以求得长时间序列年平均值,得出研究流域干旱指数,根据公式可求解径流变化的弹性系数(表 3、表 4),当研究流域年降雨量、年蒸散量增加或减少时,相应的径流量增加或减少。弹性系数是有正有负

的,正值(负值)表示此因子对流域径流的影响是正向(负向)的。变化期较基准期是干旱的,表 3 为降水的敏感性系数,表 4 为蒸散发的敏感性系数,比如 Budyko—Fu 方程式,降水每增大(减少)1%,基准期的径流增大(减少)2.53%,变化期的径流增大(减少)3.29%;蒸散发每增大(减少)1%,基准期的径流减少(增大)1.53%,变化期的径流减少(增大)2.29%。由表 3 可知,降水对于径流的影响是正向的,且影响系数都>2,降水对于径流的影响在变化期是较基准期变大的,研究区域降水增大导致径流增加,是正向的变化;流域蒸散发对于径流的影响是负向的,影响系数基本为-1~-2,虽然不如流域降水对于流域径流的影响,但也不能忽视,蒸散发对于径流的效应在变化期同样是较基准期变大的,研究区域的蒸散发增大对径流产生负向效应,二者呈反比。总体来说,在气候因素中,降水对于径流的影响大于蒸散发的影响,是主导因素。

表 3 8 种 Budyko 假设下的模型所得出的礼县站控制流域的降水弹性系数(ε_P)值

时期	Budyko-Sch	Budyko-Old	Budyko	Budyko-PT	Budyko-Fu	Budyko-zhang	Budyko-CY	Budyko-WT
总时段(1960—2016)	2.72	2.74	2.74	2.58	2.82	2.54	2.88	2.48
基准期(1960—1994)	2.61	2.71	2.66	2.54	2.53	2.41	2.57	2.35
变化期(1995—2016)	2.90	2.78	2.87	2.65	3.29	2.74	3.37	2.68

表 4 8 种 Budyko 假设下的模型所得出的礼县站控制流域的蒸散发弹性系数(ε_{E₀})值

时期	Budyko-Sch	Budyko-Old	Budyko	Budyko-PT	Budyko-Fu	Budyko-zhang	Budyko-CY	Budyko-WT
总时段(1960—2016)	-1.72	-1.74	-1.74	-1.58	-1.82	-1.54	-1.88	-1.48
基准期(1960—1994)	-1.61	-1.71	-1.66	-1.54	-1.53	-1.41	-1.57	-1.35
变化期(1995—2016)	-1.90	-1.78	-1.87	-1.65	-2.29	-1.74	-2.37	-1.68

2.3 径流变化归因分析

由研究区各指数变化值(表 2)以及气候弹性系数值(表 3、表 4)可知,研究区域径流的分因素变化情况及各自的贡献率(表 5)。径流总体变化量是减少的,8 种方法得出人为因素所导致的径流减少量均大于气候因素导致的径流减少量。虽然 8 种方程式有差异,但是其人为

因素的贡献率均>50%,人类活动因素占主导作用,而气候因素的贡献率均<50%,属于次要因素。在气候因素中,区域降水的贡献大于区域的蒸散发,降水占主导作用,蒸散发是次要作用。由此说明,在 1960—2016 年西汉水礼县水文站控制区域的径流衰减的主要原因是人类活动造成的原因,其次是气候方面的原因。

表 5 8 种 Budyko 假设下的方程式得出的径流的分因素变化情况及其因素贡献率

	Budyko-Sch	Budyko-Old	Budyko	Budyko-PT	Budyko-Fu	Budyko-zhang	Budyko-CY	Budyko-WT
ΔQ _c /mm	-28.38	-28.59	-28.59	-26.65	-29.65	-26.07	-30.39	-25.36
ΔQ _h /mm	-32.41	-32.21	-32.20	-34.15	-31.14	-34.72	-30.40	-35.44
P _c /%	46.69	47.02	47.03	43.84	48.77	42.88	49.99	41.71
P _h /%	53.31	52.98	52.97	56.16	51.23	57.12	50.01	58.29

综上所述,人类活动是引起研究区径流量减少的主要因素,降雨次之,蒸散发影响最小。人类通过对下垫面的影响进而影响径流,研究区域属于“天保工程”的实施区域,“天保工程”是天然林资源保护工程,旨在恢复保护区域的植被,自实施以来收到不俗的成效。经计算,研究区 1982—2016 年 NDVI 值为 0.617,

1982—1998 年研究区的 NDVI 值为 0.591,1998—2016 年研究区的 NDVI 值为 0.624。1998 年天保工程实施以来,NDVI 值有显著的增长,植被得到恢复。植被面积的增加,导致蒸发减小、汇流减弱,从而使径流减小。除此之外,一些水利工程也对径流产生影响,阻碍径流正常的产生、汇流等等,从而导致径流减少。

气候因素中的降雨和蒸散发的影响都没有人类活动的影响那么显著,而且在各种科学技术都在急速发展的时代,人类活动的强度和影响也在不断增强。

2.4 土地利用类型动态变化情况

土地利用类型的变化指土地覆被类型在时间和空间上的变化,主要通过各种土地类型的面积变化来揭示人类对于研究区下垫面的影响,通过研究区的土地动态变化可以得到下垫面的相关情况,从而探究人类活动对于下垫面的影响^[24]。

三期土地利用情况(图 5、表 6)表明,研究区以草地和耕地为主,西汉水礼县水文站控制区域草地与耕地的面积均有不同程度的减小,2000 年相比 1990 年减幅较小,草地面积减少 4.94 km²,同比减少 0.40%;耕地面积减少 1.33 km²,同比减少 0.08%;2010 年相比

2000 年减幅较大,草地面积减少 63.57 km²,同比减少 5.21%;耕地面积减少 15.95 km²,同比减少 1.00%。城乡、工矿、居民用地面积呈现微弱增大的现象,2000 年较 1990 年面积增大 5.71 km²,同比增大 6.61%;2010 年较 2000 年面积增大 8.08 km²,同比增大 8.78%。水域面积 30 年来呈现微弱的变化,且主要是 1990—2000 年内的变化,2000 年较 1990 年面积增大 1.56 km²,同比增大 14.24%;2010 年较 2000 年面积减小 0.06 km²,同比减少 0.52%。2000—2010 年之间由于某些原因出现 3.08 km²的未利用土地。林地的变化是最显著的,2000 年相较于 1990 年变化不大,2010 年相较于 2000 年的林地面积同比增长 28%,面积增加 68.41 km²,30 年间流域林地的覆盖度和植被覆盖面积增加,原因离不开保林护林工程的实施。

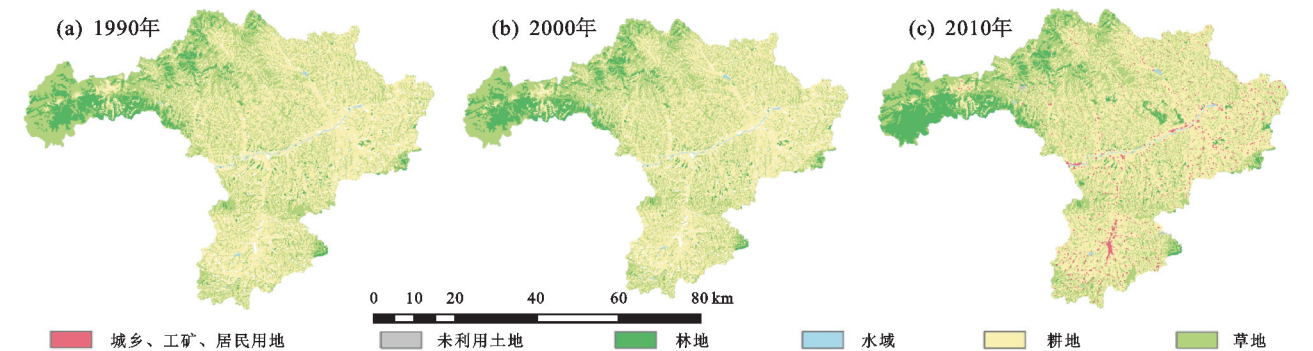


图 5 1990 年、2000 年、2010 年研究区域土地利用类型

表 6 不同年份各土地类型覆被面积及变化

单位:km²

土地利用类型	面积及变化				
	1990 年	2000 年	2010 年	1990—2000 年变化	2000—2010 年变化
草地	1223.24	1218.30	1154.73	—4.94	—63.57
耕地	1597.19	1595.86	1579.91	—1.33	—15.95
城乡、工矿、居民用地	86.29	92.00	100.08	5.71	8.08
林地	244.12	244.13	312.54	0.01	68.41
水域	10.95	11.51	11.45	1.56	—0.06
未利用土地	0	0	3.08	0	3.08

2.5 土地利用类型转移变化分析

通过 1990—2000 年的土地利用转移矩阵(表 7)和 2000—2010 年的土地利用转移矩阵(表 8)分析研究区在变化期的各个土地利用类型变化情况:

1990—2000 年,草地与耕地占研究区大部分的面积,2000 年较 1990 年草地、耕地面积减少,城乡、工矿、居民用地、林地和水域面积增加。其中,城乡、工矿、居民用地增加 5.71 km²,主要来自耕地;草地面积减少 4.94 km²,主要转化为耕地;耕地减少 1.13 km²;水域和林地分别增加 0.56,0.01 km²。总体来说,这十年间,主要的变化来自于城乡、工矿、居民用地,区域的经济水平和开发程度得到提升。

2000—2010 年,2010 年较 2000 年草地、耕地面积减少,水域面积也有微弱的减小,城乡、工矿、居民用地、林

地面积继续增加,此外,还产生 3.08 km²的未利用土地。其中,草地减少 63.57 km²,主要转化为林地与耕地;林地增加 68.41 km²,主要来自草地和耕地;耕地减少 15.95 km²,主要转化为草地;城乡、工矿、居民用地和未利用土地分别增加 8.08,3.08 km²;水域减少 0.06 km²。相对来说变化最大的是林地的面积,研究区域林地的种植面积扩大,生态环境也进一步变好,其中,人类活动起着至关重要的作用。

由图 6 可知,研究区的土地类型以草地、耕地、林地为主。在 1990—2000 年的土地利用变化图中,由于变化较小,只能观察到城市、工矿、居民用地的扩张以及部分区域的耕地转换为草地,城市、工矿、居民用地在原来的小城市群或聚落的分布状况下,在其周边进一步扩张。区域的中南部有一部分的区域由耕地

转为草地,2000—2010 年与 1990—2000 年的土地利用变化不同,各种土地利用类型都发生转化,这是经济与科技水平高速发展的结果。城市、工矿居民用地在之前的基础上进一步扩张,研究区的东部有一大部

分土地由原来的草地转为林地,中部也有部分的耕地转为林地,表明国家相关护林造林政策的实施致使林地的覆盖度得到增长,植被得到恢复,人类活动对于下垫面的影响较大^[25]。

表 7 1990—2000 年研究区土地利用转移矩阵 单位:km²

土地利用类型		1990 年					总计
		草地	耕地	城乡、工矿、居民用地	林地	水域	
2000 年	草地	1218.22	0.08	0	0.01	0	1218.30
	耕地	4.72	1591.14	0	0	0	1595.86
	城乡、工矿、居民用地	0.19	5.51	86.29	0	0	92.00
	林地	0.01	0.01	0	244.11	0	244.13
	水域	0.10	0.46	0	0	10.95	11.51
	总计	1223.24	1597.19	86.29	244.12	10.95	3161.80

表 8 2000—2010 年研究区土地利用转移矩阵 单位:km²

土地利用类型		2000 年					总计
		草地	耕地	城乡、工矿、居民用地	林地	水域	
2010 年	草地	1122.25	30.52	0.38	1.32	0.26	1154.73
	耕地	35.61	1541.61	1.77	0.86	0.06	1579.91
	城乡、工矿、居民用地	1.13	9.05	89.84	0.01	0.04	100.08
	林地	57.14	13.58	0.01	241.81	0	312.54
	水域	0.08	0.23	0	0	11.15	11.45
	未利用土地	2.09	0.87	0	0.13	0	3.08
总计		1218.30	1595.86	92.00	244.13	11.51	3161.80

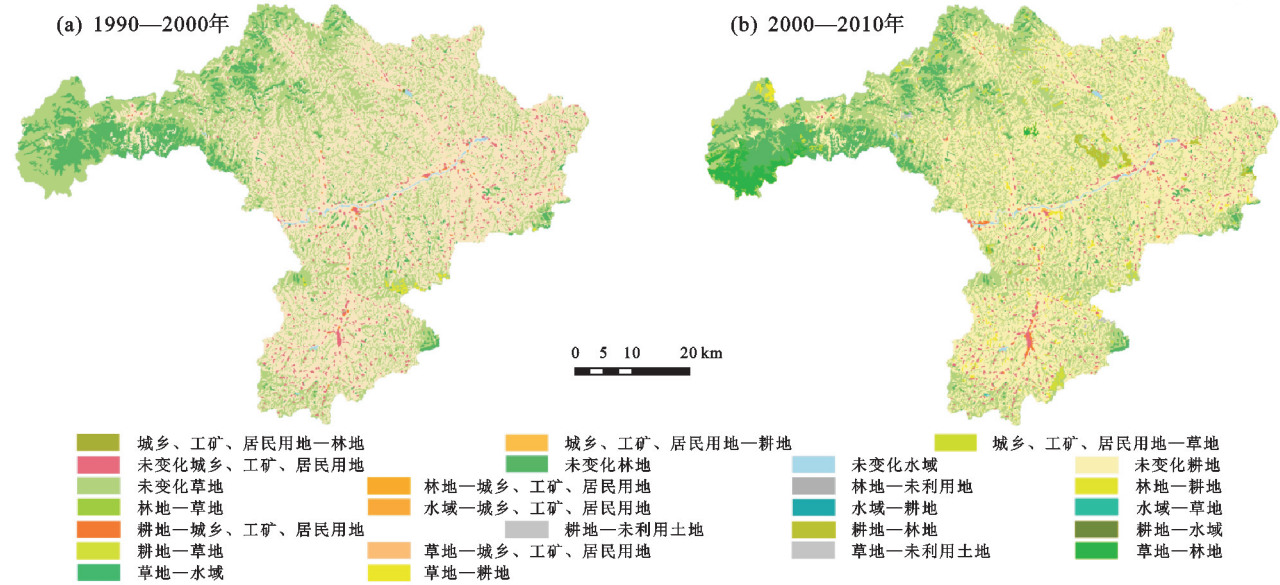


图 6 1990—2000 年、2000—2010 年研究区域土地利用类型转换

各土地利用类型转出面积依次为草地>耕地>林地>城乡、工矿、居民用地>水域>未利用用地。草地向林地的转换是此期间土地利用类型主要的变化方向,耕地在此期间也发生较大变化,主要转出方向为林地和草地,在某种程度上反映人类活动(水土保持和城镇化建设等)对流域土地利用造成的影响。保水、保林措施通过修建大量工程、植树造林和种草等改变下垫面的产汇流机制和水文循环过程,使降水通过土壤

表面流入河流的量变小,对径流量产生影响。

3 结论

1960—2016 年西汉水礼县水文站控制流域的径流呈显著减小趋势,并在 1994 年发生突变。基准期平均径流深为 98.10 mm,变化期平均径流深为 37.30 mm,变化期径流深较基准期的径流深减少 60.8 mm。

依据 8 种基于 Budyko 假设的水文平衡方程式结果,人类活动所导致径流减少的贡献率为 50%~

60%,占主导作用。气象因素的贡献率为40%~50%,属于次要作用,在气象因素中,降水占主导作用,流域蒸散发是次要作用。

人类活动对于径流影响主要由下垫面的变化引起的,NDVI指数变化期较基准期有所增加,土地利用方面,草地和耕地面积都有所下降,林地、居民用地等土地利用面积有所增加,且林地的增加幅度最大。

参考文献:

- [1] Shao Y T, He Y, Mu X M, et al. Contributions of climate change and human activities to runoff and sediment discharge reductions in the Jialing River, a main tributary of the upper Yangtze River, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 145(3/4): 1437-1450.
- [2] 范利杰, 穆兴民, 赵广举. 近50年嘉陵江流域径流变化特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 12-17.
- [3] 宫渊波, 张君, 陈林武, 等. 嘉陵江上游不同植被类型小流域典型降雨产流特征分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 35-39.
- [4] 关春晖. 嘉陵江上游茨坝水文站水文特性分析[J]. 甘肃科技, 2016, 32(18): 53-54.
- [5] 叶婷, 石朋, 钟华, 等. 基于Budyko假设和微分方程的淮河上中游径流变化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 25-32.
- [6] 杜嘉妮, 蔡宜晴, 刘希胜, 等. 基于Budyko假设的湟水径流变化归因识别[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 116-121.
- [7] 周珍. 基于Mann-Kendall的嘉陵江流域降水量时空分布规律研究[J]. 水资源开发与管理, 2021(3): 25-28, 42.
- [8] 段文明, 穆兴民, 高鹏, 等. 嘉陵江流域近50年降水量演变规律分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 97-101.
- [9] 王涛, 王进, 吴彦昭. 60年来西汉水流域降水径流演变特征及影响分析[J]. 人民长江, 2020, 51(6): 89-94.
- [10] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage Paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [11] Schreiber P. Über die beziehungen zwischen dem niederschlag und wasserführung der flüsse in mitteleuropa[J]. Meteorologische Zeitschrift, 1904, 21(10): 441-452.
- [12] Oldekop E M. On evaporation from the surface of river basins[M]. Transactions on meteorological observations(in Russian). Tarm, Estonia: University of Tartu, 1911: 200-201.
- [13] Budyko M I. Evaporation under Natural Conditions[M]. English Translation by IPST; Leningrad, Gidrometeorizdat, Jerusalem, 1948: 120-121.
- [14] Pike J G. The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate[J]. Journal of Hydrology, 1964, 2(2): 116-123.
- [15] Fu G B, Charles S P, Chiew F H S. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow[J]. Water Resources Research, 2007, 43(11): 2578-2584.
- [16] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [17] Choudhury B J. 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.
- [18] Wang D B, Tang Y. A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in darwinian hydrologic models[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(13): 4569-4577.
- [19] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 490-496.
- [20] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C, 1979, 28(2): 126-135.
- [21] Schaake J C, Waggoner P E. From climate to flow[J]. Climate Change and US Water Resources, 1990, 8: 177-206.
- [22] Arora V K. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff[J]. Journal of Hydrology, 2002, 265(1/4): 164-177.
- [23] 张棋, 郑水明, 叶雪珠, 等. 浙江省生态循环农业发展实践模式和对策[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4900-4901, 4904.
- [24] 李小根, 段小芳, 付景保, 等. 基于GIS的丹江口水库土地利用/覆被动态变化特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 90-98.
- [25] 董梁蕴, 董好刚, 牛瑞卿, 等. 基于遥感的郑州市近十年土地利用时空变化及驱动力分析[J]. 华南地质, 2021, 37(4): 398-405.