

缺资料地区产流径流时空特性分析及其关系研究

——以洮河流域为例

马亚丽, 牛最荣, 王兴繁, 张芮, 孙栋元, 郑志琴

(甘肃农业大学 水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了解决缺资料地区的产流、径流时空特性分析问题,采用 SWAT 模型、多元统计分析法、相关系数法、弹性分析法等方法,研究分析缺资料地区——洮河干流分区段产流、径流的时空变化规律,揭示降雨量 P 、产流量 Y 、径流量 R 三者之间关系以及径流变化影响因素。结果表明:洮河流域红旗站 1956 – 2019 年径流量整体呈显著减小趋势,1987 年发生突变;SWAT 模型率定、验证期决定系数分别为 0.78、0.79, Nash – Suttcliffe 系数分别为 0.78、0.77, 相对误差均小于 10%, 模拟效果令人满意;河道径流中游占比最大(50.71%), 其次为上游(37.21%), 下游占比最小(12.08%), 中游是径流量的主要来源;产流量由上游到下游呈减少变化,依次为 214.18、179.43、81.16 mm;代桑曲子流域产流量最大,岔河、东峪沟最小;相关性排序为 P 与 Y 、 Y 与 R 、 P 与 R , 且相关性由上游到下游逐渐减弱;气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为 20% 和 80%, 人类活动是主要因素。研究成果有利于揭示洮河流域各区段产水径流变化及影响机理,同时为缺资料地区产流径流时空分析提供理论支撑。

关键词: 产水径流; SWAT 模型; Budyko 假设; 缺资料地区; 洮河; 黄河流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0058-08

Spatio-temporal characteristics of water yield and runoff and their relationship in regions with scarce data:

A case study of Taohe River Basin

MA Yali, NIU Zuirong, WANG Xingfan, ZHANG Rui, SUN Dongyuan, ZHENG Zhiqin

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to solve the problem of analyzing the temporal and spatial characteristics of water yield and runoff in the absence of data, various methods, including SWAT model, multivariate statistical analysis, correlation coefficient method, and elastic analysis method, were used to analyze the spatial and temporal variations of water yield and runoff of each section in the Taohe River Basin, so as to reveal the relationship among precipitation (P), water yield (Y) and runoff (R), and the influencing factors of runoff change in regions with scarce data. The results showed that the runoff of Hongqi Station in the Taohe River Basin decreased significantly overall from 1956 to 2019, and an abrupt change occurred in 1987. The determination coefficients of SWAT model were 0.78 and 0.79, and Nash – Suttcliffe coefficients were 0.78 and 0.77 in the period of validation and calibration, respectively, and all the relative errors were less than 10%, so the simulation results were satisfactory. The middle reaches accounted for the largest proportion of runoff (50.71%), followed by the upper reaches (37.21%) and the lower reaches (12.08%), therefore, the middle reaches were the main source of the runoff. The water yield decreased from the upstream to the downstream, which was 214.18, 179.43 and 81.16 mm, respectively. The water yield in the Daisang River Basin was the largest, whereas that in the Chahe River and Dongyu-

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42261003); 甘肃农业大学水利水电工程学院科研团队建设专项项目(Gaucwky-04); 甘肃省重点研发计划项目(21YF5NA015); 甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划项目(GSAU-JSYF-2021-016)

作者简介: 马亚丽(1987-), 女, 河北保定人, 讲师, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 牛最荣(1964-), 男, 甘肃通渭人, 博士, 教授级高工, 博士生导师, 研究方向为水文及水资源。

gou River were the smallest. The correlation order was $P - Y > Y - R > P - R$, and the correlation gradually decreased from the upstream to the downstream. The impacts of climate change and human activities were 20% and 80%, respectively, and human activities were the main influencing factor. The research results are helpful for the study of runoff variation and its influencing mechanism in each section of the Taohe River Basin, and provide theoretical support for spatio-temporal analysis of runoff in regions with scarce data.

Key words: water yield and runoff; SWAT model; Budyko hypothesis; the region with scarce data; the Taohe River; the Yellow River Basin

1 研究背景

径流既可以表征河川水文特征,又可以反映区域生态环境的变化,是最为直接和敏感的环境要素。对于输沙量巨大的黄河而言,其水土流失治理成效可以通过径流变化进行衡量。研究表明在气候变化背景下,近60年黄河上游径流量呈弱减少趋势,中下游显著减少^[1-2]。特别是21世纪以来,黄土高原地区退耕还林及河道整治工程效果显著,其中水保措施对径流减少起到明显作用,该地区降水呈不显著变化,产流量明显偏少,人类活动对区域水文情势产生了显著影响^[2-3]。气候因子中的降水对径流量影响比较显著,气候和下垫面条件的改变影响产流、径流过程,在气候变化和人类活动的双重因素耦合作用下,径流变化驱动机制变得更加复杂^[4]。

苏贤保等^[5]采用灵活样本熵和多尺度熵测度径流复杂度,识别人类活动对黄河上游径流影响强度的差异。魏伊宁等^[6]发现黄河上游径流呈丰枯变化,降水起主控作用,积雪和气温的季节性影响较明显。刘酌希等^[7]基于水文模拟法对1955-2015年洮河流域径流变化进行归因分析,认为气候变化是径流减少的主要原因。王莺等^[8]构建多种情景模式模拟洮河流域1976-2013年水文特征,发现上游、中下游地表径流变化分别主要受气候变化的影响、土地利用和气候变化的共同影响。已有的研究成果主要针对洮河单个或多个河道断面水文站点的径流变化特征及归因进行分析研究,缺乏对降雨-产流-径流的产汇流过程关系研究,以及流域范围分区段更为细化的产水、径流时空特性研究,尤其在缺乏或仅有少量水文监测站点的区域,该研究更具有必要性。因此,本文以黄河上游洮河流域为例,基于分布式水文模型,将研究内容从传统的河道断面监测径流研究,扩大至流域范围分区段产水和径流的时空特性研究,将洮河干流划分为上游、中游、下游3个区段以及若干个子流域,结合多元统计分析法、相关系数法分区段分流域更为细化地揭示产水、

径流演变规律及降雨、产水与径流的变化关系,利用弹性分析法明确气候变化和人类活动的影响,研究成果为缺资料地区产流、径流时空分析提供了理论支撑,对流域水资源管理、水土流失防治和生态建设等具有重要意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

洮河是黄河上游右岸一级支流,位于甘肃省南部,从西倾山北麓勒尔当发源,自南向北经甘南藏族自治州、定西市、临夏回族自治州等地汇入永靖县黄河干流刘家峡水库,干流全长673 km,研究区面积为25 508.88 km²,经纬度坐标范围为101°36'~104°20'E,34°06'~36°01'N。下巴沟、李家村、河口分别作为上游、中游、下游出口,流域面积分别为7 313.40、11 906.47、6 289.01 km²,占比分别为28.67%、46.68%、24.65%。洮河自上游到下游流经三大地貌单元,上游为高原区,海拔3 000 m以上,植被情况良好;中游为高山峡谷区,海拔2 000 m以上,坡陡水急,地表覆被森林草原;下游至河口为黄土丘陵区,地形支离破碎,植被状况较差,有严重的水土流失问题。流域从上游到下游多年平均气温由1℃增至9℃,多年平均降水量由650 mm减少至300 mm,上、中游寒冷湿润,为流域产水区,下游温暖干旱,为流域产沙区,水沙异源,年径流量较大,属于黄河流域在甘肃省境内的丰水区^[9-10]。

2.2 数据来源

洮河流域数字高程模型DEM(digital elevation model)为地理空间数据云美国SRTM(shuttle radar topography mission, SRTM)数据,空间分辨率为90 m×90 m,投影坐标为WGS84(world geodetic system 1984)。土地利用栅格来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,空间分辨率为1 km×1 km,投影坐标为WGS84。土壤栅格数据来自世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD)的中国土壤数据集,空间分辨率为1 km×1 km,投影坐标为

WGS84。洮河流域及周边 6 个气象站点 1984 – 2019 年的气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>), 包括降水、气温、相对湿度、风速和日照时数等。径流数据采用红旗水文站 1956 – 2019 年的逐月资料, 数据摘录于水文年鉴。洮河流域高程、水系及水文气象站点分布如图 1 所示。

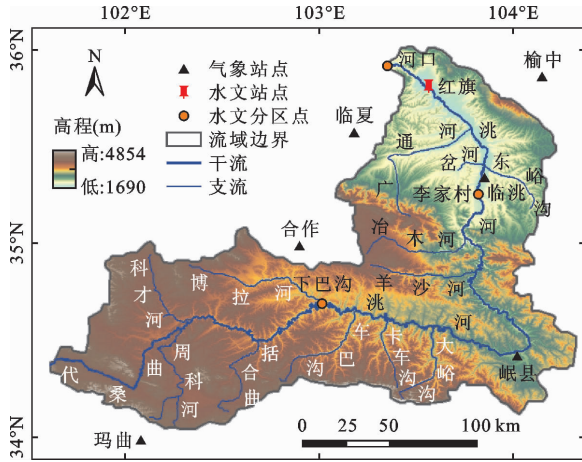


图 1 洮河流域高程、水系及水文气象站点分布

2.3 SWAT 模型

SWAT(soil and water assessment tool)模型可以用于流域尺度长时段分布式降雨径流、泥沙和污染物迁移转化等过程的模拟, 由水文过程模块、土壤侵蚀模块、污染负荷模块 3 大部分组成, 各参数物理意义明确。水文过程模块分为产流阶段和汇流阶段两部分, 其建模基于水总量平衡理论, 地表降水径流过程通过 SCS(soil conservation service)径流曲线方程来描述, 此方程是经验模型, 需考虑土壤因素(土壤的下渗、土地利用、土壤前期含水量等)和降雨因素来确定径流量, 径流曲线数 CN (curve number) 是关键参数。土壤侵蚀模块采用修正的通用土壤流失方程即 MUSLE(modified universal soil loss equation)来计算各水文响应单元中的侵蚀量和产沙量。SWAT 模型具体模型结构及原理参照文献[11] – [12]。

采用相对误差 Re 、决定系数 R^2 和 Nash – Suttcliffe 系数 E_{ns} 3 个评价指标来表征模型模拟结果的优劣以及评价 SWAT 模型在研究区的适用性^[13], 各评价指标计算公式如下:

$$Re = \frac{Q_{sim} - Q_{obs}}{Q_{obs}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (2)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

式中: Q_{sim} 为模拟值; Q_{obs} 为实测值; n 为样本个数; $\bar{Q}_{obs}$ 为实测值的平均值; $\bar{Q}_{sim}$ 为模拟值的平均值。 R^2 值的范围为 $0 \leq R^2 \leq 1$, 值越大则模拟效果越好, 取最大值时表示完全符合线性相关规律, 无误差, 取最小值时表示线性相关性很差。一般以决定系数 $R^2 \geq 0.5$ 、 $E_{ns} \geq 0.5$ 、相对误差 $Re \leq 25\%$ 作为模拟值可以接受的标准^[12]。

2.4 多元统计方法

本研究运用滑动平均法、线性回归法、Mann – Kendall(M – K)非参数统计检验法^[14]揭示水文气象数据序列的趋势性变化。采用 M – K 突变检验对径流突变进行分析, 同时应用双累积曲线作为突变点的辅助检验。

2.5 弹性分析法

前苏联学者 Budyko^[15]认为流域年实际蒸散发量(ET_a)为干燥指数 ϕ ($\phi = ET_0/P$) 的函数:

$$ET_a/P = F(ET_0/P) = F(\phi) \quad (4)$$

式中: P 为年降水量, mm; ET_a 为年实际蒸散发量, mm; ET_0 为年潜在蒸散发量, mm。

根据流域长时段水量平衡公式($Q = P - ET_a$)及 Budyko 假设, 计算径流对降水及潜在蒸散发的弹性系数。径流量对气候变化的定量响应可表示为:

$$\Delta Q_C = \varepsilon_P \frac{Q}{P} \Delta P + \varepsilon_{ET_0} \frac{Q}{ET_0} \Delta ET_0 \quad (5)$$

$$\varepsilon_P = 1 + \frac{\phi F'(\phi)}{1 - F(\phi)}, \text{ 且 } \varepsilon_P + \varepsilon_{ET_0} = 1 \quad (6)$$

$$\Delta Q = \Delta Q_C + \Delta Q_H \quad (7)$$

式中: ΔQ_C 为径流对气候变化响应的变化量, 10^8 m^3 ; ε_P 为降水弹性系数; ε_{ET_0} 为 ET_0 弹性系数; ΔP 和 ΔET_0 分别为降水和潜在蒸散发的变化量, 10^8 m^3 ; ΔQ 为径流变化总量, 10^8 m^3 ; ΔQ_H 为径流对人类活动响应的变化量, 10^8 m^3 。 $F(\phi)$ 和 $F'(\phi)$ 可通过 Budyko 假设进行计算, 相关公式具体见表 1。

3 结果与分析

3.1 洮河流域径流量年际变化

1956 – 2019 年洮河流域(红旗水文站)径流量年际变化及突变分析如图 2 所示。由图 2 可见, 研究时段内洮河流域径流量整体呈显著下降趋势, 线性倾向变化率为 $-0.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (图 2(a)), M –

K 统计量为 -2.61 , 达到 0.05 显著性水平, 多年平均年径流量为 $44.90 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中 $1956 - 1986$ 年平均值为 $52.13 \times 10^8 \text{ m}^3$, 大于多年平均值 16.10% ; $1987 - 2019$ 年平均值为 $38.12 \times 10^8 \text{ m}^3$, 小于多年平均值 15.10% , $1987 - 2019$ 年多年平均径流量比

$1956 - 1986$ 年减少 26.88% 。年径流在 95% 的置信区间内于 1987 年发生突变(图 2(b)), 1987 年之前大部分年份 $UF_k > 0$ 且并未超越临界线, 年径流量呈不显著增大趋势; 1987 年以后 $UF_k < 0$, 且 1998 年超过临界线, 年径流量呈显著减少趋势。

表 1 基于 Budyko 假设的 $F(\phi)$ 和 $F'(\phi)$ 计算公式

来源文献	$F(\phi)$	$F'(\phi)$
Ol' dekop ^[16]	$\phi \tanh(1/\phi)$	$\tanh(1/\phi) - 1/[\phi \cosh(1/\phi)]^2$
Budyko ^[17]	$[\phi \tanh(1/\phi)(1 - e^{-\phi})]^{0.5}$	$0.5[\phi \tanh(1/\phi)(1 - e^{-\phi})]^{-0.5} \cdot \left\{ \frac{[\tanh(1/\phi) - 1/\phi \operatorname{sech}^2(1/\phi)]}{(1 - e^{-\phi}) + \phi \tanh(1/\phi)e^{-\phi}} \right\}$
Pike ^[18]	$(1 + \phi^{-2})^{-0.5}$	$1/\{\phi^3[1 + (1/\phi)^2]^{1.5}\}$
傅抱璞 ^[19]	$1 + \phi - (1 + \phi^\alpha)^{1/\alpha}, \alpha = 2.5$	$1 - (1 + \phi^\alpha)^{1/\alpha-1} \phi^{\alpha-1}$
Zhang 等 ^[20]	$(1 + \omega\phi)/(1 + \omega\phi + 1/\phi), \omega = 1$	$(\omega + 2\omega/\phi - 1 + 1/\phi^2)/(1 + \omega\phi + 1/\phi)^2$

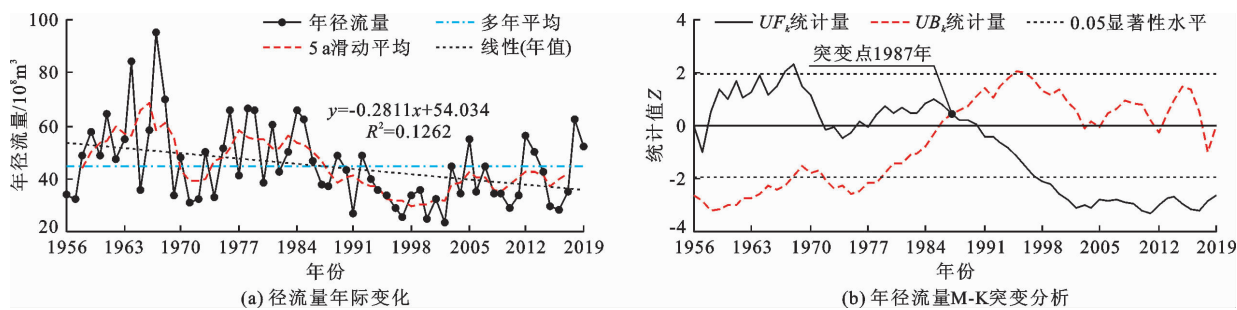


图 2 1956 - 2019 年洮河流域径流量年际变化及突变分析(红旗水文站)

3.2 SWAT 模型径流模拟

选取洮河流域红旗水文站 $1984 - 2019$ 年实测逐月流量数据作为率定和验证数据, 以 1984 年作为预热期, 以 $1985 - 2010$ 年数据进行率定, 以 $2011 - 2019$ 年数据进行验证。河道的径流量模拟值存储在模型输出文件. rch 文件 FLOW_OUT 字段下, 单位为 m^3/s , 代表模拟时段该河段流量。基于 SWAT 模型对流域进行离散化处理, 在水系节点、分区水文站点、红旗站点的基础上, 划分 31 个子流域, 197 个水

文响应单元(hydrological response unit, HRU), 其中红旗水文站位于 2 号子流域内的河段。结果表明, 月尺度径流率定期决定系数 $R^2 = 0.78$, Nash - Sutcliffe 系数 $E_{ns} = 0.78$; 验证期决定系数 $R^2 = 0.79$, Nash - Sutcliffe 系数 $E_{ns} = 0.77$, 相对误差 Re 均小于 10% , 可见率定期和验证期的月尺度径流模拟结果均满足 $R^2 \geq 0.5$ 、 $E_{ns} \geq 0.5$ 、 $Re \leq 25\%$ 的要求, 且满足 $0.75 \leq E_{ns} \leq 1$ 、 $Re \leq 10\%$ ^[12], 模拟效果令人满意。月均流量率定与验证结果如图 3 所示。

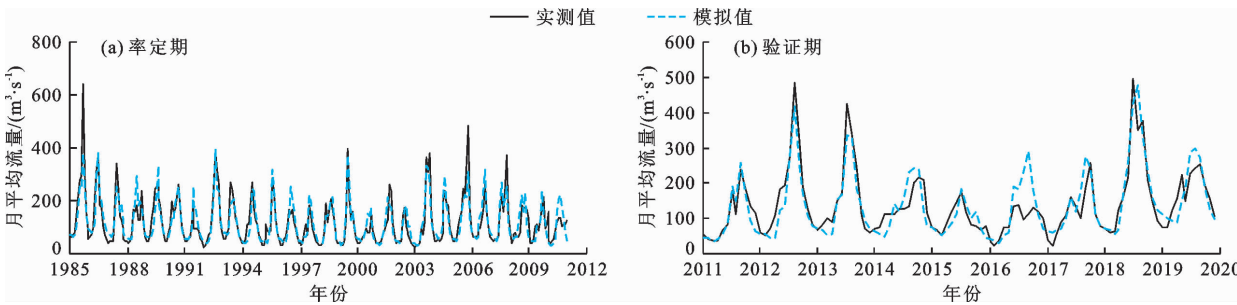


图 3 1984 - 2019 年洮河流域月均流量模拟结果(红旗水文站)

3.3 洮河流域各分区径流时空变化

3.3.1 洮河流域各分区径流量年际变化 洮河上游(下巴沟)、中游(李家村)、下游河道出口(河口)分别位于 SWAT 模型模拟结果的 23、9、1 号子流域, 1985–2019 年各分区径流量年际变化如图 4 所示。由图 4 可看出, 研究时段内洮河流域各分区年径流量整体均呈增大趋势, 下巴沟、李家村、河口径流量线性倾向变化率分别为 0.12×10^8 、 0.24×10^8 、

$0.27 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 显著性水平分别为 0.05、0.10、0.10, 因而洮河流域 1985–2019 年年径流量整体呈增大趋势。1985–2019 年下巴沟、李家村、河口的多年平均径流量分别为 15.67×10^8 、 37.02×10^8 、 $42.11 \times 10^8 \text{ m}^3$, 对于流域径流量的贡献率分别为 37.21%、50.71%、12.08%, 可见中游河道径流入河量最大, 下游河道入河量最小, 中游是河道径流量输入的主要区域。

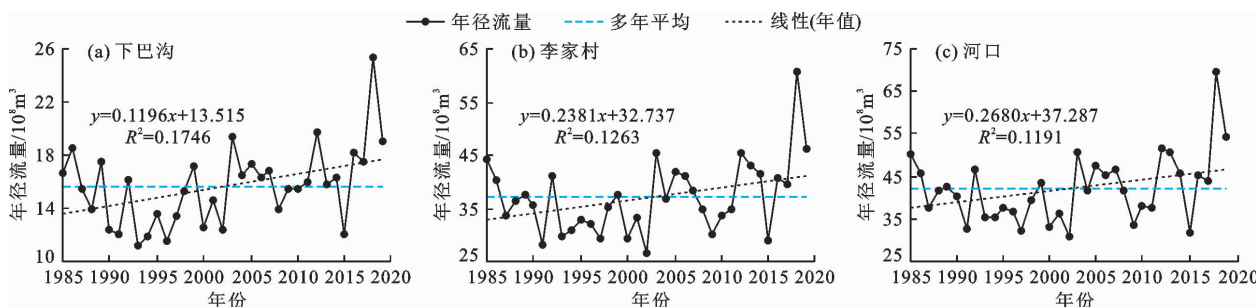


图4 1985–2019 年洮河流域各分区径流量年际变化

3.3.2 洮河流域各分区径流量空间分布 洮河流域干流各河段和各支流多年平均径流量以及各子流域多年平均产流量空间分布如图 5 所示。

由图 5(a)可以看出, 干流径流量由上游到下游逐渐增大, 多年平均径流量由 $2.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增大至干流出口处 $42.11 \times 10^8 \text{ m}^3$; 因各支流的流域面积及地理环境不同, 其径流量也相应存在差异, 其中代桑曲、博拉河、周科河、括合曲、冶木河子流域的年均径流量介于 $1.8 \times 10^8 \sim 4.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其他支流的年均径流量介于 $0.4 \times 10^8 \sim 1.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均径流量由大到小排序依次为代桑曲 ($4.25 \times 10^8 \text{ m}^3$)、博拉河 ($3.15 \times 10^8 \text{ m}^3$)、周科河、括合曲、冶木河、车巴沟、广通河、大峪沟、科才河、羊沙河、卡车沟、岔河 (均为 $0.80 \times 10^8 \text{ m}^3$)、东峪沟 ($0.46 \times 10^8 \text{ m}^3$)。图 5(b) 显示各子流域产流量大小与各支流径流量大小相对应, 代桑曲子流域的产流量最大, 其次是博拉河、周科河、括合曲、冶木河子流域, 岔河和东峪沟子流域的产流量最小。

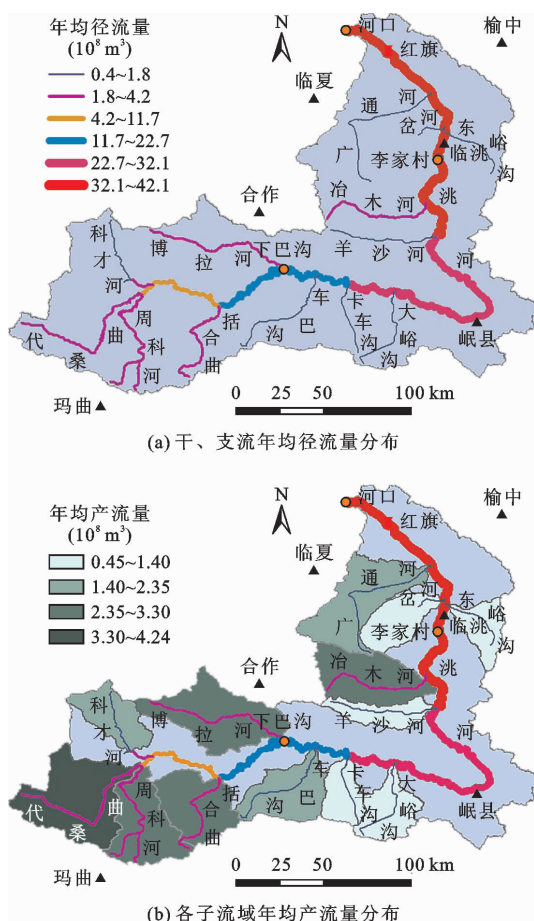


图5 洮河流域干、支流多年平均径流量及各子流域产流量空间分布

3.4 洮河流域各分区产流时空变化

3.4.1 洮河流域各分区产流量年际变化 1985–2019 年各分区产流量年际变化如图 6 所示。由图 6 可看出, 研究时段内各分区产流量年际变化整体均呈上升趋势, 其中上游 Z 值为 2.2, 达到 0.05 显著性水平, 中、下游变化不显著, 上游、中游、下游产流量线性倾向变化率分别为 0.12×10^8 、 0.12×10^8 、 $0.03 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 多年平均产流量分别为 15.66×10^8 、 21.36×10^8 、 $5.10 \times 10^8 \text{ m}^3$, 对于流域径流量的贡献率分别为 37.18%、50.71%、12.11%, 可见中游产流量最大, 下游最小, 中游是径流量的主要来源区域。

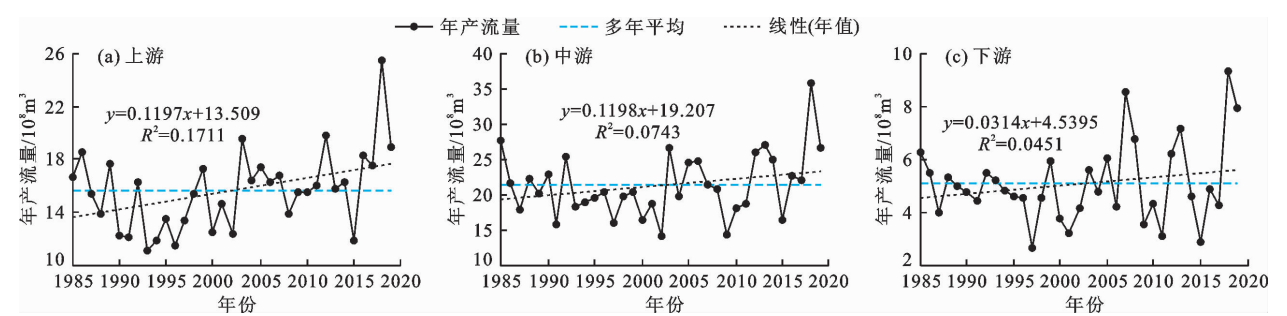


图 6 1985 – 2019 年洮河流域各区产流量年际变化

3.4.2 洮河流域各分区产流量空间分布 洮河流域各分区和各子流域多年平均单位产流量空间分布如图 7 所示。由图 7(a)可以看出,流域产流量由上游到下游呈减少变化,洮河上游段流域产流量最大,多年平均值为 214.18 mm,中游段有所减少,为 179.43 mm,下游段产流量最小,为 81.16 mm。由图 7(b)可见,洮河流域各子流域多年平均单位产流量空间分布存在差异,上游河南蒙古族自治县和碌曲县的大部分地区单位产流量为 212.07 ~ 238.56 mm,属于全流域产流量最大的区域;夏河县南部、卓尼县北部和东南部、临潭县、岷县西北地区单位产流量为 168.46 ~ 212.07 mm;卓尼县南部和东北部、岷县西南地区单位产流量为 108.58 ~ 168.46 mm;和政县、东乡族自治县东北和东南部、广河县、康乐县、临洮县南端单位产流量为 78.46 ~ 108.58 mm;临洮县北部、渭源县西南部地区单位产流量为 44.34 ~ 78.46 mm,属于全流域产流量最小的区域。

3.5 降雨、产流、径流的相关关系

降雨、产流、径流是水文循环过程的 3 个重要环节,三者依次发生并存在紧密关系,由于地理环境存在差异,不同的下垫面条件、气候条件及人类活动的影响,都会造成三者间关系的差异,为了揭示三者的相互关系,进而厘清水沙关系,采用 Pearson、Kendall、Spillman 等 3 种相关系数对降雨量、产流量、径流量的相关性进行表征,结果见 2。表 2 中的计算结果表明,各分区均遵循如下相关性排序:降雨量 – 产流量 (0.675 ~ 0.972) > 产流量 – 径流量 (0.546 ~ 0.974) >

降雨量 – 径流量 (0.450 ~ 0.848),即 3 个变量间降雨量与产流量关系最密切,降雨量与径流量相关性最弱,且降雨量 – 径流量、产流量 – 径流量的相关性由上游到下游逐渐减弱。

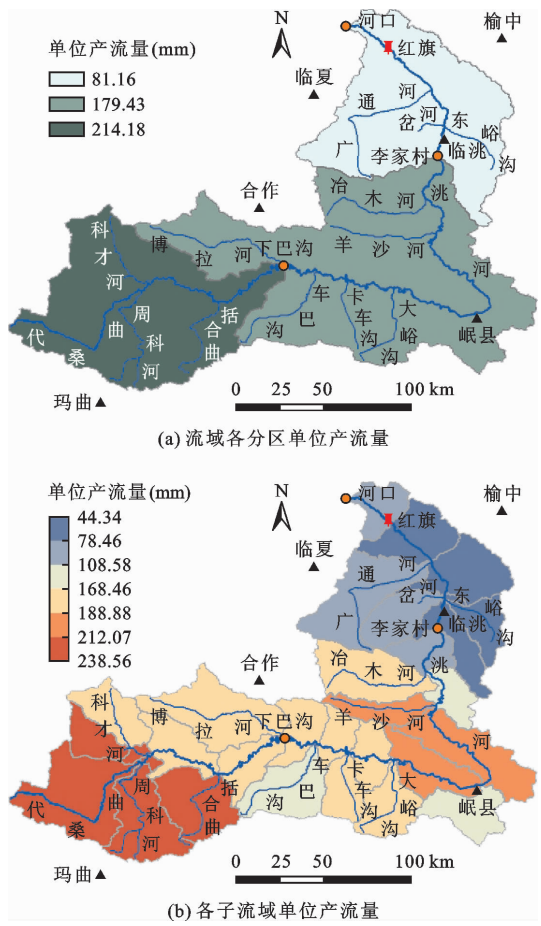


图 7 洮河流域各分区和各子流域多年平均单位产流量空间分布

表 2 洮河流域各分区降雨量、产流量、径流量的相关性

分区	降雨量 – 径流量			降雨量 – 产流量			产流量 – 径流量		
	Pearson	Kendall	Spillman	Pearson	Kendall	Spillman	Pearson	Kendall	Spillman
上游	0.848 **	0.581 **	0.796 **	0.943 **	0.675 **	0.861 **	0.942 **	0.868 **	0.974 **
中游	0.764 **	0.551 **	0.774 **	0.972 **	0.806 **	0.944 **	0.832 **	0.689 **	0.879 **
下游	0.665 **	0.450 **	0.661 **	0.934 **	0.819 **	0.953 **	0.728 **	0.546 **	0.757 **

注:“ ** ”表示显著性水平达到 0.05;Pearson、Kendall、Spillman 分别表示皮尔逊相关系数、肯德尔S相关系数、皮尔曼相关系数。

3.6 气候变化与人类活动对径流变化的影响

前文中基于年径流量 $M-K$ 突变检验得出洮河流域年径流在 1987 年发生突变,因此将研究时段以 1987 年为界划分为基准期和变化期,洮河流域多年平均径流量由基准期的 $52.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减小为变化期的 $38.12 \times 10^8 \text{ m}^3$,减小了 26.88%。采用本文 2.5 节所述的弹性分析法,结合水量平衡公式、Budyko 假设和 Ol'dekop 公式等计算降雨量和潜在蒸散发量对径流量的影响,计算结果见表 3。由表 3 可以看出,气候变化对径流量的影响值约为 $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,影响贡献率约为 20%;人类活动对径流量的影响值约为 $16.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,影响率约 80%,因而人类活动是洮河流域径流变化的主要影响因素。

表 3 洮河流域气候变化和人类活动对径流量变化的贡献计算表

来源文献	ε_p	$\Delta Q_c /$ 10^8 m^3	$\Delta Q_h /$ 10^8 m^3	$C_c /$ %	$C_h /$ %
Ol'dekop ^[16]	2.71	3.89	16.40	19.17	80.83
Budyko ^[17]	2.84	3.90	16.39	19.20	80.80
Pike ^[18]	2.59	3.88	16.41	19.14	80.86
傅抱璞 ^[19]	2.29	3.87	16.42	19.06	80.94
Zhang ^[20]	2.41	3.87	16.42	19.09	80.91

注: ΔQ_c 、 ΔQ_h 分别为径流量受气候变化和人类活动影响的变化量; C_c 、 C_h 分别为气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率。

4 讨 论

本研究表明,1956–2019 年洮河流域红旗水文站年径流量整体呈显著减小趋势且在 1987 年发生突变,突变前流域年径流量呈不显著增大趋势,突变后呈显著减小趋势,这与刘酌希等^[7]、杨林等^[21]关于洮河流域径流量变化的研究结论一致。本研究选取洮河流域红旗水文站 1984–2019 年实测逐月流量数据,基于 SWAT 模型将 1984 年作为预热期,以 1985–2010 年数据进行率定,以 2011–2019 年数据进行验证,得出该流域月尺度径流量率定期的决定系数 $R^2 = 0.78$ 、Nash–Sutcliffe 系数 $E_{ns} = 0.78$;验证期 $R^2 = 0.79$ 、 $E_{ns} = 0.77$,相对误差 Re 均小于 10%,整体模拟效果令人满意。月径流量的模拟值与实测值存在着个别月份不能完全吻合的现象,两者的差异可能来源于流域的空间分布离散化程度与参数取值准确程度的匹配,参数筛选和参数取值范围的确定、数据精度和准确性以及模型结构缺陷等因素均会造成模拟误差。

洮河流域产流量由上游到下游呈减少变化,上

游流域产流量大,中游段有所减少,下游产流量最小。中游河道径流入河量最大,下游河道入河量最小,上、中、下游分区径流占比分别为 37.21%、50.71%、12.08%,中游是河道径流量输入的主要区域,其中,中、上游径流占比 87.92%,与牛最荣等^[22]研究得出的 1956–2016 年洮河李家村多年平均实测径流量占比为 88.49% 的结论相似。代桑曲子流域产流量最大,其次是博拉河、周科河、括合曲、冶木河子流域,岔河和东峪沟子流域产流量最小。洮河流域中、上游气候寒冷湿润,为流域产水区,而下游温暖干旱,为流域产沙区,整个流域水沙异源^[9–10]。

洮河流域降雨量、产流量、径流量的相关性分析结果表明,各分区均遵循如下相关性排序:降雨量–产流量 > 产流量–径流量 > 降雨量–径流量,即降雨量与产流量的相关性最强,降雨量与径流量的相关性最弱,这也符合一般水文规律。降雨除去损失后得到净雨,即为产流过程,净雨再通过坡面和沟道汇流过程形成径流,即为径流过程,降雨先后经历这两个过程的变化,使其与径流的相关性弱于与产流的相关性。另外,3 个变量的相关性因区域地理环境的差异而不同,降雨与径流、产流与径流的相关性由上游到下游逐渐减弱,考虑是由于人类活动参与程度由上游到下游逐渐增大,从而弱化了降雨等气候因素对径流的影响,出现降雨、产流与径流相关性减小的情况。弹性分析法表明,洮河流域径流量多年呈显著减少趋势,其中气候变化影响值约为 $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,影响率约占 20%;人类活动影响值约为 $16.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,影响率约占 80%,因此,人类活动是影响径流变化的主要因素,这与杨林等^[21]关于洮河流域下垫面变化对径流变化的贡献率超过 60%,是引起研究区河川径流变化的主要因素的结论一致,具体取值差异与变化期时段有关。

在小流域或高海拔山区,实测水文气象站点往往稀缺,无法完整、全面表征各子单元产流汇流特征及不同监测断面的径流大小,本研究采用少量站点实测资料结合具有物理机制的水文模型模拟的方法,以解决因缺少资料而导致的以上问题,可为缺资料流域的产流、径流时空分析提供理论支撑。同时,分别从上、中、下游分区和子流域两个空间维度以及产流和径流两个研究维度,对缺资料地区——洮河流域进行分析研究,具体、细化地分析了产流、径流的时空规律及其关系,并从上游到下游的空间角度揭示了降雨、产流、汇流三者之间的相关性,定量确定了径流变化的主要影响因素。以上对于缺少资料

的小流域及偏远高海拔地区径流的相关研究均具有重要的借鉴意义。

5 结 论

本研究以缺资料地区——黄河上游洮河流域为例,基于分布式水文模型,将洮河流域划分为上游、中游、下游3个分区以及若干个子流域,对产流、径流时空特性进行研究,更为细化地揭示了产流、径流演变规律及降雨、产流与径流的相关关系,明确了气候变化和人类活动的影响。得到的主要结论如下:

(1)1956–2019年洮河流域红旗水文站径流量整体呈显著减少趋势,SWAT模型模拟月尺度径流量率定期决定系数 $R^2 = 0.78$ 、Nash–Sutcliffe系数 $E_{ns} = 0.78$;验证期 $R^2 = 0.79$ 、 $E_{ns} = 0.77$,相对误差 Re 均小于10%,模拟效果令人满意。

(2)洮河中游河道径流入河量最大,下游河道入河量最小,中游是河道径流量输入的主要区域。代桑曲子流域产流量最大,其次是博拉河、周科河、括合曲、冶木河子流域,岔河和东峪沟子流域的产流量最小。上、中游是主要产水区。

(3)流域产流量由上游到下游呈减少变化,上游流域产流量最大,多年平均值为214.18 mm,中游有所减少,为179.43 mm,下游产水量最小,为81.16 mm。流域降雨量、产流量、径流量的相关性排序为:降雨量–产流量>产流量–径流量>降雨量–径流量,且降雨量、产流量与径流量的相关性由上游到下游逐渐减弱。流域径流量多年呈显著下降趋势,气候变化影响值约为 $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,影响率约20%;人类活动影响值约为 $16.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,影响率约80%,因此,人类活动是影响径流量变化的主要因素。

参考文献:

- [1] 张建云,王国庆,金君良,等. 1956–2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展,2020,31(2):153–161.
- [2] 赵建华,刘翠善,王国庆,等. 近60年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):1–5+12.
- [3] 李勃,穆兴民,高鹏,等. 1956–2017年黄河干流径流量时空变化新特征[J]. 水土保持研究,2019,26(6):120–126+132.
- [4] 姚海芳,师长兴,顾珍逵. 气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响[J]. 干旱区地理,2018,41(3):472–479.
- [5] 苏贤保,李勋贵,王义鹏,等. 多时间尺度下黄河上游径流复杂度变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(5):1–10.
- [6] 魏伊宁,李勋贵,李芳. 黄河上游径流丰枯空间分布特征及其影响因素[J]. 水资源保护,2021,37(6):103–113.
- [7] 刘酌希,陈鑫,管晓祥,等. 变化环境下洮河流域径流变化归因[J]. 水土保持研究,2020,27(5):87–92+100.
- [8] 王莺,张强,王劲松,等. 基于分布式水文模型(SWAT)的土地利用和气候变化对洮河流域水文影响特征[J]. 中国沙漠,2017,37(1):175–185.
- [9] 王万瑞,王刘明,张雪蕾,等. 1956–2015年洮河径流演变特征研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版),2018,54(1):92–99.
- [10] 李常斌,杨林山,杨文瑾,等. 洮河流域土地利用/土地覆被变化及其驱动机制研究[J]. 地理科学,2014,34(7):848–855.
- [11] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KIRY J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual[M]. Temp: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 2002.
- [12] 奚建梅. 基于SWAT模型的黄河源区河流泥沙变化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2020.
- [13] WU Jun, DENG Guoning, ZHOU Dongmei, et al. Effects of climate change and land-use changes on spatiotemporal distributions of blue water and green water in Ningxia, Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2021, 13: 674–687.
- [14] 张艳霞,于瑞宏,薛浩,等. 锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应[J]. 干旱区研究,2019,36(1):67–76.
- [15] BUDYKO M I. Climate and life[M]. New York and London: Academic Press, 1974.
- [16] OL' DEKOP E M. On evaporation from the surface of river basins[J]. Transactions on Meteorological Observations, University of Tartu, 1911, 4: 200.
- [17] BUDYKO M I. Evaporation under natural conditions[M]. Leningrad: Gidrometeorizdat, 1948.
- [18] PIKE J G. The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate[J]. Journal of Hydrology, 1964, 2(2): 116–123.
- [19] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学,1981,5(1):23–31.
- [20] 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.
- [21] 杨林,赵广举,穆兴民,等. 基于Budyko假设的洮河与大夏河径流变化归因识别[J]. 生态学报,2021,41(21):8421–8429.
- [22] 牛最荣,王启优,孙栋元,等. 基于径流还现的洮河流域径流变化特征研究[J]. 干旱区地理,2021,44(1):149–157.