

黄土高原清水河流域降水—径流的响应关系

傅彦超^{1,2}, 王友胜², 魏天兴¹, 杨志³, 张晓明²,
解刚², 任宗萍⁴, 任正龔³, 魏小燕³

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100048;3.宁夏回族自治区水土保持监测总站,银川 750002;4.西安理工大学水利水电学院,西安 710048)

摘要: 宁夏清水河流域地处黄土高原干旱、半干旱地区,选取清水河流域出口泉眼山水文站及气象站 1989—2019 年逐日径流和降水数据,并通过 Chapman-Maxwell 法对清水河流域径流时间序列进行基流分割,并将基流分割的结果应用于径流事件的分离,来探究径流事件对降水的响应特征。结果表明:(1)宁夏清水河流域降水量、径流量和基流量整体上均呈现上升趋势,经 Mann—Kendall 检验未发现突变显著的时间点,日降雨量 10 mm 以下的降水呈现增加趋势,年内降水主要分布在 5—9 月,占比达 81.72%。(2)基于日径流时间序列,在清水河流域近 30 年间共分离出 58 次径流事件。在旱季降水总量与降雨强度显著相关,在土壤湿度和流域内水量存储条件的影响下,干旱时期的径流过程对事件前期降水响应较为敏感;在雨季,降水总量和降水强度是径流量的主要影响因素。(3)土壤水分对径流事件特征的影响具有阈值的变化,当前 10 天降水量未达 5 mm 时,峰值流量对其响应敏感。

关键词: 降水; 径流过程; 输沙率; 清水河流域; Mann—Kendall 检验

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)01-0017-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.003

Response Relationship Between Precipitation and Runoff in Qingshui River Basin on the Loess Plateau

FU Yanchao^{1,2}, WANG Yousheng², WEI Tianxing¹, YANG Zhi³,

ZHANG Xiaoming², XIE Gang², REN Zongping⁴, REN Zhengyu³, WEI Xiaoyan³

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Research Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048; 3.Soil and Water Conservation Monitoring Station of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002; 4.School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: The Qingshui River Basin in Ningxia is located in the arid and semi-arid transition area of the Loess Plateau. This paper selected the daily runoff and precipitation data of the Quanyanshan hydrological station and meteorological station in the Qingshui River Basin from 1989 to 2019, and used the Chapman-Maxwell method to divide the daily runoff time series of the basin. The result of base flow segmentation was applied to separate runoff events to further explore the response law of runoff events to precipitation. The results showed that: (1) The precipitation, runoff and base flow of the Qingshui River Basin in Ningxia showed an upward trend as a whole. The Mann—Kendall test showed there was no significant mutation time point. The precipitation with a daily rainfall of less than 10 mm showed an increasing trend. The annual precipitation was mainly distributed in May-September, accounting for 81.72%. (2) Based on the daily runoff time series, a total of 58 runoff events were isolated in the Qingshui River Basin in the past 30 years. Under drought conditions, the total amount of precipitation was significantly related to rainfall intensity. Under the influence of soil moisture and water storage, the runoff process under drought conditions was more sensitive to the precipitation response in the early stage of the event. In the rainy season, the total amount of precipitation and the precipitation intensity were the main factors influencing surface runoff. (3) The influence of soil moisture on the characteristics of runoff events had a threshold change. When the precipitation in the

收稿日期:2022-06-18

资助项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510701);国家自然科学基金项目(42107375);宁夏回族自治区水利科技项目(SBZZ-J-2021-12,SBZZ-J-2021-13)

第一作者:傅彦超(1998—),男,硕士研究生,主要从事流域自然地理研究。E-mail:fu_yanchao@bjfu.edu.cn

通信作者:魏天兴(1969—),男,教授,主要从事流域自然地理与水土保持效益监测与评价研究。E-mail:weitx@bjfu.edu.cn

previous 10 days was less than 5 mm, the peak flow was sensitive to its response.

Keywords: precipitation; runoff process; sediment transport rate; Qingshui River Basin; Mann—Kendall test

径流事件是指在连续的径流时间序列中,经过一系列降水的驱动,径流量随着降水增加,进而从基流值逐步增大达到峰值,并再次与基流值相近的连续过程^[1]。定义径流事件可以帮助理解径流特征的变化对降水过程的响应规律。把流域内降水的过程与径流事件相结合有助于理解在气候人为双重作用下的径流产流机制^[2]。基流是参与补给河流的地下径流,也是径流过程当中最为稳定的部分,基流能够补充径流,维持径流稳定,对保护流域生态健康起到关键作用^[3]。同时,作为稳定的地下径流,基流也承担着连接相邻径流事件的角色,保证水文过程的连续性和稳定性。基流识别和分割能够帮助划分径流事件,有的研究在识别基流时采用化学示踪剂的方法,示踪剂方法的优点是精度较高,但耗费时间较多,不适合长时间序列的测量^[4]。近年来,非化学示踪剂的方法如数字滤波法^[5-6]得到广泛的应用。有学者^[7]通过基流指数和径流指数等来研究流域内的径流变化情况。因此,本文采用 Chapman Maxwell 数字滤波法来识别多年径流序列的基流状况。

清水河流域地处黄土高原干旱、半干旱过渡区的宁夏中南部,气候较为干旱,水资源较为匮乏,年降水量不足 400 mm,流域内有土石山区、丘陵、阶地等多种地貌类型,水资源利用效率较低,制约当地经济发展^[8]。清水河是宁夏境内最大的入黄一级支流,是水土流失比较严重的地区之一,在清水河流域探究径流过程对降水的响应规律有助于帮助水资源调配和增加干旱地区径流过程的理解。目前,在径流过程的变化趋势及归因分析上已经有较多研究,但在我国黄土高原干旱区径流对降水的响应规律尚不清晰。因此,本文选择宁夏清水河流域为研究区域,结合流域下游泉眼山水文站径流数据和流域内气象站收集的降水数据,探索径流对降水的响应关系,研究结果可以为干旱条件下的水资源高效利用提供一定的理论依据。

1 研究区概况与数据来源

清水河位于宁夏回族自治区中南部,处于黄土高原干旱、半干旱交错区,面积 13 511 km²,全长 320 km,发源于原州区开城乡黑刺沟脑,流经宁夏南部黄土丘陵沟壑区和中部风沙区,包括海原县、原州区、同心县、西吉县、红寺堡区、中卫市,最终经中宁县泉眼山(37°29′12.78″N,105°32′30.53″E)汇入黄河,河流左岸有冬至河、苋麻河和中河等 30 余条支流,右岸有双井子沟和折死沟等 20 余条水系,南部海拔最高为 2 489 m^[9]。流域内植被较少,水土流失问题突出,河谷

区域地形平坦,以农业为主,属于温带半干旱气候。气温北高南低,降水分布不均衡,南部山区降水较多,多年平均降水量 600 mm 以上,而北部区域极为干旱,年均降水量不足 200 mm,年内降雨量最大和最小值分别出现在 8 月和 1 月,且流域内风大干燥,年平均蒸发量可达 1 800 mm。流域内土壤类型为灰褐土、黑垆土和灰钙土,天然植被主要为干旱草原,主要植物种群有禾草、芒草和茅草等^[10]。清水河流域 1989—2019 年逐日径流量取自清水河流域水文控制站泉眼山水文站,降雨数据来自固原、海原、同心、中宁 4 个气象站(图 1)。

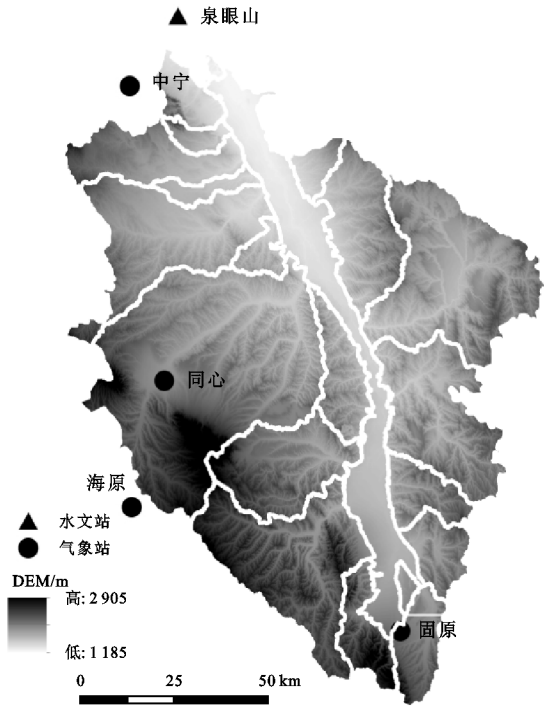


图 1 研究区位置

2 研究方法

2.1 基流分割

本文利用 C-M(Chapman Maxwell)数字滤波技术进行基流分割。数字滤波技术精度高、可靠性好,已经广泛应用在许多领域中,在水文上可以克服地表径流断流的误差问题。计算表达式^[11]为:

$$Q_{B(i)} = \frac{\alpha}{2-\alpha} Q_{B(i-1)} + \frac{1-\alpha}{2-\alpha} Q_i \quad (1)$$

式中: i 为时间(日期); $Q_{B(i)}$ 为在 i 日期的平均基流量(m^3); $Q_{B(i-1)}$ 为 i 前一时刻的基流量(m^3); Q_i 为 i 时刻的径流量(m^3); α 为退水系数,一般为后一时期的径流量和前一时期径流量的比值,经验值为 0.925^[12]。

2.2 Mann—Kendall 趋势分析

利用 Mann—Kendall(下文简称 M—K)非参数统计分析的方法对泉眼山水文站水文泥沙数据进行趋势性

分析。非参数 M—K 统计检验方法的优点是可以把长时间水文序列的数据变化趋势反映出来^[13],因此,该方法常用于水文气象数据的趋势性检测。

假定降雨时间序列为 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, m_i 为第 i 个数据 ($1 \leq j \leq i$) 的累计值,统计量 r_k 为:

$$r_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq N) \quad (2)$$

并且在降雨时间序列独立随机等假设条件下, d_k 方差与均值为:

$$E(r_k) = k(k-1)/4 \quad (3)$$

$$\text{var}(r_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (4)$$

标准化后:

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{var}(d_k)}} \quad (5)$$

式中:统计量 UF_k 是由径流时间序列构造,统计量 UB_k 为原径流序列反序列构造,计算公式与 UF_k 相同(公式 5)。在 M—K 检验曲线中,若 $UF > 0$,则表明序列呈上升趋势;若 $UF < 0$,则表明序列呈下降趋势^[14]。若 $|UF| > U_{0.05}$,表明时间序列变化趋势显著^[15]。

2.3 确定径流事件

当 i 时刻的流量既大于前一时刻 ($i-1$) 的流量,又

大于后一时刻 ($i+1$) 的流量时, i 时刻的流量有最大值,为 1 次洪峰,径流事件开始于洪峰流量之前最接近基流的时刻,结束在洪峰流量后径流量与基流量相等的时刻^[16]。为确保选择的径流事件具有代表性,选取洪峰流量远大于基流量时,持续时间不低于 5 天。

3 结果与分析

3.1 降水、径流的年际变化与年内变化

清水河流域在 1989—2019 的 30 年内,年均降水量 201.27 mm,年均径流量 1.26 亿 m^3 ,年均基流量 0.63 亿 m^3 。进一步对泉眼山水文站收集的数据进行线性回归分析(图 2)表明,径流量、基流量和降水量在近 30 年中均有增加的趋势,但增加趋势不明显。降水量、径流量和基流量的倾向率为 $1.25 \times 10^{-4} \text{ mm/a}$, $1.10 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$, $1.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,径流量和基流量增加程度较降水量更大。进一步通过 Mann—Kendall 突变检测发现,近 30 年来,径流量和基流量在 1995 年和 2009 年之后分别有减少和增加的趋势,相应地,降水量在 1995 年降低,在 2009 年之后有升高的趋势。但是突变检测结果显示 UF 与 UB 的交点在显著性水平之内,说明近 30 年间未发生明显的突变增加或减少。

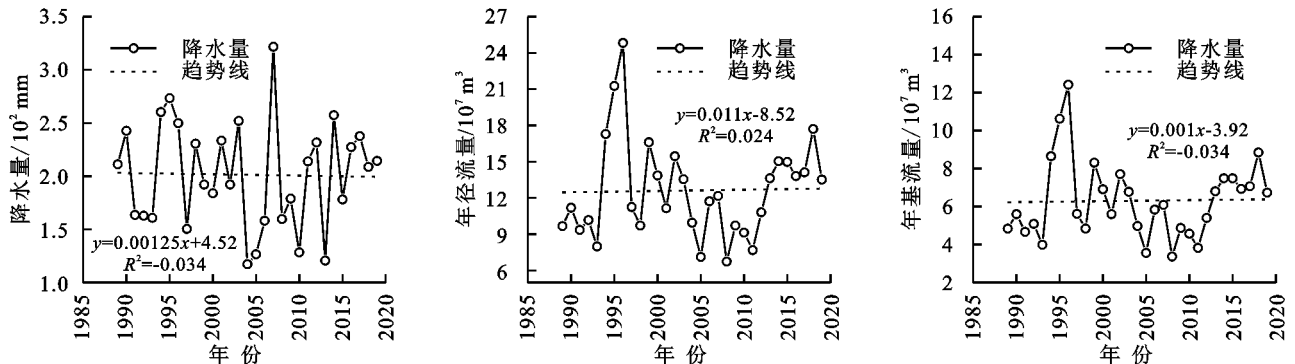


图 2 1989—2019 年降水量、年径流量和年基流量变化趋势

逐月降水量分析表明,清水河流域月平均降水量分布特征为单峰型,月平均降水量从 3 月开始缓慢增加,随 4—5 月雨季来临,降水量有明显增加,并且在 8 月达到峰值,为 46.24 mm,9—10 月下降明显,11—12 月下降走缓达到 12 月的 0.52 mm。结果显示,降水量在 5—9 月比较集中,为 19.11~46.24 mm,其他月份降水较少,降水主要集中在夏秋季节,冬春季节降水较少。清水河流域雨季多年平均降水总量达到 164.49 mm,在全年降水量中占比达 81.72%。

3.2 径流事件对降水的响应关系

基流分割结果(图 3)显示,基流线总体低于径流线,并且在年径流量较大时,基流量与其差值越大,而在年径流量较小时,二者差值较小。在 1995 年径流显著升高,此时,年径流量为 2 461.07 m^3/s ,年基流量为 1 229.62 m^3/s ,二者差值为 1 231.45 m^3/s ;而在 2011 年,径流量相对平稳,其年径流量为 888.63 m^3/s ,年基流量

为 442.38 m^3/s ,二者差值为 446.24 m^3/s 。同时,也发现在旱季径流量较小时,基流量与之差值较小,但处于雨季时,特别是汛期二者差异较为明显。此基流分割结果可进一步作为径流事件确定与筛选的依据。

对泉眼山水文站 1989—2019 年径流观测数据进行径流事件识别,共检测出 58 次径流事件。其中,雨季(夏秋)和旱季(春冬)分别检测出 40,18 次,径流事件包括 1 次或多次连续性降水。对径流事件的降水特征和水文要素进行相关性分析(图 4),显示出总降水量 (P_{tot})、最大降雨强度 ($I_{p\text{max}}$) 和平均单次降水量 (P_a) 具有极强的相关性 ($p < 0.01$),在雨季其相关系数分别为 0.79 和 0.68,旱季分别为 0.92 和 0.90,均通过 $p < 0.05$ 的显著性检验,表明在清水河流域降水总量较大时,往往伴随较大的降雨强度,平均单次降雨量也随之显著增大。相较于雨季,旱季的降水总量与最大降雨强度的相关系数更大,表明在干旱条件下,降雨强度更

受降水总量的影响。在降水总量的影响下,雨季径流量最大值和基流量最大值均与最大降雨强度(I_{pmax})以及前期基流量(Q_B)呈现出显著的相关关系($p<0.05$)。不同的是,基流量最大值与平均单次降水量(P_a)的相关性不显著($p>0.05$),表明基流量对单次降水的响应不敏感。在旱季径流量最大值和基流量最大值分别与事件前 10 天降水显著相关($p<0.05$),相关系数为分别为 0.58 和 0.69,结果显示,在旱季径流事件前期的积水程度显著影响径流量和基流量的最值,而在雨季影响不显著。

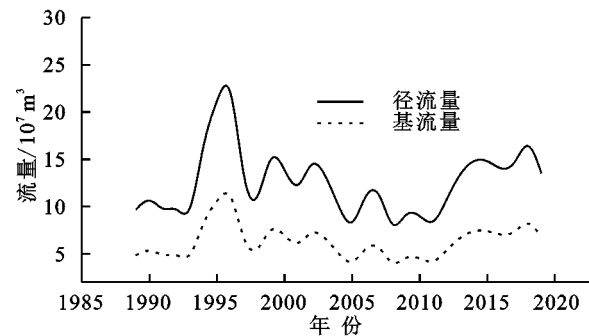
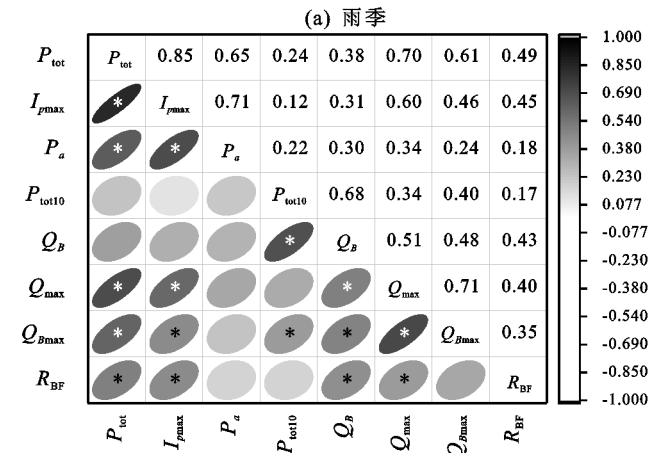


图 3 清水河流域 1989—2019 年基流分割

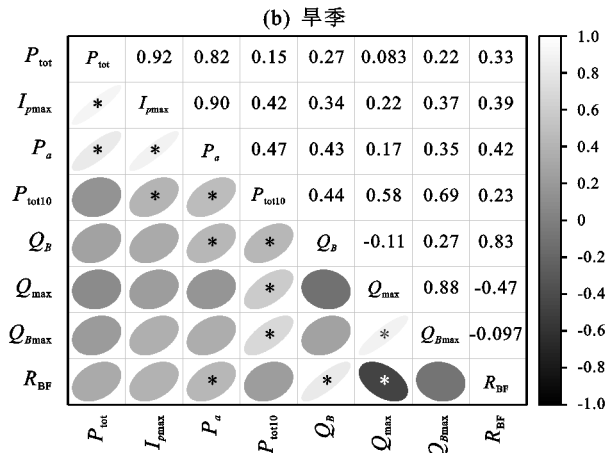


图 4 降水特征与水文特征的相关系数

3.3 影响径流特征的主要降水因子

通过主成分分析(图 5)显示,在旱季时,径流事件前 10 天的降水总量和事件前期基流量显著影响径流事件特征。而在雨季,不仅径流事件前 10 天降水量对径流特征有显著影响,降水总量(P_{tot})也是影响径流事件特征的重要因素。春冬季降水少,流量小,事件前期的降水增加径流事件前期土壤含水量,显示出流域内水量存储情况对径流过程有较大影响。雨季降水量较大,径流事件过程中的降水总量影响峰值流量和最大径流等径流特征。为进一步探究径流事件过程中径流事件前 10 天的降水总量(P_{tot10})对径流事件特征的影响,将前 10 天降水总量(P_{tot10})按照 $[0,0.5)$ $[0.5,2.0)$ $[2.0,5.0)$ $[5.0,10)$ $[10,20)$ 和 ≥ 20 mm 分为 6 个等级,然后分别观察对应径流最大值(Q_{max})、基流量最大值(Q_{Bmax})和基流指数(R_{BF})的均值变化情况。计算结果显示,随径流事件前 10 天降水总量增加,径流最大值(Q_{max})和基流量最大值(Q_{Bmax})均有上升的趋势,但径流最大值相较于基流最大值增加更为明显。当前 10 天降水总量(P_{tot10})在达到 5~10 mm 时,基流量增加趋于平缓。从基流指数(R_{BF})的均值变化来看,其数值并未随径流事件前 10 天降水总量(P_{tot10})的增加而持续升高,而在前 10 天降水总量达到 5 mm 左右时,基流指数出现峰值。表明在径流事件前期,土壤含水量增大以后,基流量的变化相对于径流量变化不明显。

3.4 不同等级降水量的贡献率和变化特征

清水河流域内水资源主要以降水补给为主,主成分分析发现,降水总量(P_{tot})是影响径流事件特征的主要影响因子,为进一步明确降水总量级的变化对径流量和基流量的影响,把流域范围内 1989—2019 年降水划分为 <5 , $5\sim10$, $10\sim20$, >20 mm 4 个等级,并在每个降雨量级下计算其倾向率和贡献率。贡献率可以反映单一要素对总要素的贡献量,计算为每一要素占总要素百分比。降水的贡献率可以定义为不同量级降水量与总降水量的比值,而径流量和基流量的贡献率表示在日降水量处于不同级别时的径流量或基流量与总径流量或总基流量的比值,表 1 为 1989—2019 年各年度贡献率的均值。结果表明, <5 , $5\sim10$, $10\sim20$, >20 mm 的年降水量贡献率均值为 27.476%, 25.209%, 27.668%, 19.647%, $10\sim20$ mm 降水贡献率最大,其次为 <5 mm 的降水,贡献率最低的为 >20 mm 降水。由表 1 线性倾向率的计算结果可知,清水河流域 1989—2019 年, <5 , $5\sim10$ mm 降水呈现增加趋势,线性倾向率分别为 0.541, 0.108 mm/a, <5 mm 降水增加的趋势大于 $5\sim10$ mm 降水;而 $10\sim20$ mm 和 >20 mm 降水减少的趋势明显,倾向率分别是 -0.467, -0.335 mm/a, 显示出 $10\sim20$ mm 降水减少更多。对应之下,径流量变化与不同量级的降水变化呈现差异,在 <5 , >20 mm 的降水下,清水河流域内近 30 年间的径流量有增加的趋

势,线性倾向率分别为 4.129,0.271 m³/(s·a),平均贡献率分别达到 93.625%和 0.976%。基流量则仅在

<5 mm 的降水下表现为增加,线性倾向率为 1.544 m³/a,贡献率达到 94.851%。

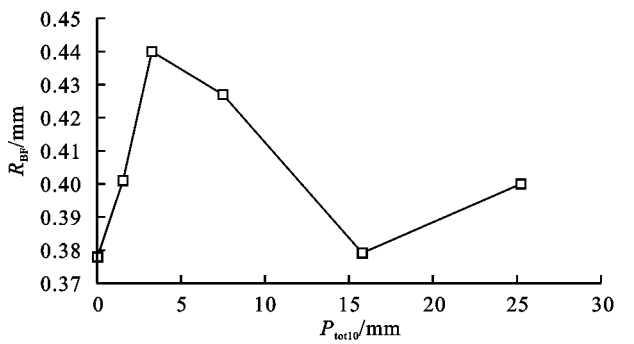
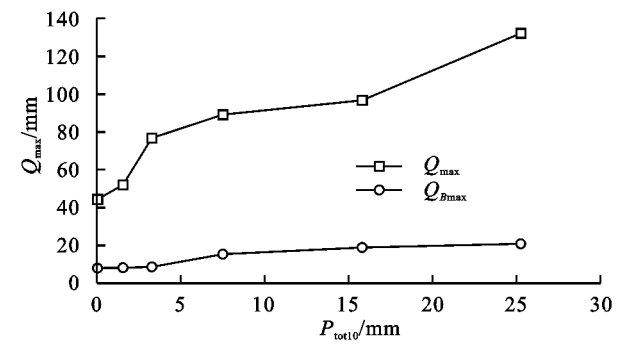


图 5 前期降水量的量级变化对水文特征的影响

表 1 1989—2019 年清水河流域不同量级降水倾向率和贡献率

项目	<5 mm		5~10 mm		10~20 mm		>20 mm	
	倾向率	贡献率/%	倾向率	贡献率/%	倾向率	贡献率/%	倾向率	贡献率/%
降水	0.541	27.476	0.108	25.209	-0.467	27.668	-0.335	19.647
径流	4.129	93.625	-1.232	3.513	-1.058	2.033	0.272	0.976
基流	1.544	94.851	-0.433	2.996	-0.404	1.637	-0.125	0.619

注:降水倾向率单位为 mm/a;径流和基流倾向率单位为 m³/(s·a)。

由 1989—2019 年宁夏清水河流域年降水量与泉眼山水文站径流量变化(图 6)可知,年降水量与年径流量的变化趋势基本相符。泉眼山水文站径流量变化与清水河流域<5,5~10,10~20,>20 mm 的年降水量有相同的变化趋势,相关系数(R)分别为 0.010,0.054,0.300,0.380,呈现出正相关,其中>20

mm 年总降水量通过了显著性检验($p<0.05$),表明径流量变化趋势与>20 mm 降水量的变化趋势有显著的相关性。由泉眼山水文站实测径流量结果可知,近 30 年来,流域内径流在 2005 年达到最低,后续年份径流量逐渐升高。在 2005 年各量级降水相较于往年均有减少,显示出径流量对降水的响应比较敏感。

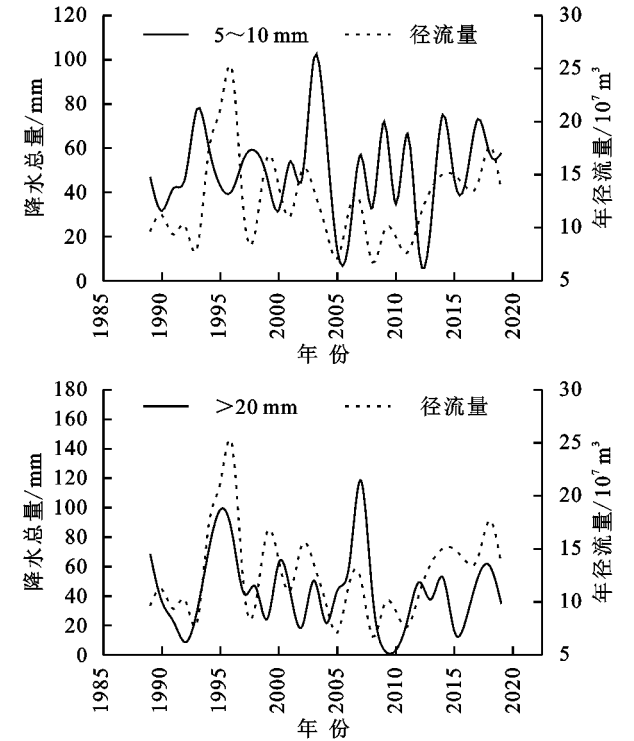
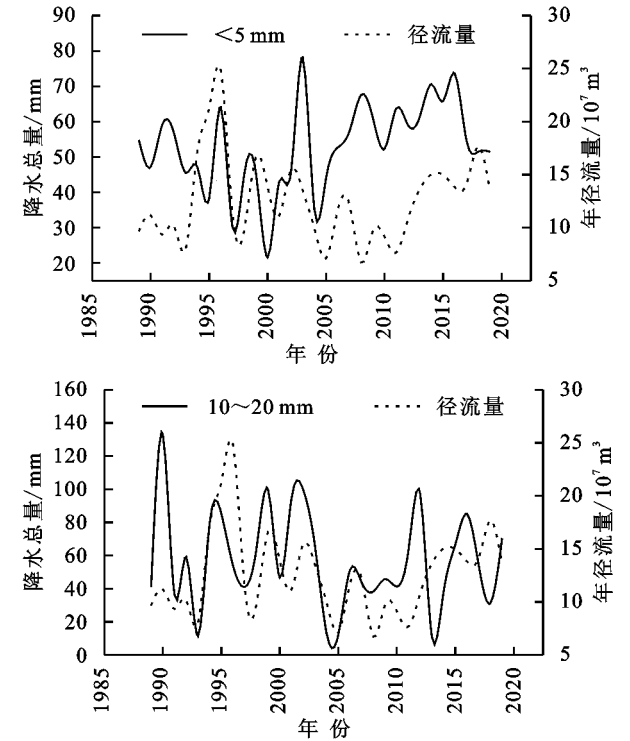


图 6 1989—2019 年清水河流域不同量级年降水总量与泉眼山水文站实测径流量变化

4 结论

(1)宁夏清水河流域年降水量、径流量与基流量整体上均呈现上升趋势,但经 Mann—Kendall 检验未发现明显突变时间点。近 30 年来,10 mm 以下降

水呈现增加趋势,年内降水主要分配在 5—9 月,占比达 81.72%。1989—2019 年,>20 mm 的降水虽呈减少趋势,但>20 mm 的降水对年径流量的贡献率呈上升趋势。表明清水河流域强降雨频次虽然有所降低,但降雨

量级并未随之降低。

(2)在旱季降水总量与降雨强度显著相关,且受土壤湿度与流域内储水量的影响,径流过程对事件前 10 天降水响应较为敏感;在雨季,地表径流的主要影响因素为降水总量和降水强度。

(3)流域内径流事件前期储水量对径流事件的特征影响具有阈值变化,在前 10 天降水量未达 5 mm 时,峰值流量对其响应敏感。

(4)流域内 $<5, 5\sim10, 10\sim20, >20$ mm 的降水量均与泉眼山水文站径流量呈现正相关,相关系数(R)分别为 0.010, 0.054, 0.300, 0.380, 其中 >20 mm 降水量与径流量变化趋势具有显著的相关性,其联系更加紧密。

参考文献:

- [1] Tarasova L, Basso S, Zink M, et al. Exploring controls on rainfall-runoff events: 1. Time series-based event separation and temporal dynamics of event runoff response in Germany [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10): 7711-7732.
- [2] Blume T, Zehe E, Bronstert A. Rainfall—runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation[J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2007, 52(5): 843-862.
- [3] 王晨杨, 闫铁柱, 翟丽梅, 等. 密云水库白河流域基流演变特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3181-3190.
- [4] 莫崇勋, 谢燕平, 班华珍, 等. 不同基流分割方法在澄碧河的适用性探讨[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 86-92.
- [5] Xie J X, Liu X M, Wang K W, et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583:

e124628.

- [6] 吴珍妮, 黄土区基流分割适宜性方法及基流特征分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [7] 亢小语, 张志强, 陈立欣, 等. 黄土高原中尺度流域基流变化驱动因素分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 563-572.
- [8] 王素艳, 李欣, 王璠, 等. 宁夏降水资源格局演变特征[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(3): 733-746.
- [9] 包淑萍, 马云, 王生鑫, 等. 宁夏清水河流域水资源评价分析[J]. *宁夏农林科技*, 2015(3): 43-46, 50.
- [10] 孟祥仪. 基于 WASP 模型的宁夏清水河水水质预警研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [11] Sun J Q, Wang X J, Shahid S, et al. An optimized baseflow separation method for assessment of seasonal and spatial variability of baseflow and the driving factors [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(12): 1875-1896.
- [12] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 63-72.
- [14] 郑诗然, 胡琦, 和骅芸, 等. 1961—2020 年华北平原冬小麦-夏玉米生长季内光能资源时空变化特征[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(1): 26-37.
- [15] Sheng Y, Wang C Y. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series[J]. *Water Resources Management*, 2004, 18(3): 201-218.
- [16] Mei Y W, Anagnostou E N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 636-649.

(上接第 7 页)

- [16] 苏长芳. 基于多尺度影响因子的水土保持措施布局研究[J]. *水利技术监督*, 2020(1): 161-164, 268.
- [17] 和继军, 蔡强国, 方海燕, 等. 张家口地区水土保持措施空间配置效应评价[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 69-75.
- [18] 周毅, 魏天兴, 解建强, 等. 黄土高原不同林地类型水土保持效益分析[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 12-16, 21.
- [19] 何长高. 水土保持在综合调控流域水资源配置中的作用[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 91-102.
- [20] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64-69.
- [21] 谢永生, 李占斌, 王继军, 等. 黄土高原水土流失治理模式的层次结构及其演变[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 211-214.
- [22] 水利部黄河水利委员会. 1919—1951 年及 1991—1998 年黄河流域主要水文站实测水沙特征值统计[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2001.
- [23] 黄河水利委员会. 黄河水沙变化研究[R]. 郑州: 黄河水

利委员会, 2015.

- [24] 张胜利, 于一鸣, 姚文艺. 水土保持减沙减沙效益计算方法[M]. 北京: 中国环境出版社, 1994: 106-145.
- [25] 赵文林. 黄河泥沙[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996: 43-48.
- [26] 张兴军. 黄河流域水土流失面积和强度实现“双下降”[EB/OL]. (2022-01-30) [2022-10-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/30/content_5671409.htm.
- [27] 姚文艺, 李长明, 张攀, 等. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J]. *人民黄河*, 2018, 40(6): 141-147.
- [28] 殷宝库, 苏鹏飞, 张建国, 等. 1985—2020 年黄河中游多沙粗沙区水土流失动态变化[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 123-126.
- [29] 李占斌. 黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀协同治理技术与示范项目实施方案[R]. 西安: 西安理工大学, 2022: 3.
- [30] 陈正新. 黄河十大孔兑水土保持减沙效益评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2021: 236-237.