

# 洮儿河流域径流事件对降水的响应研究\*

李 苗<sup>1,2)</sup> 严思睿<sup>1,2)</sup> 李姝臻<sup>1,2)</sup> 康银红<sup>3)</sup> 刘 强<sup>1,2)†</sup> 张军龙<sup>4)</sup>

(1)北京师范大学环境学院,水环境模拟国家重点实验室,100875,北京;

(2)北京师范大学环境学院,教育部水沙科学重点实验室,100875,北京;

(3)四川农业大学水利水电学院,625014,四川雅安; (4)山东师范大学地理与环境学院,250358,山东济南)

**摘要** 以洮儿河流域为研究对象,选取洮南水文站 1960—2016 年日径流数据,采用改进退水系数后的 Chapman-Maxwell 法对流域日径流进行基流分割,并在分离径流事件的基础上,探究径流事件对降水的响应规律.结果表明:洮儿河流域降水、径流与基流均呈现下降趋势,且径流、基流与降水均检测到减小突变;基流维持径流过程的连续性,基于日径流序列,共分离出 72 次径流事件,均由多次降水导致,降水总量显著影响最大径流、最大基流;受土壤含水量和流域储水量等因素影响,径流对降水的响应具有明显的阈值特征.因此,在气候变化、人为干扰等不确定因素影响下,深入理解水文过程动态变化与生态性能指标之间的内在联系,有助于河流生态的保护和恢复.本文研究结果可加深不同流域产流机制和径流对降水响应的理解,为维持河道生态系统健康提供一定理论依据和实践参照.

**关键词** 径流事件;基流;降水;Chapman-Maxwell 法;洮儿河流域

**中图分类号** P933

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2020387

## 0 引言

河道径流过程由一系列径流事件组成<sup>[1]</sup>.径流事件可定义为径流序列中以 1 次或多次降水为驱动,以径流量等于基流量为起始点,径流量随着降水过程逐步增强达到峰值,并以径流等于基流为终止点的连续过程.径流事件为识别并量化降水与径流关系提供了良好的技术窗口<sup>[2]</sup>,尤其将径流事件与降水、流域前期储水量等相结合,有助于深入理解流域产流机制<sup>[3]</sup>.受地形、储水量等流域特征影响,径流事件具有时空变异性<sup>[4]</sup>.且在气候变化与高强度人类活动双重作用下,流域内植被、土壤与水文相互作用方式改变,导致径流对降水响应的差异.鉴于此,识别径流事件、探究径流对降水响应规律,是理解变化环境下流域产流机制、揭示河道生态系统演变规律的关键.

基流是河川径流中较稳定的部分,能够补充河道径流,保护河岸生态系统健康<sup>[5-6]</sup>;同时,作为连接不同径流事件的关键水文过程,基流维系着水文过程的连续性和河道内水文连通性<sup>[7-9]</sup>.基流分割是识别径流事件的前提.基流分割有示踪剂与非示踪剂 2 种方法<sup>[10]</sup>.示踪剂法虽较为精准,但耗时多、难以在大流域应用<sup>[11]</sup>;非示踪剂法中的数字滤波法,由于原理清晰且易于在大流域中应用,得到广泛关注<sup>[12-13]</sup>.基流

分割为进一步分析径流过程对典型气候事件的响应,研究特定流域产流机制提供了良好技术支撑.如 Yang 等<sup>[14]</sup>应用 Lyne-Hollick 退水系数法分割基流,研究澳洲东南部地区流域在极端干旱影响下水文恢复滞后性.目前,年径流变化趋势<sup>[15]</sup>、径流干旱特征<sup>[14]</sup>、径流对暴雨的响应<sup>[16]</sup>等已经有较多研究.有学者开始关注径流事件与降水的关系.如:Mei 等<sup>[17]</sup>研究了降水对径流事件特征如基流指数、径流指数的影响;Tarasova 等<sup>[1]</sup>关注径流事件对降水响应的动态过程.然而,受区域气候、流域特征等影响,径流事件对降水响应的敏感性和阈值特征存在明显区域差异性.

洮儿河流域处于半干旱地区,水资源相对匮乏,且受气候变化和人类活动影响,洮儿河流域水资源开发利用失衡,出现径流衰减、河道断流等问题<sup>[18]</sup>.如察尔森水库拦截上游来水,下游可用水量减少,洮南和黑帝庙水文断面连续断流<sup>[19]</sup>,河道断流已经导致河道生态退化等问题.研究径流对降水的响应规律有助于揭示不同流域产流机制,维持河道生态系统健康.因此,本研究选择洮儿河流域为研究对象,利用流域下游的洮南站水文站数据和流域 4 个气象站数据,划分径流事件,研究径流、基流过程对降水的响应规律,研究结果为河道生态环境恢复提供一定的理

\* 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0404505, 2016YFC0500402);国家自然科学基金资助项目(42071129, 41771042)

† 通信作者:刘强(1978—),男,博士,副教授.研究方向:生态水文. E-mail: liuqiang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-19

论支撑与实践参考。

## 1 研究区概况与数据

洮儿河是嫩江下游右岸重要支流,发源于大兴安岭东麓高岳山,流域总面积4.2万 km<sup>2</sup>,干流全长563 km。本研究选取洮南站以上流域为研究区域,面积约为3.6万 km<sup>2</sup>。流域属于北温带大陆性季风气候区,多年平均降水量435.4 mm,6—9月降水总量约占全年的85.4%;在空间上,降水量从上游到下游递减<sup>[20]</sup>。受全球变暖等气候变化和筑堤引水等人为活动影响,流域生态环境脆弱<sup>[21]</sup>,河段断流,湿地面积减少或退化,荒漠化、盐碱化等生态问题突出<sup>[22]</sup>。如2001—2004年,洮南站河道全年断流<sup>[23]</sup>。河道断流导致莫莫格国家级自然保护区失去连续的水源补给,湿地生态系统退化<sup>[24]</sup>。

本研究选取的洮南水文站1960—2016年日径流资料,由吉林省水文水资源调查局提供;阿尔山、索伦、乌兰浩特、白城4个气象站1960—2016年的日降水量序列,源自中国气象局国家气候中心(<http://data.cma.cn>),用于研究洮儿河流域径流事件对降水的响应。

## 2 方法

**2.1 基流分割** 本研究选择数字滤波法中Chapman-Maxwell(简称C-M)方法进行基流分割。C-M方法有效解决了地表径流断流的不确定问题,提高了准确性<sup>[25]</sup>,计算式为<sup>[10]</sup>

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

式中*i*为时间步长, $Q_{B(i)}$ 表示*i*时刻的基流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), $Q_{B(i-1)}$ 表示*i*前一时刻的基流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), $Q_i$ 表示*i*时刻的径流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), $\alpha$ 表示退水系数。

$\alpha$ 可根据退水分析得到,其经验值为0.925,由Nathan等<sup>[26]</sup>根据德国6个流域特征获取,并用于基流分割。本研究中利用Cheng等<sup>[27]</sup>开发的自动化基流识别法(ABIT)计算流域 $\alpha$ ,并进行基流划分。

**2.2 趋势分析和突变检测** 使用一元线性回归模型对洮儿河流域降水、径流和基流进行趋势分析。一元线性回归模型可以根据观测的数据进行线性拟合,是最简单的趋势分析模型<sup>[28-29]</sup>,计算式为

$$y = ax + b, \quad (2)$$

式中*y*表示年降水(mm)或年径流序列( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),*x*表示时间序列(*a*)。

采用Mann-Kendall(M-K)非参数统计方法进行突变检测。M-K法能有效区分某一过程为自然波动还是有变化趋势,常用于非正态分布的水文气象数据

的趋势检测<sup>[30-31]</sup>。对于具有*n*个样本量的时间序列*x*,构造一秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i (k=2,3,\dots,n), \quad (3)$$

其中:

$$r_i = \begin{cases} +1 (x_i > x_j), \\ 0 (x_i \leq x_j), \end{cases} \quad (j=1,2,\dots,n). \quad (4)$$

秩序列 $S_k$ 是第*i*时刻数值大于*j*时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下,定义正向样本序列的统计量

$$U_{F_i} = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}}, \quad (k=1,2,\dots,n), \quad (5)$$

其中, $U_{F_i}=0$ , $E(S_k)$ 和 $\text{Var}(S_k)$ 是累计数 $s_k$ 的均值和方差:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4}, \quad (6)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}. \quad (7)$$

按时间序列*x*的逆序再重复上述过程,同时使 $U_{F_i}=-U_{B_i}$  ( $k=n, n-1, \dots, 1$ ), $U_{B_i}=0$ 。 $U_{F_i}=U_{B_i}$ 时即为突变点。显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

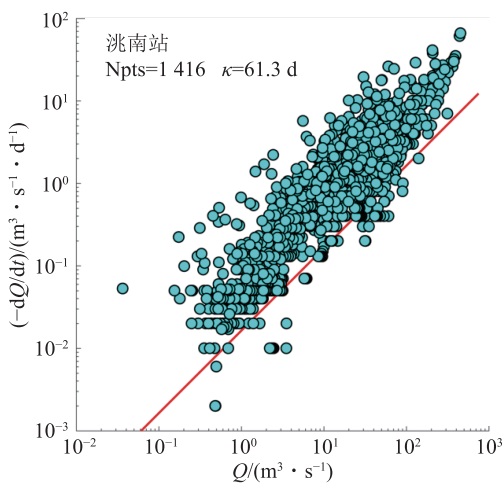
**2.3 径流事件识别** 根据径流序列确定径流事件。当 $Q_i > Q_{i-1}$ 和 $Q_i > Q_{i+1}$ 时,*i*对应的流量为峰值;径流事件开始于峰值前径流与基流最接近的时刻,当径流再次趋近于基流,该径流事件结束<sup>[17]</sup>。为避免径流波动引起虚假事件,当峰值流量大于基流10%时,才被确定为径流事件,其最小持续时间为1 d。一个径流事件可能由1次或多次降水事件引起,1 d或连续几天持续降水被定义为一次降水事件<sup>[32]</sup>。表1为径流事件中降水特征及水文响应指标。

## 3 结果

**3.1 降水、基流与径流的时间变化趋势** 基于ABIT得到洮儿河流域的退水时间 $\kappa$ 为61.3 d(图1),退水系数 $\alpha$ 为0.984,其值大于经验退水系数0.925。相较于经验值,将AIBT得到的退水系数应用于C-M法,基流过程线更加稳定,且平滑;此外,不同退水系数得到的基流过程线在枯水期相差不大,但汛期差异明显(图2)。年尺度上,经验退水系数(0.925)和ABIT退水系数(0.984)下的基流贡献率分别为48.25%和37.73%,前者远大于后者,结果与Zhang等<sup>[10]</sup>一致。Zhang等比较了4种数字滤波法和化学过程线分割法

表 1 径流事件中降水特征及水文响应指标

参量	定义	量符号	单位	参考文献
降水总量	导致某一径流事件的降水量之和	$P_{\text{tot}}$	mm	Rauthe 等 <sup>[33]</sup> Zink 等 <sup>[34]</sup>
最大降雨强度	径流事件期间的最大降水强度	$I_{p\text{max}}$	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	Rauthe 等 <sup>[33]</sup>
平均单次降水量	降水总量除以降水次数	$P_a$	mm	径流事件分离
前10 d降水总量	径流事件前10 d降水量之和	$P_{\text{tot}10}$	mm	Rauthe 等 <sup>[33]</sup>
事件前期基流	径流事件前1 d的基流	$Q_B$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	IH <sup>[35]</sup>
最大径流量	径流事件中径流量的最大值	$Q_{\text{max}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	径流事件分离
最大基流量	径流事件中基流量的最大值	$Q_{B\text{max}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	径流事件分离
基流指数	基流量与总径流量的比率	$R_{\text{BF}}$	1	Sapač 等 <sup>[36]</sup>



红线表示低于 5% 包络线, 斜率为 0.984.

图 1 自动基流识别技术 (ABIT) 评估洮儿河流域的退水系数

之间的偏差, 改进退水系数均表现出更好的分割性能, 而经验  $\alpha$  一般会高估基流量.

趋势分析结果显示, 1960—2016 年洮儿河流域年降水量、年径流量和年基流量均呈现下降趋势, 线性倾向率分别为  $-0.003 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $-0.1 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$  和  $-0.05 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$  (图 3-a、c 和 e), 径流和基流下降趋势强于降水. M-K 突变检测结果显示, 降水分别在 1999、2008 年发生减小突变, 径流量和基流量发生减小突变的时间分别为 2006、2010 年 (图 3-b、d 和 f). 洮儿河流域在 1998 年发生洪水后出现减小突变; 径流和基流在 2006 年第 1 次发生减小突变 (即断流恢复后的第 1 年); 2010 年径流和基流再次发生减小突变.

**3.2 径流事件识别及其对降水的响应** 1960—2016 年洮儿河流域共识别出 72 次径流事件, 春季和夏季分别为 36 次, 均由多次降水事件形成. 降水总量 ( $P_{\text{tot}}$ ) 显著影响最大径流 ( $Q_{\text{max}}$ )、最大基流 ( $Q_{B\text{max}}$ ) ( $P < 0.05$ ), 尤其在夏季, 相关系数分别为 0.79 和 0.78; 与降水总量相比, 前 10 d 的降水总量 ( $P_{\text{tot}10}$ ) 仅在夏季与最大径

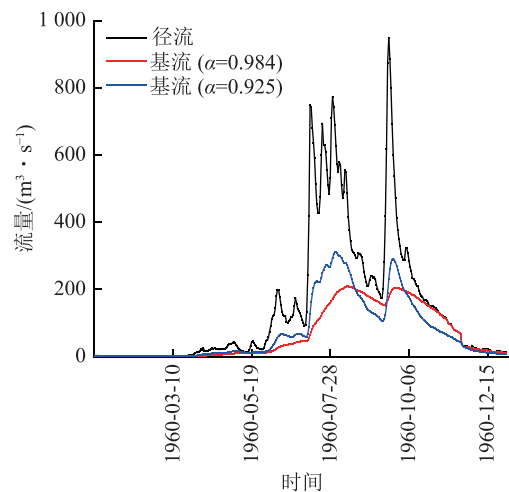
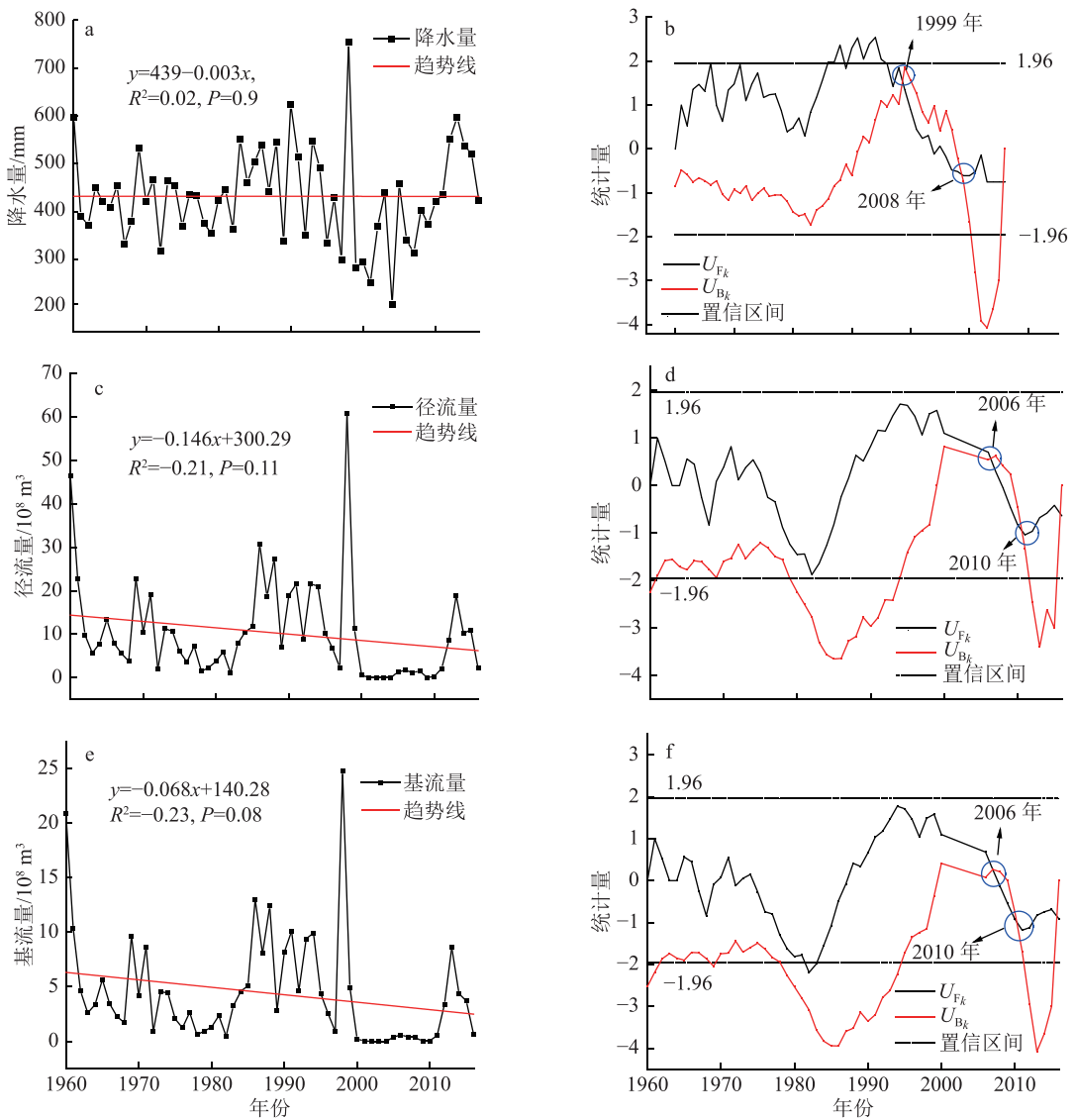


图 2 自动基流识别技术 (ABIT) 和经验退水系数基流分割结果

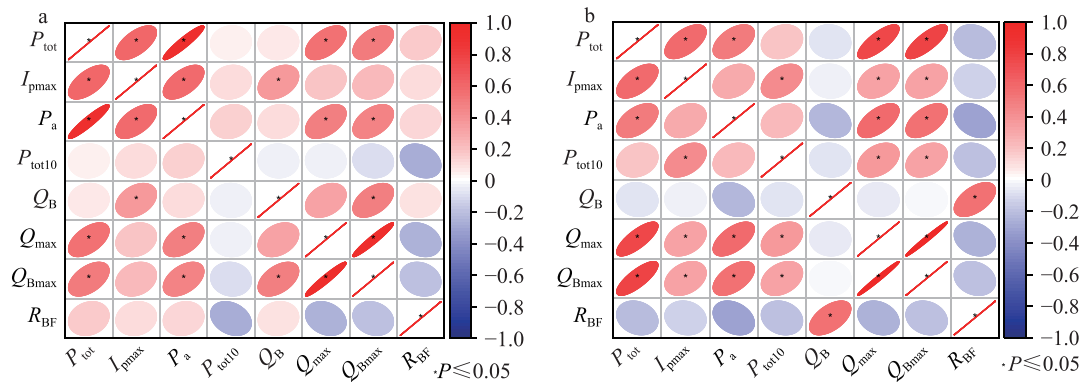
流 ( $Q_{\text{max}}$ )、最大基流 ( $Q_{B\text{max}}$ ) 显著相关, 相关系数分别为 0.50 和 0.47 ( $P < 0.05$ ); 春季的事件前期基流量 ( $Q_B$ ) 与最大基流 ( $Q_{B\text{max}}$ ) 关系显著, 相关系数为 0.48 ( $P < 0.05$ ), 表明在枯水季节 (春季) 降水量少且分散, 前期流域蓄水量 (前期基流量) 对径流事件影响较大 (图 4); 而相对于枯水季节 (春季), 丰水季节 (夏季) 径流事件受降水强度影响更大, 最大降水强度 ( $I_{p\text{max}}$ )、平均单次降水量 ( $P_a$ ) 与最大径流量 ( $Q_{\text{max}}$ ) 相关系数分别达到 0.34、0.59 ( $P < 0.05$ ), 结果表明, 除了降水总量, 最大降水强度、平均单次降水量也显著影响着径流事件特征 (图 5).

**3.3 影响径流的关键降水因子识别** 主分量分析结果显示 (图 6), 降水量大小影响最大径流和最大基流, 是决定径流事件特征的主要成分; 除了降水总量, 前 10 d 降水量 ( $P_{\text{tot}10}$ ) 影响土壤前期含水量, 是影响径流事件关键成分. 基于  $P_{\text{tot}10}$ , 将径流事件按照  $[0, 5)$ 、 $[5, 10)$ 、 $[10, 15)$ 、 $[15, 20)$  和  $\geq 20 \text{ mm}$  分为 5 个等级, 计算最大径流 ( $Q_{\text{max}}$ )、最大基流 ( $Q_{B\text{max}}$ )、基流指数



2001—2004 年河道全年断流.

图 3 洮儿河流域降水 (a、b)、径流 (c、d) 及基流 (e、f) 趋势和突变分析



a 春季; b 夏季.

图 4 降水特征 ( $P_{tot}$ 、 $I_{pmax}$ 、 $P_a$ 、 $P_{tot10}$ ) 与水文特征 ( $Q_B$ 、 $Q_{max}$ 、 $Q_{Bmax}$ 、 $R_{BF}$ ) 的相关系数

( $R_{BF}$ ) 均值. 结果表明, 随着  $P_{tot10}$  增加, 最大径流、最大基流均值呈上升趋势; 相对于基流, 径流上升趋势更加明显 (图 7-a); 平均基流指数先增大后减小, 当

前 10 d 降水量为 [5, 10] mm 时, 基流指数最大 (图 7-b), 表明土壤前期含水量达到一定程度后, 径流对降水的响应敏感程度远大于基流.

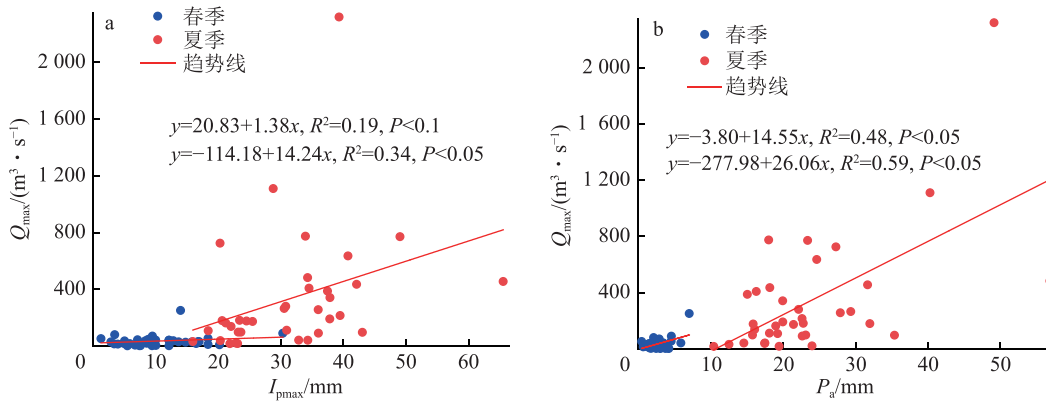


图 5 最大降水强度 (a) 和平均单次降水量 (b) 对径流的影响

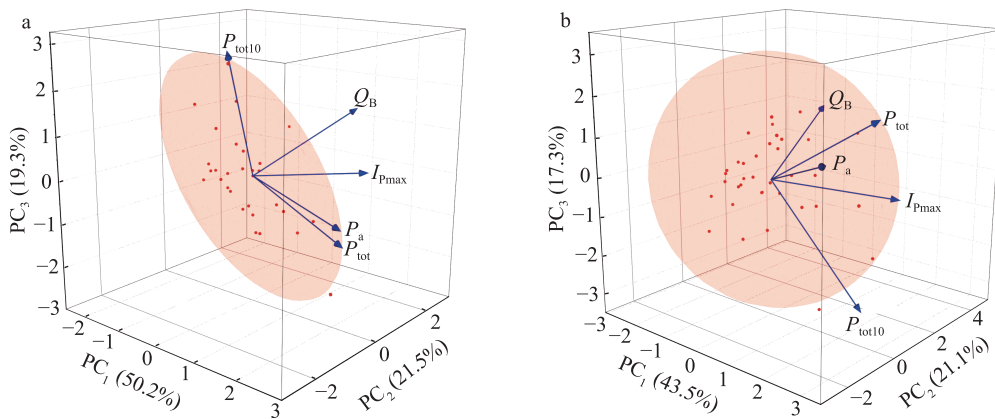


图 6 春季、夏季径流事件主成分分析

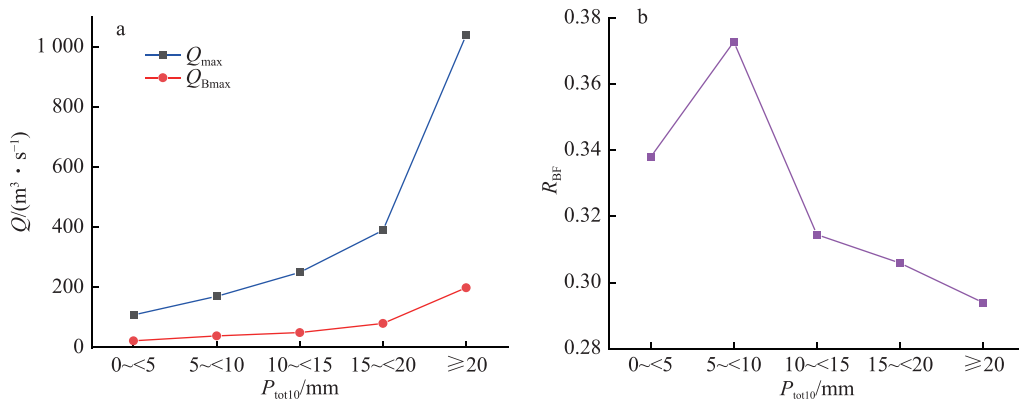


图 7 不同等级径流事件的平均  $Q_{max}$ 、 $Q_{Bmax}$ 、 $R_{BF}$  值

## 4 讨论

**4.1 径流对降水响应机制** 径流过程受到降水和流域前期储水量等诸多因素的影响。降水总量、降水强度是影响径流事件特征的主要成分,调控着最大径流和最大基流(图 4);除了降水,事件前 10 d 降水量也是影响径流事件的关键因子(图 6、7)。夏季的径流事件特征更大程度上受到前 10 d 降水量的影响(图 4)。一方面受到前期土壤含水量的影响,径流的响应规律

出现差异。相对于径流,土壤水分含量直接受降水过程补给<sup>[37]</sup>。春季降水少,大多数降水补给土壤,少部分形成径流或被蒸发<sup>[38]</sup>。此时前 10 d 降水量不能很好代表流域湿润状态,Merz 等<sup>[39]</sup>指出在较长时间范围内(30~60 d)计算的前期降水量能更好代表土壤湿润状态。而夏季降水多,前期降水导致流域土壤含水量增加,同样降水条件流域更易蓄满产流<sup>[40-41]</sup>。此外,土壤渗透性也会影响径流对降水的响应:土壤渗透性强的

流域, 土壤水分对径流系数影响较小; 反之径流系数随土壤水分而增加, 且土壤水分超过某一阈值, 径流系数显著增加<sup>[42]</sup>。另一方面, 径流事件对降水的响应受到流域储水量的影响。流域的蓄水能力有限或入渗量过大, 径流事件特征受降雨量变化的影响比较明显, 导致流域前期土壤水分与径流之间的非线性响应关系(图 7-b)。研究显示当流域储水量超过某一阈值, 基流和径流过程对降水的响应会发生根本性变化<sup>[41, 43]</sup>, 且该阈值受气候、流域结构和植被等多种因素控制<sup>[14, 44]</sup>。

**4.2 径流对河道生态的影响** 水文情势是维持河流生态系统稳定和健康的指标<sup>[4, 45]</sup>。Palmer 等<sup>[6]</sup>提出流态-群落-生态系统过程之间的相互关系, 表明径流通过物质、能量、信息的流动、传递和循环影响生物群落和生态系统过程。干旱时期, 基流是补给河流径流主要来源, 维持着水文连通的稳定<sup>[40, 46]</sup>。而丰水季节, 径流过程的变化影响河道结构、功能以及河道生态<sup>[45]</sup>。径流特征如幅度、频率、时机、持续时间和变化率等影响生物适应性<sup>[47]</sup>, 改变河道内和泛洪区的初级生产力和养分循环。水库堤坝建设等人类活动, 洪涝与干旱等极端气候事件加剧了水文情势变异特征, 使得径流过程由自然维持过渡到自然与人工双重调控, 维持河道径流过程、保证河道生态需水成为当前需要解决的关键问题之一。改变核算生态需水中静态匹配的理念, 充分考虑水文与生态在多时空尺度动态匹配关系, 维持河道生态系统结构、功能的完整与健康是保证河道生态需水的关键<sup>[4]</sup>。因此, 研究径流事件对降水的响应, 有助于理解径流维持机制、保障河道生态需水以及维持水文连通。

## 5 结论

运用 C-M 法对洮儿河径流进行基流分割, 在长时间径流序列中分离出径流事件, 研究径流事件对降水的响应规律, 结果显示:

1) 基流是划分径流事件、维持河道径流连续性的关键指标。基流变化趋势较径流小, 更稳定, 其多年线性倾向率为  $-0.05 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ , 仅为径流倾向率  $-0.1 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$  的 1/2。

2) 从筛选出的 72 次径流事件对降水的响应看, 单次径流事件由多次降水导致, 且对降水总量、降水强度、最大降水强度等因素响应敏感。干旱季节前期降水用于填洼和补充土壤水分, 因此夏季径流事件特征与前 10 d 降水量的相关性远大于春季。

3) 受土壤含水量和流域储水量影响, 径流对降水的响应具有明显阈值特征。同时, 径流过程受气候变

化、人为干扰等不确定因素影响, 水文动态变化与生态性能指标相联系将有助于河流生态保护和恢复。

## 6 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
- [2] SEIBERT S P, JACKISCH C, EHRET U, et al. Exploring the interplay between state, structure and runoff behaviour of lower mesoscale catchments[J/OL]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. (2016-03-09) [2020-11-01]. [https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=53e528880abc04cd0e7640c693205b25&site=xueshu\\_se&hitarticle=1](https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=53e528880abc04cd0e7640c693205b25&site=xueshu_se&hitarticle=1)
- [3] BLUME T, ZEHE E, BRONSTERT A. Rainfall-runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2007, 52(5): 843
- [4] POFF N L. Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world[J]. *Freshwater Biology*, 2018, 63(8): 1011
- [5] FAN Y T, CHEN Y N, LIU Y B, et al. Variation of baseflows in the headstreams of the Tarim River basin during 1960-2007[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 98
- [6] PALMER M, RUHI A. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: implications for river restoration[J]. *Science*, 2019, 365(6459): eaaw2087
- [7] HALL F R. Base-flow recessions: a review[J]. *Water Resources Research*, 1968, 4(5): 973
- [8] CHEN X F, PARAJKA J, SZÉLES B, et al. Spatial and temporal variability of event runoff characteristics in a small agricultural catchment[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2020, 65(13): 2185
- [9] HUANG X D, SHI Z H, FANG N F, et al. Influences of land use change on baseflow in mountainous watersheds[J]. *Forests*, 2016, 7(12): 16
- [10] ZHANG J L, ZHANG Y Q, SONG J X, et al. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 252
- [11] 焦玮, 朱仲元, 宋小园, 等. 基流分割方法在锡林河流域适用性分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(1): 26
- [12] 周嘉欣, 丁永建, 吴锦奎, 等. 基流分割方法在疏勒河上游流域的应用对比分析[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1456
- [13] 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: 124628

- [14] YANG Y T, MCVICAR T R, DONOHUE R J, et al. Lags in hydrologic recovery following an extreme drought: Assessing the roles of climate and catchment characteristics[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(6): 4821
- [15] ZHAO J, MU X M, GAO P. Dynamic response of runoff to soil and water conservation measures and precipitation based on VAR model[J]. *Hydrology Research*, 2019, 50(3): 837
- [16] LI J, DAI W, SUN Y, et al. Different runoff patterns determined by stable isotopes and multi-time runoff responses to precipitation in a seasonal frost area: a case study in the Songhua River basin, northeast China[J]. *Hydrology Research*, 2020, 51(5): 1009
- [17] 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
- [18] 刘启宁. 变化环境下洮儿河流域径流演变规律研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020
- [19] 董洋洋, 刘建卫. 洮儿河流域水资源供需分析及对策[J]. *东北水利水电*, 2020, 38(2): 41
- [20] LIU J W, ZHANG C, KOU L M, et al. Effects of climate and land use changes on water resources in the Taoyer River[J]. *Advances in Meteorology*, 2017(5): 1
- [21] LI L J, JIANG D J, HOU X Y, et al. Simulated runoff responses to land use in the middle and upstream reaches of Taoyerhe River basin, Northeast China, in wet, average and dry years[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(24): 3484
- [22] LIU Q, MA X J, YAN S R, et al. Lag in hydrologic recovery following extreme meteorological drought events: implications for ecological water requirements[J]. *Water*, 2020, 12(3): 837
- [23] LIANG L Q, LI L J, LIU Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961-2005 in the Taoyer River basin of Northeast China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(2): 298
- [24] JIANG H B, WEN Y, ZOU L F, et al. The effects of a wetland restoration project on the Siberian crane (*Grus leucogeranus*) population and stopover habitat in Momoge National Nature Reserve, China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 96: 170
- [25] CAISSIE D, EL-JABI N. Instream flow assessment: from holistic approaches to habitat modelling[J]. *Canadian Water Resources Journal*, 2003, 28(2): 173
- [26] NATHAN R J, MCMAHON T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465
- [27] CHENG L, ZHANG L, BRUTSAERT W. Automated selection of pure base flows from regular daily streamflow data: objective algorithm[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2016, 21(11): 06016008
- [28] SERRANO A, MATEOS V L, GARCIA J A. Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian peninsula for the period 1921-1995[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 1999, 24(1/2): 85
- [29] ALAMIN M, SULTANA M H, XU H M, et al. Robustification of linear regression and its application in genome-wide association studies[J]. *Frontiers in Genetics*, 2020, 11: 549
- [30] LIU Q, MCVICAR T R. Assessing climate change induced modification of Penman potential evaporation and runoff sensitivity in a large water-limited basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 464/465: 352
- [31] GÜÇLÜ Y S. Improved visualization for trend analysis by comparing with classical Mann-Kendall test and ITA[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124674.
- [32] KOSKELO A I, FISHER T R, UTZ R M, et al. A new precipitation-based method of baseflow separation and event identification for small watersheds (< 50 km<sup>2</sup>) [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 450/451: 267
- [33] RAUTHE M, STEINER H, RIEDIGER U, et al. A Central European precipitation climatology-Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS) [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2013, 22(3): 235
- [34] ZINK M, KUMAR R, CUNTZ M, et al. A high-resolution dataset of water fluxes and states for Germany accounting for parametric uncertainty[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(3): 1769
- [35] Institute of Hydrology. Low flow studies, Report 1[R]. Wallingford, UK: UK Department of the Environment, 1980
- [36] SAPAČ K, RUSJAN S, ŠRAJ M. Assessment of consistency of low-flow indices of a hydrogeologically non-homogeneous catchment: a case study of the Ljubljanica River catchment, Slovenia[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124621
- [37] JIN Z, GUO L, YU Y L, et al. Storm runoff generation in headwater catchments on the Chinese Loess Plateau after long-term vegetation rehabilitation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: 141375
- [38] WANG S P, ZHANG Z Q, SUN G, et al. Detecting water yield variability due to the small proportional land use and land cover changes in a watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(21): 3083
- [39] MERZ R, BLÖSCHL G. A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment

- characteristics in Austria[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(1): W01405
- [40] BEATTY S J, MORGAN D L, MCALEER F J, et al. Groundwater contribution to baseflow maintains habitat connectivity for *Tandanus bostocki* (Teleostei: Plotosidae) in a south-western Australian river[J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2010, 19(4): 595
- [41] GRAEFF T, ZEHE E, BLUME T, et al. Predicting event response in a nested catchment with generalized linear models and a distributed watershed model[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(24): 3749
- [42] NORBIATO D, BORGA M, MERZ R, et al. Controls on event runoff coefficients in the eastern Italian Alps[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3/4): 312
- [43] JAMES A L, ROULET N T. Investigating hydrologic connectivity and its association with threshold change in runoff response in a temperate forested watershed[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(25): 3391
- [44] SPENCE C. On the relation between dynamic storage and runoff: a discussion on thresholds, efficiency, and function[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(12): W12416
- [45] POFF N L, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime[J]. *BioScience*, 1997, 47(11): 769
- [46] CLILVERD H M, TSANG Y P, INFANTE D M, et al. Long-term streamflow trends in Hawai'i and implications for native stream fauna[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(5): 699
- [47] LYTTLE D A, POFF N L. Adaptation to natural flow regimes[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(2): 94

## Study on runoff event response to precipitation in the Taoer River basin, China

LI Miao<sup>1,2)</sup> YAN Sirui<sup>1,2)</sup> LI Shuzhen<sup>1,2)</sup> KANG Yinong<sup>3)</sup> LIU Qiang<sup>1,2)†</sup> ZHANG Junlong<sup>4)</sup>

(1) State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

3) College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, 625014, Ya'an, Sichuan, China;

4) School of Geography and Environment, Shandong Normal University, 250358, Jinan, Shandong, China)

**Abstract** The Chapman-Maxwell method (the CM filter) with recession constant calculated from Automatic Baseflow Identification Technique (ABIT) was used to separate baseflow from daily runoff at the Taonan hydrological station in Taoer River basin. Time series-based rainfall-runoff events were separated to explore runoff event response to precipitation. Annual precipitation, runoff and baseflow were found to show decreasing trends, with abrupt decreases detected in all three. Baseflow was found to maintain continued runoff process, with a total number of 72 events being identified from daily series of streamflow. A strong correlation of the volume of precipitation ( $P_{tot}$ ) to maximum runoff ( $Q_{max}$ ) and maximum baseflow ( $Q_{Bmax}$ ) was observed. Runoff event response to precipitation showed marked threshold characteristics, being affected by soil moisture content and watershed water storage. Runoff process was found to be affected by climate change and human disturbance, therefore linking dynamic hydrological changes to ecological indexes was helpful to protect river ecology. These data will help to understand runoff generation and hydrological connectivity, and provide certain theoretical and practical references to maintain river ecosystem health.

**Keywords** runoff events; baseflow; precipitation; the Chapman-Maxwell method; the Taoer River basin

【责任编辑: 武佳】