

黑河上游天涝池流域生长季降雨和 气温对河川径流的影响

杨晓高¹, 郝虎², 赵传燕¹, 臧飞¹, 安金玲², 张茂军², 张恒平²

(1.兰州大学 草地农业科技学院 草地农业生态系统国家重点实验室,

兰州 730020; 2.甘肃祁连山国家级自然保护区管理局, 甘肃 张掖 734000)

摘要:西北干旱区的水资源短缺问题日益突出,但黑河上游高寒山区河川径流相关的精确水文资料稀缺,开展观测和研究其变化规律尤为必要。选择黑河上游天涝池流域为研究区,通过逐日观测 2016 年、2017 年、2019 年生长季河川径流量、降雨量和气温数据,采用相关分析和多元线性回归方法,分析了降雨和气温要素对河川径流的影响。结果表明:生长季内月均径流量明显滞后月均降雨量和月均温,三者均呈现出单峰变化趋势;河川径流对降雨的平均滞后时间约为 7.5 d。生长季内月均降雨量、月均温与月均径流量的 Pearson 相关系数分别为 0.69, 0.87 ($p < 0.01$),拟合多元线性回归模型的 R^2 为 0.772。研究显示该流域内降雨和气温较好地解释河川径流量的变化,结果可为黑河上游山区的河川径流响应过程提供参考依据。

关键词:黑河流域; 降雨; 气温; 河川径流; 滞后时间

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)04-0263-07

Effects of Rainfall and Temperature on River Runoff During Growing Season in Tianlaonchi Catchment in the Upper Reaches of Heihe River Basin

YANG Xiaogao¹, HAO Hu², ZHAO Chuanyan¹, ZANG Fei¹,

AN Jinling², ZHANG Maojun², ZHANG Hengping²

(1.State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral

Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China;

2.Management Bureau of Qilian Mountains Nature Reserve in Gansu, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: The shortage of water resources in the northwest arid area has become increasingly prominent, but the accurate hydrological data related to river runoff in the alpine mountain area in the upper reaches of Heihe River are scarce, so it is particularly necessary to carry out observations and study the process of change. The Tianlaonchi catchment in the upper reaches of Heihe River Basin was selected as the study area. The daily river runoff, rainfall and air temperature in the growing season of 2016, 2017 and 2019 were observed. Methods of correlation analysis and multiple linear regression were used to analyze the effects of two meteorological elements on river runoff. The results show that the monthly average runoff obviously lagged behind the monthly average rainfall and monthly average temperature during the growing season, all of which showed a unimodal change trend, and the average lag time of river runoff to rainfall was 7.5 days; the Pearson correlation coefficients of monthly average rainfall, monthly average temperature and monthly average runoff during the growing season were 0.69 and 0.87 ($p < 0.01$), respectively, and R^2 of the fitted multiple linear regression model was 0.772. The study shows that rainfall and temperature could well explain the change of river runoff in this basin, and the research results can provide a reference basis for the river runoff response process in the mountainous area of the upper reaches of Heihe River.

收稿日期: 2021-05-25

修回日期: 2021-06-15

资助项目: 国家自然科学基金(31901130); 甘肃省省级林业和草原科技计划项目(2020kj054); 中国博士后科学基金(2020M673532); 甘肃省自然科学基金(20JR5RA277, 20JR5RE645)

第一作者: 杨晓高(1994—), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 研究方向为流域生态水文。E-mail: yangxg19@lzu.edu.cn

通信作者: 郝虎(1969—), 男, 甘肃张掖人, 正高级工程师, 主要从事森林生态学与自然保护区管理研究。E-mail: haohuqls@163.com

Keywords: Heihe River Basin; rainfall; air temperature; river runoff; lag time

西北干旱区的生态环境安全越来越受到人们的关注,是当前我国社会发展面临的首要问题。近些年来,随着全球气候变化影响的加剧和该地区社会经济的迅速发展,脆弱的生态环境面临着一系列的严重问题,亟待解决。其中,水资源短缺问题尤为突出,已经成为制约当地社会可持续发展的关键因素^[1-2]。在内陆河流域,由于降水少,蒸发强,河川径流对于气候变化的响应极为敏感,而且径流基本代表了整个流域的地表水资源,分析其变化规律与影响因素,对未来水资源的开发和利用具有深远的指导意义^[3-4]。

黑河是我国第二大内陆河,发源于祁连山区,其上游高寒山区是主要的水源形成区,河川径流量的变化,对中、下游地区的民生、工农业和生态用水分配影响巨大^[5-7]。已有研究发现,气候变化和人类活动是河川径流变化的主要驱动因素,由于黑河上游山区的人类活动影响较小,径流主要受气候变化的影响^[8-12]。近年来,黑河上游流域的生态环境不断改善,水资源储量有所增加,出山径流量有明显的增加趋势,然而关于黑河流域径流变化归因的众多研究中,现阶段研究大多集中在年际尺度和易于监测的大面积区域,而上游高寒山区径流观测难度较大,数据缺乏,各类气象、径流要素的精确观测研究较少^[13-15],因此本研究选取黑河上游的天涝池典型小流域,通过逐日实测流域内多年生长季河川径流量、降雨量和气温,对其变化特征、相互关系和河川径流的滞后效应进行分析,探讨黑河上游流域产流机制,以期为该区域的水文过程和水资源管理及综合保护提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于黑河上游寺大隆河流域的天涝池小流域($38^{\circ}23'56''-38^{\circ}26'47''N, 99^{\circ}53'57''-99^{\circ}57'10''E$),流域总面积约为 12.8 km^2 ,河流纵长 6.0 km ,纵坡比降 $1:12.5$,海拔 $2\,660\sim4\,419 \text{ m}$ 。流域气候类型为高寒半干旱、半湿润山地森林草原气候,无霜期 $90\sim120 \text{ d}$,年均日照时数 $1\,892.6 \text{ h}$,年均气温 $-0.2\sim2.0^{\circ}\text{C}$,最高温度为 28°C ,最低气温为 -36°C ,年均相对湿度为 60% ,年均蒸发量 $1\,051.7 \text{ mm}$,年降水量 $300\sim500 \text{ mm}$,降水季节分布不均,主要集中在生长季的5—9月份,占全年降水量的 $80\%\sim90\%$ 。因流域内海拔差异较大,导致水热条件组合不同,其植被分布垂直地带性明显,由低海拔到高海拔,植被类型依次为森林草原、灌丛、亚高山草甸、高山草甸。 $2\,800 \text{ m}$ 以下主要为山地干草原, $2\,600\sim3\,450 \text{ m}$ 的

阴坡分布青海云杉(*Picea crassifolia*), $2\,700\sim3\,250 \text{ m}$ 的阳坡分布祁连圆柏(*Sabina przewalskii*), $3\,250\sim3\,750 \text{ m}$ 以亚高山灌丛分布为主,主要有金露梅(*Dasiphora fruticosa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)等, $3\,800 \text{ m}$ 以上主要为高山裸岩和冰雪带(图1)。各种植被类型中,林地面积占比最大,为 38.73% ,灌丛次之,为 32.41% ,草地占比较小,为 7.49% 。土壤随植被类型发生变化,主要为山地灰褐土和灌木草甸土,土层较薄,以粉砂质为主,成土母质主要是砾岩、紫红色砂页岩等^[16-18]。

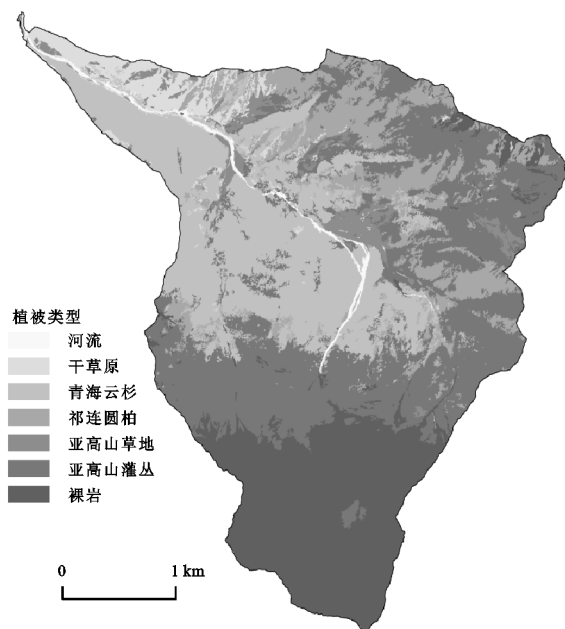


图1 研究区植被类型

2 研究方法

2.1 降雨和气温的观测

天涝池流域内布设 19 台自记式雨量筒(HOBO RG3-M, Decagon, USA),用于观测降雨量。选取 2014—2019 年的降雨观测数据,分析流域平均降雨量的年内和年际间的动态变化。基于 ArcGIS 10.8 软件,选择泰森(Thiessen)多边形工具(图2),计算流域平均降雨量空间分布。

研究区内布设 5 台自动气象站(HOBO U30, Decagon, USA),选取 2014—2019 年的气温观测数据,采用算术平均法计算平均气温,分析流域平均气温的动态变化。选择 2016 年、2017 年、2019 年生长季(4—9月)降雨量、气温和河川径流量数据,分析气象因子与径流量的关系。

2.2 研究区平均降雨量的计算方法

泰森多边形法^[19-20]是根据流域内离散分布的雨

量站的资料来计算流域平均降雨量的方法。该方法先将所有相邻雨量站连成直线,形成很多不嵌套的三角形,尽可能是锐角三角形,便于划分子区域;然后再求出每个三角形的重心,利用所得到的垂直平分线和重心将流域划分成若干个多边形子区域(图 2)。这样得到的每个子区域只包括一个雨量站,用每个子区域中雨量站测得的降雨量,表示其所在多边形区域内的降雨量,即可计算区域平均降雨量(\bar{P}),公式如下:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n P_i \frac{A_i}{A} = \sum_{i=1}^n P_i \alpha_i \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 个雨量站测得的降雨量(mm); A_i 为第 i 个子区域的面积(km^2); A 为整个区域的总面积(km^2); α_i 为雨量的面积权重; n 为雨量站的数目。

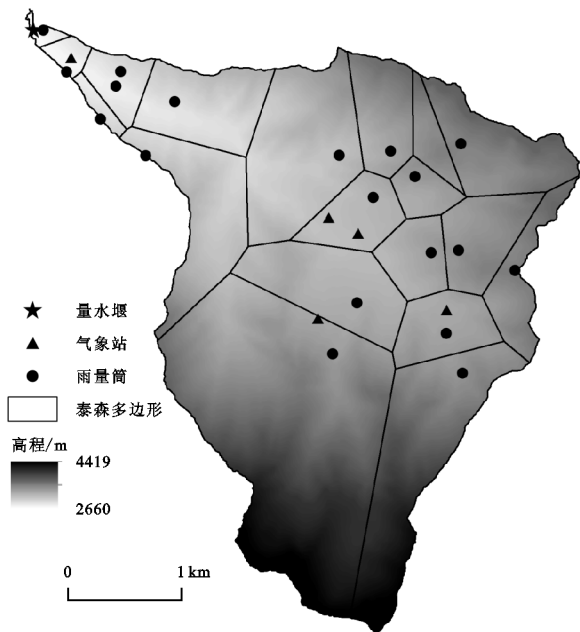


图 2 天涝池流域各类气象站点分布和泰森多边形示意图

2.3 河川径流量的观测

研究区出口处设有量水堰,观测河川径流量。量水堰由溢流堰和梯形堰组合而成,长为 5.0 m,宽为 8.0 m,其中溢流堰宽 6.8 m。梯形堰为倒置等腰梯形,上底为 0.4 m,下底为 1.2 m,腰长为 0.8 m。采用便携式流速仪(Flowatch, Switzerland)观测河川径流的瞬时流速及水位,观测步长为 4 h(每天 8:00, 12:00, 16:00, 20:00),利用水文学公式计算流域日径流量,分析其生长季内的变化。2018 年因量水堰遭洪水破坏,观测数据缺失。特别指出,从 2019 年 8 月 18 日开始,采用更为精确的超声波多普勒流速流量仪(LSH10-1QC,博意达,厦门)观测,测量间隔为 30 min。

2.4 河川径流量的计算方法

河川径流量计算公式如下:

$$R = V \times S \quad (2)$$

式中: R 为瞬时径流量(m^3/s); V 为流速(m/s); S 为

梯形堰的过水面积(m^2)。

超声波多普勒流速流量仪测量河川径流量应用了声学多普勒效应原理,根据多普勒频移方程计算流速,公式如下:

$$\Delta F_d = \frac{2 F_0 \cdot V \cdot \cos \theta}{C - V \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

式中: ΔF_d 为多普勒频移; F_0 为发射超声波频率(常数); C 为水中声速; V 为水的流速; θ 为发射波束和接收波束相对于河水流方向的夹角(仪器安装后固定不变)。

由于 $C \gg V \cdot \cos \theta$,式(3)可得:

$$V = \frac{1}{2 F_0 \cos \theta} C \cdot \Delta F_d = K \cdot C \cdot \Delta F_d \quad (4)$$

式中: K 为常数。仪器可检测 ΔF_d 和水温, C 可由温度值换算获取。

根据仪器测得水位,可计算出过水面积(S),再由式(2)即可计算出河川径流量。

2.5 数据处理方法

本文采用 ArcGIS, Excel, SPSS, Origin 等软件进行数据整理、分析和作图。在 ArcGIS 中使用泰森多边形工具,通过逐日实测降雨数据计算流域平均降雨;利用 SPSS 对河川径流与降雨、气温的相关关系进行分析,拟合多元线性回归模型。将 2016 年、2017 年、2019 年生长季的降雨事件与河川径流数据进行对比筛选,分析河川径流的时滞现象。

3 结果与分析

3.1 生长季河川径流量的变化分析

2016 年、2017 年和 2019 年天涝池流域生长季日径流量随时间呈现出先升后降的波动变化趋势(图 3A)。2016 年共实测河川径流 165 d(4 月 3 日—9 月 14 日),日平均值为 3.27 万 m^3 ,最大值为 11.58 万 m^3 (8 月 25 日),最小值为 0.14 万 m^3 (4 月 16 日)。2017 年共实测 149 d(4 月 17 日—9 月 11 日),日平均值为 2.90 万 m^3 ,最大值为 7.72 万 m^3 (8 月 23 日),最小值为 0.25 万 m^3 (5 月 8 日)。2019 年共实测 119 d(6 月 4 日—9 月 30 日),日平均值为 3.30 万 m^3 ,最大值为 9.89 万 m^3 (7 月 20 日),最小值为 1.16 万 m^3 (6 月 8 日)。

通过对比 3 a 生长季的日径流量变化可知(图 3B),2016 年日均径流量相较 2017 年高 0.37 万 m^3 ,最大值高 3.86 万 m^3 ,出现时间提前 3 d;最小值低 0.11 万 m^3 ,推迟 21 d。2016 年日均流量相较 2019 年低 0.03 万 m^3 ,最大值高 1.69 万 m^3 ,推迟 35 d;最小值低 1.12 万 m^3 ,推迟 52 d。3 a 生长季的日径流量在 3.15 万 m^3 上下波动,极差较大,且极值出现时间不同,主要是由于气象因子的变化。4—5 月降雨较

少,气温较低,导致河流补给量较小,径流量小且变化平稳;6—9月降雨增加,气温升高,冰雪大量融化和降雨同时补给河流,径流量逐渐增加,且变化较大。

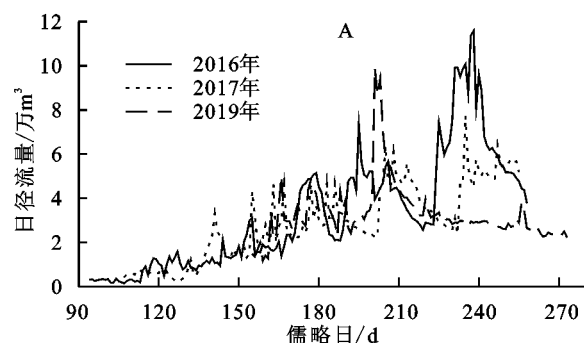


图3 2016年、2017年、2019年生长季径流量日动态和年际变化

3.2 流域内降雨量的变化分析

2014—2019年流域内年降雨量表现出波动变化的趋势(图4A),年降雨量分别为391.2,404.0,344.0,388.2,325.3,461.2 mm,6 a平均降雨量为385.7 mm。径流观测期间,2019年降雨最为丰沛,2016年降水较少,相差117.2 mm,2017年的降雨量最接近6 a均值。6 a间月降雨量呈现年内分配不均的现象(图4B),呈单峰曲线变化。生长季(4—9月)降雨较多,占全年降雨量的91.15%;非生长季(10月—翌年3月)降雨较少,占年降雨总量的8.85%。2014年和2016年最大月降雨量出现在8月,分别为95.1,75.6 mm,

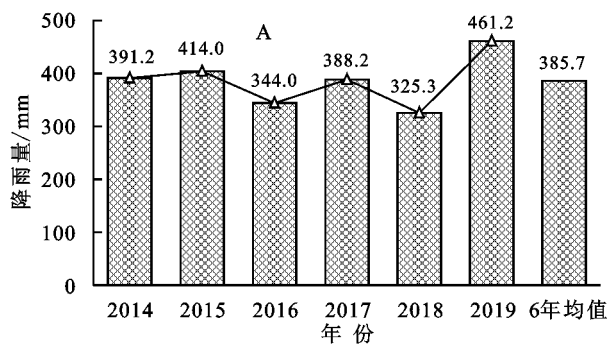
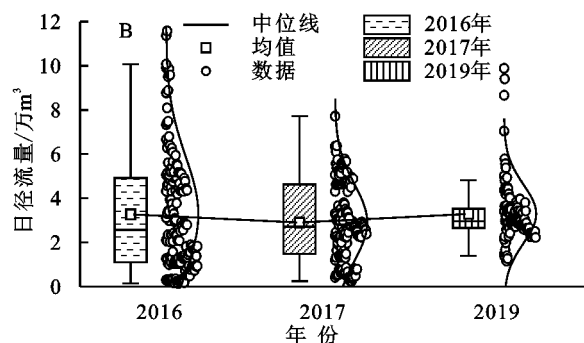


图4 2014—2019年流域年降雨量和月降雨量的变化

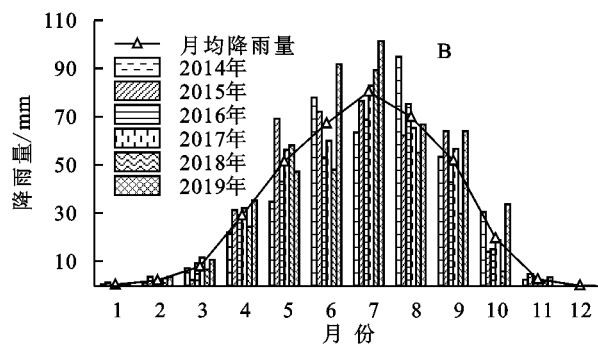
3.3 流域内气温的变化分析

2014—2019年流域内年均温呈先升后降的变化过程,分别为0.02℃,0.87℃,1.45℃,1.25℃,0.29℃,0.11℃,6 a平均气温为0.67℃(图5A)。径流观测年份,2016年和2017年的年平均气温高于6 a平均气温,2019年平均气温低于平均值。6 a间月均温随着时间呈现出单峰的变化趋势(图5B),最低月均温出现在12月(2014年)或1月(2015—2019年),分别为-12.93℃,-10.69℃,-13.09℃,-11.20℃,-13.51℃,-12.92;最高月均温都出现在7月,分别为12.04℃,11.11℃,13.78℃,13.65℃,12.75℃,10.71℃,气温年较差为24.97℃,21.80℃,26.88℃,

本研究结果与李秋菊^[21]、李云武^[22]等在黑河上游研究结果一致,降雨、气温是引起河川径流量变化的主要因素。



2015年、2017年、2018年和2019年份最大月降雨量出现在7月,分别为76.8,83.1,89.7,101.7 mm;而2017年11月未发生降雨事件,其余年份最小月降雨量出现在12月,分别为0.3,0.1,0.1,0,0.1,0.3 mm。6 a来,7—8月降雨量占全年降雨量的39.14%,11—12月降雨量仅占全年降雨量的0.78%。已有研究表明,黑河上游降雨补给是河流最主要的补给类型^[23-24]。本研究区为黑河上游典型小流域,由于7—8月降雨集中,河川径流量达到峰值,说明降雨对径流补给作用明显。流域内植被覆盖率高,植被冠层和凋落物对降雨有截留和再分配的作用,可削弱河川径流洪峰。



24.86℃,26.27℃,23.63℃,符合研究区所处中纬度、高海拔地区的规律。在积雪、河冰和冻土融化期(5—6月),2016年和2017年气温比6 a的平均值要高,2019年比6 a的平均值要低。河川径流对气温响应敏感,气温对径流量的影响表现在两个方面。首先,春季气温回升,冰雪融化、冻土消融开始补给河流;其次,随着气温逐渐升高,流域蒸发量和土壤入渗量逐渐增加,不利于径流产生^[25-26]。研究区位于高寒山区,4月气温上升到0℃以上,冰雪、冻土融水引起径流量增加;7月气温达到年内最高,显然在这个时间段,蒸发和土壤入渗加强,但降雨补给径流的程度在增加,减弱了蒸发和土壤入渗对径流的负效应,所以径流仍然升高。

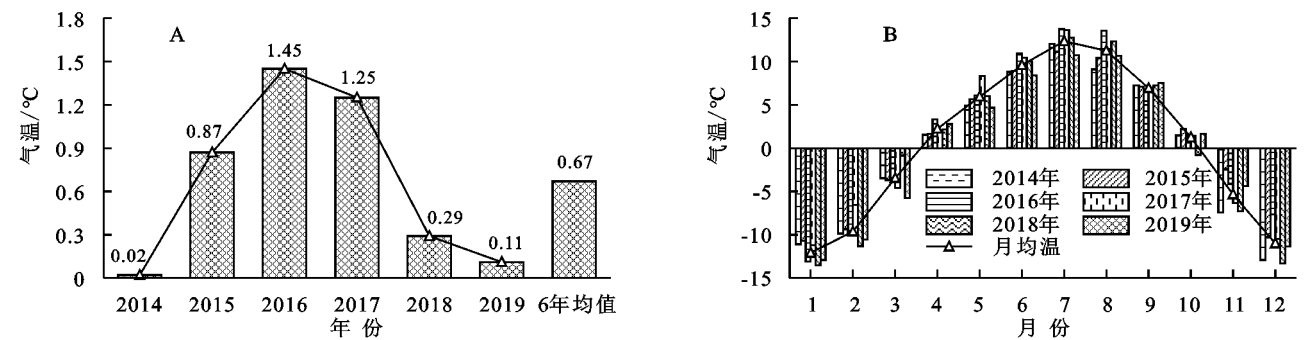


图 5 2014—2019 年流域年均温和月均温的变化

3.4 生长季降雨、气温与河川径流量的关系

3.4.1 生长季降雨、气温与河川径流量的回归模型

选择 2016 年、2017 年、2019 年生长季(4—9 月)同期 16 组月降雨量、月均温和月径流量数据,采用 Shapiro-Wilk test 方法进行正态性检验,均呈正态分布($p<0.01$),因此可采用 Pearson 相关性检验(表 1),月径流量与月降雨量、月均温均为极显著正相关,月均温的相关性高于月降雨量,这与已有研究结果一致^[27-28]。采用多元线性回归分析方法,拟合回归模型:

$$S=1.21\times10^5T+2.70\times10^3P-4.21\times10^5$$
$$(R^2=0.772)$$

(5)

式中: S 为月径流量(m^3); T 为月均温($^{\circ}\text{C}$); P 为月降水量(mm)。

回归模型通过了 F 方差检验和 R^2 拟合检验,且拟合程度较高。

3.4.2 生长季月降雨量、月均温与月径流量的变化关系

观测期间,月径流量表现出先升后降的趋势(图 6),最小值出现在 4 月,为 11.20 万 m^3 ,最大值出

现在 8 月,为 142.15 万 m^3 。生长季内月降水量与月径流量的变化趋势一致,最小值出现在 4 月,为 21.8 mm ,但在 7 月出现最大值,为 84.6 mm 。月均温最低月均温出现在 4 月,为 3.93°C ,最高月均温出现在 7 月,为 12.72°C 。生长季内,4 月径流量最小,主要因为降雨较少,气温较低,冰雪、冻土消融对河川径流的补给量少。但 5—8 月,降雨增加,气温不断升高,产流丰富,8 月达到径流量峰值。进入 9 月,降雨开始减少,气温降低,径流量开始出现下降趋势。通过对比可见,在月尺度上,生长季内河川径流、降雨和气温的变化趋势一致,但径流对降雨和气温响应具有时滞现象,这与前人研究结果相符^[29],本研究中径流峰值滞后 1 月。

表 1 生长季月径流量与月降雨量、月均温的相关分析

因子	Pearson 相关性检验	
	相关系数	p 值(双尾)
月降雨量	0.6852 **	0.0033
月均温	0.8728 **	0.0000

注:** 表示极显著相关($p<0.01$)。

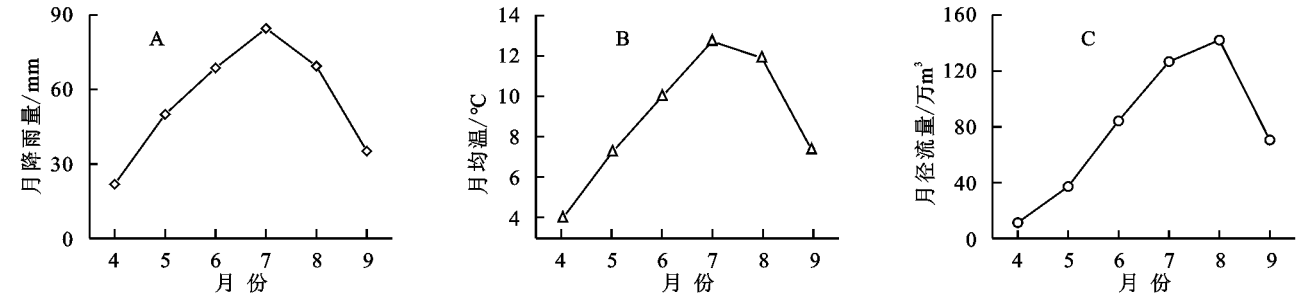


图 6 生长季内月径流量与月降雨量、月均温的对比分析

3.4.3 生长季河川径流对降雨的时滞效应

在研究区的生长季内,降雨是河川径流的主要补给源,降雨汇集至流域出口断面形成径流需要经过一定时间,一般有 3 个过程:流域蓄渗、流域产流和河网汇流。降雨会在流域内出现滞留,之后在流域出口形成径流高峰,选择了 2016 年、2017 年、2019 年生长季内的 4 次典型降雨事件,分析河川径流对降雨的滞后时间。如图 7 所示,4 次降雨事件之前都有较长时间的晴天,发生降雨之后,河川径流量的峰值均滞后降雨峰值出现。在 4 次降雨径流过程中,径流滞后天数分别为 9,7,7,7 d,平均滞后天数为 7.5 d。毛亚花等^[27]

在该流域研究得出,径流的滞后时间约为 3 d,因选取的降雨事件不同而表现出差异。崔步礼等^[30]在青海湖流域内的布哈河流域,通过对 47 a 来的径流和降水的集中期探讨得出,多年平均滞后时间约为 20 d。罗玉等^[31]在长江源区沱沱河流域通过分析年际尺度上的降雨径流过程得出,51 a 来的平均滞后天数约为 13.7 d。天涝池流域河川径流的滞后时间较短,主要由于在该流域生长季内降雨事件频繁,产、汇流较快,径流对降雨响应迅速。除此之外,河川径流的滞后时间与流域的植被分布、下垫面状况和分析时间尺度等均有关系。

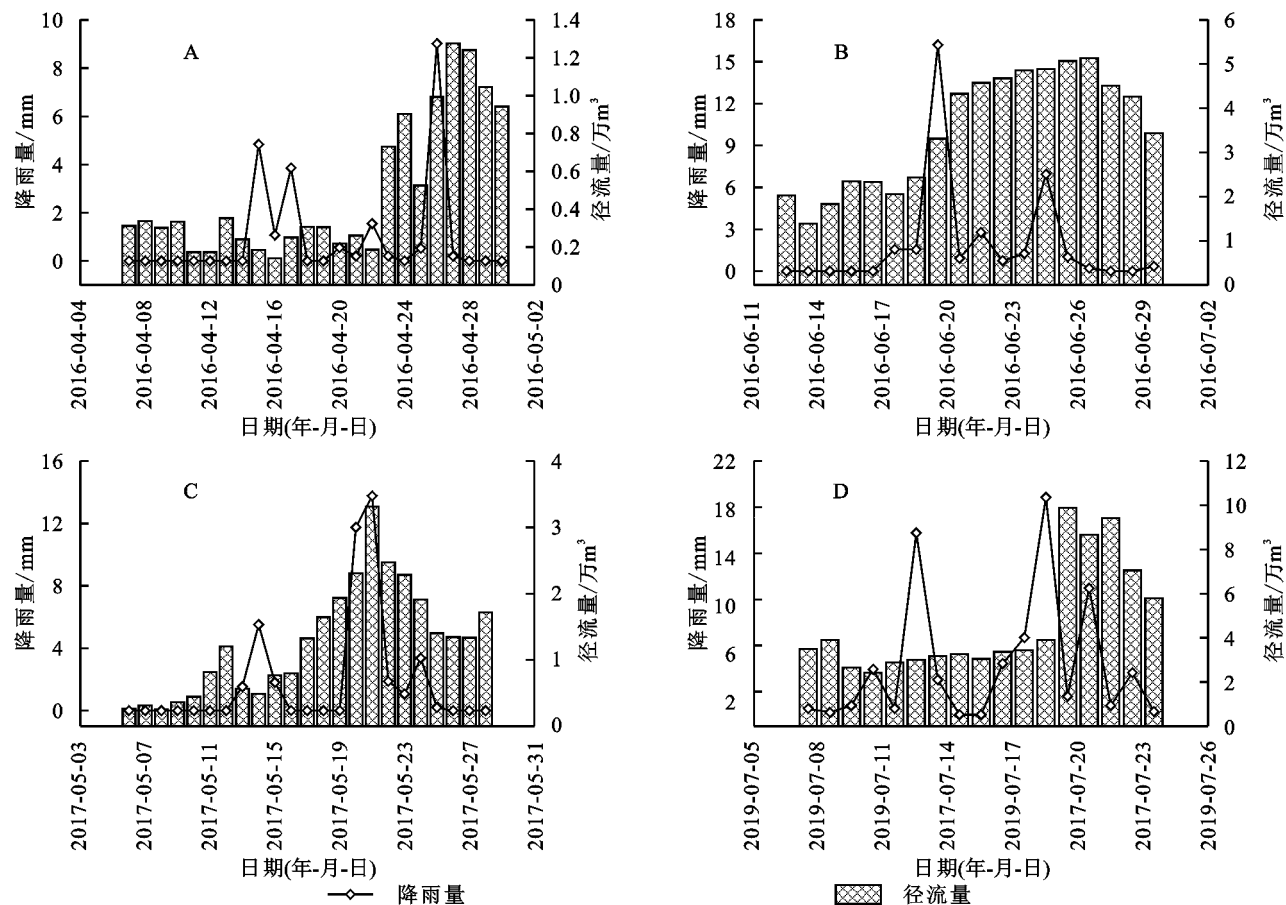


图 7 河川径流对降雨的时滞效应

4 结论

(1) 黑河上游天涝池流域 2016 年、2017 年和 2019 年生长季内河川径流随时间呈现出先升后降的趋势,日均径流量为 3.15 万 m^3 ,河川径流量高峰集中在 7—8 月,最高可达 11.58 万 m^3 ,其主要的补给形式为降雨。

(2) 河川径流对降雨、气温的变化响应敏感, Pearson 相关系数分别达到 0.69, 0.87 ($p < 0.01$),拟合多元线性回归模型的 R^2 为 0.772,表明降雨和气温能较好地解释径流量的变化。

(3) 降雨径流过程中,河川径流的时滞现象受多种因素(如气候、植被、下垫面等)相互作用的影响,且时间尺度不同,滞后时间有异;在日尺度上,河川径流的平均滞后天数约为 7.5 d。

参考文献:

- [1] 王玉洁,秦大河.气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J].气候变化研究进展,2017,13(5): 483-493.
- [2] 李洪源,赵求东,吴锦奎,等.疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟[J].冰川冻土,2019,41(4):907-917.
- [3] 陆志翔,肖洪浪, Yongping Wei,等.黑河流域近两千年

- 人-水-生态演变研究进展[J].地球科学进展,2015,30(3):396-406.
- [4] 何兵,高凡,唐小雨,等.基于滑动 Copula 函数的新疆干旱内陆河流水文气象要素变异关系诊断[J].水土保持研究,2019,26(1):155-161.
- [5] 刘婵,刘冰,赵文智,等.黑河流域植被水分利用效率时空分异及其对降水和气温的响应[J].生态学报,2020,40(3):888-899.
- [6] 刘志方,刘友存,郝永红,等.黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J].干旱区地理,2014,37(6): 1137-1146.
- [7] 程国栋,肖洪浪,傅伯杰,等.黑河流域生态-水文过程集成研究进展[J].地球科学进展,2014,29(4):431-437.
- [8] 王钧,蒙古军.黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素[J].地理科学,2008,28(1):83-88.
- [9] 张喜风.黑河上游气候变化对出山口径流的驱动分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(4):542-548.
- [10] Li Z, Li Q, Wang J, et al. Impacts of projected climate change on runoff in upper reach of Heihe River basin using climate elasticity method and GCMs[J]. Science of the Total Environment, 2020,716:137072.
- [11] 田义超,王世杰,白晓永,等.桐梓河流域径流对气候和人类活动的响应[J].水土保持研究,2020,27(3):76-82.
- [12] Zhang M, Wei X, Sun P, et al. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large

watershed: The case study in the upper Minjiang River of Yangtze River basin [J]. Journal of Hydrology, 2012, 464: 1-11.

[13] 霍雪丽,刘友存,郝永红,等.基于 GPD 模型的黑河出山径流极值变化分析[J].干旱区研究,2014,31(4): 672-681.

[14] 张晓晓,张钰,徐浩杰,等.河西走廊三大内陆河流域出山径流变化特征及其影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):66-72.

[15] 王昱,连运涛,范严伟,等.黑河流域上游水沙变化特征及成因分析[J].水土保持通报,2018,38(2):1-7.

[16] 高婵婵,赵传燕,王超,等.黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J].水土保持学报,2016,30(1):117-121,126.

[17] 高云飞,赵传燕,彭守璋,等.黑河上游天涝池流域草地蒸散发模拟及其敏感性分析[J].中国沙漠,2015,35(5):1338-1345.

[18] Wang Q, Zhao C, Gao C, et al. Effects of environmental variables on seedling-sapling distribution of Qinghai Spruce (*Picea crassifolia*) along altitudinal gradients[J]. Forest Ecology and Management, 2017,384:54-64.

[19] 王方圆.黑河上游天涝池流域径流过程研究[D].兰州:兰州大学,2017.

[20] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:高等教育出版社,2013.

[21] 李秋菊,李占玲,王杰.黑河流域上游径流变化及其归因分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):31-39.

[22] 李云武,崔力超,王冠星.黑河上游八宝河流域径流变化及其对气候变化的响应[J].水文,2019,39(2):39-43.

[23] 李占玲,徐宗学.黑河流域上游山区径流模拟及模型评估[J].北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3): 344-349.

[24] 程建忠,陆志翔,邹松兵,等.黑河干流上中游径流变化及其原因分析[J].冰川冻土,2017,39(1):123-129.

[25] 刘志斌,黄粤,刘铁,等.开都河源区径流变化的气候响应[J].干旱区研究,2020,37(2):418-427.

[26] Han P, Long D, Han Z, et al. Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling [J]. Remote Sensing of Environment, 2019,224:44-59.

[27] 毛亚花,赵传燕,王方圆,等.黑河上游天涝池流域生长季河川径流变化及主控因子分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2019,55(4):520-524,532.

[28] 凌红波,徐海量,张青青.新疆克里雅河源流区径流变化与气候因子关系的非线性分析[J].地理研究,2012,31(5):792-802.

[29] 张雪艳,秦翔,吴锦奎,等.祁连山老虎沟流域产汇流特征分析[J].冰川冻土,2017,39(1):140-147.

[30] 崔步礼,李小雁,李岳坦,等.青海湖流域河川径流特征及其对降水的滞后效应[J].中国沙漠,2011,31(1): 247-253.

[31] 罗玉,秦宁生,周斌,等.长江源区沱沱河流域 1961—2011 年径流特征及其对降水的滞后效应[J].水土保持通报,2019,39(2):22-28.



(上接第 262 页)

[10] 张青雯,崔宁博,赵禄山,等.基于相对湿润指数的云南省季节性干旱变化特征[J].干旱地区农业研究,2020,38(4):278-284.

[11] 张克新,王娟娟,彭娇婷,等.贵州省降水集散程度时空变化及其影响因素分析[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2020,38(2):10-18.

[12] 李月,白晓永,周运超,等.基于 SPEI 的贵州省近 60 年干旱时空特征分析[J].中国水土保持,2015(7):57-60.

[13] 贺中华,陈晓翔,梁虹,等.基于土壤系统结构的喀斯特流域水文干旱分析:以贵州省为例[J].自然资源学报,2013,28(10):1731-1742.

[14] 毛春艳,戴丽,杨广斌,等.1960—2016 年贵州喀斯特山区干旱时空动态分析[J].水资源与水工程学报,2021,32(3):64-72,79.

[15] 申双和,张方敏,盛琼.1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J].农业工程学报,2009,25(1):11-15.

[16] 张强,邹旭凯,肖风劲,等.气象干旱等级 GB/T20481—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.

[17] 柏庆顺,颜鹏程,蔡迪花,等.近 56 a 中国西北地区不同强度干旱的年代际变化特征[J].干旱气象,2019,37(5):722-728.

[18] He Z, Liang H, Yang C, et al. Temporal-spatial evolution of the hydrologic drought characteristics of the karst drainage basins in South China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 64: 22-30.

[19] 任璐.基于 Copula 的汾河上游水文干旱频率的多时间尺度分析[D].太原:太原理工大学,2016.

[20] 胡义明,罗序义,梁忠民,等.基于藤 Copula 多维联合分布的 CMIP5 多模式降雨综合方法研究[J].中国农村水利水电,2021(4):10-15.

[21] 慎东方,商崇菊,方小宇,等.贵州省干旱历时和干旱烈度的时空特征分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(7):138-143.

[22] 罗文芳.青藏高原积雪异常与贵州东、西部旱、寒灾害关系的初步分析[J].高原气象,2001,20(3):340-344.