

引用格式:牛赞,赵维俊,许尔文,董继业,金铭,任小凤.祁连山排露沟流域径流对气候及下垫面变化的响应[J].山地学报,2023,41(6):799-810.

NIU Yun, ZHAO Weijun, XU Erwen, DONG Jiye, JIN Ming, REN Xiaofeng. Response of runoff to the changes in climate and underlying surface at the Pailugou Basin of the Qilian Mountains, China[J]. Mountain Research, 2023, 41(6): 799-810.

## 祁连山排露沟流域径流对气候及下垫面变化的响应

牛赞<sup>1</sup>,赵维俊<sup>2\*</sup>,许尔文<sup>2</sup>,董继业<sup>3</sup>,金铭<sup>4</sup>,任小凤<sup>2</sup>

(1. 淮阴师范学院 地理科学与规划学院,江苏 淮安 223300;

2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院 甘肃祁连山森林生态系统国家定位观测研究站,甘肃 张掖 734000;

3. 甘肃农业大学 林学院,兰州 730030;4. 河西学院 农业与生态工程学院,甘肃 张掖 734000)

**摘 要:**在全球气候变暖和人类活动的共同影响下,中国西北干旱半干旱区水循环变化与水资源再分配正在改变区域生态环境。在长时间序列尺度上,仍缺乏对西北内陆河径流变化机制与特征时空格局的统一认识。本研究以祁连山排露沟流域为试验区,基于量水堰实测长序列径流数据,采用线性回归法、Mann-Kendall、滑动  $t$ 、Pettitt 和累积距平等检验方法,分析排露沟流域 1994—2020 年径流序列的变化趋势和突变年份;以气象站监测和人工潜在蒸发观测数据为基础,采用 Budyko 假设水热耦合平衡模型对排露沟流域径流量变化趋势进行归因分析;以固定样地 2003—2021 年每木检尺数据,采用材积源生物量法,对排露沟流域 15 个乔木固定样地的 1017 棵青海云杉的碳密度进行估算。结果表明:(1)1994—2020 年排露沟流域径流量波动变化,丰枯交替,但整体呈现增加趋势,2006 年径流发生突变,突变后的年平均径流量增加了  $9.53 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,增加率为 34.88%。(2)在 2007—2020 年的突变期,排露沟流域径流对降水、潜在蒸发和流域下垫面参数的弹性系数分别为 3.15、-0.70 和 -0.68,且各因子对径流的贡献率分别为 87.92%、19.97% 和 -7.89%,表明径流量对降水量变化最为敏感,气候因子中潜在蒸发对径流的影响大于流域下垫面的变化。(3)2003—2021 年排露沟流域青海云杉平均碳密度为  $63.09 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,平均每年增长速率为 1.94%。在人类活动干扰较小的条件下,森林植被的碳储量和碳密度变化是引起流域下垫面参数波动的主要原因。研究结果可为流域管理部门制定自然资源保护与水资源合理分配及调用方案提供科学依据,为生态环境保护部门在权衡林水效益方面提供参考。

**关键词:**径流变化;归因分析;气候变化;碳密度;祁连山排露沟流域

**中图分类号:** P333.1

**文献标志码:** A

在全球气候变暖和人类活动的双重驱动下,蒸发、水汽输送、降水、下渗、径流等水循环路径正持续发生改变<sup>[1-2]</sup>。在中国西北干旱半干旱区,水循环变化与水资源再分配影响了区域生态系统稳定<sup>[3-4]</sup>。同时,随着水库、水电站等大型基础设施建

设以及其他人类活动在中国西部的持续强化,逐渐改变了区域土地利用格局,干扰了流域产汇流过程<sup>[5]</sup>。探究西北内陆河流域径流的动态变化特征及成因机制,对指导流域水资源综合管理开发,促进区域生态环境保护等具有重要的现实意义。

**收稿日期** (Received date): 2023-09-06; **改回日期** (Accepted date): 2023-12-16

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金 (32060247); 甘肃省自然科学基金重点项目 (22JR5RG1029); 淮安市自然科学研究计划 (HAB202159)。[National Natural Science Foundation of China (32060247); Key Project of Natural Science Foundation of Gansu Province (22JR5RG1029); Natural Science Research Program of Huai'an (HAB202159)]

**作者简介** (Biography): 牛赞 (1974-), 男, 甘肃通渭人, 博士, 教授, 主要研究方向: 生态水文。[NIU Yun (1974-), male, born in Tongwei, Gansu province, Ph. D., professor, research on ecological hydrology] E-mail: 747650046@qq.com

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 赵维俊 (1981-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 生态学。[ZHAO Weijun (1981-), male, Ph. D., professor of research, research on ecology] E-mail: zhaoweijun1019@126.com

对西北内陆河径流变化机制与特征的已有研究,在长时间序列尺度上,缺乏对其时空格局的统一认识。例如,位于天山南北的玛纳斯河和塔里木河径流增大,其直接原因是气温增加导致冰川积雪消融加快,流域降水增加而增大径流补给量<sup>[6-9]</sup>。发源于祁连山东段的石羊河径流减少,而黑河与疏勒河径流呈现增加趋势,夏季受降水影响较明显,冬、春季则受气温升高影响较明显<sup>[10-12]</sup>。

西北内陆河区位地段影响径流变化。在中游区域,工农业生产和人口集中分布,水量消耗大<sup>[13-14]</sup>,自然气候因素与工程因素共同作用,水文循环过程复杂。而在河流上游山区,人类活动较少,对流域上游的影响相对不明显<sup>[15-19]</sup>。因此,研究西北内陆河径流在气候环境因素影响下的变化规律与机制,选择上游区段或山区河流能够突显气候因素对流域径流的主导作用。

祁连山排露沟流域是典型降水和季节性冰雪融水补给的高寒山地半封闭流域,人口分布少,人类活动对径流影响微小,径流对气候变化响应敏感。已有研究成果揭示了气候在径流变化机制中的主导作用<sup>[20-23]</sup>,但这类研究大多着眼于一个或多个不连续水文年的径流日变化特征分析,缺乏长时间尺度上对高寒区域流域径流的年际、年代际的连续性研究,且因时间尺度较短,并未对径流突变以及突变原因进行全面的定量研究。

本研究以排露沟流域为研究对象,全面搜集该流域的长时间序列径流、气象和青海云杉林每木检尺等数据资料,分别采用 M-K 突变检验法、滑动  $t$  检验法、Pettitt 检验法、累积距平法,对祁连山排露沟流域径流演变进行时间尺度分析,采用 Budyko 模型对径流变化进行归因分析,讨论气候变化和青海云杉生长对径流变化的影响。研究结果可为流域管理部门制定自然资源保护与水资源合理分配及调用方案提供科学依据,为生态环境保护部门在权衡林水效益方面提供参考。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

祁连山排露沟流域( $100^{\circ}17' \sim 100^{\circ}18'E, 38^{\circ}32' \sim 38^{\circ}33'N$ )位于甘肃省张掖市肃南裕固族自治县境内,祁连山北麓中段大野口流域的东北处(图 1),是

黑河流域中上游的小流域,属典型的大陆性半干旱高山气候,受西风环流和极地冷气团的影响有明显的干湿季之分。流域总面积  $2.73 \text{ km}^2$ ,海拔  $2640 \sim 3800 \text{ m}$ ,青海云杉(*Picea crassifolia*)是该流域的主要建群树种。在流域出口处建有水文站(图 1),利用雷达水位计和流速仪、浮标相互配合监测径流量。在流域下游建有国家三级标准气象站。

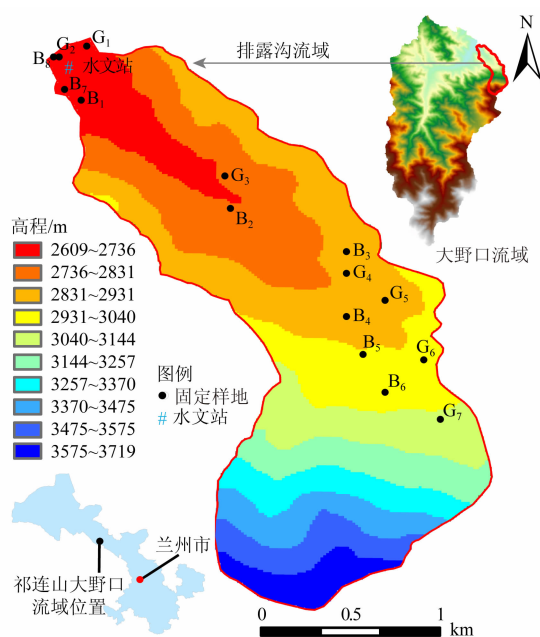


图 1 祁连山中段排露沟流域及气象水文监测点

Fig. 1 Location of the Pailugou Basin and meteorological-hydrological monitoring points in the middle Qilian Mountains

### 1.2 数据来源

1994—2020 年连续日降水及气温数据源于祁连山排露沟流域自动气象站(Campbell-CR1000);径流数据来源于流域出口处的三角形量水堰;青海云杉林胸径和树高数据源于 2003—2021 年祁连山排露沟流域 15 个固定样地的每木检尺数据。对收集到的资料进行分类汇总,并运用 Excel 2016、SPSS 13.0、Origin 10.0、MATLAB 等软件进行统计分析。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 径流变化趋势和突变检验

收集排露沟流域 1994—2020 年径流数据,采用线性回归法和 5 a 滑动平均法进行趋势分析,利用 M-K 突变检验、滑动  $t$  检验、Pettitt 检验法和累积距平等 4 种方法进行径流突变检验,6 种方法综合考虑,最后确定年径流序列的突变时间点<sup>[17-18]</sup>。

## (1) Mann-Kendall 检验法 (M-K 突变检验)

将流域年径流量作为样本  $R$ , 将第  $i$  个样本  $R_i$   $> R_j$  的累计数统计成为:

$$R_k = \sum_{i=1}^k R_i \quad (1 \leq k \leq n) \quad (1)$$

式中,  $R_i$  为前后两个样本  $R$  的值, 分别取 0 和 1。

(2) 滑动  $t$  检验法

假设流域年径流量  $R$  存在一个突变点, 突变点前后  $R$  容量分别为  $n_1, n_2$ , 计算公式为:

$$\sigma = \frac{|\bar{R}_1 - \bar{R}_2|}{\sqrt{\frac{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (2)$$

式中,  $\sigma$  服从自由度为  $n_1 + n_2 - 2$  的  $t$  分布;  $n_1, n_2$  分别为某一基准年前后两段径流值个数;  $\bar{R}_1, \bar{R}_2$  分别为某一基准年前后两段径流量相邻时段斜率平均值;  $\sigma_1, \sigma_2$  分别为前后两段样本标准差。

## (3) Pettitt 法

假设流域年径流量  $R$  存在突变点  $m$ , 突变时刻  $t_p$ , 采用 Mann-Whitney 的统计量  $U_{t_p}$ ,  $n$  检验年径流量  $R$  突变点  $m$  前后两个子样本  $\{R_1, R_2, \dots, R_{t_p}\}$  和  $\{R_{t_p+1}, R_{t_p+2}, \dots, R_n\}$  二者间累积分布是否存在显著差异, 统计量  $U_{t_p,n}$  计算公式为:

$$U_{t_p,n} = U_{t_p-1,n} + \sum_{i=1}^n \text{sgn}(R_{t_p} - R_i) \quad (t_p = 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

$$K = \max_{1 \leq t_p \leq n} |U_{t_p}| \quad (4)$$

$$P \cong 2 \exp \left[ -6k_t^2 / (n^3 + n^2) \right] \quad (5)$$

式中,  $R_{t_p}, R_i$  分别为第  $t_p, i$  年径流量斜率值;  $K$  为  $t_p$  时刻出现  $U_{t_p,n}$  最大统计量。若概率  $P \leq 0.05$ , 则  $m$  点为显著突变点。

## (4) 累积距平法

差积曲线上的拐点即为流域年径流量  $R$  的突变点, 其计算公式为:

$$R_{t_a} = \sum_{i=1}^{t_a} (R_i - \bar{R}) \quad (1 \leq t_a \leq n) \quad (6)$$

式中,  $R_{t_a}$  为径流量在时间序列  $t_a$  时段的累积距平值;  $R_i$  为流域径流量  $i$  时刻斜率值;  $\bar{R}$  为径流量序列平均值;  $n$  为年径流的年际区间。

## 1.3.2 径流变化归因分析

采用基于 Budyko 假设水热耦合平衡原理的弹性系数法<sup>[24-26]</sup> 量化气候因素和下垫面变化对排露沟流域径流量的影响。

(1) 一般认为流域多年蓄水量变化可忽略不计, 基于 Budyko 假设提出流域水热耦合平衡方程, 计算公式为:

$$E = \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (7)$$

$$R = P - E = P - \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (8)$$

式中,  $R$  为径流深;  $P$  为降水量;  $E$  为实际蒸散发量;  $n$  为流域下垫面参数;  $ET_0$  为潜在蒸散发。

(2) 假设  $P, ET_0, n$  为相互独立的变量, 用弹性系数  $\varepsilon_x$  表示径流  $R$  对  $x$  因子的敏感性, 其含义为单位影响因素的变化引起的径流变化量, 其表达式为:

$$\varepsilon_P = \frac{(1 + K^n)^{\frac{1}{n}+1} - K^{n+1}}{(1 + K^n) [(1 + K^n)^{\frac{1}{n}} - K]} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1 + K^n) [1 - (1 + K^{-n})^{\frac{1}{n}}]} \quad (10)$$

$$\varepsilon_n = \frac{\ln(1 + K^n) + K^n \ln(1 + K^{-n})}{n(1 + K^n) - (1 + K^n)^{1/n+1}} \quad (11)$$

式中,  $k$  为干燥系数 ( $k = ET_0/P$ );  $n$  为下垫面条件 ( $n$ );  $\varepsilon_P, \varepsilon_{ET_0}, \varepsilon_n$  分别为降雨  $P$ 、潜在蒸散发  $ET_0$  和下垫面条件  $n$  的弹性系数。

(3) 用  $dR'$  表示采用 Budyko 假设而计算出的突变前后径流变化, 表示  $P, ET_0, n$  发生变化而引起的  $R$  变化量 ( $dR_P, dR_{ET_0}, dR_n$ ), 其计算公式为:

$$dR' = dR_P + dR_{ET_0} + dR_n \\ = \varepsilon_P \frac{R}{P} dP + \varepsilon_{ET_0} \frac{R}{ET_0} dET_0 + \varepsilon_n \frac{R}{n} dn \quad (12)$$

式中,  $dP, dET_0, d_n$  为  $P, ET_0, n$  在突变前后两段时间多年平均值的差值, 则  $P, ET_0, n$  对径流  $R$  贡献率分别为:

$$C_P = \frac{dR_P}{dR'} \times 100\% \quad (13)$$

$$C_{ET_0} = \frac{dR_{ET_0}}{dR'} \times 100\% \quad (14)$$

$$C_n = \frac{dR_n}{dR'} \times 100\% \quad (15)$$

## 1.3.3 青海云杉林碳密度计算

## (1) 固定样地每木检尺方法

采用常规的每木检尺方法, 在 2003—2021 年期间对排露沟流域 15 个固定样地的 1017 棵青海云杉单株每隔 4 年或 5 年的 6—8 月份进行一次固定样地调查。调查内容涉及本研究的主要数据, 包括青海云杉林的树高和胸径, 固定样地特征因子如表 1 所示。

表 1 祁连山排露沟流域固定样地特征因子

Tab. 1 Characteristic factors of the fixed plots in the Pailugou Basin of the Qilian Mountains

样地号	植被类型	GPS-E	GPS-N	边长/m	海拔/m	坡度/(°)	郁闭度	调查数量/棵
B1	藓类青海云杉林	100°17'11"	38°33'19"	12.8 × 25	2700	35	0.69	93
B2	藓类青海云杉林	100°17'38"	38°32'59"	20 × 20	2860	30	0.82	87
B3	草类云杉林	100°17'59"	38°32'51"	20 × 20	2900	12	0.50	52
B4	藓类青海云杉林	100°17'59"	38°32'39"	20 × 20	3028	25	0.70	56
B5	藓类青海云杉林	100°18'02"	38°32'32"	20 × 20	3097	23	0.70	48
B6	藓类青海云杉林	100°18'06"	38°32'25"	20 × 20	3195	35	0.66	45
B7	藓类青海云杉林	100°17'08"	38°33'21"	20 × 20	2762	30	0.66	43
B8	藓类青海云杉林	100°17'06"	38°33'27"	20 × 20	2730	25	0.69	74
G1	藓类青海云杉林	100°17'12"	38°33'29"	20 × 20	2715	32	0.67	59
G2	藓类青海云杉林	100°17'07"	38°33'27"	20 × 36	2800	28	0.58	120
G3	藓类青海云杉林	100°17'37"	38°33'05"	20 × 20	2840	16	0.87	115
G4	藓类青海云杉林	100°17'59"	38°32'47"	20 × 20	2952	33	0.83	78
G5	藓类青海云杉林	100°18'06"	38°32'42"	20 × 20	3015	22	0.78	94
G6	灌丛云杉林	100°18'13"	38°32'31"	20 × 20	3100	20	0.40	38
G7	灌丛云杉林	100°18'16"	38°32'20"	23.5 × 21	3300	34	0.35	16

(2)青海云杉林碳密度计算方法

在区域尺度森林生物量估算方面,材积源生物量法表现良好,是目前简单易操作且较流行的方法之一。本研究主要采用该方法对青海云杉林碳密度进行估算,其表达式简述如下<sup>[27-30]</sup>：

$$C_{ij} = a \cdot c \cdot d \cdot (D_{ij}^2 H_{ij})^b \tag{16}$$

$$C_j = \sum_{i=1}^n C_i \tag{17}$$

$$C_{dj} = C_j / A_j \tag{18}$$

式中, $D_{ij}$ 、 $H_{ij}$ 、 $C_{ij}$ 分别为第*j*个固定样地内第*i*棵青海云杉单株胸径、单株树高、单株碳储量; $a$ 、 $b$ 分别为青海云杉全株蓄积量经验系数,取值分别为0.4312、0.7425; $c$ 、 $d$ 分别为青海云杉全株生物量和碳密度经验系数,取值分别为0.5939和0.462。

式(16)表示青海云杉单株碳储量的计算公式。

式(17)表示青海云杉样方的碳储量计算公式。式中, $C_j$ 和 $n$ 分别为第*j*个固定样地内青海云杉碳储量总和、总株数。

式(18)表示青海云杉样方的碳密度计算公式。式中, $C_{dj}$ 和 $A_j$ 分别为第*j*个固定样地的平均碳密度、样地面积。

2 结果与分析

2.1 径流变化分析

2.1.1 径流变化趋势分析

排露沟流域量水堰是该流域唯一的径流控制站,1994—2020年排露沟流域多年平均径流量为 $31.96 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,最大值出现在2009年,为 $55.44 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,最小值出现在2001年,为 $12.48 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。1994—2006年呈现较明显的枯水年份,2007—2020年基本处于丰水年份。从线性拟合情况来看,年径流量总体呈增加趋势,变化率为 $0.4728 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。从5 a滑动平均曲线来看,2004年以前5 a滑动平均曲线基本位于平均线下方,表明1994—2006年排露沟流域径流量较少;2006年以后5 a滑动平均曲线基本位于平均线上方,表明2006—2020年排露沟流域径流量较多。

2.1.2 径流突变检验分析

排露沟流域量水堰年径流量的突变检验如图3所示。图3a为M-K突变检验,图中UF统计量呈现先下降、后上升的波动趋势,UF统计量在1994—

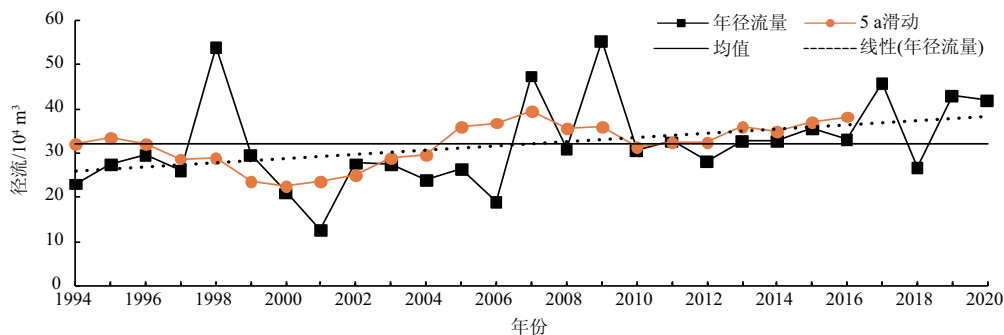


图2 祁连山排露沟流域水文站年径流变化趋势

Fig. 2 Annual runoff variation trend of the hydrology station in the Pailugou Basin of the Qilian Mountains

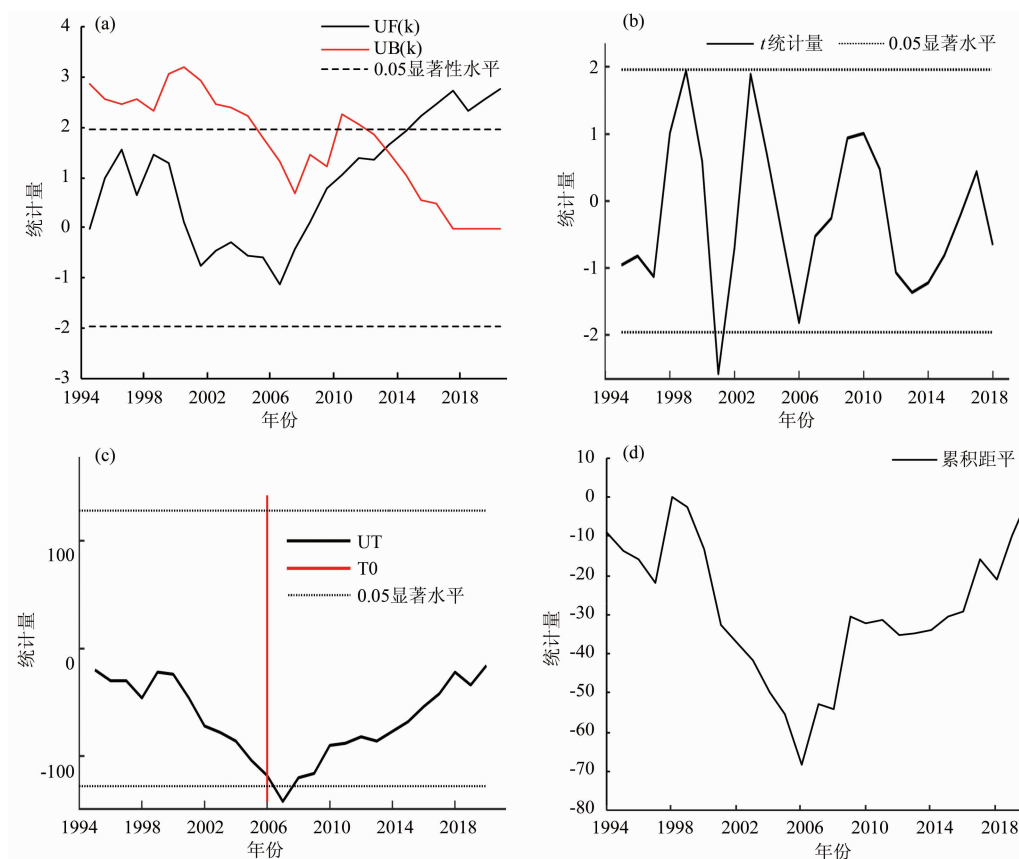


图3 祁连山排露沟流域水文站年径流突变检验

Fig. 3 Abrupt change test of annual runoff at hydrology station in the Pailugou Basin of the Qilian Mountains

2000 年间均为正值且处在 0.05 显著水平临界线 (+1.96) 内, 表明排露沟流域年径流量在此段时间呈现震荡上升趋势; 2000—2008 年 UF 统计量为负值且处在 0.05 显著水平临界线 (-1.96) 内, 表明 2000—2008 年排露沟流域年径流量呈现波动下降趋势; UB 和 UF 两条曲线交于 2009 和 2012 年, 根据 M-K 突变检验规则可知, 排露沟流域年径流量可能在 2009 年和 2012 年前后发生了两次突变。

图 3b 为滑动  $t$  检验, 图中统计量  $t$  在 2001 年左

右超出给定  $P=0.05$  显著水平临界线, 2006 年与给定  $P=0.05$  显著水平临界线几乎相交, 表明排露沟流域年径流量可能在 2001 年和 2006 年前后分别发生了突变, 其中 2001 年突变显著。

图 3c 为 Pettitt 检验, 图中统计量 UT 曲线在 1994—2006 年变化较为剧烈, 2006—2020 年变化较平缓。根据 Pettitt 突变检验中  $T0$  值与 UT 值的交点原则, 表明排露沟流域年径流量可能在 2006 年前后发生了一次显著突变。

图 3d 为累积距平曲线,排露沟流域年径流量累积距平曲线在 1994—2006 年呈现明显的下降趋势;2006—2020 年整体呈现明显的单调上升趋势,且下降幅度较大,说明在此段时间内排露沟流域年径流量较少;自 2006 年后,累计距平曲线呈现显著的单调上升趋势,表明排露沟流域径流量可能在 2006 年前后发生了一次突变。

由上述分析结果可知,利用 M-K 突变检验、滑动  $t$  检验、Pettitt 检验和累积距平法四种方法对排露沟流域径流量的突变检验结果不完全一致,但其中三种方法均表明突变点在 2001—2006 年前后。结合图 2 中年径流变化趋势综合考虑,确定排露沟流域径流突变点发生在 2006 年。

突变后排露沟流域的年平均径流量与突变前相比存在较大幅度增加,年平均径流量由突变前的  $27.33 \times 10^4 \text{ m}^3$  增加到突变后的  $36.86 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,增加率为 34.88%;变异系数由 0.35 变为 0.84,表明突变后径流量年际间变异程度更大、变化更加剧烈。

## 2.2 径流变化归因分析

### 2.2.1 径流变化敏感性分析

祁连山排露沟流域面积为  $2.73 \text{ km}^2$ ,采用排露沟流域 1994—2020 年实测径流量资料,计算径流深  $R$ ;利用祁连山森林生态定位研究站人工潜在蒸发量实测值  $ET_0$ 。以 2006 年作为分界点,将研究期(1994—2020 年)划分为基准期(1974—2006 年)和变化期(2007—2020 年)。根据多年平均径流深  $R$ 、降水量  $P$  以及潜在蒸发量  $ET_0$  计算下垫面参数  $n$ 、径流系数  $\alpha$  和干燥指数  $K$ ,再通过相关文献中的公式<sup>[24-26]</sup>计算得到不同时期的  $P$ 、 $ET_0$ 、 $n$  分别所对应的弹性系数  $\varepsilon$ ,计算结果见表 2。

排露沟流域变化期的  $R$ 、 $P$  与基准期相比均有所上升,分别上升了 38.11%、14.19%,而  $ET_0$  与基准期相比均有所下降,下降了 14.43%,径流深上升幅度较大。径流系数  $\alpha$  较基准期有所上升,变化期增加的降水转化为径流的比例比基准期高,干燥指

数  $K$  比较基准期有较大下降,表明变化期比基准期气候更潮湿,符合林区实际湿度变化趋势。 $\varepsilon_p$  为正值,表示降雨量  $P$  与径流深  $R$  呈正相关关系, $\varepsilon_p$  从基准期的 3.89 降到变化期的 3.15,正相关性有减弱趋势,这可能与潜在蒸发量  $ET_0$  和下垫面参数  $n$  与径流深的负相关性减弱有关。当  $ET_0$  和  $n$  分别增加 1 mm 或 1 时,径流深的减少量由基准期的 0.76 mm 变为变化期的 0.70 mm,或由 10.22 mm 变为 6.18 mm,这说明径流变化不单纯受  $P$ 、 $ET_0$ 、 $n$  中某一变量的影响,而是多变量综合影响的结果。

弹性系数  $\varepsilon$  绝对值大小表征径流对影响因子的敏感度<sup>[24]</sup>,研究期内排露沟流域径流对降水  $R$  的敏感度最强,对流域下垫面参数  $n$  的敏感度最弱。

### 2.2.2 径流变化归因分析

利用 Budyko 水热耦合平衡方程方法,对排露沟流域各影响因子的贡献率进行计算,计算结果发现,流域径流变化量  $dR'$  为 49.76 mm,实际径流变化量  $dR$  值为 37.26 mm。变化期内  $P$ 、 $ET_0$  和  $n$  对径流的贡献程度有较大差异,气候因素  $P$  和  $ET_0$  对排露沟流域径流的贡献率为 107.89%,其中降水引起的径流深变化量为 43.75 mm,贡献率 87.92%,潜在蒸发引起的径流深变化量为 9.94 mm,贡献率 19.97%;下垫面引起的径流变化量为 -3.93 mm,贡献率 -7.89%。

综上所述,排露沟流域径流量变化主要归因于降水量和潜在蒸发量参数的变化,气候因素变化对径流量的变化起决定性的影响,流域下垫面变化对径流的变化起到抑制作用,这充分说明保护祁连山水源涵养林对维护生态系统健康、确保其向下游稳定供水具有重要意义。

## 3 讨论

### 3.1 气候变化对径流的影响

已有研究<sup>[10-14]</sup>表明,降水是地表径流的直接补

表 2 祁连山排露沟流域不同时期水文气象变量特征

Tab. 2 Characteristics of the hydrometeorological variables in different periods in the Pailugou Basin of the Qilian Mountains

水文站点	时期	$R/\text{mm}$	$P/\text{mm}$	$ET_0/\text{mm}$	$n$	$\alpha$	$k$	$\varepsilon_p$	$\varepsilon_{ET_0}$	$\varepsilon_n$
排露沟 流域	基准期(1994—2006 年)	97.76	362.13	1006.78	1.0154	0.27	2.85	3.89	-0.76	-10.22
	变化期(2007—2020 年)	135.02	413.51	861.49	1.0220	0.33	2.15	3.15	-0.70	-6.18



给源,是径流分配及其分配量的直接影响因素。同时,区域气温和下垫面条件影响蒸散发强度和空间格局,进而对径流形成以及径流量大小产生重要影响。近 20 a 来,祁连山排露沟流域径流总体呈现出增多趋势,其变化主要受气温与降水的影响,其中降水影响更大。为了进一步分析祁连山排露沟流域径流量变化与气候因子之间的关系,根据已知资料对径流量与降雨量、气温以及蒸发量之间的相关性进行分析(图 4)。

1994—2020 年祁连山排露沟流域径流量变化与降水量  $P$  变化趋势基本一致,呈正相关关系,但相关性不显著(图 4a)。从基准期到变化期径流量随降水量变化的增加率从 0.4557 减小到 0.2418,这说明变化期降水对径流的贡献减弱,影响径流年际间的变化可能还与其他因素有关。排露沟流域径流量与气温的相关性呈现微弱正相关,从基准期到变化期径流量随气温变化的增加率从 27.08 降为 41.617(图 4b),说明变化期气温对径流的影响逐渐

增强。蒸散发是祁连山排露沟流域水分耗散的主要途径之一,受气温变化和下垫面等因素的综合影响。夏季气温高,蒸散发量最大,而冬季气温低,蒸散发量最小<sup>[31]</sup>。在一定的气候条件下,下垫面条件影响蒸散发进而影响地表径流的形成及其年内分配。由图 4c 可知,排露沟流域径流量与潜在蒸发量  $ET_0$  在基准期呈现极微弱的负相关,在变化期呈现极微弱的正相关,从基准期到变化期径流量随潜在蒸发量变化的上升率从 0.0422 增加为 0.1452,说明变化期潜在蒸发量对径流的影响增强。

结合上述气候因子的影响分析,本研究得出的降水量  $P$ 、潜在蒸发量  $ET_0$  对排露沟流域径流量变化的影响结果与相关学者<sup>[20-23]</sup>的研究结果一致,即气候因子中的降水对祁连山排露沟流域径流演变的影响占主导作用。

### 3.2 下垫面变化对径流的影响

祁连山排露沟流域特殊的下垫面和地质构造条件,致使区域径流的形成汇集及转换可能更为复

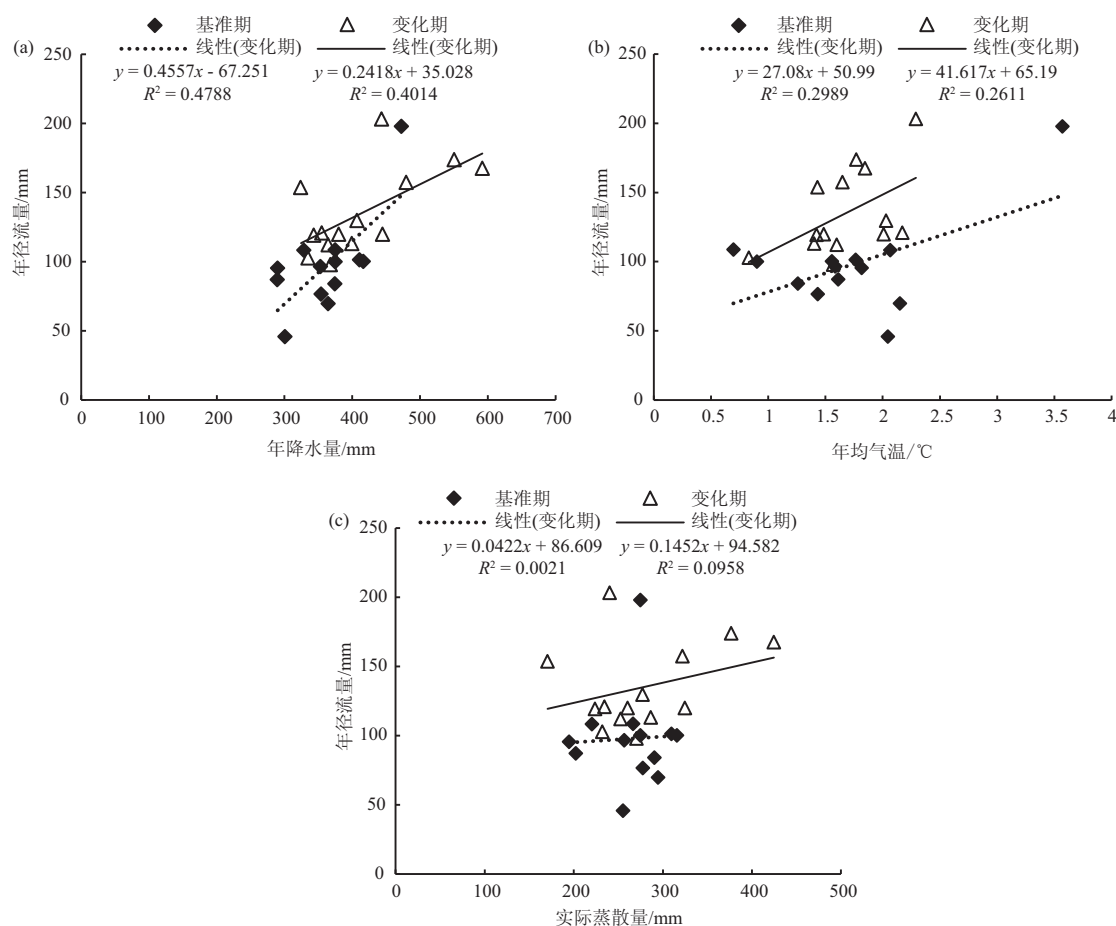


图 4 祁连山排露沟流域径流量与气候因子的相关性

Fig. 4 Correlation between runoff and climatic factors in the Pailugou Basin of Qilian Mountains

杂<sup>[32]</sup>。相关研究表明<sup>[33-34]</sup>,下垫面参数( $n$ )与流域的地形、土壤性质、土地利用类型以及植被覆盖度等因素有关,一般考虑到在较短时间内流域的地形和土壤性质变化较小,可忽略不计,加之该研究流域受人为活动影响较小,因此流域下垫面参数( $n$ )的变化主要是由森林植被的变化引起,而碳源/碳汇功能变化是反映森林植被变化的重要标志。碳源/碳汇功能变化不仅对降水的二次分配过程产生复杂的影响,而且通过蒸散发对内陆水文循环和流域产汇流过程产生重要影响。为进一步分析碳源/碳汇功能变化对径流变化的影响,本研究主要采用 2003—2021 年祁连山排露沟流域的固定样地每木检尺的青海云杉碳储量的变化指标,对排露沟流域径流量年际变化的影响进行分析(表 3)。

2003—2021 年祁连山排露沟流域青海云杉林平均碳密度为  $63.09 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,且呈增长趋势,平均每年增长速率为  $1.94\%$ ,尤其在 2007 年以后,青海云杉林碳密度明显增长,平均每年增长速率为  $2.15\%$ 。青海云杉林碳密度的这种变化趋势与流域径流突变发生在 2006 年基本相对应,即进入变化期

(2007—2020 年)后,流域的青海云杉林碳密度有所增加,这是因为这一时期的气候突变,植被生长所需要的水分供应不断提高,加之气温增高,植被生长量增加,进而对流域径流量的增加产生了正面影响。由于祁连山排露沟流域受人为干扰较小,下垫面参数  $n$  的变化主要受植被系统变化影响。通过青海云杉林碳密度的变化研究进一步解释了下垫面参数  $n$  的变化特征,同时也证明了流域近 20 多年来,森林植被增加、流域径流也增加的生态水文现象。进入变化期(2007—2020 年)后,青海云杉林碳密度呈增大态势,但同时并未影响流域向下游供水的能力,这一研究成果为林水矛盾关系的认识提供了新的参考。

综上所述,排露沟流域径流量的年际变化与气候条件及森林植被的变化息息相关。流域地表水与地下水相互转化频繁,通过降水、蒸发、地下水溢出等不同水文过程形成了干旱半干旱区特殊的水资源演变模式。加强对流域径流演变规律的研究,深化气候和下垫面变化对径流影响程度的认识,对祁连山水源涵养林孕育的黑河、疏勒河、石羊河三大流域

表 3 祁连山排露沟流域青海云杉林碳密度及其年际变化

Tab. 3 Carbon density and interannual variation of the *Picea crassifolia* forest in the Pailugou Basin of the Qilian Mountains

样地 编号	样地 面积/ $\text{hm}^2$	碳密度/ $\text{Mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$						碳密度年均增长率/%					死树 数/棵
		2003 年	2007 年	2012 年	2017 年	2021 年	平均	2007 年	2012 年	2017 年	2021 年	平均	
B1	0.03	49.07	48.55	55.46	61.02	69.75	56.77	-0.27	2.84	2.01	3.58	2.04	0
B2	0.04	84.36	99.55	99.55	112.26	115.61	102.27	4.50	0.00	2.56	0.74	1.95	5
B3	0.04	36.18	37.27	41.63	42.24	48.95	41.26	0.76	2.34	0.29	3.97	1.84	2
B4	0.04	54.18	54.18	55.66	62.30	68.23	58.91	0.00	0.55	2.39	2.38	1.33	2
B5	0.04	57.35	59.85	62.35	62.77	68.67	62.20	1.09	0.84	0.14	2.35	1.10	1
B6	0.04	65.40	65.40	71.49	80.99	88.04	74.27	0.00	1.86	2.66	2.18	1.67	2
B7	0.04	76.60	70.47	79.00	81.01	90.81	79.58	-2.00	2.42	0.51	3.02	0.99	2
B8	0.04	47.61	49.17	49.17	63.62	70.95	56.11	0.82	0.00	5.88	2.88	2.39	4
G1	0.04	50.88	52.27	59.51	60.95	64.23	57.57	0.68	2.77	0.48	1.35	1.32	3
G2	0.07	58.36	58.60	65.71	67.62	71.88	64.43	0.10	2.43	0.58	1.58	1.17	2
G3	0.04	84.28	95.96	103.59	113.59	116.29	102.74	3.47	1.59	1.93	0.59	1.89	37
G4	0.04	50.73	60.17	70.17	80.25	91.93	70.65	4.65	3.32	2.87	3.64	3.62	6
G5	0.04	63.13	60.72	70.35	82.69	87.78	72.93	-0.96	3.17	3.51	1.54	1.82	0
G6	0.04	27.33	27.89	34.67	39.07	46.91	35.17	0.52	4.86	2.54	5.02	3.23	1
G7	0.05	8.65	10.85	12.36	12.36	13.25	11.49	6.34	2.79	0.00	1.80	2.73	1
平均	0.04	54.27	56.73	62.04	68.18	74.22	63.09	1.31	2.12	1.89	2.44	1.94	5



水资源优化配置和管理具有指导意义。

## 4 结论

本研究以祁连山排露沟流域量水堰实测径流数据、气象站监测数据、人工潜在蒸发数据、固定样地青海云杉每木检尺数据为基础,采用线性回归法、Mann-Kendall、滑动  $t$ 、Pettitt 和累积距等检验方法、Budyko 假设水热耦合平衡模型、材积源生物量等方法,对祁连山排露沟流域 2000—2020 年径流变化及归因进行了分析,得出以下主要结论。

(1) 1994—2020 年排露沟流域径流量年际间波动变化,但总体呈增加趋势;径流量在 2006 年发生突变,变异系数由突变前的 0.35 变为突变后的 0.84,表明发生突变后排露沟流域年径流量变化呈强变异,径流变化更趋不稳定。

(2) 变化期内(2007—2020 年)排露沟流域径流量对降水、潜在蒸发和下垫面参数的弹性系数分别为 3.15、-0.70、-0.68,表明径流量对降水量变化最为敏感,对潜在蒸发量变化的敏感性次之,对流域下垫面变化敏感性最弱。

(3) 排露沟流域的降水、潜在蒸发和下垫面参数对流域径流的贡献率分别为 87.92%、19.97% 和 -7.89%,表明森林植被引起的流域下垫面条件变化是影响流域径流量演变的原因之一,但径流演变不单纯受某一变量( $P$ 、 $ET_0$ 、 $n$ )的影响,而是多种变量综合影响的结果。

(4) 2003—2021 年排露沟流域青海云杉平均碳密度为  $63.09 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,平均增长速率为 1.94%。在人类活动干扰较小的条件下,森林植被的碳密度变化是引起流域下垫面参数波动的主要原因。

## 致谢

感谢甘肃省祁连山水源涵养林研究院敬文茂站长、王顺利科长,甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心车宗玺科长等在试验调查方面提供的支持;感谢淮阴师范学院地理科学与规划学院黄玉叶、于文会、纪思宇同学,甘肃农业大学林学院李健康同学在数据处理方面的辛勤付出。

## 参考文献 (References)

[1] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water

resources [J]. Science, 2006, **313**(5790): 1068 – 1072. DOI: 10.1126/science.1128845

- [2] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, **44**(7): 779 – 790. [SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(7): 779 – 790] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.07.001
- [3] 张强, 胡隐樵, 曹晓彦, 等. 论西北干旱气候的若干问题[J]. 中国沙漠, 2000, **20**(4): 357 – 362. [ZHANG Qiang, HU Yinqiao, CAO Xiaoyan, et al. On some problems of arid climate system of northwest China [J]. Journal of Desert Research, 2000, **20**(4): 357 – 362]
- [4] 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. [WANG Yujie, QIN Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of northwest China: An overview [J]. Climate Change Research, 2017, **13**(5): 483 – 493] DOI: 10.12006/j.issn.1673 – 1719.2017.004
- [5] 吴景全, 吴铭婉, 臧传富. 西北诸河流域土地利用变化及土地生态安全评估[J]. 干旱区地理, 2021, **44**(5): 1471 – 1482. [WU Jingquan, WU Mingwan, ZANG Chuanfu. Land use change and land ecological security assessment in the river basins of northwestern China [J]. Arid Land Geography, 2021, **44**(5): 1471 – 1482] DOI: 10.12118/j.issn.1000 – 6060.2021.05.27
- [6] 黄鑫, 程文仕, 李晓丹, 等. 干旱内陆河流域土地利用转型的生态环境效应变化特征及其驱动因素探测[J]. 水土保持研究, 2023, **30**(2): 324 – 332. [HUANG Xin, CHENG Wenshi, LI Xiaodan, et al. Recognition on the changes and driving factors of eco – environmental effect of land use transformation in arid inland river basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, **30**(2): 324 – 332] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.040
- [7] 王晓杰, 刘海隆, 包安明. 气候变化对玛纳斯河的径流量影响预测模拟分析[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(5): 1220 – 1228. [WANG Xiaojie, LIU Hailong, BAO Anming. A simulation analysis of the impact of climate change on runoff in the Manas River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(5): 1220 – 1228]
- [8] 肖森元, 苏军, 杨广, 等. 气候变化和人类活动对玛纳斯河流域径流及干旱的影响[J]. 人民珠江, 2022, **43**(7): 21 – 28. [XIAO Senyuan, SU Jun, YANG Guang, et al. Impact of climate change and human activities on runoff and drought in Manas River Basin [J]. Pearl River, 2022, **43**(7): 21 – 28] DOI: 10.3969/j.issn.1001 – 9235.2022.07.004
- [9] 孙从建, 陈伟, 王诗语. 气候变化下的塔里木盆地西南部内陆河流域径流组分特征分析[J]. 2022, **39**(1): 113 – 122. [SUN Congjian, CHEN Wei, WANG Shiyu. Stream component characteristics of the inland river basin of the Tarim Basin under regional climate change [J]. Arid Zone Research, 2022, **39**(1): 113 – 122] DOI: 10.13866/j.azr.2022.01.12

- [10] 吴凯, 李强坤, 殷会娟, 等. 黑河“97”分水方案下黑河流域径流演变新事实与调水成效分析[G]. 中国水利学会. 中国水利学会 2020 学术年会论文集第三分册. 中国水利水电出版社, 中国北京 2020: 89–95. [WU Kai, LI Qiangkun, YIN Huijuan, et al. New facts of runoff evolution and analysis of water transfer effectiveness in Heihe River Basin under the “97” water dividing scheme of Heihe River [G]. Chinese Hydraulic Engineering Society. The Third Volume of the Proceedings of the 2020 Academic Annual Meeting of the Chinese Hydraulic Engineering Society, China Water Power Press, Beijing China 2020: 89–95] DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.069414
- [11] 张妍, 郭萍, 张帆. 黑河中游农业水资源多目标优化配置[J]. 中国农业大学学报, 2019, **24**(5): 185–192. [ZHANG Yan, GUO Ping, ZHANG Fan. Study on multi-objective optimization allocation of agricultural water resources in the middle reaches of Heihe River [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, **24**(5): 185–192] DOI: 10.11841/J. ISSN. 1007–4333. 2019. 05. 21
- [12] 蒋小芳, 段翰晨, 廖杰, 等. 基于多模型的黑河中游甘临高地地区土地利用情景模拟[J]. 农业机械学报, 2022, **53**(9): 178–188. [JIANG Xiaofang, DUAN Hanchen, LIAO Jie, et al. Multi-model-based simulation of different landuse scenarios in Gan-Lin-Gao area in middle reaches of Heihe River [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, **53**(9): 178–188] DOI: 10.6041/j. issn. 1000–1298. 2022.09.018
- [13] 杜伟宏. 塔里木河干流水土资源变化与生态恢复研究[D]. 西安: 长安大学, 2020: 43–54. [DU Weihong. Study on changes of soil and water resources and ecological recovery in the main stream of Tarim River [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020: 43–54]
- [14] 耿文杰. 基于“97”分水方案和“三条红线”的黑河中游水资源配置研究[D]. 西安: 西北大学, 2021: 49–60. [GENG Wenjie. The allocation of water resources in the midstream of Heihe River for the “97 water diversion scheme” and the “Three Red Lines” [D]. Xi'an: Northwest University, 2021: 49–60]
- [15] 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. [ZHANG Xiaoxiao, ZHANG Yu, XU Haojie, et al. Mountainous runoff change in three inland river basin in Hexi Corridor and its influencing factors [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, **28**(4): 66–72] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2014.04.034
- [16] 张彧瑞. 河西内陆河流域径流变化特征及对气候变化和人类活动的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2013: 9–10. [ZHANG Yurui. The characteristic of runoff and its response on climate change and human activities in inland basins, Hexi Region [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013: 9–10]
- [17] 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. [LI Qiuju, LI Zhanling, WANG Jie, et al. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2019, **17**(3): 31–39] DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0057
- [18] 李芳, 邹松兵, 陆志翔, 等. 气候变暖背景下黄河源区白河和黑河流域径流变化归因分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, **56**(1): 56–64. [LI Fang, ZOU Songbing, LU Zhixiang, et al. Analysis of streamflow variations in the Bai and Hei River Basins in the source region of the Yellow River under the background of climate warming [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, **56**(1): 56–64] DOI: 10.13885/j.issn.0455–2059.2020.01.007
- [19] LI Zhanling, LI Wen, LI Zhanjie, et al. Responses of runoff and its extremes to climate change in the upper catchment of the Heihe River Basin, China [J]. Atmosphere, 2023, **14**(3): 539. DOI: 10.3390/atmos14030539
- [20] 芦倩. 祁连山排露沟流域植被类型变化对径流过程的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022. 93–102. [LU Qian. Effect of vegetation type change on runoff in Pailugou catchment of Qilian mountains [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022: 93–102]
- [21] 牛赞, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山排露沟流域气温、冻土冻融与河川径流特征[J]. 林业科学, 2014, **50**(1): 27–31. [NIU Yun, LIU Xiande, JING Wenmao, et al. Characteristics of temperature, soil freezing and thawing, and river flow in Pailugou watershed of Qilian Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, **50**(1): 27–31] DOI: 10.11707/j.1001–7488.20140105
- [22] 王顺利, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山区气候变化与流域径流特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(1): 162–165. [WANG Shunli, LIU Xiande, JIN Ming, et al. The impact of temperature and precipitation on the streamflow in the middle part of the Qilian Mountains, northwestern China. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, **25**(1): 162–165] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2011.01.006
- [23] 张立杰, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山典型小流域降水特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(5): 776–782. [ZHANG Lijie, ZHAO Wenzhi, HE Zhibin, et al. The characteristics of precipitation and its effects on runoff in a small typical catchment of Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(5): 776–782]
- [24] 陈丽丽, 莫淑红, 巩瑶. 基于 Budyko 弹性系数法的佳芦河流域径流变化归因识别[J]. 水资源与水工程学报, 2021, **32**(1): 110–116. [CHEN Lili, MO Shuhong, GONG Yao. Attribution identification of runoff change in Jialu River Basin based on Budyko elastic coefficient method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, **32**(1): 110–116] DOI: 10.11705/j.issn.1672–643X.2021.01.16
- [25] 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. [YANG Lin, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al.

- Attribution of runoff variations in Tao River and Daxia River based on Budyko hypothesis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41** (21): 8421–8429 DOI: 10.5846/stxb202007221924
- [26] 苗正伟, 路梅, 丁志宏. 基于时变 Budyko 模型的湟沱河上游径流变化归因分析[J]. *长江科学院院报*, 2022, **39**(7): 29–35. [MIAO Zhengwei, LU Mei, DING Zhihong. Cause analysis of runoff change in the upper reaches of Hutuo River based on time-varying Budyko-type equation [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(7): 29–35 DOI: 10.11988/ckyyb.20210284
- [27] 王秀云, 孙玉军. 森林生态系统碳储量估测方法及其研究进展[J]. *世界林业研究*, 2008, **21**(5): 24–29. [WANG Xiuyun, SUN Yujun. Review on research and estimation methods of carbon storage in forest ecosystem [J]. *World Forestry Research*, 2008, **21**(5): 24–29 DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2008.05.007
- [28] 彭守璋, 赵传燕, 郑祥霖, 等. 祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(7): 1689–1694. [PENG Shouzhang, ZHAO Chuanyan, ZHENG Xianglin, et al. Spatial distribution characteristics of the biomass and carbon storage of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forests in Qilian Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(7): 1689–1694 DOI: 10.13287/j.1001-9332.2011.0240
- [29] 牛赞, 毛广雄. 林区资源与生态环境调查教程[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2021: 65–78. [NIU Yun, MAO Guangxiong. Forest resources and ecological environment survey course [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2021: 65–78]
- [30] 刘建泉, 李进军, 郝虎, 等. 祁连山青海云杉林生物量与碳储量及其影响因素分析[J]. *现代农业科技*, 2017(12): 140–143+146. [LIU Jianquan, LI Jinjun, HAO Hu, et al. Analysis on biomass and carbon storage of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains and its influence factors [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(12): 140–143+146]
- [31] 闫宇会, 薛宝林, 张路方, 等. 基于 MOD16 产品的黑河流域蒸散量时空分布特征[J]. *节水灌溉*, 2019, **44**(9): 85–92. [YAN Yuhui, XUE Baolin, ZHANG Lufang, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of evapotranspiration in the Heihe River Basin based on MOD16 product [J]. *Water Saving Irrigation*, 2019, **44**(9): 85–92]
- [32] 祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 等. 黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, **49**(3): 29–43. [QI Xiaofan, LI Wenpeng, CUI Huqun, et al. Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2022, **49**(3): 29–43 DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202003
- [33] 何旭强, 张勃, 孙力炜, 等. 气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率[J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(11): 2884–2890. [HE Xuqiang, ZHANG Bo, SUN Liwei, et al. Contribution rates of climate change and human activity on the runoff in upper and middle reaches of Heihe River Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(11): 2884–2890 DOI: 10.13292/j.1000-4890.2012.0474
- [34] 潘燕辉, 张辉, 马金珠. 气候变化和人类活动对黑河水资源的影响[J]. *人民黄河*, 2012, **34**(5): 55–60. [PAN Yanhui, ZHANG Hui, MA Jinzhu. Quantities research of climate change and human activities affecting water resources [J]. *Yellow River*, 2012, **34**(5): 55–60 DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2012.05.019

## Response of Runoff to the Changes in Climate and Underlying Surface at the Pailugou Basin of the Qilian Mountains, China

NIU Yun<sup>1</sup>, ZHAO Weijun<sup>2\*</sup>, XU Erwen<sup>2</sup>, DONG Jiye<sup>3</sup>, JIN Ming<sup>4</sup>, REN Xiaofeng<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Planning, Huaiyin Normal University, Huaian 223300, Jiangsu, China;

2. Gansu Qilian Mountains Forest Eco-system of the State Research Station, Gansu Province Academy of Water Resources Conservation Forest of the Qilian Mountains, Zhangye 734000, Gansu, China; 3. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730030, China;

4. College of Agriculture and Ecological Engineering, Hexi University, Zhangye 734000, Gansu, China)

**Abstract:** Under the joint influence of global warming and human activities, the change of water cycle and redistribution of water resources in arid and semi-arid areas of Northwest China are changing the regional ecological environment. On a long-term time series scale, there was a lack of unified interpretation of spatial-temporal patterns of runoff variations in inland rivers in northwest China.

In this study, it took the Pailugou Basin originated from the Qilian Mountains as case study. It interpreted the

measured long-series runoff data collected at water weirs by using linear regression method, Mann-Kendall, sliding  $t$ , Pettitt and cumulative distance test methods, etc., and then the change trend and mutation year of the runoff series from 1994 to 2020 were analyzed. Based on data collected at meteorological stations and artificial potential evaporation observation, it used the Budyko hypothesis of hydrothermal coupling balance model to conduct attributional analysis of the trend of runoff variation in the basin. The carbon density of 1017 *Picea crassifolia* trees in 15 fixed tree plots in the Pailugou Basin was estimated by using volume source biomass method based on the data from 2003 to 2021.

It has following results. (1) From 1994 to 2019, runoff in the Pailugou Basin fluctuated, with alternating of ample flow and low water, but presenting an overall increasing trend. A sudden change in runoff occurred in 2006, and the average annual runoff after the event increased by  $9.53 \times 10^4 \text{ m}^3$ , or an increase rate of 34.88%. (2) In the mutation period of 2007 to 2020, the elasticity coefficients of runoff in the Pailugou Basin to precipitation, potential evaporation and underlying earth surface parameters were 3.15, -0.70 and -0.68, respectively, and the contribution rates of each factor to the runoff were 87.92%, 19.97%, and -7.89%, respectively, indicating that the amount of runoff was the most sensitive to the changes in precipitation, and the effect of potential evaporation among climate factors on runoff was greater than the changes in the underlying surface of the basin. (3) From 2003 to 2021, the average carbon density of *Picea crassifolia* was  $63.09 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ , with an average growth rate of 1.94%. In the case of less interference from human disturbance, the changes in carbon stocks and carbon density of forest vegetation were the main reasons for the fluctuation of underlying surface parameters in the basin.

The research can provide scientific basis for hydro-resource management administration to formulate programs natural resource protection and rational utilization of water resources, and provide reference for ecological environmental protection departments to weigh benefits of forest and water.

**Key words:** runoff change; attribution analysis; climate change; carbon density; Pailugou Basin of the Qilian Mountains

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)