

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.020.

杨雪琪, 武玮, 郑从奇, 等. 基于 Budyko 假设的沂河流域径流变化归因识别[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 100-106.

YANG Xueqi, WU Wei, ZHENG Congqi, et al. Attribution Identification of Runoff Change in Yihe River Basin Based on Budyko Hypothesis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 100-106.

# 基于 Budyko 假设的沂河流域径流变化归因识别

杨雪琪<sup>1</sup>, 武玮<sup>1</sup>, 郑从奇<sup>2</sup>, 王琦琨<sup>1</sup>

(1. 济南大学 水利与环境学院, 济南 250022; 2. 山东省水文中心, 济南 250001)

**摘要:** 气候变化和人类活动是导致径流变化的主要原因, 因此计算气候变化和人类活动对沂河流域径流变化的贡献率可为缓解沂河流域水资源紧张提供一定的参考依据。以山东省沂河流域为研究对象, 基于 1960—2016 年的气温、风速、降水和流量等水文气象数据, 首先采用 Mann-Kendall、有序聚类分析法和累积平距法分析降水量及径流量的变化趋势及突变点, 最后采用 Budyko 水热耦合平衡方程, 定量计算了气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。结果表明: 1960—2016 年沂河流域年径流深呈现显著减小趋势, 且在 1975 年和 2003 年发生突变, 因此将径流序列分为 1960—1975 年(基准期), 1976—2003 年(变化期 I)和 2004—2016 年(变化期 II)3 个阶段。基于 Budyko 水热耦合平衡方程计算变化期 I 和变化期 II 中降水、潜在蒸散发和下垫面对径流变化的贡献率, 发现导致沂河流域变化期 I 径流减少的主要原因是下垫面条件和降水的改变, 贡献率分别为 51.42%, 49.43%, 潜在蒸散发的减少导致径流增加, 贡献率为 -0.85%; 导致变化期 II 径流减少的最主要原因是下垫面条件的改变, 占 73.11%, 其次是降水, 贡献率为 42.53%, 潜在蒸散发的减少导致径流量增加, 占比为 -15.64%。综上, 沂河流域径流变化是人类活动和气候变化共同作用的结果, 随着经济社会发展, 下垫面条件改变对径流变化的影响越来越大。

**关键词:** Budyko 假设; 径流变化; 归因分析; 人类活动; 沂河

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0100-07

## Attribution Identification of Runoff Change in Yihe River Basin Based on Budyko Hypothesis

YANG Xueqi<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>, ZHENG Congqi<sup>2</sup>, WANG Qikun<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Shandong Hydrology and Water Resources Bureau, Jinan 250001, China)

**Abstract:** Climate change and human activities are the main causes of runoff change. Therefore, calculating the contribution rate of climate change and human activities to runoff change in the Yi River basin can provide a certain reference for alleviating the water resources stress in the Yihe River basin. Based on the hydrometeorological data of temperature, wind speed and precipitation from 1960 to 2016, Mann-Kendall, ordered cluster analysis method and cumulative horizontal distance method were applied to analyze the variation trend and change point of precipitation and runoff in the Yihe River basin. Effects of climate change and human activities on runoff change were quantified by Budyko hydrothermal coupled equilibrium equation. The results showed that: the annual runoff depth of the basin decreased significantly from 1960 to 2016, and change points were in 1975 and 2003, respectively; Therefore, the runoff sequence of Yihe River was divided into three stages: 1960—1975 (base period), 1976—2003 (change period I) and 2004—2016 (change period II); based on Budyko hydrothermal coupled equilibrium equation, the contributions of precipitation, poten-

收稿日期: 2021-12-15

修回日期: 2022-01-20

资助项目: 国家自然科学基金(51909104); 山东省自然科学基金(ZR2019BEE064); 山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201602); 小清河防洪综合治理工程科学研究试验项目(XQHFHZZL-KY202003)

第一作者: 杨雪琪(1997—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: 1378607985@qq.com

通信作者: 武玮(1987—), 女, 山东青岛人, 博士, 副教授, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: stu\_wuw@ujn.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

tial evapotranspiration and underlying surface to runoff change in change period I and II were calculated, respectively; the results indicated that decreasing runoff in change period I resulted from underlying surface and precipitation change, with contribution rates of 51.42% and 49.43%, respectively; the decreasing of potential evapotranspiration led to increasing runoff, with contribution rate of  $-0.85\%$ ; the main reason for decreasing runoff in the change period II was the change of underlying surface conditions, accounting for 73.11%, followed by precipitation, accounting for 42.53%; the decrease of potential evapotranspiration led to the increase of runoff, and the contribution rate was  $-15.64\%$ . The change of runoff in Yihe River Basin was impacted jointly by human activities and climate change. With the development of economy and society, the influence of underlying surface change of runoff was increasing.

**Keywords:** Budyko hypothesis; runoff variation; attribution analysis; human activity; Yihe River

近几十年来,受气候变暖和人类活动的共同影响,径流过程发生了显著变化<sup>[1-2]</sup>,导致流域水文循环规律发生了严重改变,极端干旱、洪涝灾害等极端水文事件频发,给流域水资源管理和生态系统平衡带来了严峻的挑战。气候变化主要通过改变降水、蒸散发和相对湿度等影响径流过程,水利工程修建、土地利用变化等人类活动改变了流域下垫面结构,从而对径流过程产生影响。因此,定量分析气候变化和人类活动对径流变化的影响,可为合理开发利用水资源、实现水资源安全保障及可持续利用提供更重要的理论依据。

近年来,定量识别人类活动和气候变化对径流变化影响的方法较多,其中 Budyko 水热耦合平衡方程和水文模型应用最为广泛,也是定量评估径流变化影响的主要方法。水文模型能够模拟多种情景下的水文变化,是分析各因子对径流变化产生影响的重要工具之一<sup>[3-4]</sup>,但该模型对数据资料要求较高,且加上模型建立和验证的复杂性和不确定性,均会对模拟结果产生较大误差。Budyko 水热耦合平衡方程,不仅考虑了植被生长状况的影响,且输入变量和参数较少(一般参数为 1 个),具有理论可行且应用简单的优点。目前基于 Budyko 假设<sup>[5]</sup>衍生出多种适用于不同情况的 Budyko 方程<sup>[6-10]</sup>,且被广泛用于定量分析气候变化和人类活动对径流变化的影响。张丽梅等<sup>[11]</sup>采用 Budyko 假设得出下垫面变化是导致渭河流域径流量减少的主要原因,其次是降水影响,最后是潜在蒸散发。杨大文等<sup>[12]</sup>基于水热耦合平衡方程,以黄河流域 38 个典型子流域为研究对象对径流变化进行了归因分析,发现下垫面变化对绝大多数子流域的径流量减少起主导作用;鲍振鑫等<sup>[13]</sup>分析了气温、降水、下垫面和取用水 4 种因子对海河流域河川径流减少的贡献率,发现人类活动中的下垫面变化对该流域的径流影响最大。经过上述研究说明应用 Budyko 方程理论定量识别径流变化的驱动因子合理可行。

沂河是淮河流域沂沭泗水系中最大的河流,近年来由于经济发展和城镇化建设,导致土地利用发生显著变化<sup>[14]</sup>,一定程度上改变了该流域的水文循环和水量平衡。目前已有部分学者针对沂河流域的径流变化方面开展了一定的研究。例如薛丽芳<sup>[15]</sup>等、刘金玉<sup>[16]</sup>主要采用径流回归模拟和双累积曲线对沂河流域径流变化进行了归因识别,两种方法主要考虑了降水对径流的影响,未考虑植被生长程度和潜在蒸散发对径流变化的影响,降低了结果的精确度。近年来基于 Budyko 假设提出了流域水热耦合平衡方程,即 Choudhury-Yang 公式,该公式引入了反映流域下垫面特征的参数  $n$ ,使得该方法既具有合理的物理机制,同时计算相对简单便捷。综合来看,Budyko 假设是定量分析气候变化和下垫面变化对径流影响的可靠评估方法。结合已有研究,本文采用 Budyko 水热耦合平衡方程,定量分析沂河流域 1960—2016 年气候变化和人类活动对径流变化的影响,以期为缓解沂河流域水资源紧张提供一定的参考依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

沂河流域位于  $117^{\circ}25'—119^{\circ}50'E$ ,  $34^{\circ}00'—36^{\circ}50'N$ ,发源于山东省境内沂源县鲁南山麓,为淮河流域沂沭泗水系中最大的山洪河道,河道全长 333 km,流域面积 11 820 km<sup>2</sup>,流域面积主要位于临沂境内,于江苏省燕尾港汇入黄海。流域属暖温带大陆性季风气候,是山东省降雨量最为丰富的地区,降水量年际变化较大,年内分布不均匀,多年平均降水量为 815 mm,多集中在 7—8 月。受降雨影响,河道流量陡涨陡落流域多年平均径流深为 320 mm,年均气温  $13\sim 14.3^{\circ}C$ 。流域地势北高南低,临沂以上主要为山丘区,河道落差大,水流急,生态脆弱,水土流失较为严重,临沂以下为平原河道,易产生洪涝灾害影响,临沂站以上流域集水面积为 10 315 km<sup>2</sup>。

## 1.2 数据处理与数据来源

临沂站是沂河流域的下游控制站,能较好地反映流域径流变化情况,因此本文以临沂水文站为代表,选取1960—2016年的实测月径流数据分析流域径流变化,数据主要来源于山东省水文中心。同时以流域内及周边共11个气象站点作为代表站点(图1),选取平均相对湿度、降水量、日照时间、平均气温、平均风速、平均水汽压等逐日气象要素,时间序列为1960—2016年,以上数据主要来源于中国气象数据网。潜在蒸散发量根据Penman-Monteith公式<sup>[17]</sup>计算得到,该公式充分考虑了农作物的地表特征和空气动力学的参数的变化,具有较为严谨的物理基础,目前被广泛应用于潜在蒸散发的计算<sup>[18]</sup>。流域降水量根据流域及周边区域共11个气象站通过泰森多边形计算得到,其余数据则由算术平均法求得。

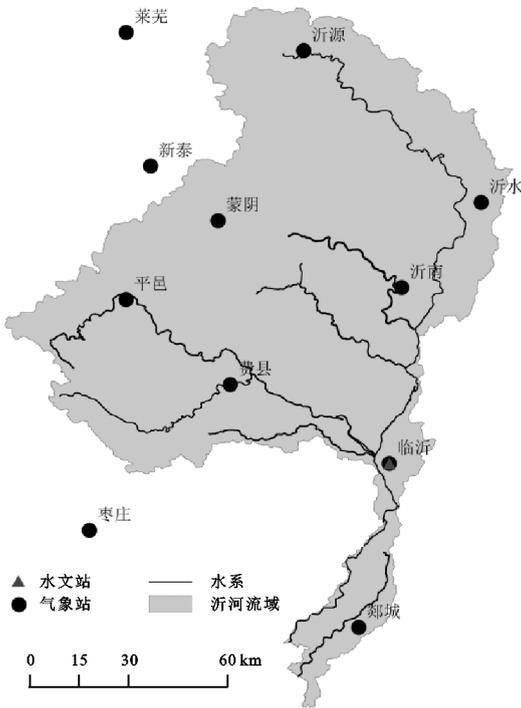


图1 沂河流域水文站与气象站空间分布

## 2 研究方法

### 2.1 趋势分析与突变检验方法

目前用于突变检验的方法较多,包括Mann-Kendall趋势检验法、有序聚类分析法、累积距平法、双累积曲线法、贝叶斯变点分析法和R/S分析法等方法。本文选取Mann-Kendall趋势检验法、有序聚类分析法和累积距平法综合分析沂河流域年降水量、年径流深及年潜在蒸散发量的变化趋势和突变情况,综合3种方法的计算结果能够保证突变点选择更加合理,3种方法的计算原理详见参考文献<sup>[19—21]</sup>。根据突变点分析,将整个时期分成基准期和变化期,

其中突变点之前的时期,被称为基准期,认为该时期内气候变化和人类活动的影响相对较小。突变点之后的径流受到了多种因素的共同影响称为变化期。

### 2.2 数据处理与数据来源

基于Budyko假设的水热耦合平衡方程是从水分和能量平衡的角度出发,分析气候变化和人类活动对径流的影响。比起其他方法,该方法可以直接计算出气候变化和下垫面变化对径流变化的贡献程度,且数据获取容易,计算方法简单,因此被广泛应用。

根据水量平衡原理,在闭合情况下的流域水量平衡公式如下所示:

$$R = P - ET \quad (1)$$

式中: $R$ 为径流深(mm); $ET$ 为实际蒸散发量(mm); $P$ 为降水量(mm)。

Choudhury-Yang<sup>[9-10]</sup>公式的流域水热耦合平衡方程表达式如下:

$$ET = \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (2)$$

式中: $ET_0$ 为潜在蒸散发量(mm); $ET$ 为实际蒸散发量(mm); $P$ 为降水量(mm); $n$ 为下垫面参数,主要与流域的土地利用,植被和土壤有关。

结合式(1)和(2),水量平衡方程可以表示如下:

$$R = P - \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (3)$$

由不同因子引起的径流变化可以通过各因子变化及其偏导数的乘积来估计,因此多年平均径流深变化可以表示为以下全微分形式:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial P} dP + \frac{\partial R}{\partial ET_0} dET_0 + \frac{\partial R}{\partial n} dn \quad (4)$$

其中径流深的变化量为 $dR$ ,公式(4)可简化为:

$$\Delta R = \Delta R_P + \Delta R_{ET_0} + \Delta R_n \quad (5)$$

龙达等<sup>[22]</sup>将降水弹性系数表示为 $\epsilon_P = \frac{dR/R}{dP/P}$ ,

同样潜在蒸散发和下垫面弹性系数分别为 $\epsilon_{ET_0} = \frac{dR/R}{dET_0/ET_0}$ 和 $\epsilon_n = \frac{dR/R}{dn/n}$ 。弹性系数为正,表明径流与该因子呈正比,绝对值越大表示对径流的影响程度越大,反之亦然。

对弹性系数进一步推导,各弹性系数表达式为:

$$\epsilon_P = \frac{(1 + \Phi^n)^{\frac{1}{n}+1} - \Phi^{n+1}}{(1 + \Phi^n) + [(1 + \Phi^n)^{\frac{1}{n}} - \Phi]} \quad (6)$$

$$\epsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1 + \Phi^n) [1 - (1 + \Phi^n)^{\frac{1}{n}}]} \quad (7)$$

$$\epsilon_n = \frac{\ln(1 + \Phi^n) + \Phi^n \ln(1 + \Phi^{-n})}{n(1 + \Phi^n) [1 - (1 + \Phi^n)^{\frac{1}{n}}]} \quad (8)$$

根据弹性系数,分别计算出由降水和潜在蒸散发变化引起的径流深变化公式如下:

$$\Delta R_P = \epsilon_P \frac{R}{P} \Delta P \quad (9)$$

$$\Delta R_{ET_0} = \epsilon_{ET_0} \frac{R}{ET_0} \Delta ET_0 \quad (10)$$

$$\Delta R_n = \epsilon_n \frac{R}{n} \Delta n \quad (11)$$

$$\Delta R_c = \Delta R_P + \Delta R_{ET_0} \quad (12)$$

式中: $\Delta R_P$ 、 $\Delta R_{ET_0}$ 、 $\Delta R_c$  和  $\Delta R_n$  分别为降水、潜在蒸散发、气候变化和下垫面性质对径流的影响量; $\Delta ET_0$ 、 $\Delta P$  (mm) 和  $\Delta n$  分别为变化期与基准期潜在蒸散发、降水变化和下垫面参数变化量。

各个因素对径流变化的贡献率为:

$$C_{xi} = \frac{dR_{xi}}{dR} \times 100\% \quad (13)$$

式中: $C_{xi}$  为由不同因子引起径流变化的贡献率; $x_i$  为  $P$ 、 $ET_0$ 、 $c$  和  $n$  因子。

## 3 结果与分析

### 3.1 水文气象要素趋势与突变分析

采用 Mann-Kendall 检验法分别对沂河流域 1960—2016 年的年潜在蒸散发量、年径流深和降水量进行趋势分析,结果见表 1。从表中可以看出,3 种气象要素均呈下降趋势,其中潜在蒸散发为极显著下降趋势,径流深为显著下降趋势,而年降水量的减小趋势并不显著,这与赵艳红等<sup>[23]</sup>的结果一致。

采用有序聚类法、累积距平检验法和 Mann-Kendall 突变检验 3 种方法分析了该流域的径流突变情况,结果见表 2。3 种方法计算结果略有不同,有序聚类检验发现 1965 年和 1974 年是径流变化的突变点,累积距平法的突变点为 1976 年和 2003 年, Mann-Kendall

法的突变点为 1965 年、2003 年和 2013 年。由于 1960—1965 年和 2013—2016 年的时间序列较短,对径流变化情况的代表性较差,未将其作为突变年份。综合 3 种方法,最终确定 1960—2016 年该流域径流深的突变点为 1975 年和 2003 年。

表 1 1960—2016 年各气象因素 Mann-Kendall 趋势检验结果

水文气象要素	检验统计量	显著性	趋势
潜在蒸散发量	-3.24	**	↓
降水量	-0.82		↓
径流深	-1.99	*	↓

注:\* 表示通过了置信度为 95% 的显著性检验,\*\* 表示通过了置信度为 99% 的显著性检验。

表 2 不同检验方法的突变分析

方法	突变点	选取突变点
有序聚类法	1965 年、1974 年	1975 年、2003 年
累积距平法	1976 年、2003 年	
Mann-Kendall 法	1965 年、2003 年、2013 年	

### 3.2 径流量变化的归因分析

3.2.1 水文气象要素特征 根据径流深突变点分析结果,将 1960—1975 年定为基准期,认为该时期内径流变化受气候变化和人类活动影响较小,1976—2003 年和 2004—2016 年分别视为变化期 I 和变化期 II。3 个时期多年平均潜在蒸散发量、径流深和降水量的计算结果见表 3。基准期平均径流深为 292.31 mm,变化期 I 和 II 的径流深分别为 151.45、187.78 mm,分别减少了 140.87、104.53 mm,变化期 I 的径流减少程度更大。基准期降水量为 865.41 mm,与基准期相比,变化期 I 与变化期 II 的降水量分别减少 127.68、75.68 mm,变化期 I 的降水量减少程度更大。与变化期 II 相比,由于变化期 I 内连续多年为枯水年,因此降水量和径流量减少更明显。

表 3 沂河流域 1960—2016 年气象水文变量特征值

年份	$ET_0$ /mm	$R$ /mm	$P$ /mm	$\Delta ET_0$ /mm	$\Delta R$ /mm	$\Delta P$ /mm	$\Phi$	$R/P$	$n$
1960—1975	1139.46	292.31	865.41				1.32	0.34	1.29
1976—2003	1133.21	151.45	737.73	-6.25	-140.87	-127.68	1.54	0.21	1.71
2004—2016	1065.23	187.78	789.73	-77.23	-104.53	-75.68	1.35	0.24	1.72

对比分析变化期 I 与变化期 II 的干燥指数与径流系数可知:变化期 I 的干燥指数为 1.54,变化期 II 的干燥指数减少到 1.35,径流系数增加到 0.24,从而可知变化期 II 的湿润程度有所增加,暖干旱现象有所缓解,且变化期 II 的降水量和径流量均有所增长,但潜在蒸散发量有所减少,因此降水转换为蒸散发的比例减小。

3.2.2 径流变化因素敏感性分析 沂河流域变化期 I 和变化期 II 径流深对降水和潜在蒸散发的敏感系数见

表 4。其中变化期 I 的  $\epsilon_P$  值为 2.04,  $\epsilon_{ET_0}$  值为 -1.04,  $\epsilon_n$  值为 -1.57,说明  $ET_0$ 、 $P$  或  $n$  增加 1% 将分别导致变化期 I 径流增加 2.04%、减少 1.04% 和减少 1.57%;变化期 II 的  $\epsilon_P$  值为 2.03,  $\epsilon_{ET_0}$  值为 -1.02,  $\epsilon_n$  值为 -1.34,说明  $ET_0$ 、 $P$  或  $n$  增加 1%,将导致变化期 II 径流分别增加 2.03%、减少 1.02% 和减少 1.34%。根据变化期 I 和 II 的敏感系数可知,流域径流深与  $P$  呈正相关,与  $ET_0$  和  $n$  均呈负相关。对比潜在蒸散发、降水与下垫

面弹性系数的绝对值大小,降水弹性系数最大,下垫面弹性系数次之,潜在蒸散发弹性系数最小,说明在

整个研究时段内,径流对降水的变化更为敏感,降水量的多少直接决定流域的径流量大小。

表4 沂河流域敏感系数及贡献率沂河流域不同弹性系数绝对值趋势分析结果

时期	$\epsilon_P$	$\epsilon_{ET0}$	$\epsilon_n$	$\Delta R_P / \text{mm}$	$\Delta R_{ET0} / \text{mm}$	$\Delta R_n / \text{mm}$	$C_P / \%$	$C_{ET0} / \%$	$C_c / \%$	$C_n / \%$
变化期 I	2.04	-1.04	-1.57	-67.47	1.16	-70.18	49.43	-0.85	48.58	51.42
变化期 II	2.03	-1.02	-1.34	-42.60	15.66	-73.22	42.53	-15.64	26.89	73.11

根据沂河流域 1960—2016 年的弹性系数变化图(图 2),并对其进行了 Mann-Kendall 趋势检验(表 5),发现沂河流域降水、潜在蒸散发及下垫面弹性系数的绝对值均呈增加趋势,其中降水和潜在蒸散发弹性系数呈显著增加趋势,说明在此期间该流域径流变化对气候变化越来越敏感。降水、潜在蒸散发和下垫面弹性系数的变化趋势较为一致,下垫面参数  $n$  与流域土地利用、土壤性质和植被变化均有关系,气温、降水、水文条件均是影响植被生长的主要因素,因此沂河流域气候、水文及植被三者之间具有紧密耦合的关系。

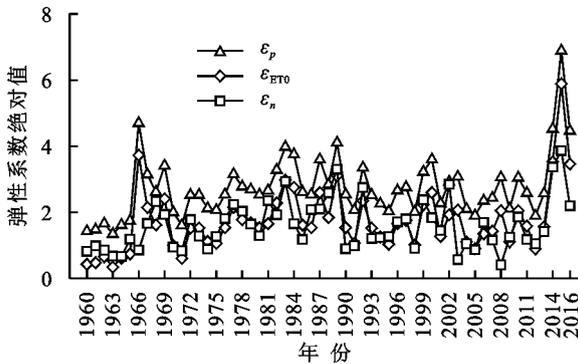


图2 沂河流域各弹性系数绝对值年际变化趋势

表5 沂河流域不同弹性系数绝对值趋势分析结果

弹性系数绝对值	Z	显著性	趋势
$\epsilon_P$	2.26	*	↑
$\epsilon_{ET0}$	2.26	*	↑
$\epsilon_n$	1.84		↑

3.2.3 径流变化归因分析 沂河流域降水、潜在蒸散发和下垫面变化对变化期 I 及变化期 II 径流变化的贡献率见表 4,1976—2003 年气候变化导致沂河流域径流深减少 66.31 mm,其中由于降水量减少导致径流深减少 67.47 mm,而潜在蒸散发的减少导致径流深增加 1.16 mm,相应贡献率为 48.58%(降水和潜在蒸散发的贡献率分别为 49.43%, -0.85%);下垫面变化导致沂河流域径流深减少 70.18 mm,其贡献率为 51.42%。因此在变化期 I,下垫面变化的影响是导致径流减少的主要原因,其次是气候变化的影响,但二者对径流变化的影响基本相当。

2004—2016 年气候变化导致径流深减少 26.94 mm(其中由降水减少导致径流深减少 42.6 mm,而潜在蒸散发减少导致径流深增加 15.66 mm),相应贡献率为 26.89%(降水和潜在蒸散发的贡献率分别为 42.53%,

-15.64%);下垫面变化导致径流深减少 73.22 mm,其贡献率为 73.11%。因此在变化期 II,下垫面变化是导致径流减少的主要原因,其次是气候变化的影响。

对比变化期 I 和变化期 II 两个时段各因子对径流变化影响程度可知,气候变化的贡献率从 48.58% 减少到 26.89%,而下垫面变化的贡献率则从 51.42% 增加到 73.11%。说明下垫面变化对径流变化的影响程度在不断增强,并起到了主导作用,但气候变化的影响依旧难以忽略。值得注意的是,虽然变化期 II 中降水的贡献率从 49.43% 减少到 42.53%,但潜在蒸散发的贡献率从 -0.85% 变为 -15.64%,即潜在蒸散发对径流变化的影响程度变大,说明气候变化对潜在蒸散发具有一定的影响。因此伴随着经济社会的高速发展,下垫面变化对水资源的影响越来越显著,这与薛丽芳等<sup>[15]</sup>和刘金玉<sup>[16]</sup>对沂河流域的径流变化规律的研究结果较为一致。

## 4 讨论

降水和下垫面变化是导致径流减少的两大主要因素,且随着经济社会的发展,下垫面变化的贡献率由变化期 I 的 51.42% 增大到 73.11%,下垫面性质的改变对径流变化的影响逐渐加剧。根据于元赫等<sup>[14]</sup>对沂河土地利用情况的分析得知,1995—2015 年,沂河流域土地利用类型的主要变化为耕地转化为林地和建设用地,具体变化为:耕地面积减少 625.85 km<sup>2</sup>,建设用地面积增加了 489.18 km<sup>2</sup>,林地面积增加 200.24 km<sup>2</sup>,草地面积减少 84.77 km<sup>2</sup>,耕地和草地的减少和城镇建设用地的增加是沂河流域土地利用方式的主要变化趋势,主要受退耕还林、荒地造林等水土保持措施的实施及城镇化发展的影响。由于耕地的作物冠层小,截留迟滞降水作用较差,而林木根系持水能力强,导致下渗量增加,地表径流量减少,因此退耕还林导致流域地表径流量减少。结合苏宁<sup>[24]</sup>的研究,沂河流域 1995—2005 年和 2005—2015 年整体土地利用变化速率分别为 0.630%, 1.143%,后期土地利用变化更加剧烈,下垫面变化更大,因此变化期 II 下垫面变化的贡献率显著上升。另外,沂河流域自 20 世纪 50 年代末开始大规模修建水利工程,21 世纪初对众多水利工程进行改扩建,截至 2015

年,沂河流域共修建 901 座水库,包括 7 座大型水库,31 座小型水库,其总库容达到  $3.457 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,大量水利工程的拦蓄对地表径流量的减少产生重要影响,结合近年研究,退耕还林等水土保持措施及水利工程修建已成为我国诸多流域径流减少的主要原因<sup>[25-29]</sup>。

除了下垫面变化,气候变化对沂河流域径流变化的影响也不能忽视,气候因子中降水弹性系数的绝对值最大,表明降水是径流变化的主导因素。沂河流域近 60 a 平均降水量为 768.65 mm,最大降水量发生在 1964 年为 1180.10 mm,最小降水量发生在 2002 年为 411.89 mm,年际降水量变化较大。从图 3 中可以看出,1960—1975 年间沂河流域降水量较为丰富,16 a 内有 6 a 是偏丰或者特丰水年,仅 3 a 为偏枯或者特枯水年,1976—2003 年降水量开始减少,28 a 内有 13 a 为枯水年次,其中 8 a 为特枯水年,丰水年仅有 7 a,2004—2016 年,13 a 内枯水年和丰水年均发生了 3 次。由于变化期 I 内连续多年为枯水年,与变化期 II 相比降水量明显偏少,导致径流深变小,进一步说明降水条件变化直接影响了径流的变化趋势。另外,本研究将降水、潜在蒸散发和下垫面变化看做相互独立的变量,实际上气候变暖导致的气温和降水的变化也是影响植被生长的因素,本研究未考虑气候变化对植被生长的影响,可能导致气候变化贡献率偏小,未来将进一步明确分析气候变化引起的植被变化对径流的贡献率。

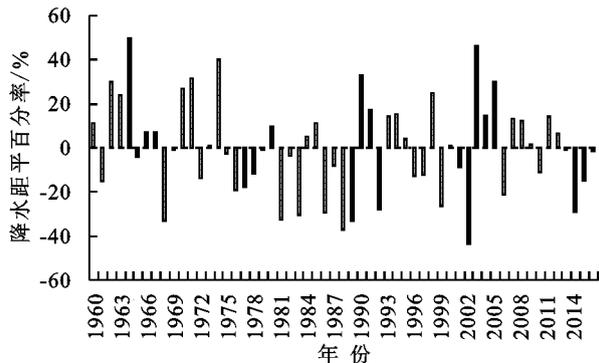


图3 1960—2016年沂河流域降水距平百分率

## 5 结论

(1) 在 1960—2016 年沂河流域的年潜在蒸散发量、降水量和径流深均呈减小趋势,其中潜在蒸散发和径流深为显著减小趋势,径流深在 1975 年和 2003 年发生突变,因此将研究时段分为基准期(1960—1975 年)、变化期 I (1976—2003 年)和变化期 II (2004—2016 年)三部分。

(2) 径流与降水的变化呈正相关,从不同时期来看,变化期 I 气候变化和人类活动对径流变化的贡献

率分别为 48.58%,51.42%,其中下垫面变化的影响最大,降水的影响次之,潜在蒸散发的影响最小。对于变化期 II,两者的贡献率分别为 26.89%,73.11%,其中下垫面变化的影响对沂河流域径流变化的影响最大,降水的影响次之,潜在蒸散发的影响最小。

(3) 对比沂河流域变化期 I 与变化期 II 径流变化的影响因素,发现随着沂河流域退耕还林工程的实施、水利工程修建及经济社会的飞速发展,下垫面变化对径流减小的影响程度不断加强,成为径流减少的主要原因,气候变化对径流的影响程度有所减少,但仍是径流变化中难以忽略的因素。

### 参考文献:

- [1] Fu G B, Chen S L, Liu C M, et al. Hydro-climatic trends of the Yellow River Basin for the last 50 years[J]. Climatic Change, 2004,65(1/2):149-178.
- [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.
- [3] 张利平,于松延,段尧彬,等.气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J].气候变化研究进展,2013,9(6):391-397.
- [4] 胡珊珊,郑红星,刘昌明,等.气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J].地理学报,2012,67(1):62-70.
- [5] Budyko M I. Climate and Life[M].New York: Academic Press,1974.
- [6] Pike J G. The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate[J]. Journal of Hydrology, 1964,2(2):116-123.
- [7] 傅抱璞.论陆面蒸发的计算[J].大气科学,1981,5(1):23-31.
- [8] 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.
- [9] Choudhury B J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999,216(1/2):99-110.
- [10] Yang H B, Yang D W, Lei Z D, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. Water Resources Research,2008,44(3):W03410.
- [11] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等.基于Budyko假设的渭河径流变化归因识别[J].生态学报,2018,38(21):7607-7617.
- [12] 杨大文,张树磊,徐翔宇.基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J].中国科学:技术科学,2015,45(10):1024-1034.
- [13] 鲍振鑫,张建云,严小林,等.基于四元驱动的海河流域河川径流变化归因定量识别[J].水科学进展,2021,32

- (2):171-181.
- [14] 于元赫,李子君,林锦阔,等.沂河流域土地利用时空变化图谱特征分析[J].自然资源学报,2019,34(5):975-988.
- [15] 薛丽芳,谭海樵.沂河流域水文特征变化及其驱动因素[J].地理科学进展,2011,30(11):1354-1360.
- [16] 刘金玉.沂河流域水沙变化及其对气候地利用的响应[D].济南:山东师范大学,2020.
- [17] 左亚凡,贺康宁,柴世秀,等.基于 Penman-Monteith 方程模拟青海云杉生长季日蒸腾过程[J].生态学报,2021,41(9):3656-3668.
- [18] 彭涛,梅子祎,董晓华,等.基于 Budyko 假设的汉江流域径流变化归因[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1114-1124.
- [19] 刘静,龙爱华,李江,等.近 60 年塔里木河三源流径流演变规律与趋势分析[J].水利水电技术,2019,50(12):10-17.
- [20] 王国庆,张建云,管晓祥,等.中国主要江河径流变化成因定量分析[J].水科学进展,2020,31(3):313-323.
- [21] 叶晶萍,刘政,欧阳磊,等.不同时间尺度小流域径流变化及其归因分析[J].生态学报,2019,39(12):4478-4487.
- [22] 龙达,董前进,杨荣芳.基于水热耦合平衡方程的六冲河上游流域径流变化归因分析[J].人民珠江,2021,42(10):32-37,48.
- [23] 赵艳红,詹道强,李斯,等.沂沭河流域径流变化特征分析[C]//北京沃特咨询有限公司.2018 中国水资源高效利用与节水技术论坛论文集,广州:2019.
- [24] 苏宁.沂河流域土地利用景观格局变化对年径流量的影响[D].济南:山东师范大学,2018.
- [25] 冷曼曼,张志强,于洋,等.昕水河流域径流变化及其对气候和人类活动的响应[J].水土保持学报,2020,34(3):113-119,128.
- [26] 秦文静,王云琦,王彬,等.土地利用和气候变化对王家桥小流域径流的影响[J].水文,2019,39(2):49-54.
- [27] 邓睿,张治意,陈亚.嘉陵江流域下游地表径流对土地利用变化的响应[J].水土保持研究,2019,26(3):141-147.
- [28] 罗伟林,刘俊.沂河上游土地利用变化的设计洪水响应研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2021,43(2):23-30.
- [29] 杜勇,李建柱,牛凯杰,等.1982—2015 年永定河山区植被变化及对天然径流的影响[J].水利学报,2021,52(11):1309-1323.

(上接第 99 页)

- [13] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2014, 514:180-191.
- [14] Meshesha D T, Tsunekawa A, Tsubo M, et al. Evaluation of kinetic energy and erosivity potential of simulated rainfall using laser precipitation monitor [J]. Catena, 2016, 137:237-243.
- [15] 王宏,徐娅玲,张奇,等.沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J].环境科学,2020,41(10):4547-4554.
- [16] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. Responses of water erosion to rainfall extremes and vegetation types in a loess semiarid hilly area, NW China[J]. Hydrological Process, 2009,23(12):1780-1791.
- [17] 梁斐斐,蒋先军,袁俊吉,等.降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):81-85.
- [18] 毛妍婷,刘宏斌,郭树芳,等.耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):26-33.
- [19] Guo S, Zhai L, Liu J, et al. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping[J]. Soil and Tillage Research, 2019,191:48-56.
- [20] 王静,郭熙盛,王允青.自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(3):492-495.
- [21] 李新举,张志国,邓基先,等.免耕对土壤生态环境的影响[J].山东农业大学学报,1998,29(4):104-110.
- [22] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110:34-40.
- [23] 祖艳群,杨静,湛方栋,等.秸秆覆盖对玉米和青花农田土壤面源污染负荷的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):155-160.
- [24] 辛艳,王瑄,邱野,等.坡耕地不同耕作模式下土壤养分流失特征研究[J].沈阳农业大学学报,2012,43(3):346-350.
- [25] 范成五,罗益,王文华,等.不同管理措施对黄壤坡耕地径流氮输出的控制效果[J].农业环境科学学报,2014,33(10):1948-1955.
- [26] 陈静蕊,刘佳,王惠明,等.保护性耕作措施对陡坡地养分流失的影响[J].中国土壤与肥料,2018(1):146-152.
- [27] 徐露,张丹,向宇国,等.不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].山地学报,2020,38(6):851-860.