

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.004

基于 Budyko 假设和微分方程的淮河上中游 径流变化归因分析

叶 婷¹,石 朋¹,钟 华²,瞿思敏¹,吴洪石¹,沈玲怡¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水文水资源研究院,江苏 南京 210098)

摘要:为探究淮河上中游流域气候变化和人类活动对不同时间尺度径流特征的影响,采用包括高流量、平均流量和低流量在内的 7 个流量指标表征径流变化特征,运用 Mann-Kendall 趋势检验、滑动 T 检验识别各流量指标的突变年份,并利用推导出的流量指标变化微分方程改进原有的基于 Budyko 假设的方法,从而定量识别气候变化与人类活动对径流变化的贡献率,并构建了土地利用转移矩阵分析人类活动对径流特征变化的驱动机制。结果表明:淮河上中游大部分径流特征在突变年份后呈现下降趋势,其中平均流量特征最为明显,下降幅度为 2.25%~44.25%;高流量指标、汛期径流深与气候指标的相关性最高,相关系数为 0.859~0.987,低流量指标和非汛期径流深的相关性较低;气候变化和人类活动使得大部分径流特征呈下降趋势,其中人类活动为主导因素,其在息县、王家坝、鲁台子和蚌埠站的贡献率范围分别为 87.55%~98.46%、80.91%~88.50%、80.42%~92.42% 和 83.23%~99.99%。

关键词:淮河上中游;径流归因分析;Budyko 假设;微分方程;径流特征
中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)05-0025-08

Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation

YE Ting¹, SHI Peng¹, ZHONG Hua², QU Simin¹, WU Hongshi¹, SHEN Lingyi¹
(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the upper and middle reaches of the Huaihe River (above Bengbu Station) as the study area, seven flow indicators including the high flow, average flow and low flow are adopted to characterize the features of runoff changes and investigate the influences of climate change and human activities on the runoff characteristics at different time scales. Firstly, the Mann-Kendall trend test and the sliding T test are used to identify the mutation year of each flow index. Secondly, the derived differential equation of flow indicators change is used to improve the original method based on the Budyko hypothesis, so as to quantitatively identify the contribution rate of climate change and human activities to the change of runoff. Finally, the driving mechanism of human activities on changes of runoff characteristics is analyzed by constructing a land-use transfer matrix. The results show that most of the flow indicators in the upper and middle reaches of the Huaihe River show a downward trend after mutation years. Among them, the average flow indicators declined most significantly, ranging from 2.25% to 44.25%. High flow indicators, floodseason runoff depth and climate indicators have the highest correlation, with a correlation coefficient of 0.859~0.987, while low flow indicators and non-flood season runoff depth have a low correlation. Climate change and human activities make most of the flow indicators show a downward trend, among which human activities are the dominant factor, and their contribution rates at Xixian, Wangjiaba, Lutaizi, and Bengbu stations are from 87.55% to 98.46%, 80.91% to 88.50%, 80.42% to 92.42% and 83.23% to 99.99%, respectively.

Key words: upper and middle reaches of the Huaihe River; runoff attribution analysis; Budyko hypothesis; differential equation; runoff characteristics

基金项目: 国家自然科学基金(52179011);国家重点研发计划(2017YFC0405601)
作者简介: 叶婷(1998—),女,硕士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:571175039@qq.com
通信作者: 石朋(1976—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: ship@hhu.edu.cn
引用本文: 叶婷,石朋,钟华,等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮河上中游径流变化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):25-32.
YE Ting,SHI Peng,ZHONG Hua,et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(5):25-32.

径流特征变化受到多方面因素的综合影响,包括气候变化、土地利用/覆盖变化和人类取水等。径流变化的主要驱动因素被广泛归因于气候变化和人类活动^[14]。然而,由于气候变化和人类活动之间复杂的相互作用,水文界在解释其对径流变化驱动机制方面仍面临巨大挑战^[5-6]。目前,评估径流变化的主要方法有微观角度的牛顿法和宏观角度的达尔文法^[7]。多数水文模型(如 SWAT 模型、VIC 模型、TOPMODEL 等)被归类为牛顿法,并被广泛应用于国内众多流域。白琪阶等^[8]运用 SWAT 模型研究发现漳卫南运河流域人类活动引起的径流变化是自然因素影响的 4 倍;邓鹏等^[9]通过 VIC 模型研究发现,未来气候变化使得鄱阳湖汛期径流增加,枯季径流减小。虽然水文模型方法能较好地定量评估径流变化,但建模过程复杂且需要大量数据。而达尔文法通过系统思维解释水文行为,计算过程简洁,在径流变化归因分析研究中也有较为广泛的应用,基于 Budyko 假设的方法是其代表性方法之一,该方法来源于 Budyko 假设和水平衡理论,已在人类活动剧烈的地区得到广泛应用^[10-11]。例如:张丽梅等^[12]利用 Budyko 假设研究发现,剧烈的人类活动如工业用水以及退耕还林等引起的下垫面变化是渭河流域径流量减少的主要原因;王卫光等^[13]证实了 Budyko 水热耦合平衡方程在黄河流域的适用性;Xin 等^[14]利用 Budyko 假设研究发现气候变化和直接人类活动都会导致辉发河年尺度流量的减少,其中 68% 的变化是由人类活动引起的。

淮河流经豫、皖、苏三省,是我国重要的商品粮基地之一。当前基于 Budyko 假设的淮河径流变化归因研究多集中于径流年际间的变化,忽略了年内其他关键径流特征^[15-17]。基于此,本文选取淮河上中游为研究区域,利用多重对数转换线性回归方法拟合各径流特征指标与年径流深、气候指标的相关关系,结合基于 Budyko 假设的弹性系数法建立评估框架,探究气候变化和人类活动对不同时间尺度径流特征的影响,以期能为淮河水资源配置及河流治理提供参考。

1 研究区概况

淮河干流自西向东,经河南省南部、安徽省中部,在江苏省中部注入洪泽湖,经洪泽湖调蓄后,主流经江水道至扬州三江营注入长江。淮河上游两岸山丘起伏,支流众多;中游地势平缓,多湖泊洼地。上中游流域内息县、王家坝、鲁台子和蚌埠 4 个水文站的控制流域面积分别为 10 190 km²、30 630 km²、88 630 km² 和 121 330 km²。淮河上中游流域地处北纬 30°55′~34°56′、东经 111°55′~117°30′之间,其中息县以上主河道长 250 km,建有南湾和石山口 2 座大型水库,多年平均年径流量为 37.34 亿 m³。王家坝站位于淮河上中游分界处,干流右岸多为山区河流,急流迅速,左岸为平原区,地势平坦,多年平均年径流量为 84.75 亿 m³。鲁台子以上主河道长 511 km,多年平均年径流量为 211.5 亿 m³。鲁蚌区间主要支流为茨淮新河和涡河,存在 1 个蓄洪区和 7 个行洪区,蚌埠站多年平均径流量为 305 亿 m³。

水文气象数据包括淮河上中游息县、王家坝、鲁台子和蚌埠 4 个水文站 1955—2015 年的长系列日径流数据,信阳等 14 个气象站(图 1)的逐日气象数据。DEM 数据采用地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)提供的 SRTMDEM 90 m 分辨率数据产品。土地利用数据采用中国科学院资源环境科学与数据中心(resdc.cn)提供的 1 km 空间分辨率产品,并根据中国现行一级分类标准对其进行了重分类。

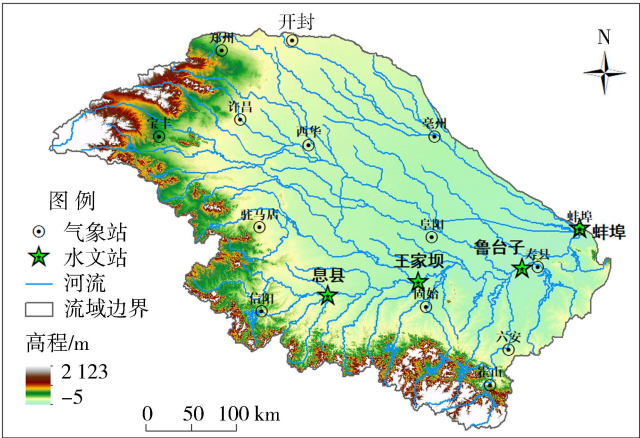


图 1 淮河上中游流域示意图

Fig. 1 Sketch map of the upper and middle reaches of Huaihe River

2 研究方法

利用 Mann-Kendall 趋势检验(M-K 检验)^[18]、滑动 T 检验^[19]识别径流特征突变年份,并依此划分基准期和变化期。应用多重对数线性回归方法(MLLR)^[20-21]研究各径流特征指标与年径流深、气候指标之间的相关关系^[22]。采用基于 Budyko 假设的经验公式将年径流深变化归因于气候变化和人类活动。结合基于 Budyko 假设的弹性系数和径流特征指标微分方程,求解由于年径流深变化和气候指标变化引起的径流特征

指标变化,其余变化则被看作人类活动的影响。最后建立土地利用转移矩阵,分析人类活动对径流特征变化的驱动机制。

2.1 径流特征和气候指标

径流特征简明地描述了长期观测到的径流状态,包括反映径流分布以及径流动态的指数。研究选取了 7 个流量指标表征淮河上中游的径流特征,分别为 3 个平均流量指标(年径流深 M_{GAF} 、汛期径流深 M_{FF} 和非汛期径流深 M_{NF})、2 个低流量指标(年最小日径流深 A_{min} 和 90% 低流量径流深 L_{90})、2 个高流量指标(年最大日径流深 A_{max} 和 10% 高流量径流深 H_{10})。采用 11 个气候指标表征研究流域的气候变化,分别是 6 个降水指标(年降水量 P 、最大 7 d 降水量 $P_{7\text{d}}$ 、汛期降水量 P_{f} 、非汛期降水量 P_{nf} 、无降雨天数 P_{z} 和非汛期与汛期降水量比值 P_{sea})、5 个潜在蒸散发量指标(年潜在蒸散发量 E_0 、7 d 最大潜在蒸散发量 $E_{7\text{d}}$ 、汛期潜在蒸散发量 E_{f} 、非汛期潜在蒸散发量 E_{nf} 和非汛期与汛期潜在蒸散发量比值 E_{sea})。采用逐步回归方法选取每个径流特征的 3 个最显著气候指标。流域的潜在蒸散发根据 FAO 修正的 Penman-Monteith 公式^[23]进行计算。

2.2 气候变化和人类活动的影响评估

2.2.1 自然条件下的径流特征

通过 M-K 检验和滑动 T 检验,将所有径流特征时间序列分为基准期和变化期。为了保持同一站点前后周期的一致性,将各指标序列的平均突变年份作为站点径流变化的突变年份^[22]。选择年径流深和气候指标作为回归建模的自变量,各个径流特征作为因变量,采用 MLLR 方法拟合前期径流特征:

$$S = b_0 M_{\text{AF}}^{b_R} \prod_{i=1}^N C_i^{b_i} \tag{1}$$

式中: $b_0, b_1, \dots, b_N$ 为 MLLR 的系数; M_{AF} 为年径流深; b_R 为年径流深的 MLLR 系数; S 为径流特征; C 为气候指标。

根据 MLLR 方法进行转换,式(1)变为

$$\ln S = \ln b_0 + b_R \ln M_{\text{AF}} + \sum_{i=1}^N b_i \ln C_i \tag{2}$$

由于淮河上中游的站点可能出现零径流日,而式(2)并不适用此情景,因此在考虑零径流日的低流量指标时,使用 3 年平均值建立方程。

2.2.2 基于 Budyko 假设的方法

Budyko 假设揭示了年径流深与其影响因子(降雨、潜在蒸散发和流域下垫面特征)之间的非线性关系。傅抱璞^[24]在 Budyko 假设的基础上推导出具有普适性的年尺度流域水热耦合平衡方程,随后 Yang 等^[25]改进该方程,提出水热耦合平衡方程的经验公式。基于此经验公式,忽略流域长期蓄水量变化,则流域多年水量平衡方程为

$$M_{\text{AF}} = P - E = P - \frac{E_0}{[1 + (E_0/P)^n]^{1/n}} \tag{3}$$

其中 $n = \omega - 0.72$

式中: E 为年实际蒸散发量; n 为无量纲的下垫面参数; ω 为反映流域下垫面特征的无量纲数^[26],如土壤属性、坡度、土地利用和植被覆盖和气候季节性,取值范围为 $[1, +\infty]$; E_0/P 为干燥度指数。

研究表明, ω 可以很好地表征人类活动^[12,17,20], ω 越大,流域平均蒸散发越大且径流深越小。基准期的 n 可以根据基准期多年平均年径流深、降水量和蒸散发量求得。假设 P, E_0 和 n 是独立变量,由气候变化和人类活动导致的径流深变化可表示为径流深对该变量的偏导数与其本身变化量的乘积,根据弹性系数法^[12]可得

$$\Delta M_{\text{AF}} = \frac{\partial M_{\text{AF}}}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial M_{\text{AF}}}{\partial E_0} \Delta E_0 + \frac{\partial M_{\text{AF}}}{\partial n} \Delta n \tag{4}$$

设 E_0/P 为 φ , 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial M_{\text{AF}}}{\partial P} = 1 + \varphi^{n+1} \frac{\partial M_{\text{AF}}}{\partial E_0} \\ \frac{\partial M_{\text{AF}}}{\partial E_0} = - \frac{1}{(1 + \varphi^n) (1 + \varphi^n)^{1/n}} \end{cases} \tag{5}$$

2.2.3 微分方程的推导与求解

流域属性在很大程度上决定了径流特征,通过建立基准期流域属性和径流特征之间的多重对数线性回归关系,可以定量分析人类活动和气候变化对径流变化的贡献率。该方法已被广泛应用于径流特征的预测分析^[20]。根据式(2)可知,径流特征变化的新微分方程可以推导为

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{b_R}{M_{AF}} \Delta M_{AF} + \sum_{i=1}^N \frac{b_i}{C_i} \Delta C_i$$

(6)

根据式(4)和式(6)可知,气候变化对径流特征变化的影响(ΔS_C)可以表示为

$$\Delta S_C = b_R \frac{S}{M_{AF}} \left(\frac{\partial M_{AF}}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial M_{AF}}{\partial E_0} \Delta E_0 \right) + \sum_{i=1}^N b_i \frac{S}{C_i} \Delta C_i$$

(7)

式中 $\partial M_{AF}/\partial P$ 和 $\partial M_{AF}/\partial E_0$ 可以根据式(5)计算。

假设人类活动的影响与气候变化无关,人类活动对径流特征变化的影响(ΔS_H)可以表示为

$$\Delta S_H = \Delta S - \Delta S_C$$

(8)

因此,在径流成因分析中,气候变化以及人类活动对径流特征变化影响的贡献率 P_C 和 P_H 分别为为

$$\begin{cases} P_C = \frac{|\Delta S_C|}{|\Delta S_C| + |\Delta S_H|} \\ P_H = \frac{|\Delta S_H|}{|\Delta S_C| + |\Delta S_H|} \end{cases}$$

(9)

3 结果分析

3.1 径流突变分析

采用 M-K 检验、滑动 T 检验方法确定淮河上中游 4 个水文站径流突变年份,得到息县、王家坝、鲁台子和蚌埠站的径流突变年份分别为 1999 年、2008 年、1988 年和 1991 年。由表 1 可知,4 个水文站的多年平均年径流深在突变年份后均呈下降趋势,这与孙鹏等^[27]的研究结论一致。其中息县站变化期多年平均年径流深相较于基准期下降了 6.25%,而王家坝、鲁台子和蚌埠站分别下降了 39.67%、13.54% 和 20.16%,中游多年平均年径流深下降趋势较上游明显,主要是因为中游地区受到的人类活动影响更多。

表 1 4 个水文站径流特征、年降水量和潜在蒸散量的平均值及其变化率

Table 1 Means and change rates of runoff characteristics, annual rainfall and potential evapotranspiration across four sites

水文站	M_{AF}/mm		M_{AF} 变化率/%	M_{FF}/mm		M_{FF} 变化率/%	M_{NF}/mm		M_{NF} 变化率/%
	基准期	变化期		基准期	变化期		基准期	变化期	
息 县	362.8	340.2	-6.25	254.2	248.5	-2.25	108.8	91.5	-15.86
王家坝	239.5	144.5	-39.67	163.4	91.1	-44.25	75.8	56.9	-25.00
鲁台子	247.5	214.0	-13.54	171.6	146.9	-14.41	76.7	67.0	-12.71
蚌 埠	231.3	184.7	-20.16	162.6	124.4	-23.50	71.1	59.1	-16.90

水文站	$A_{\min}/\text{mm}$		$A_{\min}$ 变化率/%	L_{90}/mm		L_{90} 变化率/%	$A_{\max}/\text{mm}$		$A_{\min}$ 变化率/%
	基准期	变化期		基准期	变化期		基准期	变化期	
息 县	0.073	0.089	21.68	0.137	0.170	23.86	22.00	22.60	2.74
王家坝	0.057	0.118	108.02	0.112	0.118	5.91	5.48	7.78	41.95
鲁台子	0.052	0.041	-21.15	0.106	0.106	0.00	3.86	3.38	-12.58
蚌 埠	0.017	0.009	-46.44	0.074	0.059	-20.06	2.98	2.88	-3.40

水文站	H_{10}/mm		H_{10} 变化率/%	P/mm		P 变化率/%	E_0/mm		E_0 变化率/%
	基准期	变化期		基准期	变化期		基准期	变化期	
息 县	2.07	3.94	89.91	1111.2	1072.0	-3.53	1025.7	1009.5	-1.57
王家坝	1.77	0.93	-47.59	954.1	843.2	-11.62	1057.2	1000.5	-5.36
鲁台子	1.75	1.55	-11.71	930.1	923.1	-0.75	948.1	893.5	-5.76
蚌 埠	1.71	1.43	-16.58	965.4	950.4	-1.55	1079.8	1036.8	-3.98

除息县站外,其下游水文站的 M_{FF} 下降幅度均大于 M_{NF} ,而王家坝站的下降幅度更是达到了 44.25%。王家坝站位于淮河上中游交界处,其下游的濠洼蓄洪区 1954—2015 年累计 12 个年份 15 次滞蓄洪水,蓄洪

总量达 75 亿 m³。重大水利工程汛期防洪调控不仅大幅度减少了下游汛期径流,同时确保了沿淮大中城市的防洪安全。

此外,变化期的高、低流量指标与基准期相比,息县站和王家坝站大部分都呈上升趋势(除王家坝站 H_{10} 下降 47.59%),而鲁台子站和蚌埠站大部分呈下降趋势(除鲁台子站 L_{90} 无变化)。这也是上游水利工程对径流的调控所致。

3.2 径流特征的估计

由表 2 可知,高流量指标、汛期径流深与年径流深以及气候指标的相关性最高,相关系数范围为 0.859 ~ 0.987;而低流量指标、非汛期径流深用年径流和气候指标估计较为困难,相关性偏低,大部分指标方程相关系数小于 0.8(除鲁台子站 L_{90} 径流特征方程相关系数为 0.843)。

息县、王家坝、鲁台子和蚌埠 4 个水文站径流特征多重相关系数变化范围分别为 $0.467A_{\min} \sim 0.967M_{\text{FF}}$ 、 $0.612A_{\min} \sim 0.967M_{\text{FF}}$ 、 $0.757A_{\min} \sim 0.987H_{10}$ 和 $0.541M_{\text{NF}} \sim 0.984M_{\text{FF}}$ 。总体而言,各站点的平均相关系数均达到 0.75 以上,径流特征与气候变量呈现出明显的非线性关系。表明本文方法能够很好地应用于径流特征估计。

表 2 基准期径流特征方程以及相关系数				
Table 2 Runoff characteristic equation and correlation coefficients during the base period				
水文站	M_{FF}		M_{NF}	
	特征方程	相关系数	特征方程	相关系数
息 县	$\ln M_{\text{FF}} = -0.552 + 1.134 \ln M_{\text{AF}} + 0.443 \ln E_{\text{sea}} - 0.362 \ln E_{7\text{d}}$	0.967	$\ln M_{\text{NF}} = -9.814 + 0.395 \ln M_{\text{AF}} + 1.082 \ln P_{\text{nf}} - 0.436 \ln P_{7\text{d}} + 1.447 \ln P_z$	0.638
王家坝	$\ln M_{\text{FF}} = -0.552 + 1.134 \ln M_{\text{AF}} + 0.443 \ln E_{\text{sea}} + 0.184 \ln P_{7\text{d}} - 0.362 \ln E_{7\text{d}}$	0.967	$\ln M_{\text{NF}} = -9.814 + 0.392 \ln M_{\text{AF}} + 1.082 \ln P_{\text{nf}} - 0.436 \ln P_{7\text{d}} + 1.447 \ln P_z$	0.638
鲁台子	$\ln M_{\text{FF}} = -10.403 + 1.042 \ln M_{\text{AF}} + 0.579 \ln P_{7\text{d}} + 1.232 \ln P_z$	0.985	$\ln M_{\text{NF}} = 26.715 + 1.701 \ln M_{\text{AF}} - 2.506 \ln E_{\text{nf}} - 4.020 \ln P_{\text{f}} + 1.345 \ln P$	0.763
蚌 埠	$\ln M_{\text{FF}} = 0.056 + 0.953 \ln M_{\text{AF}} + 0.702 \ln P_{7\text{d}} - 0.233 \ln P - 0.567 \ln E_{7\text{d}}$	0.984	$\ln M_{\text{NF}} = -25.699 + 0.088 \ln M_{\text{AF}} + 1.790 \ln P_{\text{nf}} + 1.799 \ln E_{7\text{d}} + 2.320 \ln P_z - 1.247 \ln E_{\text{sea}}$	0.541
水文站	$A_{\min}$		L_{90}	
	特征方程	相关系数	特征方程	相关系数
息 县	$\ln A_{\min} = -4.414 + 0.517 \ln M_{\text{AF}} - 0.266 \ln P + 1.253 \ln P_{\text{f}} - 0.334 \ln P_{7\text{d}}$	0.467	$\ln L_{90} = 1.971 + 0.530 \ln M_{\text{AF}} + 0.945 \ln P_{\text{f}} - 1.053 \ln E_{\text{nf}} - 0.201 \ln P_{7\text{d}}$	0.684
王家坝	$\ln A_{\min} = -10.318 + 2.400 \ln M_{\text{AF}} - 1.363 \ln P_{\text{f}} - 0.832 \ln P_{7\text{d}} + 3.421 \ln E_{7\text{d}}$	0.612	$\ln L_{90} = 24.612 + 0.930 \ln M_{\text{AF}} - 0.569 \ln P_{\text{f}} - 2.841 \ln E_0 - 0.509 \ln P_{7\text{d}}$	0.663
鲁台子	$\ln A_{\min} = -19.797 + 1.873 \ln M_{\text{AF}} + 3.491 \ln E_{7\text{d}} - 1.865 \ln P_{7\text{d}} + 1.221 \ln P$	0.757	$\ln L_{90} = 32.534 + 0.942 \ln M_{\text{AF}} - 1.393 \ln P_{7\text{d}} - 2.149 \ln P_z - 2.515 \ln E_{\text{nf}}$	0.843
蚌 埠	$\ln A_{\min} = -26.806 + 3.645 \ln P_{7\text{d}} + 1.659 \ln P + 1.804 \ln P_{\text{sea}}$	0.558	$\ln L_{90} = 8.351 + 1.244 \ln M_{\text{AF}} - 2.235 \ln P_{7\text{d}} + 2.198 \ln E_0 - 2.845 \ln P_z$	0.757
水文站	$A_{\max}$		H_{10}	
	特征方程	相关系数	特征方程	相关系数
息 县	$\ln A_{\max} = 6.059 + 0.754 \ln M_{\text{AF}} + 0.823 \ln P_{7\text{d}} - 0.471 \ln P - 0.405 \ln P_{\text{f}}$	0.899	$\ln H_{10} = -3.924 + 1.271 \ln M_{\text{AF}} - 0.405 \ln P_{7\text{d}} + 0.624 \ln E_{\text{nf}} + 0.202 \ln P$	0.965
王家坝	$\ln A_{\max} = -11.859 + 0.782 \ln M_{\text{AF}} + 0.357 \ln P_{7\text{d}} + 1.835 \ln P_z + 0.841 \ln E_{7\text{d}}$	0.859	$\ln H_{10} = -8.620 + 1.189 \ln M_{\text{AF}} + 0.110 \ln P_{7\text{d}} + 1.218 \ln E_{\text{f}} - 0.144 \ln P_{\text{sea}}$	0.953
鲁台子	$\ln A_{\max} = -13.893 + 0.805 \ln M_{\text{AF}} + 0.839 \ln P_{7\text{d}} + 2.272 \ln P_z + 0.251 \ln P_{\text{sea}}$	0.934	$\ln H_{10} = -1.904 + 0.811 \ln M_{\text{AF}} + 0.371 \ln P_{\text{f}} + 0.519 \ln P_{7\text{d}} - 0.174 \ln P$	0.987
蚌 埠	$\ln A_{\max} = -1.778 + 0.543 \ln M_{\text{AF}} + 0.818 \ln P_{7\text{d}} - 1.074 \ln E_{\text{nf}} + 1.461 \ln P_z$	0.951	$\ln H_{10} = 4.215 + 0.753 \ln M_{\text{AF}} + 0.724 \ln P_{7\text{d}} - 0.212 \ln P - 0.595 \ln E_0$	0.978

3.3 气候变化和人类活动的影响分析

根据 Budyko 曲线拟合可知,息县、王家坝、鲁台子和蚌埠站的 n 值分别为 1.883、2.118、1.827 和 2.141,干燥度指数分别为 0.928、1.116、0.997 和 1.105,由 n 和干燥度指数的数值变化可知,随着干旱程度的增加,4 个水文站的径流逐渐减小。在息县、王家坝、鲁台子和蚌埠 4 个水文站控制的流域中,气候变化对径流特征的影响贡献率变化范围分别为 1.54% ~ 12.45%、11.50% ~ 19.09%、7.58% ~ 19.58% 和 0.01% ~

16.77%。人类活动对径流特征的影响贡献率变化范围分别为 87.55%~98.46%、80.91%~88.50%、80.42%~92.42%和 83.23%~99.99%,贡献率均超过 80%。人类活动在淮河上中游的径流特征变化中起主导作用。王国庆等^[28]对中国主要江河径流变化成因进行定量分析,发现人类活动对包括淮河在内的大多数河流径流变化的影响率超过 50%,是径流变化的主要驱动因素。城市化进程的推进与“三生”用水需求的不断扩大,都可能使径流呈现下降趋势。

对于淮河流域而言,土地利用变化是径流变化的关键影响因素,本文将其纳入人类活动的影响^[16-17]。息县、王家坝、鲁台子和蚌埠站的径流特征平均突变年份分别为 1999 年、2008 年、1988 年和 1991 年,依照各站点突变年份,构建 1980—1990 年(鲁台子和蚌埠站)、1980—1995 年(息县站)和 1980—2005 年(王家坝站)3 个时期土地利用转移矩阵(表 3),从而分析不同站点基准期和变化期土地利用类型空间分布变化。

表 3 淮河流域上中游 1980—1990、1980—1995 和 1980—2005 年土地利用转移矩阵 单位:km²

Table 3 Land use transfer matrices in the upper and middle reaches of Huaihe River from 1980 to 1990, from 1980 to 1995 and from 1980 to 2005 unit:km²

1980 年	1990 年						
	耕地	林地	草地	水域及水利设施用地	住宅用地	其他用地	合 计
耕地	85 274	18	2	218	208	0	85 720
林地	6	12 972	14	0	0	0	12 992
草地	1	0	4 315	0	0	0	4 316
水域及水利设施用地	74	0	24	2 851	2	2	2 953
住宅用地	0	0	0	0	13 173	0	13 173
其他用地	0	0	0	0	0	7	7
合计	85 355	12 990	4 355	3 069	13 383	9	119 161

1980 年	1995 年						
	耕地	林地	草地	水域及水利设施用地	住宅用地	其他用地	合 计
耕地	84 507	81	11	256	865	0	85 720
林地	213	12 734	41	3	3	0	12 994
草地	268	227	3 808	9	4	0	4 316
水域及水利设施用地	150	5	23	2 769	3	1	2 951
住宅用地	104	3	0	1	13 065	0	13 173
其他用地	1	1	0	0	0	5	7
合计	85 243	13 051	3 883	3 038	13 940	6	119 161

1980 年	2005 年						
	耕地	林地	草地	水域及水利设施用地	住宅用地	其他用地	合 计
耕地	83 871	54	11	393	1 391	0	85 720
林地	208	12 695	40	37	14	0	12 994
草地	274	225	3 786	20	11	0	4 316
水域及水利设施用地	100	3	16	2 819	12	1	2 951
住宅用地	3	0	0	1	13 169	0	13 173
其他用地	2	0	0	0	0	5	7
合计	84 458	12 977	3 853	3 270	14 597	6	119 161

1980—1990 年土地利用类型变化较大的有:耕地向水域及水利设施用地、住宅用地转变,变化面积分别为 218 km² 和 208 km²。1980—1995 年土地利用类型变化较大的有:耕地向住宅用地转变,变化面积为 865 km²;其次,耕地向水域及水利设施用地转变、林地和草地向耕地转变的面积都大于 200 km²;而水域及水利设施用地、住宅用地向耕地转变的面积均大于 100 km²。1980—2005 年土地利用类型变化较大的有:耕地向住宅用地转变,转变面积高达 1 391 km²;其次,林地和草地向耕地、草地向林地转变的面积均大于 200 km²;水域及水利设施用地向耕地转变面积也达到了 100 km²。20 世纪末以及 21 世纪初淮河上中游住宅用地大幅度增加,城市化进程加快,农业、工业及生活用水增加使得河流径流减少。刘晓丽等^[17]研究下垫面变化对淮河流域中上游径流变化的影响中也得到了相同的结论。

4 结 论

a. 大多数径流特征序列都检测到了基准期与变化期,突变年份主要出现在 20 世纪 90 年代与 21 世纪

初。与基准期相比,4 个水文站变化期的大部分径流特征都呈现下降趋势,尤其是平均流量指标,下降幅度从 2.25% 到 44.25% 不等。

b. 气候指标对径流特征有着重要影响。其中,高流量指标、汛期径流深与年径流深以及气候指标的相关性最高,相关系数范围为 0.859~0.987;低流量指标、非汛期径流深与年径流深以及气候指标的相关性相对较低,相关系数小于 0.8(除鲁台子站 L_{90} 相关系数为 0.843)。

c. 淮河上中游气候变化和人类活动对大部分径流特征起到负面作用,其中人类活动为主导因素。在息县、王家坝、鲁台子和蚌埠 4 个水文站控制流域,人类活动贡献率范围分别为 87.55%~98.46%、80.91%~88.50%、80.42%~92.42% 和 83.23%~99.99%,4 个站点控制流域贡献率都达到 80% 以上。

参考文献:

[1] SHI Peng,MA Xinxin,HOU Yuanbing,et al. Effects of land-use and climate change on hydrological processes in the upstream of Huai River,China[J]. Water Resources Management,2013,27(5):1263-1278.

[2] SHI Peng, QIAO Xueyuan, CHEN Xi, et al. Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment (SERRA),2014,28(2):201-212.

[3] MOU Shiyu, SHI Peng, QU Simin, et al. Projected regional responses of precipitation extremes and their joint probabilistic behaviors to climate change in the upper and middle reaches of Huaihe River Basin, China[J]. Atmospheric Research,2020,240:104942.

[4] 张泳华,刘祖发,赵铜铁钢,等. 东江流域基流变化特征及影响因素[J]. 水资源保护,2020,36(4):75-81. (ZHANG Yonghua,LIU Zufa,ZHAO Tongtiegang,et al. Variation characteristics and influencing factors of base flow in Dongjiang River Basin[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):75-81. (in Chinese))

[5] 刘剑宇,张强,陈喜,等. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J]. 地理学报,2016,71(11):1875-1885. (LIU Jianyu, ZHANG Qiang, CHEN Xi, et al. Quantitative evaluations of human-and climate-induced impacts on hydrological processes of China[J]. Acta Geographica Sinica,2016,71(11):1875-1885. (in Chinese))

[6] MARHAENTO H,BOOIJ M J,HOEKSTRA A Y. Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment[J]. Hydrological,2018,63(9):1368-1385.

[7] HARMAN C,TROCH P A. What makes Darwinian hydrology "Darwinian"? Asking a different kind of question about landscapes [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2014,18(2):417-433.

[8] 白琪阶,宋志松,王红瑞,等. 基于 SWAT 模型定量分析自然因素与人为因素对水文系统的影响:以漳卫南运河流域为例 [J]. 自然资源学报,2018(9):1575-1587. (BAI Qijie,SONG Zhisong,WANG Hongrui,et al. Quantitative analysis of the impact of natural factors and human factors on hydrological system using the SWAT Model:The Zhangweinan Canal Basin case[J]. Journal of Natural Resources,2018(9):1575-1587. (in Chinese))

[9] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):39-45. (DENG Peng,SUN Shanlei,HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(1):39-45. (in Chinese))

[10] 赵昀皓,邢万秋,傅健宇. 基于概率性 Budyko 方程的我国可利用水资源量脆弱性评估[J]. 水资源保护,2020,36(2):47-52. (ZHAO Yunhao,XING Wanqiu,FU Jianyu. Evaluation of vulnerability of water availability in China based on probabilistic Budyko equation[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):47-52. (in Chinese))

[11] 薛联青,倪涛,刘远洪,等. 基于地表径流量预测的玛纳斯河流域绿洲适宜规模计算[J]. 水资源保护,2021,37(1):7-13. (XUE Lianqing,NI Tao,LIU Yuanhong,et al. Calculation of suitable scale of oasis in Manas River Basin based on surface runoff prediction[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):7-13. (in Chinese))

[12] 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. (ZHANG Limei,ZHAO Guangju,MU Xingmin,et al. Attribution of runoff variation in the Wei River basin based on the Budyko hypothesis[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(21):7607-7617. (in Chinese))

[13] 王卫光,陆文君,邢万秋,等. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J]. 水资源保护,2018,34(2):7-13. (WANG Weiguang,LU Wenjun,XING Wanqiu,et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River [J]. Water Resources Protection,2018,34(2):7-13. (in Chinese))

[14] XIN Zhouhang, LI Yu, ZHANG Lu, et al. Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on seasonal

- streamflow [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 936-945.
- [15] ZHENG Hongxing, ZHANG Lu, ZHU Ruirui, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 641-648.
- [16] 刘睿, 夏军. 气候变化和人类活动对淮河上游径流影响分析[J]. *人民黄河*, 2013, 35(9): 30-33. (LIU Rui, XIA Jun. Influence analysis of climate change and human activities on runoff of the upper Huaihe River [J]. *Yellow River*, 2013, 35(9): 30-33. (in Chinese))
- [17] 刘晓丽, 陈明哲, 汪子雄, 等. 淮河流域中上游径流变化归因分析[J]. *人民黄河*, 2020, 42(10): 16-22. (LIU Xiaoli, CHEN Mingzhe, WANG Zixiong, et al. Attribution analysis of runoff changes in the upper and middle Huaihe River Basin [J]. *Yellow River*, 2020, 42(10): 16-22. (in Chinese))
- [18] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, 13(3): 245-259.
- [19] 冷梦辉, 白桦, 李二辉, 等. 洪水基流分割非参数检验方法优选[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 82-88. (LENG Menghui, BAI Hua, LI Erhui, et al. Optimization of nonparametric test methods for flood baseflow separation [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 82-88. (in Chinese))
- [20] ZHANG Yongqiang, CHIEW F H S, LI Ming, et al. Predicting runoff signatures using regression and hydrological modeling approaches [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10): 7859-7878.
- [21] 贺新月, 曾献奎, 王栋. 融合 AR 模型和 MCMC 方法的水文模拟不确定性分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 116-122. (HE Xinyue, ZENG Xiankui, WANG Dong. Uncertainty analysis of hydrological simulation with auto regressive model and MCMC method [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(2): 116-122. (in Chinese))
- [22] WANG Wei, ZHANG Yongyong, TANG Qihong. Impact assessment of climate change and human activities on streamflow signatures in the Yellow River Basin using the Budyko hypothesis and derived differential equation [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125460.
- [23] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements [J]. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, 1998, 300(9): D05109.
- [24] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算 [J]. *大气科学*, 1981(1): 23-31. (FU Baobu. On the calculation of the evaporation from land surface [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981(1): 23-31. (in Chinese))
- [25] YANG Hanbo, YANG Dawen, LEI Zhidong, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44: W03410.
- [26] ZHANG L, HICKEL K, DAWES W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): 1-14.
- [27] 孙鹏, 孙玉燕, 张强, 等. 淮河流域径流过程变化时空特征及成因 [J]. *湖泊科学*, 2018, 30(2): 497-508. (SUN Peng, SUN Yuyan, ZHANG Qiang, et al. Temporal and spatial variation characteristics of runoff processes and its causes in Huaihe Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(2): 497-508. (in Chinese))
- [28] 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. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-21 编辑: 刘晓艳)