

竹磊磊, 王纪军, 吴璐, 等. 河南省主要河川径流变化归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 228-236. ZHU L L, WANG J J, WU L, et al. Attribution of runoff variation of main river basins in Henan Province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 228-236. (in Chinese)

河南省主要河川径流变化归因

竹磊磊^{1,2}, 王纪军^{1,2}, 吴璐^{1,2}, 杨婷^{1,2}, 苏晓乐^{1,2}, 李芳^{1,2}

(1. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003; 2. 河南省气候中心, 郑州 450003)

摘要:为相对全面客观地分析气候变化和人类活动对河南省主要河川径流变化的影响, 基于河南省内卫河、伊洛河、洪汝河和唐河流域 1961—2022 年径流和降水资料, 以及国家气候中心根据 Penman-Monteith 公式计算的年潜在蒸散发资料, 比较 4 个蒸发对比站年潜在蒸散发和蒸发皿年蒸发值, 运用 Mann-Kendall 突变检验法和累积双曲线法分析 4 个研究流域控制水文站年径流序列的变化趋势和突变年份, 以及 4 个流域年降水和潜在蒸散发的变化趋势。采用基于 Budyko 假设的弹性系数法对径流变化开展归因分析。结果表明: 4 个蒸发对比站年潜在蒸散发与蒸发皿年蒸发变化趋势基本一致, 4 个水文站年径流深及 4 个流域年降水和年潜在蒸散发均呈下降趋势。4 个水文站年径流深分别在 1977 年、1985 年、2008 年和 2010 年发生了突变。气候变化对径流减少的贡献率在卫河和伊洛河流域为 7% 以下, 在洪汝河和唐河流域约为 12%~18%, 降水减少不显著和潜在蒸散发呈下降趋势是贡献率小的原因, 可见人类活动是影响 4 个流域径流变化的主要驱动因素。

关键词:弹性系数法; 气候变化; 人类活动; 径流变化; 卫河; 伊洛河; 洪汝河; 唐河

中图分类号: P467; TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0024

在气候变化和人类活动的共同影响下, 不少河川径流呈现出明显的变化趋势, 但是在不同流域这两类影响因子对径流变化的影响程度却并不相同, 科学定量地评价两类因子对径流变化的影响对流域的水资源管理和生态环境的可持续发展有着重要的参考价值。针对河南省内河川径流变化的归因分析以伊洛河流域的研究最多, 但结论有些差别。贺瑞敏等^[1]指出人类活动和降水变化对径流减少的贡献率分别为 42% 和 58%。梁国付等^[2]表明气候变化会导致伊河上游的年径流量先减少后增加。刘绿柳等^[3]认为相较于 1971—1985 年, 气候因素是致使 1986—1995 年和 2006—2015 年黑石关水文站径流变化的主要因素, 其贡献率分别为 68.7% 和 83.1%, 而人类活动是致使 1996—2005 年径流变化的主要因素, 其贡献率为 76.7%。杨旭等^[4]得出人为因素、降水量和参考蒸发量对黑石关水文站径流变化的贡献率分别为 55.72%、52.42% 和 -8.14%, 倪用鑫等^[5]得出人类活动和气候变化对径流变化的贡献率分别为 56.36% 和 42.60%。在潜在蒸散发方面,

杨旭等^[4]的计算结果呈不显著的减少趋势, 而倪用鑫等^[5]的计算时段虽与杨旭等^[4]的略有不一致, 但潜在蒸散发却呈增加趋势。同时有不少学者^[6-11]对淮河上游的径流变化作了归因分析, 虽然各研究中气候变化和人类活动对径流变化的贡献率存在差异, 但均认为人类活动是淮河上游径流变化的主导因素; 在潜在蒸散发方面, 刘晓丽等^[7]和王豪杰等^[10]认为淮河流域的潜在蒸散发为下降趋势(蒸散发变化对径流减少为负贡献), 但是金亚优等^[11]认为蒸散发变化对径流减少为正贡献。在海河流域, 付晓花等^[12]得出气候变化和人类活动对漳卫南运河径流变化的贡献率分别为 29.4% 和 70.6%。河南省长江流域的面积较小, 研究几乎空白。所以为了相对全面客观地评价气候变化和人类活动对河南省主要河川径流变化的影响, 有必要以翔实可靠的基础数据为依托, 开展河南省代表流域水文站的径流变化归因分析。

流域径流变化归因分析方法包括水文模型法^[13-14]、

收稿日期: 2023-08-13 修回日期: 2023-10-26 网络出版时间: 2024-03-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240315.1607.006>

基金项目: 中国气象局气候变化专项项目(CCSF201911); 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放研究室开放研究基金项目(AMF201509)

作者简介: 竹磊磊(1979—), 女, 河南固始人, 高级工程师, 主要从事气候预测与气候变化研究。E-mail: zhuleilei2005@163.com

通信作者: 王纪军(1970—), 男, 河南偃师人, 正高级工程师, 博士, 主要从事气候变化研究。E-mail: WJJ_wang@hotmail.com

双累积曲线法^[15]、弹性系数法^[14]和累积量斜率变化法^[16]等,基于 Budyko 假设的弹性系数法考虑了径流、降水和蒸散发的水量平衡,在径流变化归因分析中得到了广泛应用,已有研究^[4,9]证明该方法在河南省径流变化归因分析中有较好的适用性。本文在河南省四大流域中各取一个面积相对较大、水文和气象资料相对完整的子流域,分析子流域内径流、降水和潜在蒸散发的变化,根据径流突变点划分基线期和变化期,基于 Budyko 假设的弹性系数法分析流域气候变化和人类活动对其径流变化的影响,以为河南省的水资源管理提供一定的科学依据,同时为多流域地区的径流变化归因分析提供一定的参考。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

河南省跨长江、黄河、淮河和海河四大流域,属

于亚热带向暖温带的过渡地区,气候复杂多样,年降水量差异较大,降水多年(1991—2020年)平均值由 521.2 mm(温县)至 1 242.7 mm(新县)不等。在四大流域中分别选取 1 个水文站作为研究站点,4 个水文站^[17]分别是海河支流卫河元村站、黄河支流伊洛河黑石关站、淮河支流洪汝河班台站和长江支流唐河郭滩站,4 个站控制流域面积分别为 14 286、18 563、11 280 和 7 591 km²,分别占河南省内海河、黄河、淮河和长江流域面积的 93.4%、51.3%、13.1% 和 27.5%,4 个水文站控制流域共占河南省总面积的 30%。在对比潜在蒸散发和蒸发皿观测蒸发时,考虑到蒸发皿观测蒸发数据的完整性及年数据的局地性较小,选取安阳、嵩山、宝丰和商丘 4 个国家级气象站作为对比站开展对比分析。上述 4 个气象站是河南省仅有的具有较长观测数据且目前仍保留全年蒸发观测的国家级气象站。各子流域分布见图 1。

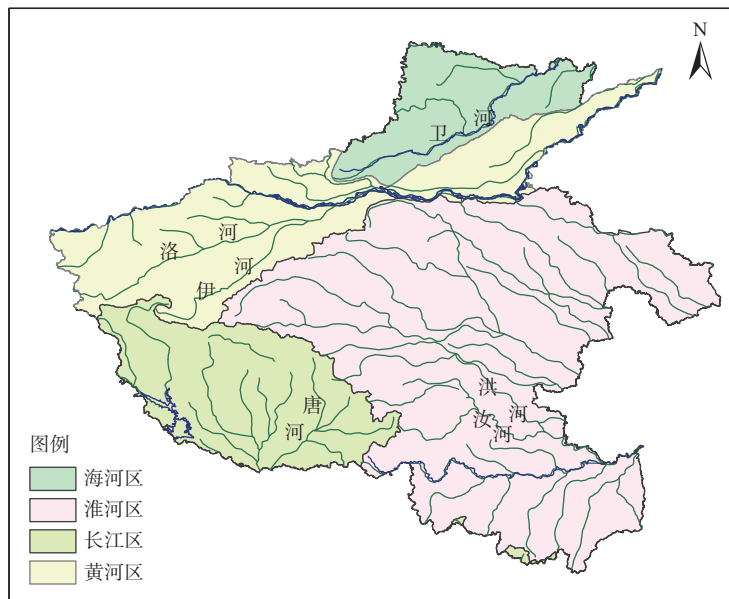


图 1 河南省流域分布

Fig. 1 Basins in Henan Province

1.2 资料来源

4 个水文站年径流数据来源于河南省水利部门,37 个国家级气象站的年降水和 4 个蒸发对比站的蒸发皿月蒸发数据来源于河南省气象探测数据中心,37 个国家级气象站和 4 个蒸发对比站的年潜在蒸散发为国家气候中心根据国家标准^[18]采用 Penman-Monteith 公式计算的数据,计算中涉及了日最高气温、最低气温、平均气温、2 m 高处风速、露点温度、气压和日照时数共 7 个气象要素,该套数据已在气

候及相关业务中应用多年。本文所有数据时段均为 1961—2022 年。

1.3 基于 Budyko 假设的弹性系数法

流域径流变化是气候变化和人类活动共同作用的结果,气候变化对流域径流的影响主要包括降水和蒸散发两部分,流域径流的变化表示为

$$\Delta Q = \Delta Q_C + \Delta Q_H \quad (1)$$

$$\Delta Q_C = \Delta Q_P + \Delta Q_E \quad (2)$$

式(1)和(2)中: ΔQ 为流域径流总变化; ΔQ_C 、 ΔQ_H 、

ΔQ_p 和 ΔQ_e 分别为由于气候变化、人类活动、降水量和蒸散发变化所引起的径流变化。

Budyko 假设^[19]认为流域实际蒸散发受降水和潜在蒸散发 2 个条件的影响,流域实际蒸散发为干燥指数 $\varnothing(\varnothing = E_0/P)$ 的函数,气候变化引起的流域径流变化可以表示为

$$\Delta Q_c = \left(\frac{\Delta P \times \varepsilon_p}{P} \right) Q + \left(\frac{\Delta E_0 \times \varepsilon_{E_0}}{E_0} \right) Q \quad (3)$$

式中: Q 为流域的径流深, mm; P 为降水量, mm; E_0 为潜在蒸散发, mm; ΔP 为降水量的变化量, mm; ΔE_0 为潜在蒸散发的变化量, mm; ε_p 和 ε_{E_0} 分别为径流对降水量和潜在蒸散发的弹性系数,弹性系数的计算公式为

$$\varepsilon_p = 1 + \frac{\varnothing f'(\varnothing)}{1 - f(\varnothing)}, \text{且 } \varepsilon_p + \varepsilon_{E_0} = 1 \quad (4)$$

其中, $f(\varnothing)$ 可通过几种 Budyko 假设进行计算,见表 1。

表 1 基于 Budyko 假设的 $f(\varnothing)$

Tab. 1 $f(\varnothing)$ based on Budyko hypothesis

Budyko 假设	$f(\varnothing)$
OL'DEKOP ^[20]	$\varnothing \tanh(1/\varnothing)$
BUDYKO ^[21]	$[\varnothing \tanh(1/\varnothing)(1 - e^{-\varnothing})]^{0.5}$
PIKE ^[22]	$(1 + \varnothing^{-2})^{-0.5}$
FU ^[23]	$1 + \varnothing - (1 + \varnothing^a)^{1/a}, a = 2.5$
ZHANG 等 ^[24]	$(1 + \omega\varnothing)(1 + \omega\varnothing + 1/\varnothing)^{-1}, \omega = 1$

2 结果与分析

2.1 水文站年径流深的变化特征

各水文站的年径流深年际变化见图 2。采用 Mann-Kenall(M-K)突变检验识别各水文站年径流深序列的突变年份, M-K 法原理见文献[25], 给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, $U_{0.05} = \pm 1.96$, 识别结果见图 3。

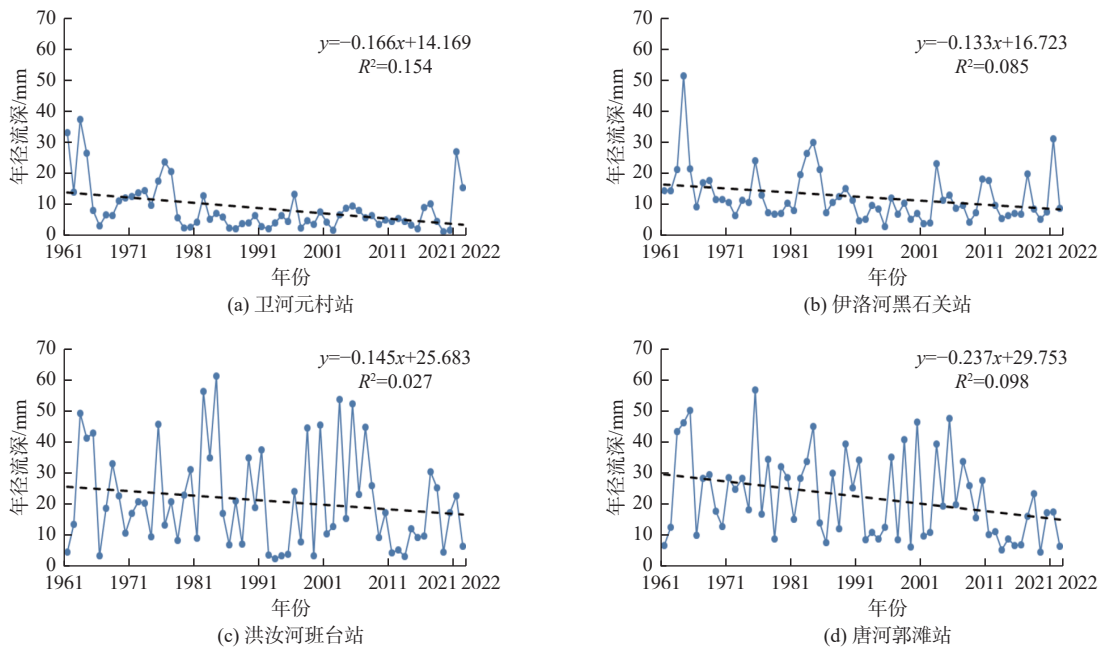


图 2 1961—2022 年各水文站年径流深的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of annual runoff depth at hydrologic stations from 1961 to 2022

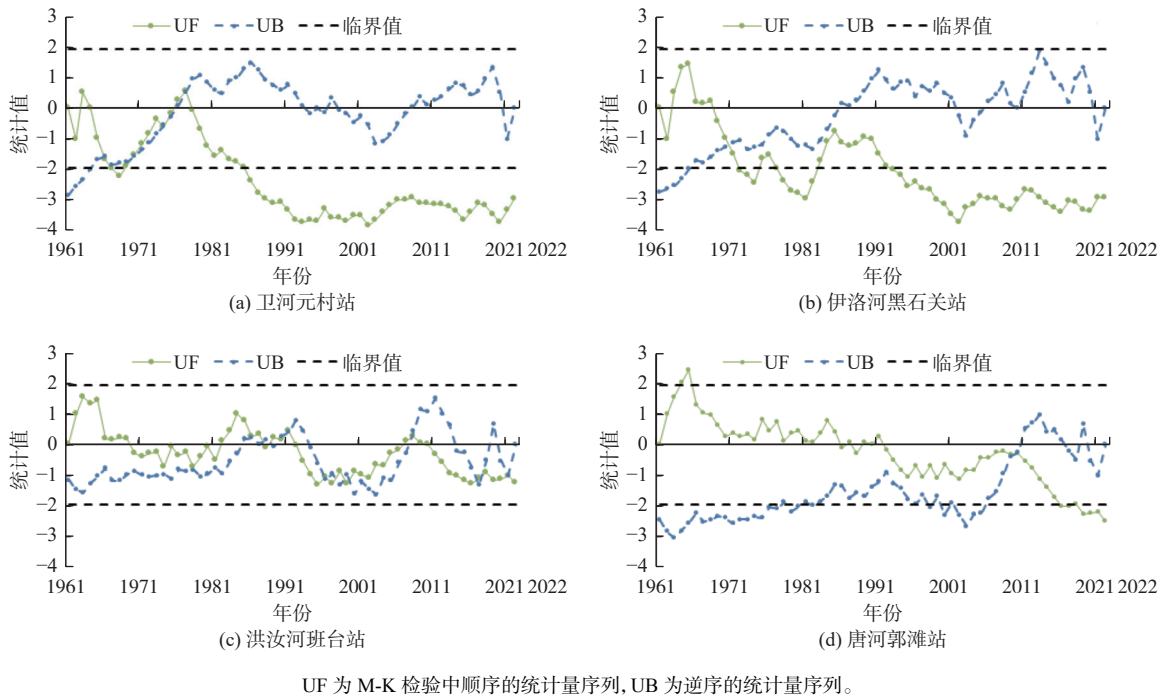
元村站和黑石关站年径流深均呈显著下降趋势($p < 0.01$), 线性倾向变化率分别为 $-1.66 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 和 $-1.33 \text{ mm}/(10 \text{ a})$; 变差系数分别为 0.858 和 0.656, 元村站的变差系数在 4 个站中最大, 说明年径流深的年际变化最大。M-K 突变检验显示元村站年径流深在 1977 年发生了突变^[12], 黑石关站年径流深在 1971 年和 1985 年发生了突变^[4,26]。两站径流突变的原因是受到水利工程修建后投入使用、土地开

发等人类活动的影响^[26], 同时也受到 20 世纪 80 年代中后期至 21 世纪 10 年代降水偏少的影响。

班台站年径流深呈不显著下降趋势^[27]($p > 0.1$); 郭滩站年径流深呈显著下降趋势($p < 0.05$), 两站线性倾向变化率分别为 $-1.45 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 和 $-2.37 \text{ mm}/(10 \text{ a})$; 变差系数分别为 0.754 和 0.611, 郭滩站变差系数在 4 个水文站中为最小, 说明郭滩站年径流深的年际变化最小。班台站和郭滩站年径流深发生突变的

时间较晚的原因是两站径流虽然也受到水利工程建设、土地利用和经济快速发展的影响,但两个子

流域前期降水一直较丰,特别是20世纪90年代末和21世纪10年代降水较丰。



UF 为 M-K 检验中顺序的统计量序列,UB 为逆序的统计量序列。

图3 各水文站 1961—2022 年径流深 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 3 Mann-Kendall mutation test of annual runoff depth at hydrologic stations from 1961 to 2022

2.2 各研究流域年降水量和年潜在蒸散发的变化特征

将各研究流域气象站的年降水量和年潜在蒸散发分别求算术平均即为各流域的年降水量和年潜在蒸散发(图4),卫河、伊洛河、洪汝河和唐河4个流域降水量均呈下降趋势,但下降趋势均不显著($p>0.1$),线性倾向变化率分别为 -3.78 、 -8.16 、 -6.85 和 -15.38 mm/(10 a);4个流域年降水量的变差系数相差不大,为 $0.552 \sim 0.575$ 。

Penman-Monteith公式是开展径流变化归因分析时计算潜在蒸散发最常用的公式^[4-5,14],本文使用的卫河、伊洛河、洪汝河和唐河流域的由Penman-Monteith公式计算的年潜在蒸散发(图4)均呈下降趋势,线性倾向变化率分别为 -16.62 、 -0.31 、 -21.32 和 -27.69 mm/(10 a),其中,伊洛河流域下降趋势不显著($p>0.1$),其他3个流域下降趋势显著($p<0.01$)。4个流域的年潜在蒸散发的变化范围和变化趋势与文献[28]和[29]的研究结果接近。

由于潜在蒸散发是人为计算的,计算公式选取、资料准确性对计算结果的影响较大,前人^[4-5,7,10-11]对同一流域潜在蒸散发的计算结果甚至出现了较大差异,

而潜在蒸散发作为径流变化归因分析中的两个气象因子之一,其变化趋势直接影响着贡献率的大小,所以有必要对潜在蒸散发进行检验。检验潜在蒸散发最常用的方法是将潜在蒸散发与蒸发皿观测蒸发进行比对^[14,29],如果两者的相关性较好,变化趋势基本一致,则可以认为计算的潜在蒸散发是合理的。河南省的蒸散发观测目前3—10月使用大型蒸发皿E-601B观测,其他几个月使用小型蒸发皿观测,首先根据文献[30]的方法将小型蒸发皿的月数据换算为大型蒸发皿的月数据,之后将蒸发皿月蒸发量累加为蒸发皿年蒸发量。图5为4个蒸发对比站年潜在蒸散发与蒸发皿年蒸发,4个站的蒸发皿年蒸发量同样呈下降趋势,这一结论与文献[29]一致。安阳、嵩山、宝丰和商丘站年潜在蒸散发与蒸发皿年蒸发的皮尔逊相关系数分别为 0.737 、 0.831 、 0.892 和 0.658 (4个站 $p<0.01$),说明4个站的年潜在蒸散发与蒸发皿年蒸发具有较好的一致性,采用Penman-Monteith公式计算的4个站的年潜在蒸散发是合理的。同时由于年潜在蒸散发和蒸发皿年蒸发的局地性较小,结合前人^[28-29]的研究成果,可以认为本文使用的河南省4个流域中各站的年潜在蒸散发同样是合理的。

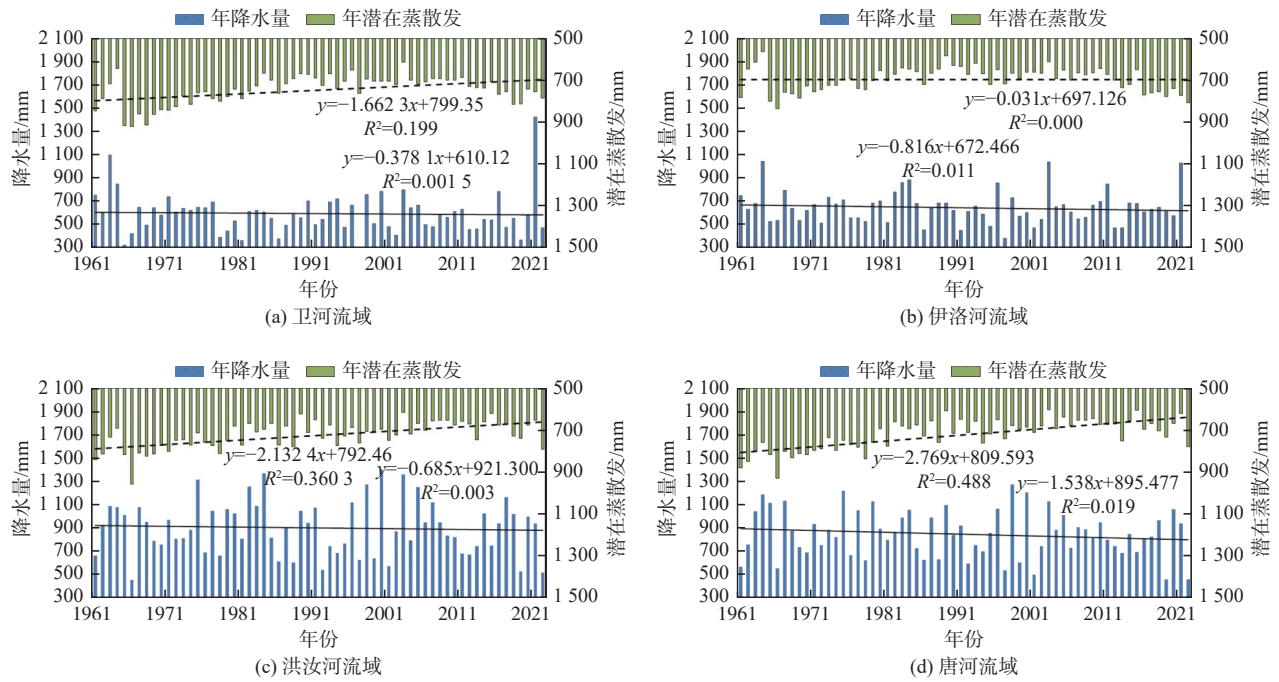


图 4 1961—2022 年各流域年降水量和年潜在蒸散发的年际变化

Fig. 4 Interannual variation of annual precipitation and potential evapotranspiration in the river basins from 1961 to 2022

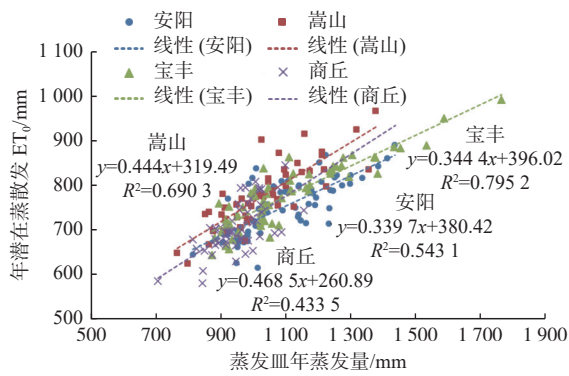


图 5 1961—2022 年 4 个蒸发对比站年潜在蒸散发和蒸发皿年蒸发的比较

Fig. 5 Comparison of annual potential evapotranspiration by Penman-Monteith equation and observed annual evaporation at 4 evaporation comparison stations from 1961 to 2022

2.3 双累积曲线判断径流突变年份

同时采用降水-径流深双累积曲线和潜在蒸散发-径流深双累积曲线识别序列发生突变的临界年份,其结果可以同径流深 M-K 突变检验的结果互为验证,降水-径流深双累积曲线见图 6。卫河流域降水-径流深双累积曲线的斜率在 1977 年发生了明显的变化,同时 1963 年和 2021 年也有明显的变化,但由于 1961—1963 年和 2021—2022 年时段较短,这 2 个时段不作分析,所以卫河流域以 1964—1977 年为基准期,1978—2020 年为变化期。伊洛河流域降水-径流深双累积曲线的斜率在 1985 年发生了明显的变化,同时 1964 年和 2021 年也有明显的变化,同样由于 1961—1964 年和 2021—2022 年时段较短

而不作分析,所以伊洛河流域以 1965—1985 年为基准期,1986—2020 年为变化期。洪汝河流域降水-径流深双累积曲线的斜率在 1965 年和 2008 年发生了明显的变化,1961—1964 年时段短,不进行分析。但在 1965—2008 年,双累积曲线有一些弯曲,在 1965—2008 年时段内的 1965—1981 年、1984—1991 年和 1996—2008 年 3 个时段内曲线较平直,分别计算它们的斜率发现相差不大,所以总体上可以认为 1965—2008 年径流和降水关系没有明显变化,可以视为一个完整的研究时段,即定义 1965—2008 年为基准期,2009—2022 年为变化期。唐河流域降水-径流深双累积曲线的斜率在 2010 年发生了明显的变化,以 1961—2010 年为基准期,2011—2022 年为变化期。4 个流域基准期和变化期双累积曲线大部分 R^2 在 0.990 以上,最低也超过 0.979,说明线性拟合程度较高。

潜在蒸散发-径流深双累积曲线(图略)的突变点与降水-径流深双累积曲线的一致,同时两类双累积曲线和 M-K 突变检验计算的突变年份基本一致,所以以分析降水-径流深双累积曲线时定义的基准期和变化期为各研究流域的基准期和变化期。

2.4 各因子的变化量及贡献率

各流域基准期和变化期的径流深、降水量和潜在蒸散发的年均值变化见表 2,卫河流域变化期相较于基准期径流深的年均值减少了 59.83%,而该流域降水量的年均值仅减少了 8.90%,说明径流的变

化主要不是降水量的变化引起的;同时该流域的潜在蒸散发的年均值减少了 12.52%,说明蒸散发对径流减少为负贡献。伊洛河、洪汝河和唐河流域类似于卫河流域,径流深年均值的变化率较大,流域降水量和潜在蒸散发年均值的变化率较小。4 个流域

中径流深年均值变化率最大的是卫河流域(59.83%),最小的为伊洛河流域(34.50%),卫河和伊洛河流域潜在蒸散发年均值的变化率大于降水量年均值的变化率,洪汝河和唐河流域潜在蒸散发年均值的变化率小于降水量年均值的变化率。

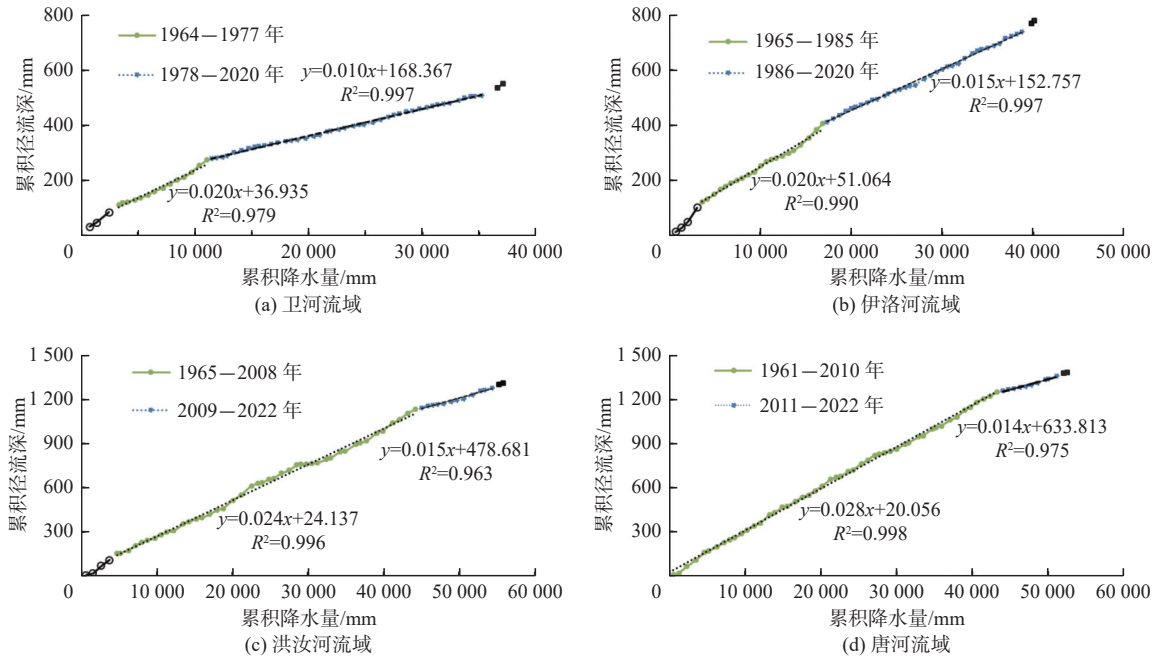


图 6 1961—2022 年各流域降水和径流深的双累积曲线

Fig. 6 Double cumulative curves of precipitation and runoff depth in the river basins from 1961 to 2022

表 2 各流域基准期和变化期径流深、降水量及潜在蒸散发的年均值及变化率

Tab. 2 Annual mean and change rate for runoff depth, precipitation and potential evapotranspiration in base period and change period in the river basins

流域	所处时期	起止年份	因子/mm			因子变化率/%		
			Q	P	E_0	ΔQ	ΔP	ΔE_0
卫河	基准期	1964—1977年	13.6	615.5	821.9	-59.83	-8.90	-12.52
	变化期	1978—2020年	5.5	560.7	719.0			
伊洛河	基准期	1965—1985年	14.5	656.5	721.5	-34.50	-4.48	-4.82
	变化期	1986—2020年	9.5	627.0	686.7			
洪汝河	基准期	1965—2008年	23.3	918.7	733.2	-45.67	-9.74	-6.24
	变化期	2009—2022年	12.6	829.2	687.5			
唐河	基准期	1961—2010年	25.0	865.0	731.1	-55.11	-10.71	-6.18
	变化期	2011—2022年	11.2	772.3	685.9			

由公式(1)~(4)和 5 种 Budyko 假设的函数形式计算贡献率,由于篇幅所限,表 3 中仅列出了 5 种函数计算结果中的最大值和最小值。由表 3 可知,OL'DEKOP 函数提供了 4 个流域的弹性系数和贡献率的极值,FU 函数提供了 2 个流域的极值,而 PIKE 函数和 ZHANG 函数各提供了 1 个流域的极值,所以计算中为了保证客观合理性,应选择多种函数形式,以得到贡献率的变化范围。

贡献率方面,卫河流域气候变化对径流减少的贡献率约为 3.88%~6.09%,人类活动的贡献率约为 93.91%~96.12%;降水减少引起的径流变化约为 15.83%~21.27%;而由于流域内潜在蒸散发为减少趋势,蒸散发变化对径流减少为负贡献,约为-17.39%~-9.74%;气候因子对径流变化的作用非常小,径流变化几乎全部是由于人类活动引起的;伊洛河流域类似于卫河流域,气候变化贡献率约为 4.04%~

4.15%, 人类活动的贡献率约为 95.85%~95.96%, 但降水变化对径流变化的正贡献和蒸散发变化对径流变化的负贡献均小于卫河流域。洪汝河和唐河流域气候变化对径流变化的贡献率要大于卫河和伊洛河流域, 分别为 12.94%~14.69% 和 15.01%~17.28%, 主要原因是这两个流域降水变化对径流减少的贡献率要大于卫河和伊洛河流域, 2 个流域人类活动的贡献率分别为 85.31%~87.06% 和 82.72%~84.99%。

表 3 气候变化和人类活动两类因子对径流变化的贡献率

流域	Budyko假设	弹性系数		各因子的贡献率/%			
		ε_p	ε_{E_0}	ΔQ_p	ΔQ_E	ΔQ_C	ΔQ_H
卫河	PIKE	2.39	-1.39	21.27	-17.39	3.88	96.12
	OL'DEKOP	1.78	-0.78	15.83	-9.74	6.09	93.91
伊洛河	OL'DEKOP	2.32	-1.32	10.42	-6.38	4.04	95.96
	ZHANG 等	2.00	-1.00	8.97	-4.82	4.15	95.85
洪汝河	OL'DEKOP	2.41	-1.41	23.51	-8.82	14.69	85.31
	FU	1.91	-0.91	18.63	-5.69	12.94	87.06
唐河	OL'DEKOP	2.45	-1.45	26.25	-8.97	17.28	82.72
	FU	1.95	-0.95	20.89	-5.88	15.01	84.99

可见, 4 个流域气候变化对径流变化的影响较小, 主要因为 4 个流域降水量的减少趋势均不显著, 且潜在蒸散发均呈减少趋势, 导致了蒸散发变化对径流减少为负贡献并抵消掉了大部分降水变化对径流减少的正贡献, 所以人类活动是 4 个流域径流减少的主要影响因素。

3 结论

前人关于伊洛河流域和洪汝河流域径流变化归因分析中的研究结论存在差异, 对河南省其他流域的研究不多。本文开展了河南省主要流域径流变化的归因分析, 具体结论如下:

卫河元村站、伊洛河黑石关站和唐河郭滩站年径流深呈显著下降趋势, 洪汝河班台站年径流深呈不显著的下降趋势; 4 个流域年降水均呈不显著的下降趋势; 潜在蒸散发呈下降趋势, 其中卫河、洪汝河和唐河流域下降趋势显著, 伊洛河流域下降趋势不显著。元村站、黑石关站、班台站和郭滩站年径流深分别在 1977 年、1985 年、2008 年和 2010 年发生了突变。

4 个研究流域气候变化对径流减少的贡献率均

远小于人类活动对径流减少的贡献率, 卫河和伊洛河流域气候变化的贡献率在 7% 以下, 洪汝河和唐河流域气候变化的贡献率约为 12%~18%; 而卫河和伊洛河流域人类活动的贡献率约为 93%~97%, 洪汝河和唐河流域人类活动的贡献率约为 82%~88%。降水减少不显著, 且潜在蒸散发的变化对径流减少为负贡献是气候变化对径流减少贡献率小的主要原因, 所以可以认为 4 个流域径流的减少主要是由于人类活动引起的。

参考文献:

- [1] 贺瑞敏, 王国庆, 张建云. 环境变化对黄河中游伊洛河流域径流量的影响[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 297-301.
- [2] 梁国付, 丁圣彦. 气候和土地利用变化对径流变化影响研究: 以伊洛河流域伊河上游地区为例[J]. 地理科学, 2012, 32(5): 635-640. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.05.018.
- [3] 刘绿柳, 王秀杰, 张鹏飞. 基于SWAT模型的气候变化和人类活动对伊洛河径流影响分析[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 1-6, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2020.01.001.
- [4] 杨旭, 申泓彦, 王超, 等. 1961—2020年伊洛河流域径流变化及归因分析[J]. 河南科学, 2022, 44(11): 1786-1793.
- [5] 倪用鑫, 余钟波, 吕锡芝, 等. 近50年伊洛河流域径流演变归因分析[J]. 水利水运工程学报, 2022, (1): 59-66. DOI: 10.12170/20211026001.
- [6] 唐为安, 田红, 卢燕宇, 等. 1961—2010年降水和土地利用变化对淮河干流上中游径流的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(10): 1647-1653.
- [7] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.10.004.
- [8] 薛颖, 高超, 张勋, 等. 淮河上游干流径流量对不同气候要素变化的响应研究[J]. 水文, 2017, 37(3): 22-28.
- [9] 石卫, 夏军. 气候变化影响下淮河流域水文响应和成因识别[C]. 第十四届中国水论坛论文集, 长春, 2016: 60-66.
- [10] 王豪杰, 左其亭, 罗增良. 沙颍河代表站径流演变特征及归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 36-42. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.05.006.
- [11] 金亚优, 徐慧, 邱新安. 洪汝河流域气候和径流响应及贡献率定量分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1): 26-29.

- [12] 付晓花,董增川,刘晨,等.不同驱动因子对漳卫南运河流域径流变化的影响[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(6): 555-561. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2015.06.009.
- [13] 李瑶,董增川,张城,等.基于SWAT模型和Budyko假设的石羊河流域径流变化归因对比分析[J].*人民黄河*, 2023, 45(7): 30-35. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.07.006.
- [14] 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.
- [15] 魏宣,王宁,周明通,等.气候变化和人类活动对克里雅河径流变化影响定量研究[J].*灌溉排水学报*, 2022, 41(8): 80-86. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2022080.
- [16] 王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].*地理学报*, 2012, 67(3): 388-397.
- [17] 河南省水资源编纂委员会.河南省水资源[M].郑州:黄河水利出版社, 2007: 72-73.
- [18] GB/T 20481—2017.气象干旱等级[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中华国家标准化管理委员会, 2017.
- [19] BUDYKO M I. Climate and life[M]. San Diego: Academic, 1974.
- [20] OL'DEKOP E M. On evaporation from the surface of river basins[J]. *Transactions on Meteorological Observations(University of Tartu)*, 1911, 4: 200.
- [21] BUDYKO M I. Evaporation under natural conditions[M]. Leningrad: Gidrometeorizdat, 1948.
- [22] PIKE J G. The estimation of annual runoff from meteorological data in tropical climate[J]. *Jornal of Hydrology*, 1964, 2(2): 116-123. DOI: 10.1016/0022-1694(64)90022-8.
- [23] FU B P. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, 5(1): 23-31.
- [24] ZHANG L, HICKEL K, DAWES W, et al. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation change at catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708. DOI: 10.1029/2000WR900325.
- [25] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社, 2007: 63-65.
- [26] 赵丽霞,徐十锋,赵旭,等.黄河伊洛河流域径流变化特性及趋势分析[J].*中国防汛抗旱*, 2020, 30(12): 70-73, 97. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2019132.
- [27] 栗士棋,刘颖,杜付然,等.河南省主要流域径流量变化及其对降水变化的响应[J].*气象与环境科学*, 2021, 44(2): 1-8. DOI: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2021.02.001.
- [28] 高歌,陈德亮,任国玉,等.1956—2000年中国潜在蒸散发变化趋势[J].*地理研究*, 2006, 25(3): 378-387. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2006.03.002.
- [29] 姬兴杰,朱业玉,顾万龙.河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析[J].*中国农业气象*, 2013, 34(1): 14-22. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2013.01.003.
- [30] 任芝花,黎明琴,张纬敏.小型蒸发器对E-601B蒸发器的折算系数[J].*应用气象学报*, 2002, 13(4): 508-512.

Attribution of runoff variation of main river basins in Henan Province

ZHU Leilei^{1,2}, WANG Jijun^{1,2}, WU Lu^{1,2}, YANG Ting^{1,2}, SU Xiaole^{1,2}, LI Fang^{1,2}

(1. Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, CMA, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Climate Center, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: With the rapid development of the social economy in Henan Province, runoff reduction is more serious. Attribution analysis of runoff variation can provide a scientific basis for water resources management. Henan Province spans the Yangtze River, the Yellow River, the Huaihe River, and the Haihe River, the water system is complex. The climate is diverse, and the economic development is unbalanced among different places, so the impact of climate change and human activities on runoff variation is different. In the past, some studies on the attribution analysis of runoff variation were carried out in Henan Province, but the conclusions are not consistent. To get a relatively comprehensive and objective attribution rate, it is necessary to carry out the attribution analysis of runoff variation in representative basins in Henan Province based on accurate meteorological and hydrological data.

The Weihe River basin, Yiluohe River basin, Hongruhe River basin, and Tanghe River basin in Henan Province were selected as study basins, which are sub-basins of the Haihe River basin, the Yellow River basin, the Huaihe River basin, and the Yangtze River basin, respectively, and their control hydrologic stations are Yuancun station, Heishiguan station, Bantai station, and Guotan station. Based on annual runoff and precipitation data of the four study basins from 1961 to 2022, and annual potential evapotranspiration by the Penman-Monteith method from National Climate Center, the Mann-Kendall mutation test and double cumulative curves method were used to analyze the mutation years of annual runoff depth series of control hydrologic stations, and the change trends of annual runoff depth of control stations, annual precipitation and annual potential evapotranspiration of the study basins were also analyzed. Annual potential evapotranspiration was compared with observed annual evaporation. The elastic coefficient method based on the Budyko hypothesis was applied to assess the attribution rate of climate change and human activities to runoff variation.

The results showed that: (1) The annual runoff depth of the four hydrologic stations showed a decreasing trend. The annual precipitation of the four study basins showed an insignificant decreasing trend. The potential evapotranspiration also indicated a decreasing trend and the decreasing trend was significant in the Weihe River basin, Hongruhe River basin, and Tanghe River basin, but not significant in the Yiluohe River basin. The changing trend of annual potential evapotranspiration and observed annual evaporation at the four weather stations was consistent. (2) The mutation of annual runoff of Yuancun station, Heishiguan station, Bantai station, and Guotan station occurred in 1977, 1985, 2008, and 2010, respectively. (3) The contribution rates of climate change to runoff reduction were less than 7% in the Weihe River and Yiluohe River basins, and about 12%–18% in the Hongruhe River and Tanghe River basins. The contribution rates of human activities were about 93%–97% in the Weihe River and Yiluohe River basins, and about 82%–88% in the Weihe River and Tanghe River basins. The climate change showed low contribution rates because of the insignificant decrease in precipitation and the decrease in potential evapotranspiration. Therefore, it can be seen that human activities were the main influencing factor of runoff reduction in the four study river basins.

Key words: elastic coefficient method; climate change; human activity; runoff variation; Weihe River; Yiluohe River; Hongruhe River; Tanghe River