DOI:10.14188/j.1671-8844.2025.0253 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-11

基于拓展Budyko方程的MOPEX流域径流变化归因分析

朱泓宇,董前进,杨子浩

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要: 为提升Budyko模型在不同气候背景和流域条件下的适应性,本文以MOPEX数据集中252个流域为研究对象,通过引入水储量变化量来拓展Budyko方程,并探索水储量变化对基于Budyko方程径流模拟精度的影响;基于拓展的Budyko方程,采用分解法量化1949~2001年气候因素和人类活动对MOPEX数据集中选定流域的累积影响。结果表明:考虑水储量变化后,不同形式的Budyko方程(Fu方程、Choudhury-Yang方程和Wang-Tang方程)相应的纳什效率系数NSE平均值提高了约0.1;基于Choudhury-Yang方程选取流域中的多数流域(69.8%)受气候变化驱动更为显著,其它流域(30.2%)径流变化受人类活动影响明显。该研究将为美国及中国相似流域的水资源管理提供科学依据。

关键词: 径流模拟;水储量变化;拓展Budyko方程;MOPEX流域

中图分类号: TV121 **文献标志码:** A

Runoff Change Attribution in MOPEX Basins Based on an Extended Budyko Equation

ZHU Hongyu, DONG Qianjin, YANG Zihao

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To improve the adaptability of the Budyko model under varying climatic and watershed conditions, this study investigates 252 basins from the MOPEX dataset. By introducing changes in water storage, the Budyko equation is extended to assess the impact of water storage variation on runoff simulation accuracy. Using the extended Budyko framework, we apply a decomposition method to quantify the cumulative impacts of climate change and human activities on runoff during the period 1949 - 2001 in the selected MOPEX basins. Results show that incorporating water storage changes increases the average Nash - Sutcliffe efficiency (NSE) by approximately 0.1 for various Budyko-type formulations (Fu, Choudhury - Yang, and Wang - Tang equations). Based on the Choudhury - Yang equation, the majority of basins (69.8%) are dominated by climate change in driving runoff variation, while in the remaining 30.2% of basins, human activities exert a more pronounced influence. This study provides scientific support for water resource management in regions of the United States and China with similar hydrological and climatic characteristics.

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 朱泓宇(2000-),男,主要从事水资源规划与管理研究,E-mail:2632157091@qq.com;

通信作者: 董前进(1979-),男,教授,主要从事水文气象、水资源规划与管理等研究,E-mail: dqjin@whu.edu.cn;

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:52279024;52261145744;51979198)。



本文引用格式: 朱泓宇,董前进,杨子浩.基于拓展Budyko方程的MOPEX流域径流变化归因分析[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-11.

Citation: ZHU Hongyu, DONG Qianjin, YANG Zihao. Runoff Change Attribution in MOPEX Basins Based on an Extended Budyko Equation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-11.

Key words: runoff simulation; water storage change; extended Budyko equation; MOPEX basins

引言

径流变化主要受气候变化与人类活动两大因素驱动,在不同区域,这两种因素对径流变化的影响程度及其相对贡献存在显著差异[1-5]。对径流变化进行归因分析,并定量评估气候变化与人类活动的影响,是科学预测和有效管理区域水资源的重要手段,也是实现水资源可持续利用的重要依据[6-9]。

对径流变化进行归因分析通常借助水文模型来完成。传统的流域水文模型以流域水文系统为研究对象,采用系统科学方法、数学物理方法,或结合物理概念和经验公式来描述流域的产汇流过程,这类模型通常依赖于大量高质量、准确的数据[10-12]。相比之下,基于概念模型的简化方法在缺乏大量观测数据的情况下,仍可通过经验参数的设定或区域化策略,实现径流的模拟与归因分析工作。Budyko假设是一种相对简单且合理的方法,该假设认为流域水分和能量之间存在一个耦合平衡关系(称为水热耦合平衡关系),并给出了一条经验关系曲线来描述流域多年平均降水量、潜在蒸散发量和实际蒸散发量之间的定量关系[13]。由该假设导出的Budyko方程在多个径流变化归因分析研究中被证明是有效且可靠的[14-18],如Wang等[19]使用基于Budyko框架的弹性方法来检查径流对气候和流域变量的敏感性,结果表明白洋淀流域的径流变化主要由流域变化(土地利用情况变化等)引起的;Zheng等[20]以Budyko方程为基础,采用弹性系数方法量化了窟野河流域的气候变化和人为活动对径流变化的贡献和敏感性;Hou等[21]基于Budyko假设的弹性系数法对黄土高原沿河流域径流变化进行了归因分析,发现下垫面条件改善是径流减少的主导因素。

本文在传统Budyko方程的基础上引入由abcd模型计算所得的年际水储量变化量(称为拓展Budyko方程),并对Fu方程、Choudhury-Yang方程和Wang-Tang方程三种不同形式的Budyko方程在美国MOPEX部分流域中的径流模拟性能进行了较为系统地对比,随后采用分解法评估了1949~2001年美国部分流域气候因素与人类活动对径流变化的累积影响。

1 研究区域及数据介绍

本文研究的流域源自美国Model Parameter Estimation Experiment(MOPEX)数据集(https://www.nws.noaa.gov/ohd/mopex/mo_datasets.htm)。该数据集最长涵盖了从1948至2003年连续的日降雨(mm)、日最高和最低气温(℃)、以及日径流(mm)序列。根据该数据集流域数据的完整性及abcd模型适用性情况,选择其中252个流域为研究对象,流域分布如图1所示。

2 研究方法

2.1 abcd模型

abcd模型是一个集总的月水量平衡模型,用它来计算流域水储量的变化量[22]。abcd模型具有概念清楚、参数少、易优化和模拟精度高的特点。该模型定义了两个状态变量:有效水W_i(即月初降水量和土壤水分之和)和蒸散潜力Y_i(即月末蒸散量和土壤储水量之和),Y_i可表示为[23]:

$$Y_i(W_i)=\frac{W_i+b}{2a}-\sqrt{\left(\frac{W_i+b}{2a}\right)^2-\frac{W_i b}{a}}\#(1)$$

式中a为0~1,表示土壤完全饱和前形成径流的概率;b为Y_i的最大值,流域储水量S_i可表示为:

$$S_i=Y_i*\exp\left(E_{0,i}/b\right)\#(2)$$

其中,E_0是潜在蒸散发量。

地下水补给量(R_i)和直接径流量(D_i)可表示如下:

$$R_i+D_i=W_i-Y_i\#(3)$$

$$R_i=c(W_i-Y_i)\#(4)$$

$$D_i=(1-c)(W_i-Y_i)\#(5)$$

其中,c是划分R_i和D_i的参数,径流Q_i包括D_i和基流,可以表示为:

$$Q_i=D_i+dG_i\#(6)$$

其中,d是用于确定基流的参数,G_i为时段末地下水储量。

2.2 Budyko方程

流域的储水量变化在较长时期(如五年以上平均)内可忽略不计,然而一些研究发现,短时间内(如年尺度)在不考虑流域水储量变化的情况下,Budyko假说不再适用于某些地区[24]。为此,可采用有效降水P_ϵ(降水量减去水储量变化量)来改善Budyko公式的径流模拟性能。

在年尺度上,考虑流域储水量变化的水量平衡可表示为:

$$R=P-\Delta S-E=P_\epsilon-E\#(7)$$

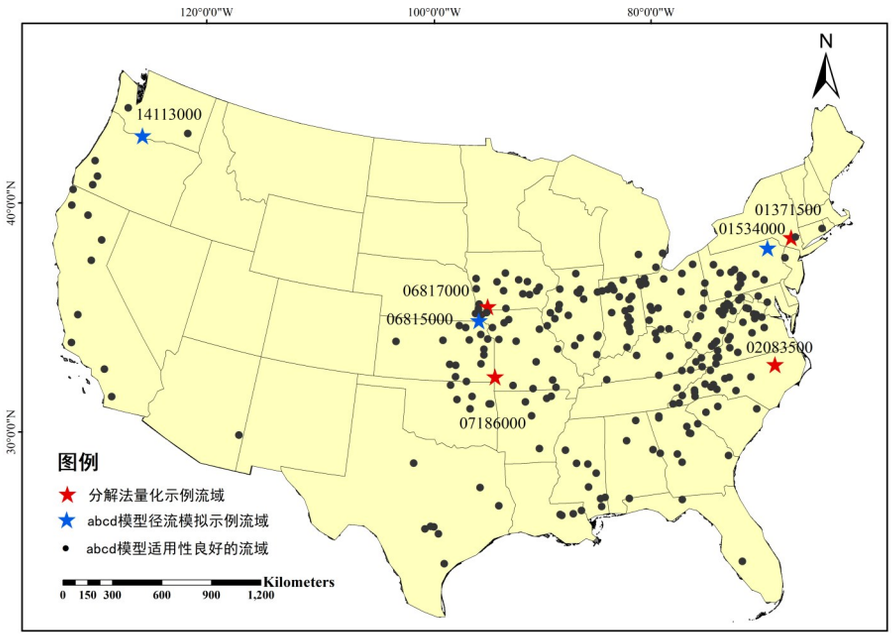


图 1 研究流域分布图

Fig. 1 Spatial distribution of the study basins

式中R, P, ΔS, E, P_ϵ分别为径流量、降水量、流域水储量变化量、实际蒸散量、有效降水量的年值。

由式(7)和三个Budyko方程[25](Fu方程、Choudhury-Yang方程和Wang-Tang方程)可得到径流量R的三个表达式:

$$R=P_\epsilon-P_\epsilon\times\left\{1+E_0/P_\epsilon-\left[1+\left(E_0/P_\epsilon\right)^n\right]^{1/n}\right\}\#(8)$$

$$R=P_\epsilon-P_\epsilon\times E_0/\left(P_\epsilon{}^n+E_0{}^n\right)^{1/n}\#(9)$$

$$R=P_\epsilon-P_\epsilon\times\left\{\frac{\left[1+E_0/P_\epsilon-\sqrt{(1+E_0/P_\epsilon)^2-4n(2-n)E_0/P_\epsilon}\right]}{\left[2n(2-n)\right]}\right\}\#(10)$$

式中E_0和n分别为研究期间潜在蒸散量和反映下垫面情况的综合参数。

2.3 分解法

设研究时段的始末时间为t_0、t_2,年径流系列的突变点为t_1,径流年际变化量可分为基准期R_1(即t_0至t_1)和变化期R_2(即t_1至t_2)两个部分(以Choudhury-Yang方程为例)[28],同时令$\alpha=t-1$可得:

$$\Delta^{c,t}=\left(P_\epsilon\right)_t\left[1-\frac{\left(E_0/P_\epsilon\right)_t}{\left(1+\left(E_0/P_\epsilon\right)_t^{n_a}\right)^{1/n_a}}\right]-\left(P_\epsilon\right)_\alpha\left[1-\frac{\left(E_0/P_\epsilon\right)_\alpha}{\left(1+\left(E_0/P_\epsilon\right)_\alpha^{n_a}\right)^{1/n_a}}\right]\#(11)$$

$$\Delta^{h,t}=\left(P_\epsilon\right)_t\left[1-\frac{\left(E_0/P_\epsilon\right)_t}{\left(1+\left(E_0/P\right)_t^{n_t}\right)^{1/n_t}}\right]-\left(P_\epsilon\right)_t\left[1-\frac{\left(E_0/P_\epsilon\right)_t}{\left(1+\left(E_0/P_\epsilon\right)_t^{n_a}\right)^{1/n_a}}\right]\#(12)$$

$\Delta^{c,t}$$\Delta^{h,t}$分别为第$t$年受气候因素和人类活动影响的年径流变化量。从初始时刻t_0到t年的径流累积变化量$A^{c,t}$,$A^{h,t}$分别为:

$$A^{c,t}=\sum_{i=t_0+1}^{t}\Delta^{c,t}\#(13)$$

$$A^{h,t}=\sum_{i=t_0+1}^{t}\Delta^{h,t}\#(14)$$

基准期R_1(即t_0至t_1)和变化期R_2(即t_1至t_2)的平均年径流量可表达为:

$$R_1=\frac{\sum_{i=i_0}^{t_1}R_i}{t_1-t_0+1}=R_{t_0}+\frac{\sum_{i=i_0+1}^{t_1}A^{c,t}+\sum_{i=t_0+1}^{t_1}A^{h,t}}{t_1-t_0+1}\#(15)$$

$$R_2=\frac{\sum_{i=i_1+1}^{t_2}R_i}{t_2-t_1}=R_{t_0}+\frac{\sum_{i=i_1+1}^{t_2}A^{c,t}+\sum_{i=t_1+1}^{t_2}A^{h,t}}{t_2-t_1}\#(16)$$

从基准期到变化期流域气候因素和人类活动对径流影响量ΔR_c、ΔR_h的计算式如下:

$$\Delta R_c=\frac{\sum_{i=t_1+1}^{t_2}A^{c,t}}{t_2-t_1}-\frac{\sum_{i=t_0+1}^{t_1}A^{c,t}}{t_1-t_0+1}\#(17)$$

$$\Delta R_{\mathrm{h}}=\frac{\sum_{i=t_1+1}^{t_2}A^{h,t}}{t_2-t_1}-\frac{\sum_{i=t_0+1}^{t_1}A^{h,t}}{t_1-t_0+1}\#(18)$$

3 研究结果与分析

3.1 基于拓展Budyko方程的径流模拟分析

3.1.1 水储量变化量的计算

首先采用abcd模型对MOPEX流域进行水储量计算,并挑选数据无缺失且径流模拟性能较好的流域用于后续研究。根据这个标准,得到符合要求的研究流域252个。在选取的252个流域中,月尺度径流模拟结果均表现良好,所有流域的NSE均大于0.6;年尺度的水储量变化量则通过对月尺度水储量进行累积计算获得。

为说明模型的径流模拟应用效果,在美国大陆区域内随机选取了三个流域(06815000、01534000和14113000)进行模型效果检验。图2展示了三个流域的径流模拟结果及对应的年尺度水储量变化情况。以流域(06815000)为例,其月尺度径流模拟的NSE为0.82,水量平衡误差(WBE)为-1.7%,表明基于abcd模型的径流模拟精度高且水储量变化计算结果可靠。

进一步得到研究流域年平均水储量变化分布

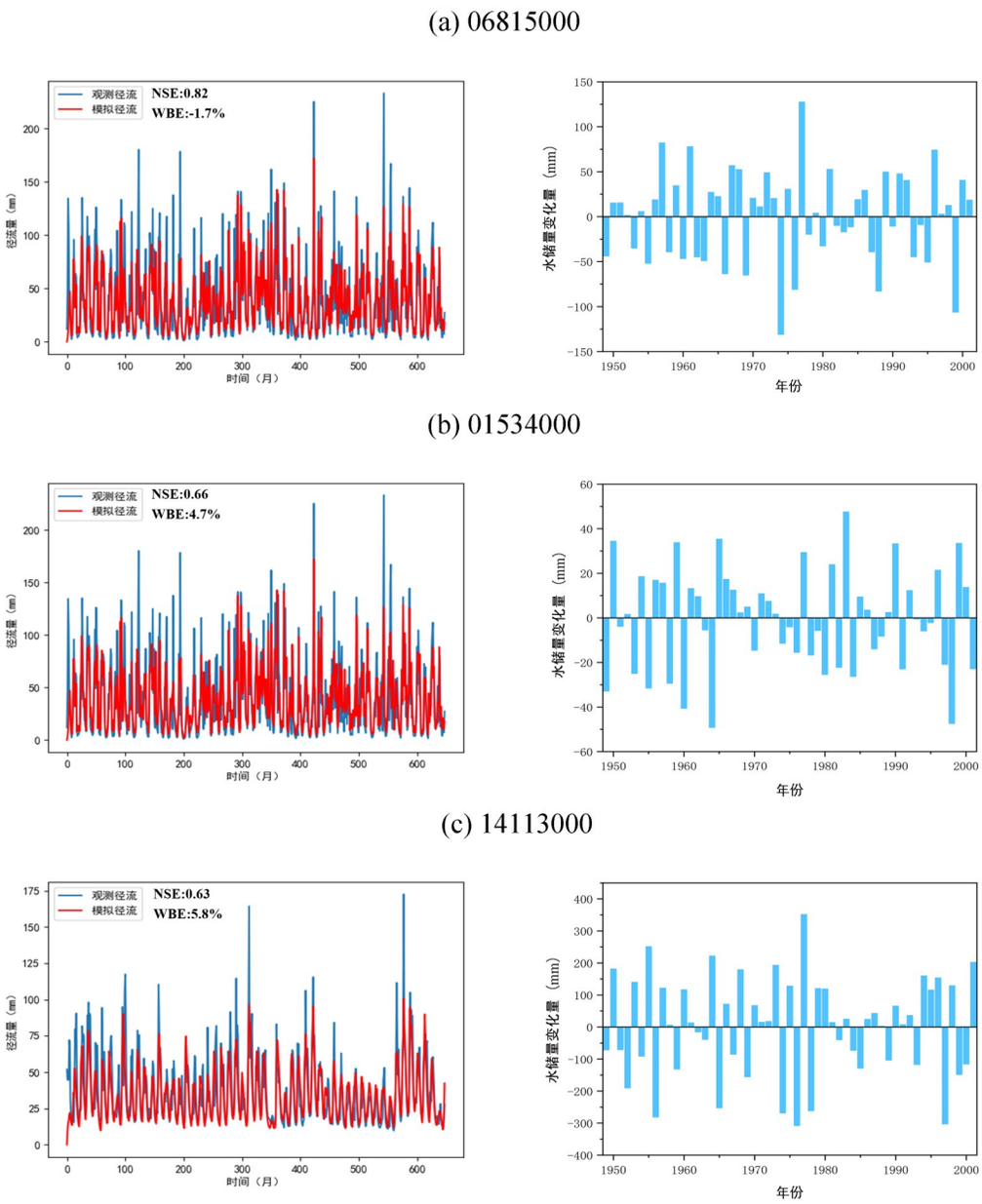


图2 随机选取的流域径流模拟及水储量变化情况

Fig. 2 Runoff simulation and water storage changes for randomly selected basins

如图3所示：

由图3可知，所研究流域年平均水储量变化量较小的地区主要集中于中部及东部，这里属于相对湿润地区。湿润区通常降水充沛，径流年际和季节性变化相对较小，因此流域水储量不会出现剧烈波动。

3.1.2 拓展Budyko方程适用情况

考虑流域水储量变化的拓展Budyko方程（Choudhury-Yang方程、Fu方程和Wang-Tang方程）径流模拟情况如图4所示。由图4可知，3种形式的拓展Budyko方程表现出非常相似的性能，如Choudhury-Yang方程在79.0%的流域中NSE大于0.5，Fu方程在78.9%的流域中NSE大于0.5，而Wang-Tang方程在77.8%的流域中NSE大于0.5。在空间分布上，NSE较高的流域主要集中在美国东南海岸。由于Choudhury-Yang方程的模拟精度在三个方程中最好，后面的研究将以Choudhury-Yang方程作为径流归因分析的基础。

3.1.3 Budyko方程改进前后性能比较

为进一步论证考虑流域水储量变化量在基于

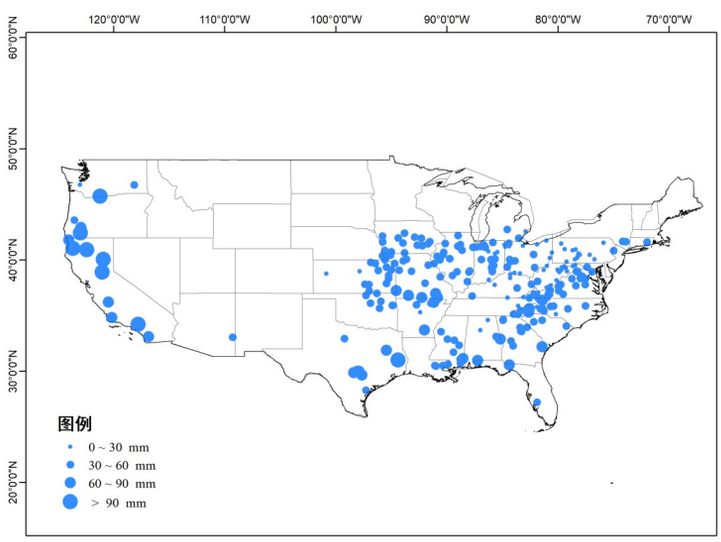


图3 研究流域年平均水储量变化量空间分布

Fig. 3 Spatial Distribution of Annual Mean Water Storage Change

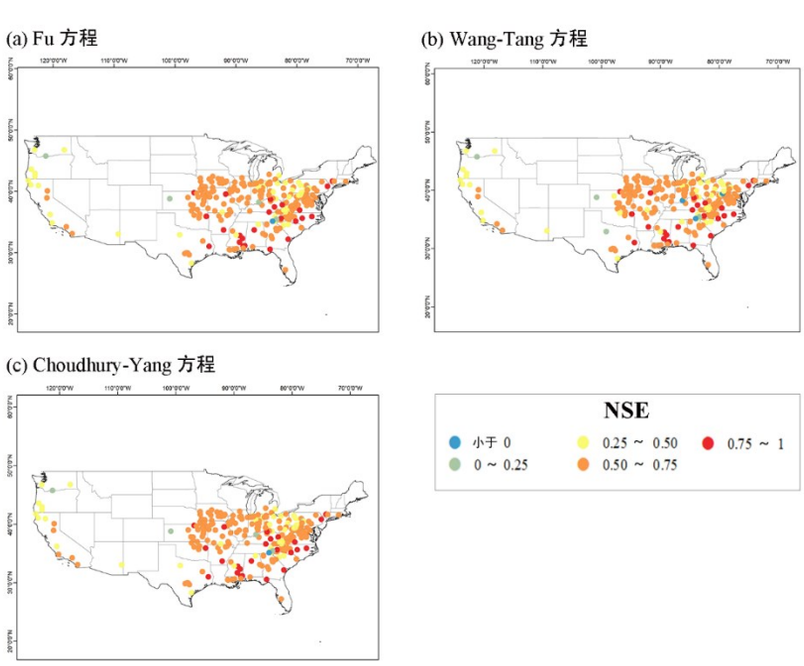


图4 考虑水储量变化量的不同扩展Budyko方程NSE空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of NSE values for various Budyko formulations incorporating water storage change

Budyko方程年径流模拟中的作用,将考虑水储量变化量的Choudhury-Yang方程、Fu方程与Wang-Tang方程,分别与对应的传统Budyko型方程进行了对比,各模型的NSE均值与标准差如图5所示。

从图5可知,扩展Budyko方程与传统Budyko方程相比,各方程NSE的平均值提高了约0.1,且标准差有所降低,模型整体的稳定性和精度有所提高。

为探究模型性能提升是否与水储量变化量的引入有关,特对扩展Budyko方程的NSE提升量与流域年平均水储量变化量进行了相关性分析(图6)。结果表明,两者之间存在显著正相关关系($r=0.31$,$P<0.05$),说明模型性能的改进在一定程度上与水储量变化项的引入有关。

3.1.4 流域水储量变化量影响因素相关性分析

为探究影响流域水储量变化量的主要因素,本文选取年均潜在蒸散发量及气候季节性与异步指数,分析它们与水储量变化量之间的关系。

由上图可得,流域水储量变化量与年均潜在蒸散发量及气候季节性与异步指数(SAI)[25]之间呈显著正相关关系,即流域水储量变化量与潜在蒸散发量的正相关性反映了能量供应对流域水储量变化有一定促进作用,主要体现在能量充足时蒸散发过程对水分的消耗作用增强,进而影响地下水补给和土壤水分动态,导致流域水储量的变化[26];而高气候季节性与异步指数(SAI)值意味着流域内水资源的年内分配存在显著的不均匀性,具体表现为降水和潜在蒸散发量在时间上的相位错配和幅度差异,这种错配迫使流域通过增加土壤水分和地下水储存,以平衡水资源的季节性需求,从而表现出更明显的水储量变化[27]。

3.2 径流变化归因分析

3.2.1 径流趋势变化及突变检验

为分析流域径流的变化特征,选择扩展Choudhury-Yang方程中纳什效率系数(NSE)大于0.5的流域,共计199个,对这199个流域的年径流量进行Mann-Kendall(M-K)趋势检验,在0.05的显著性水平下识别径流变化趋势。结果显示,共有40个流域径流存在显著增加的趋势,其余流域径流在研究时段内则无明显变化趋势。

为进一步探究气候因素和人类活动对径流变化情况不同流域的影响,本文选取两个无显著趋势变化的代表性流域(01371500和02083500)以及两个呈显著增加趋势的流域(06817000和07186000)进行深入分析

此外,为确定研究流域的突变年份,对所研究流域进行了Pettitt检验。在0.05的显著性水平下,四个代表性流域的径流突变年份分别为1971年、1971年、1971年和1972年。在对199个流域进行突变检验后发现,1971年在各流域突变年份中出现的频率最高(约占突变年份合集的23.2%),且各流域突变年份多集中于1970-1972年。基于此,本文将

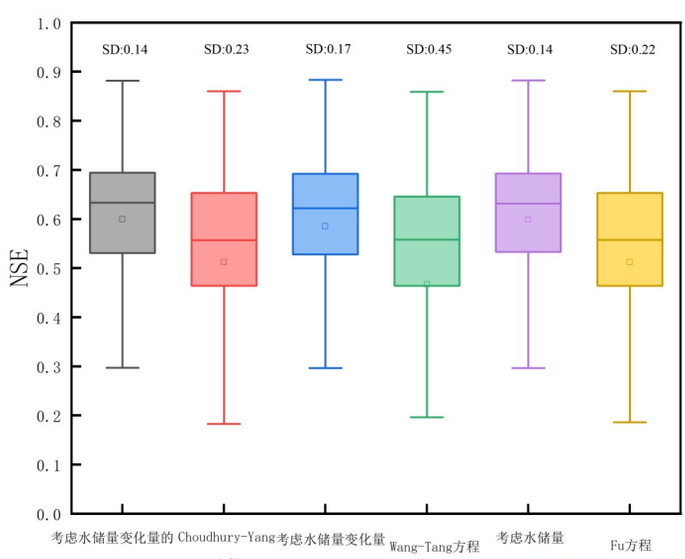


图5 不同Budyko方程改进前后性能比较

Fig. 5 Comparison of Model Performance Before and After Modification of Different Budyko Equations

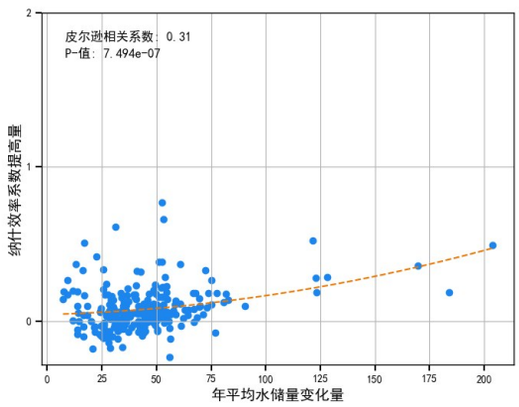


图 6 NSE提高量与流域水储量变化量的关系

Figure 6 Relationship Between the NSE Improvement and Basin Water Storage Change

1971年作为径流变化的统一突变点,并据此划分时间序列,用于后续的径流累计变化分析。

3.2.2 分解法量化结果

基于分解法,以1949年作为变化初值,径流受到气候因素、人类活动导致的累积变化量如图8所示。总体来看,相较于人类活动累积影响的变化情况,各流域气候因素的累积影响变化波动更大;另外,以流域(01371500)为例,气候因素对径流的最大影响变化幅度约为400mm,而人类活动的累积影响变化幅度区间则在-20mm~50mm内。即对于上述径流无明显变化趋势的示例流域,人类活动的累积影响变化幅度明显低于气候因素的影响,并且年际变化情况也更为稳定。

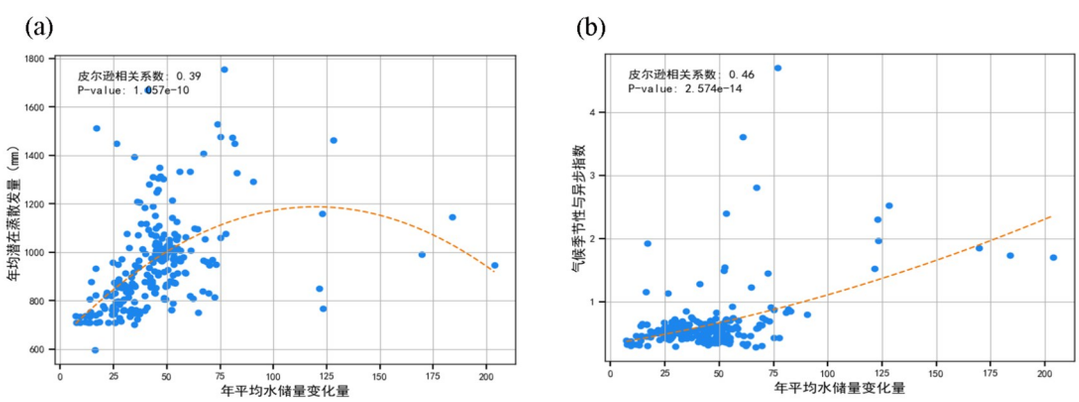


图 7 年均潜在蒸散发量及气候季节性与异步指数与流域水储量变化量的关系

Fig. 7 Relationship of Mean Annual Potential Evapotranspiration and Climate Seasonality and Asynchrony Index (SAI) with Basin Water Storage Change

图9展示了气候因素与人类活动对径流变化累积影响绝对值及相对大小的空间分布格局。其中,红色三角形表示人类活动引起的径流变化幅度超过了气候变化所致的径流变化量,蓝色圆形表示气候变化所致的径流变化幅度超过了人类活动引起的径流变化量。经计算,选取流域综合累积影响绝对值的平均值达65.20mm,最大值达179.26mm,数值分布上则集中在60-90mm这一范围内,主要集中于中部平原及东部沿海地带。在美国中西部少数地区,人类活动对径流变化的影响相较气候因素更为显著。在所分析的199个流域中,有139个流域(即69.8%的流域)表现出气候因素对径流变化的主导作用,表明气候变化是驱动这些流域径流变化的主要因素。

4 讨论

扩展Budyko方程可用于年及年内尺度径流分析,且已用于研究干旱地区、山区和全球流域的蒸散或径流的年际变化。在MOPEX流域的径流模拟中,将拓展Budyko方程与传统的Budyko方程进行对比,结果显示,考虑流域水储量变化后的方程在大多数流域表现出模拟性能有一定提升的效果,这一结论与前人所做研究结果相一致[29,30]。如Chen等[31]在Budyko方程中引入季节(或年际)水储量变化项,发现该方法在部分流域可显著改善径流和蒸散模拟性能,且尤其适用于干湿年交替明显、土壤储水变化显著的气候环境。He等[32]利用拓展Budyko方程提高了旱季径流模拟性能。

此外,有研究表明,在短时间尺度上(如年尺

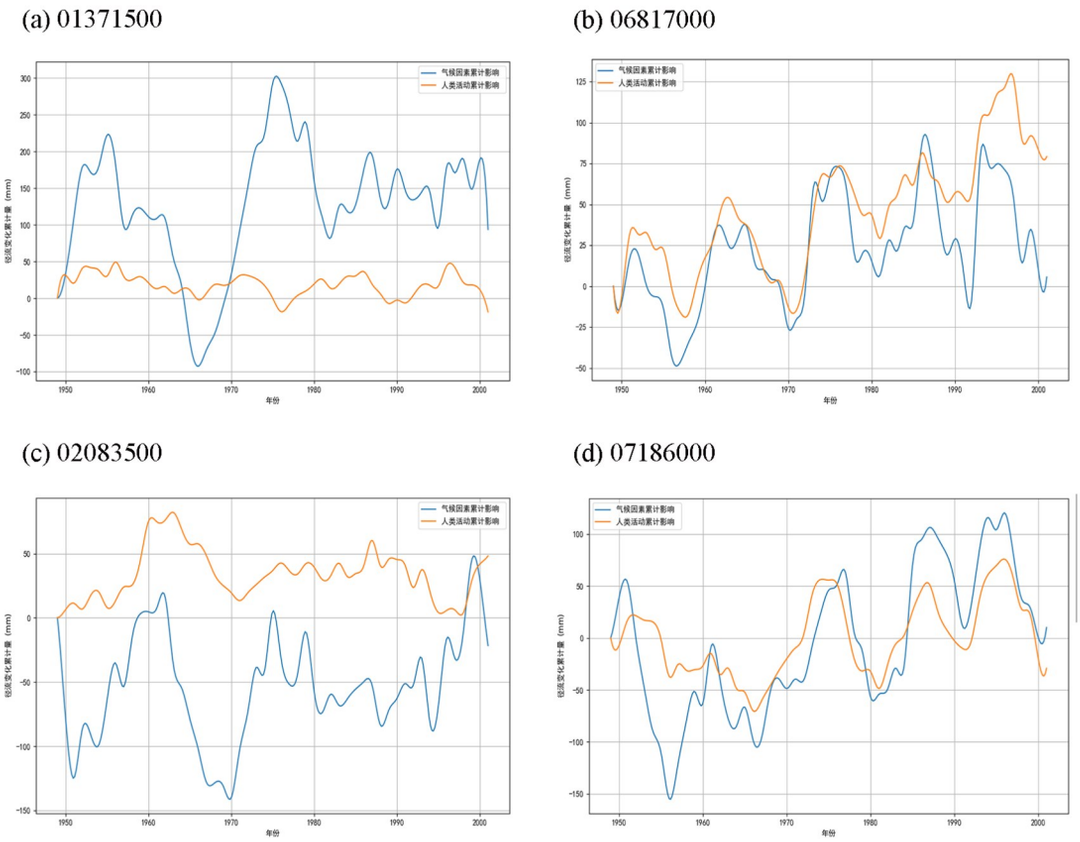


图 8 气候因素与人类活动对径流累积影响的年际变化情况

Fig. 8 Interannual Variation of the Cumulative Impact of Climate Factors and Human Activities on Runoff

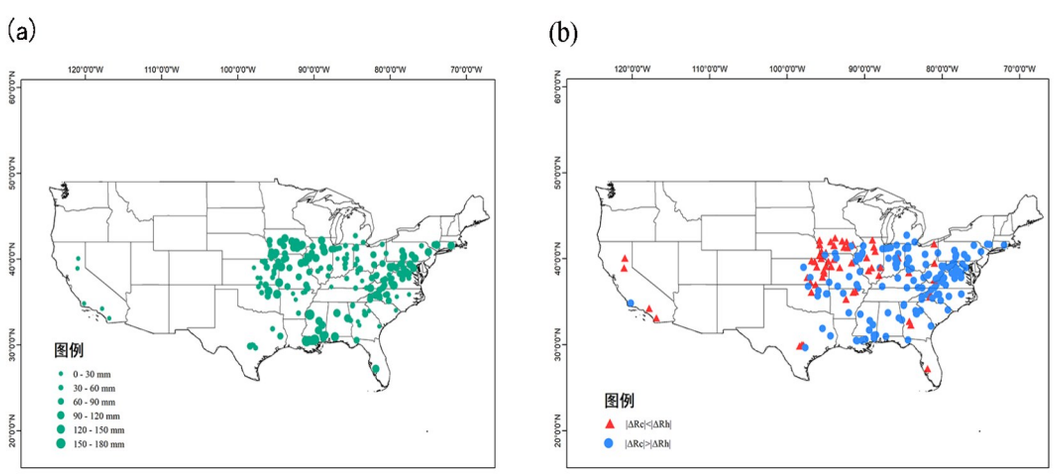


图 9 气候因素与人类活动对径流变化累积影响绝对值及相对大小的空间分布

Fig. 8 Spatial Distribution of the Absolute and Relative Contribution of Climate Factors and Human Activities to Cumulative Runoff Change

度),若不考虑流域水储量变化,人类活动对径流的影响可能会被错误估计[33],这也是本文采用拓展Budyko方程进行径流归因分析的原因。在探讨气候变化与人类活动对径流变化的驱动作用时,结果显示约70%的流域仍以气候因素为主导,尤其在湿润区,这一趋势更加明显;与之相比,人类活动在干旱区及西部高原地区的影响则相对突出[34]。这种径流变化所呈现的空间特性可能与流域内土地利用方式、水资源开发强度以及水文地质条件的差异等密切相关。如Napoli等[35]揭示了在相同气候条

件下,土地利用变化(尤其是不透水面增加与农业集约化)显著提升了年径流总量;Zhang等[36]发现构筑水库等人类活动对径流产生显著影响,且不同子流域的响应具有异质性。Wang等[37]研究发现自1997年以来,冰川加速融化和多年冻土解冻导致雅鲁藏布江流域上游地区地表径流增加了近80.9%。

尽管本研究所采用的研究方法在突变点的选择和数据精度方面仍存在一定局限性,但所得结果与前人研究总体一致[28],说明拓展Budyko方程在定量分析径流变化驱动因素方面具有良好的适用性。

5 结论

本文研究了扩展Budyko方程在美国典型流域中的径流模拟与归因分析情况。结果表明,三种拓展Budyko方程(Fu方程、Choudhury-Yang方程和Wang-Tang方程)在研究流域径流模拟性能上比较相近,且较传统Budyko方程模拟效果均有提升;后以Choudhury-Yang方程为基础,进一步量化了选取流域气候变化和人类活动对径流变化的累积影响。主要结论如下:

(1)流域水储量变化量是影响扩展Budyko方程径流模拟精度的关键因素。在方程中考虑该项,所研究流域对应的三种拓展Budyko方程NSE的平均值提高了0.1左右,且标准差有所降低,模型精度和稳定性均得到了一定程度的提升。

(2)基于拓展Budyko方程,定量分析了气候变化与人类活动对美国部分流域径流变化的影响。结果显示,与人类活动相比,受气候因素主导的流域比例达到69.8%,即研究流域中多数流域径流变化受气候变化驱动更为显著。

参考文献:

[1] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧,等.中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应[J].生态学报, 2022,42(09): 3557-3568.
GENG Qingling, CHEN Xiaoqing, HE Xiaohui, et al. Response of NDVI to climate change and human activities in different vegetation types in China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(09): 3557 - 3568.

[2] 莫兴国, 刘苏峡, 胡实.黄河源区气候-植被-水文协同演变及成因辨析[J].地理学报, 2022,77(07): 1730-1744.
MO Xingguo, LIU Suxia, HU Shi. Synergistic evolution and causative analysis of climate - vegetation - hydrology in the source region of the Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(07): 1730 - 1744.

[3] 石晓丽, 史文娇.气候变化和人类活动对耕地格局变化的贡献归因综述[J].地理学报, 2015,70(09): 1463-1476.
SHI Xiaoli, SHI Wenjiao. A review of the attribution of climate change and human activities to cropland pattern change. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(09): 1463 - 1476.

[4] 杨元合, 石岳, 孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学, 2022, 52(04): 534-574.
Yang Yuanhe, Shi Yue, Sun Wenjuan, et al. Characteristics of carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems of China and the world and their contributions to carbon neutrality. Scientia Sinica Vitae, 2022, 52(04): 534 - 574.

[5] 张强, 姚玉璧, 李耀辉,等.中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J].气象学报, 2020, 78(03): 500 - 521.
ZHANG Qiang, YAO Yubi, LI Yaohui, et al. Research progress and prospects on causes and variation patterns of drought events in China. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(03): 500 - 521.

[6] 宋益涛, 王双涛, 罗平平,等.变化环境下径流演变的研究方法进展[J].水资源与水工程学报, 2022, 33(02): 68-76+84.
SONG Yitao, WANG Shuangtao, LUO Pingping, et al. Advances in research methods of runoff evolution under changing environment. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(02): 68 - 76+84.

[7] 姜彤, 孙赫敏, 李修仓,等.气候变化对水文循环的影响[J].气象, 2020, 46(03): 289-300.
JIANG Tong, SUN Hemin, LI Xiucang, et al. Impacts of climate change on the hydrological cycle. Meteorological Monthly, 2020, 46(03): 289 - 300.

[8] 莫淑红, 王学凤, 勾奎,等.气候变化和人类活动对灞河流域径流情势的影响分析[J].水力发电学报, 2016, 35(09): 7-17.
MO Shuhong, WANG Xuefeng, GOU Kui, et al. Impact analysis of climate change and human activities on runoff regime in the Bahe River Basin. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(09): 7 - 17.

[9] 何霄嘉, 王国庆, 鲍振鑫.气候、植被变化与水文循环响应研究进展及展望[J].水资源与水工程学报, 2016, 27(02): 1-5.
HE Xiaoji, WANG Guoqing, BAO Zhenxin. Advances and prospects of research on climate, vegetation change and hydrological response. Journal of Water Re-

sources and Water Engineering, 2016, 27(02): 1 - 5.

[10] 赵建华, 舒卫民, 王文军.金沙江下游-三峡梯级水库水文预报技术及应用[J]. 人民长江, 2022, 53(S2): 52-58.
ZHAO Jianhua, SHU Weimin, WANG Wenjun. Hydrological forecasting techniques and applications for the Lower Jinsha River - Three Gorges Reservoir cascade. Yangtze River, 2022, 53(S2): 52 - 58.

[11] 陆文, 唐家良, 章熙锋,等.山地流域水文模拟研究进展与展望[J]. 山地学报, 2020, 38(01): 50-61.
LU Wen, TANG Jialiang, ZHANG Xifeng, et al. Research progress and prospects of hydrological modeling in mountainous basins. Mountain Research, 2020, 38(01): 50 - 61.

[12] 徐宗学.水文模型:回顾与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(03): 278-289.
XU Zongxue. Hydrological models: review and prospects. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(03): 278 - 289.

[13] 孙福宝.基于Budyko水热耦合平衡假设的流域蒸散发研究[D].清华大学,2007.
SUN Fubao. Study on watershed evapotranspiration based on Budyko water-energy balance hypothesis [D]. Tsinghua University, 2007.

[14] 张建云, 张成凤, 鲍振鑫,等.黄淮海流域植被覆盖变化对径流的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(06): 813-823.
ZHANG Jianyun, ZHANG Chengfeng, BAO Zhenxin, et al. Impacts of vegetation cover change on runoff in the Huang-Huai-Hai River Basin. Advances in Water Science, 2021, 32(06): 813 - 823.

[15] 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 changes in the Taohe and Daxiahe River Basins based on the Budyko hypothesis. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8421 - 8429.

[16] 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(06): 1114-1124.
PENG Tao, MEI Ziyi, DONG Xiaohua, et al. Attribution of runoff change in the Hanjiang River Basin based on the Budyko hypothesis. South-to-North Water Transfers and Water Science &. Technology, 2021, 19(06): 1114 - 1124.

[17] 张成凤, 刘翠善, 王国庆,等.基于Budyko假设的黄河源区径流变化归因识别[J]. 中国农村水利水电, 2020(09): 90-94.
ZHANG Chengfeng, LIU Cuishan, WANG Guoqing, et al. Attribution of runoff change in the source region of the Yellow River based on the Budyko hypothesis. China Rural Water and Hydropower, 2020(09): 90 - 94.

[18] 李天生, 夏军.基于Budyko理论分析珠江流域中上游地区气候与植被变化对径流的影响[J]. 地球科学进展, 2018, 33(12): 1248-1258.
LI Tiansheng, XIA Jun. Impacts of climate and vegetation changes on runoff in the upper and middle reaches of the Pearl River Basin based on the Budyko theory. Advances in Earth Science, 2018, 33(12): 1248 - 1258.

[19] Wang H, Lv X, Zhang M .Sensitivity and attribution analysis based on the Budyko hypothesis for streamflow change in the Baiyangdian catchment, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 121:107221.

[20] Zheng J, He Y, Jiang X, et al. Attribution analysis of runoff variation in Kuye River Basin based on three Budyko methods[J]. Land, 2021, 10(10): 1061.

[21] Hou K, Wang J, Wang X. Characteristic and attribution of runoff variation in the yanhe River Basin, Loess Plateau, based on the Budyko hypothesis[J]. Water, 2022, 14(3): 495.

[22] 韩鹏飞, 王旭升.利用ABCD模型预测流域水文对极端气候的响应[J]. 人民黄河, 2016, 38(11): 16-22.
HAN Pengfei, WANG Xusheng. Prediction of watershed hydrological response to extreme climate using the ABCD model. Yellow River, 2016, 38(11): 16 - 22.

[23] 姬广兴, 刘智培, 高红凯,等.1961-2020年赣江流域月尺度实际蒸发模拟及归因分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(01): 195-202.
JI Guangxing, LIU Zhipei, GAO Hongkai, et al. Simulation and attribution analysis of monthly actual evapotranspiration in the Ganjiang River Basin from 1961 to 2020. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(01): 195 - 202.

[24] Condon L E, Maxwell R M. Systematic shifts in Budyko relationships caused by groundwater storage changes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(2): 1117-1135.

[25] Cheng C, Liu W, Mu Z, et al. Lumped variable representing the integrative effects of climate and underlying surface system: Interpreting Budyko model parameter from earth system science perspective[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129379.

[26] Wu C, Yeh P J F, Zhou J, et al. Controlling factors of evapotranspiration predictability under diverse climates with the effects of water storage change in the Budyko framework[J]. Water Resources Research, 2024, 60

(2): e2023WR034499.

[27] Liu J, Zhang Q, Singh V P, et al. Hydrological effects of climate variability and vegetation dynamics on annual fluvial water balance in global large river basins[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(7): 4047-4060.

[28] Zhang X, Dong Q, Cheng L, et al. A Budyko-based framework for quantifying the impacts of aridity index and other factors on annual runoff[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124224.

[29] Mo C, Huang K, Ruan Y, et al. Quantifying uncertainty sources in runoff change attribution based on the Budyko framework[J]. Journal of Hydrology, 2024, 630: 130790.

[30] Wu C, Yeh P J F, Wu H, et al. Global analysis of the role of terrestrial water storage in the evapotranspiration estimated from the Budyko framework at annual to monthly time scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20(10): 2003-2021.

[31] Chen X, Alimohammadi N, Wang D. Modeling interannual variability of seasonal evaporation and storage change based on the extended Budyko framework[J]. Water Resources Research, 2013, 49 (9): 6067-6078.

[32] He Q, Fok H S, Ferreira V, et al. Three-dimensional Budyko framework incorporating terrestrial water storage: Unraveling water-energy dynamics, vegetation, and ocean-atmosphere interactions[J]. Science of the Total Environment, 2023, 904: 166380.

[33] Zhang W, Liang W, Tian L, et al. Climatic and different human influences on annual and seasonal streamflow with considering the soil water storage change in the middle reaches of the Yellow River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129298

[34] Wang D, Hejazi M. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States [J]. Water resources research, 2011, 47(10).

[35] Napoli M, Massetti L, Orlandini S. Hydrological response to land use and climate changes in a rural hilly basin in Italy[J]. Catena, 2017, 157: 1-11.

[36] Zhang Q, Sun P, Jiang T, et al. Spatio-temporal patterns of hydrological processes and their responses to human activities in the Poyang Lake basin, China[J]. Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques, 2011, 56(2): 305-318.

[37] Wang J, Chen X, Liu J, et al. Changes of precipitation-runoff relationship induced by climate variation in a large glaciated basin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126 (21): e2020JD034367.