

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.02.012

环境变化对澜沧江出境水文过程变异的影响

王乐扬^{1,2}, 张建云^{2,3}, 宁忠瑞^{2,4}, 贾雨凡^{2,4}, 孙高霞^{3,5}, 王国庆^{3,5}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;
3. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 河海大学水安全与水科学协同创新中心,
江苏 南京 210098; 5. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 变化环境改变河流水文节律, 影响流域水资源的开发利用; 澜沧江-湄公河是位于东南亚源于中国西南的跨境河流, 科学厘清澜沧江径流变化原因是实现澜沧江-湄公河流域跨境水利益共享的重要基础工作。基于1961—2020年允景洪水文站的实测径流量资料, 采用数理统计与水文模拟相结合的研究途径, 诊断径流序列的变异特征, 定量分析气候变化和人类活动对径流及其年内分配的影响。结果表明: ① 1961—2020年允景洪站实测年径流量呈显著性减少趋势, 其中, 1—5月径流量呈增加趋势, 6—12月径流量呈减少趋势; 实测年径流量在2008年发生突变。② RCCC-WBM模型能够较好地模拟基准期(1961—2008年)的天然径流量过程, 模拟相对误差小于1%; 模拟的人类活动影响期间(2009—2020年)天然径流量约为371.8 mm, 较基准期偏少6.8%, 这是气候变化引起的。③ 水利工程建设运行是澜沧江最主要的人类活动, 是水库蓄水运行期(2009—2013年)径流减少的主要原因; 气候变化对水库稳定正常运行期(2014—2020年)径流减少贡献更大, 约为61.7%。④ 水库运行调度使得2014—2020年汛期(6—11月)径流量减少44.3%, 非汛期(12月至翌年5月)径流量增加134.3%; 澜沧江干流水库对径流的削峰补枯调节作用在一定程度上保障了湄公河中下游的防洪安全与供水安全。

关键词: 气候变化; 人类活动; 径流量; RCCC-WBM模型; 归因识别; 澜沧江流域

中图分类号: TV121.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5791(2024)02-0313-12

气候变化是流域水循环变化的直接驱动力, 全球变暖影响下, 蒸散发、土壤水和径流量时空分布格局发生明显变化^[1-3]; 随着经济社会的快速发展, 人类活动对区域水资源的影响愈加显著^[4-6]。科学识别不同驱动要素对流域水文的影响是国际水文科学协会(IAHS)2013—2022年计划“Panta Rhei—everything flows”的重要主题^[7-8], 变化环境下的水资源问题成为多学科交叉研究的核心内容^[9-10]。

在全球地缘政治经济格局频繁变动与淡水危机双重作用下, 国际河流的水资源变化直接关系到流域内各国家水资源开发利用的竞争关系, 也影响着国家地缘安全^[11-12]。澜沧江-湄公河是发源于中国青海省, 流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南的一条国际河流。变化环境下澜沧江-湄公河流域不同区间径流发生了较为明显的改变, 未来气候变化下流域水文干旱情势也更为严峻^[13-15]。位于中国境内的澜沧江是湄公河的上游, 其出境水量一直是下游流域国家关注的焦点, 科学厘清环境变化对澜沧江出境水文过程的影响, 是解决澜沧江-湄公河流域水事争端、支撑中国跨境河流外交的重要基础工作^[16-17]。

径流变化由多种驱动要素共同影响造成, 归因分析是研究各要素贡献水平的一种方法。宋晓猛等^[18]将归因分析定义为在一定可信度条件下, 通过数学方法量化不同驱动因素对某系统变量演变的相对贡献率, 并可通过某些方式检测出变量的变化过程或趋势。近些年, 水学者在径流变化归因量化方法等方面做了许多有益探索, 总体可划分为4类: ① 分项调查法, 对水文过程的影响因子进行单独调查, 在此基础上进行径

收稿日期: 2023-10-08; 网络出版日期: 2024-01-31

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240131.1028.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(92047301; 52121006)

作者简介: 王乐扬(2000—), 男, 山东成武人, 博士研究生, 主要从事流域生态水文模型、水文水资源等方面的研究。

E-mail: yueyangwang413@163.com

通信作者: 王国庆, E-mail: qgwang@nhri.cn

流还原计算,该方法概念清晰,但人力资源投入大^[19-20];② 统计分析法,该方法对水文气象观测资料要求较高,其获得可靠结论的前提是样本充分,即连续观测年份足够多,一般需要30 a以上的资料,这在一定程度上限制了该方法的应用^[21-22];③ 试验流域法,该方法通过平行试验流域对比分析,直观明了地揭示流域治理对水文过程的影响,然而该方法试验周期长,且很难找到相似的试验流域,且大尺度流域不适用^[23];④ 流域水文模型法,运用水文模型定量分析不同驱动因子的贡献率,简便且具有一定物理基础,应用相对广泛^[24]。Räsänen等^[25]基于1960—2014年的实测资料利用统计分析方法研究了水电站运行调度对澜沧江河川径流的影响,发现水电站运行对径流量及其年内分配均会产生一定的影响;然而,该研究忽略了气候要素变化对径流的影响。Fan等^[26]采用水文模拟方法评估了降水、气温对湄公河上游和怒江流域径流的影响,研究发现降水对这2个流域径流的影响更为明显,特别是汛期降水的影响更为显著。流域水文情势也在一定程度上受到水利工程以及其他人类活动的影响,基于径流和气候要素之间的相互作用研究对人类活动的影响考虑相对欠缺;因此,科学量化解析变化环境下不同驱动要素对年径流及其月尺度径流变化归因亟待加强^[27-28]。

随着全球经济一体化与可持续发展深度融合,人们越发关注国际跨境河流水量分配和管理利用问题^[29-30]。澜沧江-湄公河是东南亚最大的跨境河流,位于中国境内的澜沧江出境径流量变化会在一定程度上影响到中下游的航运、灌溉及其他水资源利用,因此,澜沧江出境水量已成为下游流域国家关注的重点和国际争端的起因^[31]。本文在分析澜沧江流域环境变化的基础上,定量解析气候变化和人类活动对澜沧江流域径流过程的影响,以期为实现澜沧江-湄公河流域跨境水资源利益共享及解决水事争端提供支撑。

1 资料与方法

1.1 流域概况及资料来源

澜沧江位于湄公河上游,发源于青海省唐古拉山,界于94°E—102°E、21°N—34°N,由北向南呈条带状,流经青海省、西藏自治区和云南省,在西双版纳州勐腊县关累镇西南流出中国国境,中国境内主干流总长度为2 130 km,允景洪水文站以上流域面积为141 779 km²。图1给出了澜沧江流域水系及水文气象站点位置示意。

澜沧江流域由北向南跨越13个纬度,气温由北向南递增,纵跨不同的气候带。其中,位于青海南部的源头地区属于高寒气候区,位于西藏的中游上段属于高原温带气候区,中游滇西北区属亚热带,下游滇西南地区丘陵和盆地交错分布,属于亚热带或热带气候。澜沧江流域支流甚多,流域面积大于1 000 km²的支流有41条,较大支流主要分布在上游和下游(图1)。澜沧江河流天然落差大,约为4 583 m,允景洪站多年平均径流量约540亿m³,流域水资源及水能资源均非常丰富。

本文收集整理了允景洪站逐月径流量资料,澜沧江流域内及附近周边17个气象站点气温、降水资料以及12个雨量站点的降水资料,其中气象、水文资料的序列为1961—2020年。由于澜沧江流域面积较大,以0.5°分辨率进行网格划分,采用分布式计算模拟流域水文过

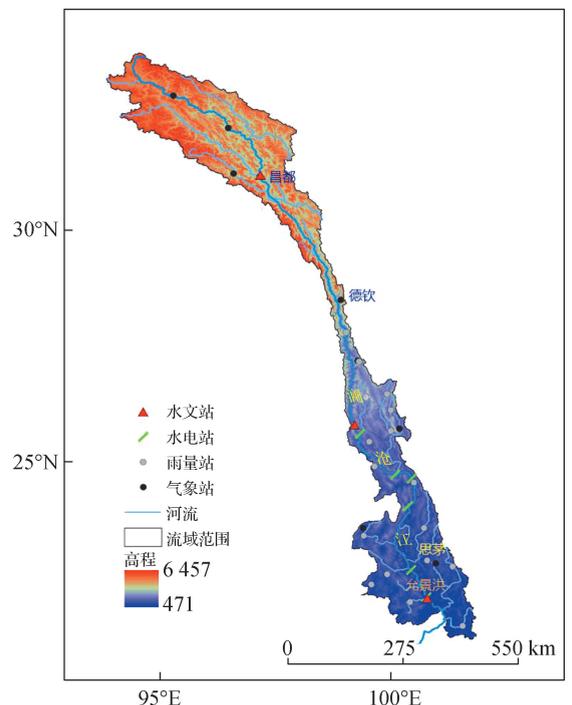


图1 澜沧江流域水系、水文气象站点和重点水电站位置示意

Fig. 1 River system, key reservoirs site and location of hydro-meteorological stations of the Lancang River basin

程;基于气象站点、雨量站点的降水资料,采用线性插值方法将站点数据插值到网格^[32]。从中国科学院资源环境科学与数据中心收集了澜沧江流域土地利用资料,从湄公河委员会官方网站、中国华能澜沧江水电集团网站和开放发展湄公河计划网站收集了澜沧江截止到2020年的已建水电工程资料。

1.2 研究方法

径流变化是气候变化和人类活动两大驱动因子综合作用的结果。基于水文模拟解析不同驱动因子对径流影响包括4个主要步骤^[19,24]:①采用Mann-Kenall方法、有序聚类方法等数理统计方法诊断径流系列的趋势性及突变特征,将径流划分为弱人类活动影响的“天然阶段”和“人类活动影响阶段”,将“天然阶段”作为基准期;②利用天然时期的水文气象资料率定模型参数,验证流域水文模型在研究流域的适应性,只有流域水文模拟对天然径流过程具有较好的模拟效果,才可用于归因量化识别;③采用人类活动影响时期的气象资料驱动率定的流域水文模型,模拟“人类活动影响阶段”的天然径流量过程;④以人类活动影响期间还原的天然径流量与基准时期天然径流量之差作为气候变化对径流的影响量,以人类活动影响期间还原的天然径流量与相应时期的实测径流量之差作为人类活动对于径流的影响量。

Mann-Kendall(M-K)检测方法是一种非参数序列趋势诊断方法^[33-34],通过计算M-K标准化统计量(UFK值)确定序列变化的趋势及其显著性。当统计量为正或负时说明序列呈现增加或减少趋势,当统计量介于给定显著水平 $\alpha=0.05$ 的临界值 ± 1.96 区间内,说明序列为非显著性变化趋势;反之,则变化趋势显著。有序聚类方法是常用的序列突变诊断方法,其原理是以某一时间点(τ)将系列划分为不同系列,最优分割点 τ^* 使得2个系列的离差平方和最小^[34]。

RCCC-WBM模型是由水利部应对气候变化研究中心团队研发并逐步完善的大尺度流域水文模型^[35-36]。该模型考虑了降雨径流、融雪径流和地下径流3种径流,能够较好地模拟高寒、温暖等不同气候区域的水文过程。模型输入包括逐时段降水量、蒸发能力和气温,其中,蒸发能力一般采用E601实测值,也可采用Penman-Monteith等公式进行估算^[37]。针对大尺度流域,模型在对流域进行网格划分和网格产流计算的基础上,采用VIC模型的汇流计算方案进行大尺度流域水文过程模拟^[37]。选用Nash-Sutcliffe模型效率系数(E_{NS})和模拟总量相对误差(E_R)为目标函数进行参数率定,若 E_{NS} 越接近于0,同时 E_R 越接近于1,说明对径流过程的模拟效果越好^[38]。

2 结果与讨论

2.1 澜沧江流域气候及环境变化

2.1.1 土地利用类型变化

基于中国科学院资源环境科学与数据中心1980年、2000年和2015年3期土地利用资料,分析了3个时期澜沧江流域耕地、林地、灌木、草地、水体、未利用地和建设用地的面积及不同土地利用类型的转移变化(图2)。

由图2可以看出:①流域主要土地利用类型为草地、林地和灌木3类;草地面积最大,广泛分布于流域上游,占流域总面积的43%(1980年);林地次之,主要分布于流域中下游地区,占流域总面积的28%(1980年);灌木面积次于林地面积,占流域总面积的14%(1980年)。②草地、林地和未利用地面积变化较大,但其相对变化较小,均不到0.7%;相比而言,水体和建设用地面积相对变化较大,1980—2015年,水体面积减少15%,建设用地面积增加1.1倍,但二者面积变化较小,不到流域总面积的1%。③从不同土地利用类型转变面积来看,耕地、林地、草地和灌木用地转移变化最大,且主要是四者之间相互转化。譬如,1980—2000年,林地多转变为耕地、草地和灌木地,同时,耕地、草地和灌木地也是转变为林地的重要组成部分。总体来看,在过去几十年,澜沧江流域尽管存在不同土地利用类型的转化,但不同土地利用类型面积变化相对较小。

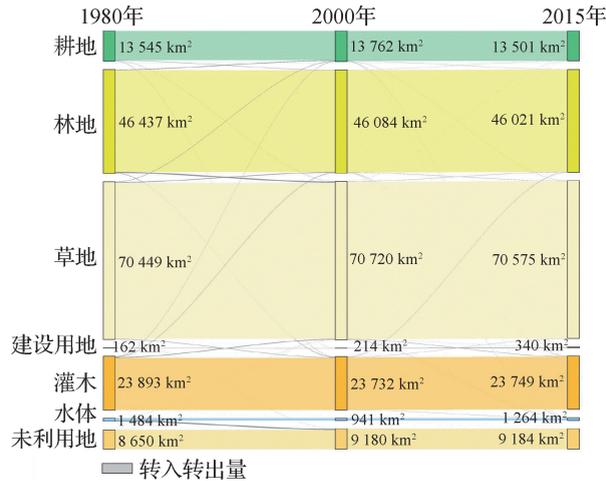


图2 1980年、2000年和2015年3个时期澜沧江流域土地利用类型面积及其转移变化

Fig. 2 Areas of 7 types land use in the Lancang River basin for 1980, 2000 and 2015 and its shift changes

2.1.2 水能资源开发程度变化

澜沧江流域具有十分丰富的水能资源，蕴藏着约3 656万kW的水能，其中干流上约2 545 kW，为中国重点开发的13个水电基地之一。澜沧江流域内已修建有大朝山(2003年投产运行)、景洪(2008年投产运行)、小湾(2009年投产运行)、功果桥(2011年投产运行)、糯扎渡(2012年投产运行)等大型水电站，其中，小湾和糯扎渡调节库容较大^[39]。图3给出了澜沧江截至到2020年已建水电工程的累积库容。可以看出，2008年之前澜沧江处于低程度开发，累积库容约18亿m³，不到年径流量的4%；之后，随着景洪、小湾等水电站工程的建设运行，2008—2013年累积库容增加明显，后期累积库容相对稳定。2020年已建水电站工程库容接近多年平均年径流量，水电工程的径流调节能力显著增强。

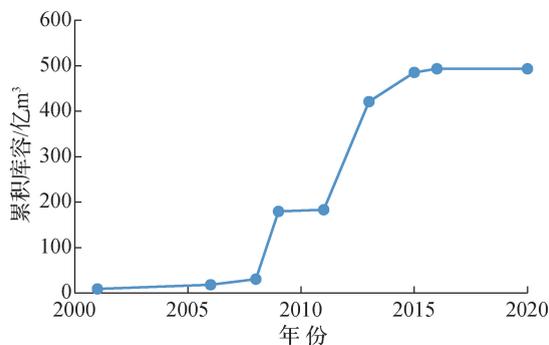


图3 澜沧江流域已建水电工程的累积库容

Fig. 3 Cumulative storage capacity of hydropower projects on the mainstream and tributaries of the Lancang River basin

2.1.3 气温和降水演变

采用M-K检测方法诊断了流域平均气温和降水演变趋势的显著性。图4给出了澜沧江流域1961—2020年气温、降水演变过程及其趋势显著性诊断结果。

澜沧江流域多年平均气温为13.1℃，多年平均年降水量为1 094.2 mm。由图4可以看出，1961—2020年期间，气温呈现显著的上升趋势，线性趋势率为0.27℃/(10 a)。降水以自然波动为主，其中，1975—1982年为枯水段，8 a中只有2个年份降水量略多于多年均值；1993—2002年降水相对较丰，10 a中只有

1994年、1997年降水量略低于多年均值; 2009—2018年又是一个持续少水阶段, 10 a中只有2010年和2016年降水略多于多年均值。趋势显著性诊断结果表明: 各月气温均呈现显著性上升趋势; 不同月份降水量均为非显著性变化趋势, 其中, 1月、3—5月和9月降水量呈现增加趋势, 6—8月降水量为减少趋势, 其余月份降水量基本不存在趋势性变化; 年和汛期降水量均呈现减少趋势, 相比而言, 汛期降水量减少相对明显。

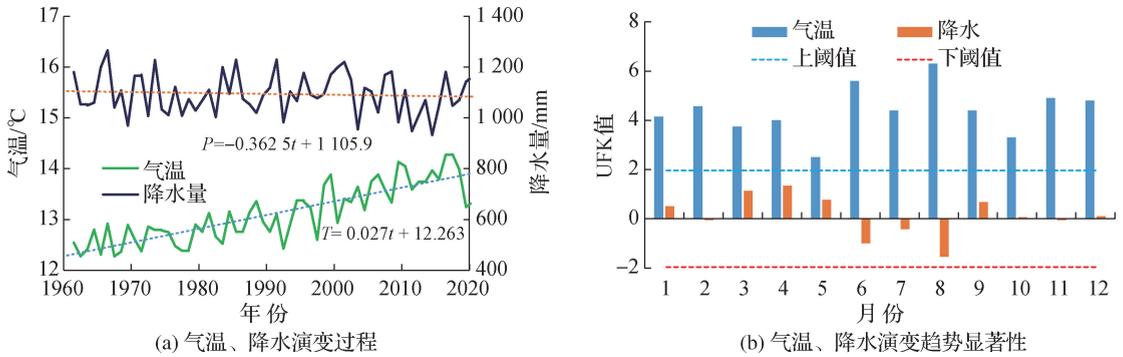


图4 澜沧江流域1961—2020年气温、降水演变过程及趋势显著性

Fig. 4 Historical variation and the trend significance test of temperature and precipitation in the Lancang River basin from 1961 to 2020

澜沧江流域上下游气候差异较大, 降水自南向北具有递减趋势, 下游降水量较大, 部分站点年降水量超过1 800 mm, 上游降水相对偏少, 个别站点降水量不足500 mm; 气温也呈现自南向北递减态势。在澜沧江上、中、下游不同区域选取昌都、德钦、思茅3个典型气象站点, 诊断分析了1961—2020年气温和降水的变化趋势特征(表1)。

表1 澜沧江不同区域典型站点气温、降水演变趋势及其显著性

Table 1 Variation trends test of temperature and precipitation for typical meteorological stations in the upper, middle and lower reaches of the Lancang River basin

区域	站点	气温		降水	
		倾向率/($^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$)	UFK 值	倾向率/($\text{mm}/(10\text{ a})$)	UFK 值
上游	昌都	0.16	3.77	4.84	0.62
中游	德钦	0.44	7.36	-0.73	-0.33
下游	思茅	0.41	7.32	-25.10	-1.51

统计结果表明, 昌都、德钦和思茅3个站多年平均降水量分别为483.2、633.4和1 488.1 mm, 上、中游的昌都站和德钦站年均气温均在10 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 而下游思茅站年均气温约为18.5 $^{\circ}\text{C}$, 远高于中上游的2个站点。由表1可以看出, 1961—2020年3站均呈现显著升温态势, 中、下游的德钦站和思茅站线性升温幅度更大, 均超过0.4 $^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$; 就降水的年代际趋势来看, 上游昌都站呈现非显著性增加趋势, 中、下游的2个代表站降水量呈现非显著性减少趋势, 其中, 下游的思茅站线性递减率更大, 约为-25.10 $\text{mm}/(10\text{ a})$ 。

2.2 变化环境下径流过程变异特征

澜沧江允景洪站多年平均径流深为381.6 mm, 变化环境下实测径流量过程发生一定的变化。图5(a)给出了澜沧江允景洪站1961—2020年实测径流量距平及其累积过程, 采用M-K检测方法诊断了月径流量演变趋势的显著性(图5(b))。

由图5(a)可以看出: 允景洪站实测径流在2000年之前以自然波动为主, 其中, 20世纪60年代水量偏丰, 多数年份高于多年均值; 2000年之后, 径流量相对偏少, 只有2001年、2004年、2007年和2017年4

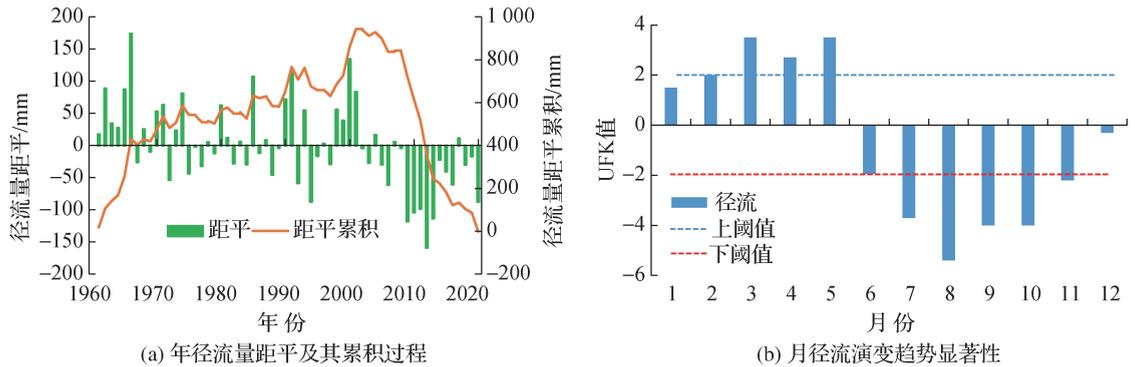


图5 澜沧江允景洪站1961—2020年实测径流量距平及其累积过程和月实测径流量演变趋势显著性

Fig. 5 Measured annual runoff anomaly and its cumulative process as well as trend significance of month runoff for the Yunjinghong station on the Lancang River from 1961 to 2020

个年份径流量高于多年均值，其中2008—2013年实测径流量持续偏少，且偏少幅度较大，接近 -100 mm。图5(b)趋势诊断结果表明：1—5月径流量呈现增加趋势，6—12月径流量呈现减少趋势，其中，只有1月、2月、6月、12月径流量为显著性变化趋势；统计结果表明，1961—2020年期间汛期(6—11月)和年径流量均为显著性减少趋势。

基于聚类分析方法对年径流量突变诊断结果表明，实测径流量在2008年发生了较为明显的突变，结合澜沧江流域内人类活动状况(图3)，将1961—2008年作为人类活动影响相对较小的天然基准期，将2009—2020年作为人类活动影响时期。统计结果表明，2009—2020年实测径流量较基准期偏少21.9%，其中，2009—2013年和2014—2020年期间分别偏少34.1%和13.2%，2009—2013年实测径流偏少较多，这与图5(a)径流量距平给出的结果一致。

根据澜沧江流域降水和径流的年内分布特征，将6—11月和12月至翌年5月分别定义为汛期和非汛期，图6给出了允景洪站2个时期实测径流量较基准期径流量变化的年内分配过程。可以看出，2009—2013年非汛期径流量较基准期变化不大，但2014—2020年期间非汛期径流量较基准期明显偏大；同时，也可发现2个时期汛期径流量均较基准期明显偏小，特别是主汛期7—10月径流偏小幅度较大。

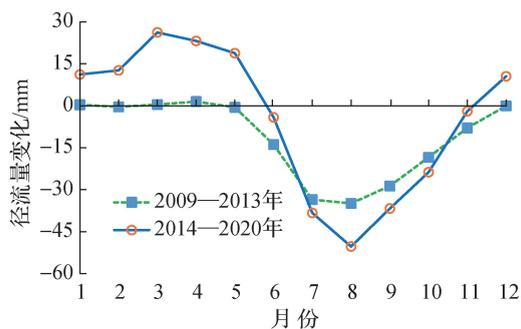


图6 澜沧江允景洪站2009—2013年和2014—2020年实测径流量较基准期径流量变化的年内分配

Fig. 6 Intra-annual distribution of changes in measured runoff of 2009—2013 and 2014—2020 relative to baseline of 1961—2008 for the Yunjinghong station on the Lancang River

2.3 模型参数率定及天然径流过程模拟

利用1961—2008年的逐月气象水文资料率定RCCC-WBM模型参数并验证模型的可靠性。为避免初始状态变量对模拟效果的影响，将1961年作为模型预热期，将1962—1990年作为率定期率定模型参数，将

1991—2008年作为验证期验证模型的可靠性。图7给出了1961—2008年允景洪站实测与模拟径流量年内分配过程。

由图7可以看出, 1961—2008年澜沧江允景洪站实测与模拟月径流量过程拟合良好, 7—8月模拟径流量略微偏大, 10—11月模拟径流量略微偏小。统计结果表明, 年径流量模拟误差为0.7%, 率定期和验证期的 E_{NS} 分别为0.87和0.85, E_R 分别为-3.1%和1.4%, 说明RCCC-WBM模型对允景洪站月径流量过程具有较好的模拟能力。

保持模型参数不变, 利用1961—2020年的实测气象资料驱动RCCC-WBM模型, 模拟天然状态下流域的径流量过程。图8给出了1961—2020年澜沧江允景洪站天然径流量模拟偏差及其累积过程。可以看出, 2008年之前天然径流量模拟偏差正负相间且变幅较小, 多在 ± 10.0 mm之间, 2008年之后模拟值偏大, 个别年份甚至偏大100.0 mm以上。模拟偏差的累积过程在2008年之前围绕0轴线上波动, 2008年之后由于模拟值偏大, 模拟偏差累积过程持续升高, 在2014年之后有所放缓。统计结果表明, 2009—2020年模拟的天然径流量为371.8 mm, 尽管较同期实测径流量偏大, 但仍较1961—2008年偏少6.8%。

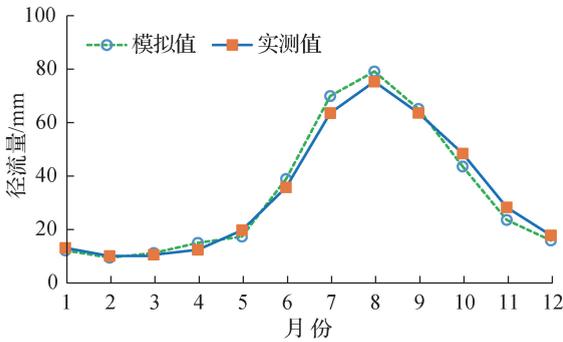


图7 1961—2008年澜沧江允景洪站实测与模拟径流量年内分配过程

Fig. 7 Seasonal distribution of measured and modelled runoff for 1961—2008 at Yunjinghong station on the Lancang River

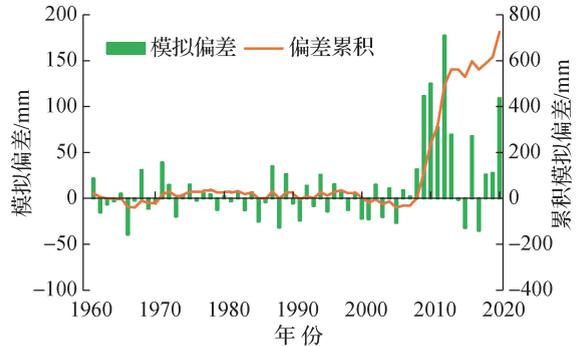


图8 1961—2020年澜沧江允景洪站天然径流量模拟偏差及其累积过程

Fig. 8 Simulated deviations of natural runoff volume and its accumulation process for 1961—2020 at Yunjinghong station on the Lancang River

2.4 环境变化对径流变异的影响

基于实测径流距平演变特征及突变诊断结果和图3分析结果, 以1961—2008年为基准期, 将人类活动影响期分段定义为水库蓄水运行期(2009—2013年)和稳定调度运行期(2014—2020年); 根据实测径流和模拟的天然径流过程分析气候变化和人类活动对径流量的影响(表2)。

表2 气候变化和人类活动对澜沧江允景洪站径流深的影响

Table 2 Impacts of climate change and human activities on runoff change at Yunjinghong station on the Lancang River

时段	实测径流深/mm	模拟径流深/mm	径流变化量/mm	气候变化		人类活动	
				影响量/mm	影响占比/%	影响量/mm	影响占比/%
1961—2008年	399.1						
2009—2013年	262.9	379.2	-136.2	-19.9	14.6	-116.3	85.4
2014—2020年	346.3	366.5	-52.8	-32.6	61.7	-20.2	38.3

由表2可以看出: ①与基准期相比, 2009—2013年和2014—2020年实测径流量分别减少136.2、52.8 mm, 气候变化和人类活动均使得2个影响时期径流量减少; ②2009—2013年期间, 气候变化和人类活动的影响导致径流量分别减少19.9、116.3 mm, 占径流减少总量的14.6%和85.4%, 人类活动是径流减

少的主要原因；③ 2014—2020年期间，气候变化和人类活动的影响导致径流量分别减少32.6、20.2 mm，占该时期径流减少总量的61.7%和38.3%，气候变化是该时期径流减少的主要驱动因素；④ 对比2个影响时期，气候变化对径流的影响量由-19.9 mm变化到-32.6 mm，影响幅度有增大趋势；而人类活动对径流的影响量由-116.3 mm变化到-20.2 mm，影响幅度大幅度减小。

环境变化不仅影响径流量，而且影响径流的年内分配。图9给出了气候变化和人类活动对允景洪站2009—2013年和2014—2020年2个时期径流年内分配的影响。

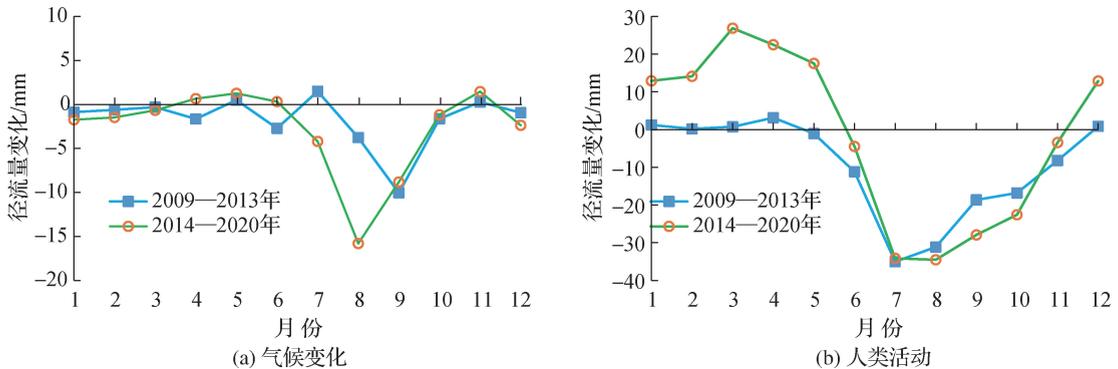


图9 气候变化和人类活动对允景洪站径流年内分配的影响

Fig. 9 Impacts of climate change and human activities on inter-annual runoff distribution at Yunjinghong station

由图9可以看出：① 2009—2013年期间，气候变化导致5月、7月和11月经流略微增加，其他月份径流减少，9月减少幅度最大，约为-10.1 mm。在2014—2020年期间，气候变化因素导致4—6月和11月经流量增加，但增加幅度较小，均不到1.5 mm；气候变化使得其他月份径流减小，相比而言，8月减少幅度最大，约为-15.8 mm，其次为9月和7月，减少幅度分别为-8.8、-4.2 mm。② 水库建设运行调度是澜沧江流域最主要的人类活动；在水库蓄水运行期(2014—2020年)，人类活动使得汛期径流量减少42.2%，非汛期径流量增加6.4%；在水库稳定调度运行期(2014—2020年)，人类活动的影响使得径流量减少44.3%，非汛期径流量增加134.3%。③ 总体来看，气候变化对主汛期的8—9月经流影响幅度较大，而对非汛期月份径流影响幅度较小；水利工程运行调度在蓄水阶段对汛期影响较大，尽管在稳定调度运行阶段对年径流量的影响较小，但削峰增枯的作用明显。

2.5 讨 论

气温升高导致蒸发能力和流域蒸发损失增大，从而导致径流减少；降水是河川径流的主要来源，降水的增减直接影响径流的丰枯。澜沧江流域2009—2013年和2014—2020年气温较1961—2008年分别升高0.97、1.03℃，降水量分别减少11.8、23.5 mm，这是径流减少的原因之一，其中，后一个时期气温升高及降水减少幅度均大于前一个时期，这是气候变化影响量幅度增大的重要原因。

下垫面变化、工农业发展及水电工程开发是澜沧江流域主要的人类活动结果。前述土地利用分析结果表明，澜沧江流域过去40 a尽管土地利用类型发生了变化，但变化较小；基于本研究收集到的用水资料统计得到，2010年和2020年澜沧江流域用水总量分别为27.6、26.7亿 m^3 ，约占允景洪站年径流量的5%，流域内用水量总体变化不大，并且占径流总量的比率较低，因此，土地利用变化和用水量变化不会对流域水文过程产生较大的影响。然而，澜沧江干流修建了一系列水电工程，特别是2008—2014年期间，已建水库的累积库容大幅度增加，而实测径流也在2008年前后发生突变，因此，水利工程建设与运行是流域的主要人类活动，且与径流变化密切相关。

图10给出了澜沧江流域径流突变前后3个时段的降水—径流关系，可以看出：基准期1961—2008年的降水—径流关系点群最高，2009—2013年的点群最低，2014—2020年的点群大多位于基准期点群之中，但

位置相对略低。由此说明,同样降水条件下基准期的径流量最大,其次为2014—2020年,2009—2013年的径流量最小。结合图3不难推断,2009—2013年期间是澜沧江水库蓄水运行期,该时期水库蓄水调度对径流量的影响相对较大,其影响量约占该时期天然径流量的30%;2014—2020年是水库稳定调度期,水库稳定调度对径流量的影响相对较小,影响量约占该时期天然径流量的5.3%。

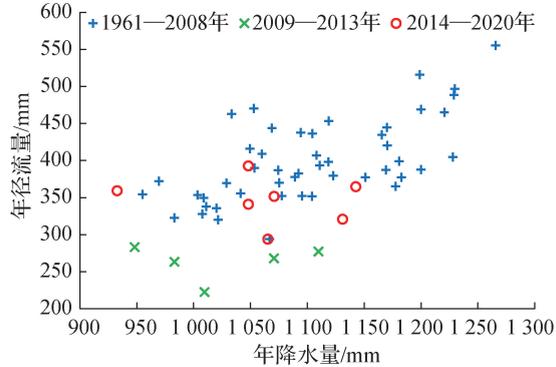


图10 澜沧江流域不同时期降水—径流关系

Fig. 10 Relationships between precipitation and runoff in different periods in the Lancang River basin

湄公河流域雨热同期,降水主要集中在汛期6—10月,非汛期1—5月降水相对偏少,而非汛期正是作物生长季节,需水量大^[13-14]。基于本研究收集的气象资料统计得到,1961—2008年,70%以上的径流量集中在汛期6—10月,非汛期径流量不到年径流量的30%;而在2009—2013年和2014—2020年,由于水库的调节作用,非汛期径流量占比增加至年径流量的40.3%和61.6%。澜沧江干流水库的修建和运行尽管对径流量有一定的影响,但其对径流的调节作用对于保障湄公河中下游的农业灌溉起到至关重要的作用。

3 结 论

基于澜沧江流域水文气象、水利工程、工农业用水和下垫面等资料,分析了流域气候与径流的演变特征;采用流域水文模拟与数理统计分析相结合的途径,量化了气候要素和人类活动对允景洪站径流变化的影响。主要结论如下:

(1) 1961—2020年,澜沧江流域气温呈现显著上升趋势,降水以丰枯交替波动为主;变化环境影响下,允景洪站实测年和汛期径流量出现显著减少趋势,1—5月径流量出现增加趋势,6—12月径流量出现减少趋势;实测年径流量在2008年发生突变,2009—2020年实测径流量较1961—2008年径流量减少21.9%。

(2) RCCC-WBM模型对允景洪站天然径流量具有较好的模拟效果,率定期(1961—1990年)和验证期(1991—2008年)的Nash-Sutcliffe模型效率系数分别为0.87和0.85,模拟相对误差分别为-3.1%和1.4%,可见该模型可以用于人类活动影响时期天然径流量的模拟还原。

(3) 人类活动是2009—2013年径流减少的主要原因,其贡献占比约为85.4%;气候变化是2014—2020年径流减少的主要驱动因素,其贡献占比约为61.7%;气候变化对径流的影响幅度有增大趋势,人类活动对2个阶段径流的影响幅度显著减小,由-116.3 mm(2009—2013年)变化到-20.2 mm(2014—2020年)。

(4) 以水电工程为主的人类活动对允景洪站径流量的影响主要体现为增枯削峰作用,使得非汛期1—5月和12月径流增加,6—11月径流减少。这一方面增大了湄公河中下游旱季灌溉用水量,另一方面通过拦蓄汛期径流,减轻了湄公河中下游防汛抗洪压力。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

- [2] KIESEL J, GERICKE A, RATHJENS H, et al. Climate change impacts on ecologically relevant hydrological indicators in three catchments in three European ecoregions[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 404-416.
- [3] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 153-161. (ZHANG J Y, WANG G Q, JIN J L, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))
- [4] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [5] 李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 等. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2005-2020. (LI Y Z, LIU C M, LIU X M, et al. Impact of the grain for green project on the land use/cover change in the Middle Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12): 2005-2020. (in Chinese))
- [6] 王乐扬, 李清洲, 王金星, 等. 变化环境下近 60 年来中国北方江河实测径流量及其年内分配变化特征[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 36-42. (WANG Y Y, LI Q Z, WANG J X, et al. The variation characteristics of recorded runoff and its annual distribution in North China during the recent 60 years in the context of environment change[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2020, 41(2): 36-42. (in Chinese))
- [7] MONTANARI A, YOUNG G, SAVENIJE H H G, et al. "Panta Rhei: everything flows": change in hydrology and society: the IAHS scientific decade 2013—2022[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(6): 1256-1275.
- [8] BLÖSCHL G, BIERKENS M, CHAMBEL A, et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH): a community perspective[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2019, 64: 1141-1158.
- [9] EVARISTO J, MCDONNELL J J. Global analysis of streamflow response to forest management[J]. *Nature*, 2019, 570(7762): 455-461.
- [10] POKHREL Y, FELFELANI F, SATOH Y, et al. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 226-233.
- [11] 钟苏娟, 毛熙彦, 黄贤金. 地缘安全视角下的中国国际河流水资源开发利用[J]. *世界地理研究*, 2022, 31(3): 466-477. (ZHONG S J, MAO X Y, HUANG X J. Water resources exploitation and utilization of international rivers in China from the perspective of geo-security[J]. *World Regional Studies*, 2022, 31(3): 466-477. (in Chinese))
- [12] 许紫月, 马凯, 袁旭, 等. 跨境流域水-能源-粮食关联关系研究进展与展望[J]. *地理科学*, 2023, 43(8): 1442-1450. (XU Z Y, MA K, YUAN X, et al. Progress and prospect of water-energy-food nexus in the transboundary river basins[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(8): 1442-1450. (in Chinese))
- [13] 李杨, 王婕, 唐雄朋, 等. 变化环境下澜沧江-湄公河流域径流演变及年内分配特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 141-148. (LI Y, WANG J, TANG X P, et al. Characteristics of runoff variation and seasonal pattern of Lancang-Mekong River in the context of environment change[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 141-148. (in Chinese))
- [14] 李昱, 席佳, 张弛, 等. 气候变化对澜沧流域气象水文干旱时空特性的影响[J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 508-519. (LI Y, XI J, ZHANG C, et al. Impact of climate change on the spatio-temporal characteristics of meteorological and hydrological drought over the Lancang-Mekong River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 508-519. (in Chinese))
- [15] 谈晓珊, 王婕, 唐雄朋, 等. 1960—2012 年澜沧江-湄公河流域气候变化趋势及不同区间的径流响应[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(4): 1-8. (TAN X S, WANG J, TANG X P, et al. Variation trends of climate change and hydrological responses of individual regions in Lancang-Mekong River basin from 1960—2012[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(4): 1-8. (in Chinese))
- [16] 孙周亮, 刘艳丽, 刘冀, 等. 基于博弈论组合赋权法的澜沧江-湄公河水量分配[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(1): 1-5. (SUN Z L, LIU Y L, LIU J, et al. Water allocation of Lancang-Mekong River based on game theory combination weighting method[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(1): 1-5. (in Chinese))
- [17] 施国良, 薛航. 基于 XGBoost 算法的跨境河流水资源争端影响因素分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(6): 137-144. (SHI G L, XUE H. XGBoost-based analysis of factors affecting water resources disputes in transboundary rivers[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6): 137-144. (in Chinese))
- [18] 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 X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J].

- Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese)
- [19] 张建业, 王国庆. 河川径流变化及归因定量识别[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (ZHANG J Y, WANG G Q. Quantitative identification of river runoff change and attribution[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [20] 刘晓燕, 王富贵, 杨胜天, 等. 黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 793-800. (LIU X Y, WANG F G, YANG S T, et al. Sediment reduction effect of level terrace in the hilly-gully region in the Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 793-800. (in Chinese))
- [21] 谢平, 吴林倩, 吴子怡, 等. 西南诸河地表水资源演变的基因图谱[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 416-428. (XIE P, WU L Q, WU Z Y, et al. Gene map of water resources evolution of Southwest rivers in China[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 416-428. (in Chinese))
- [22] DEY P, MISHRA A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: a review of methodologies and critical assumptions[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 278-290.
- [23] BOSCH J M, HEWLETT J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology, 1982, 55(1/2/3/4): 3-23.
- [24] 王国庆, 张建业, 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 G Q, ZHANG J Y, GUAN X X, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [25] RÄSÄNEN T A, SOMETH P, LAURI H, et al. Observed river discharge changes due to hydropower operations in the Upper Mekong basin[J]. Journal of Hydrology, 2017, 545: 28-41.
- [26] FAN H, HE D M. Temperature and precipitation variability and its effects on streamflow in the upstream regions of the Lancang-Mekong and Nu-Salween rivers[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(5): 2248-2263.
- [27] WU J W, MIAO C Y, WANG Y M, et al. Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods[J]. Journal of Hydrology, 2017, 545: 263-275.
- [28] HAN Z Y, LONG D, FANG Y, et al. Impacts of climate change and human activities on the flow regime of the dammed Lancang River in Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 96-105.
- [29] 刘宗瑞, 周海炜, 赵又霖. 国际河流跨境洪灾防治的合作特征及演进趋势: 基于防洪合作协议的内容分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(12): 78-84. (LIU Z R, ZHOU H W, ZHAO Y L. Cooperation characters and evolution trends of international rivers' cross-border flood prevention based on the content analysis of flood prevention cooperation agreements[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(12): 78-84. (in Chinese))
- [30] 何大明, 刘恒, 冯彦, 等. 全球变化下跨境水资源理论与方法研究展望[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 928-934. (HE D M, LIU H, FENG Y, et al. Perspective on theories and methods study of transboundary water resources under the global change[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 928-934. (in Chinese))
- [31] 王涛, 刘承良, 杜德斌. 1948—2018年国际河流跨境水冲突的时空演化规律[J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1792-1809. (WANG T, LIU C L, DU D B. Spatio-temporal dynamics of international freshwater conflict events and relations from 1948 to 2018[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1792-1809. (in Chinese))
- [32] 张玮玮, 张眉, 吴杨, 等. 复杂地形下浙江夏季气候要素空间插值方法评价[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 674-682. (ZHANG W W, ZHANG M, WU Y, et al. Evaluation of spatial interpolation method about climatic elements in summer in Zhejiang Province under complex topography[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(4): 674-682. (in Chinese))
- [33] 管晓祥, 张建业, 鞠琴, 等. 多种方法在水文关键要素一致性检验中的比较[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 51-56. (GUAN X X, ZHANG J Y, JU Q, et al. Comparison of consistency testing for key hydrological elements by using multiple statistical methods[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 51-56. (in Chinese))
- [34] 吴雷, 许有鹏, 王强, 等. 长三角地区夏季降水结构演变及其非平稳性[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 730-742. (WU L, XU Y P, WANG Q, et al. Evolution and non-stationary characteristics of summer precipitation structure over the Yangtze River Delta[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 730-742. (in Chinese))
- [35] 赵建华, 王国庆, 张建业, 等. RCCC-WBM水量平衡模型在北方典型流域的适用性研究[J]. 水文, 2018, 38(2): 25-29, 14. (ZHAO J H, WANG G Q, ZHANG J Y, et al. Suitability of RCCC-WBM model to typical river catchments in North China[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(2): 25-29, 14. (in Chinese))

- [36] WANG G Q, YANG Q L, BAO Z X. RCCC-WBM model and its application for impact assessment of climate change on water resource variability[M]. Macao: Unique Network Printing Fty Ltd, 2022.
- [37] 鞠琴, 高慧滨, 王国庆, 等. 基于能量平衡原理的潜在蒸散发模型构建[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 794-804. (JU Q, GAO H B, WANG G Q, et al. Modeling potential evapotranspiration based on energy balance[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 794-804. (in Chinese))
- [38] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part: I: a discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [39] 陆颖, 何大明, 何开为, 等. 澜沧江-湄公河水电站单位发电耗水量分析计算[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 415-423. (LU Y, HE D M, HE K W, et al. Analysis and calculation of water consumption of hydropower plants in Lancang-Mekong River basin[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 415-423. (in Chinese))

Impact of environmental changes on variability of outlet hydrological process of the Lancang River basin*

WANG Yueyang^{1,2}, ZHANG Jianyun^{2,3}, NING Zhongrui^{2,4}, JIA Yufan^{2,4}, SUN Gaoxia^{3,5}, WANG Guoqing^{3,5}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 3. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Environment change alters hydrological rhythms and affects utilization of water resources for a river basin. The Lancang-Mekong River is a transboundary river in Southeast Asia originated in the Southwestern China. It is of significance to scientifically quantifying runoff change attribution of the Lancang River for supporting water benefits share between countries which the Lancang-Mekong River runs across. Based on the recorded runoff data series from 1961 to 2020 gauged at the Yunjinghong hydrometric station on the Lancang River, the variability characteristics of runoff series and the impact of climate change and human activities on runoff change as well as its seasonal distribution were investigated by using statistical methods and hydrological simulation methods. The results show that: ① The measured annual runoff at Yunjinghong station showed a significant decrease trend from 1961 to 2020, with an increase in runoff during the period from January to May and a decrease in runoff in period from June to December. The abrupt change of the measured annual runoff series was occurred in 2008. ② The RCCC-WBM model performs well for monthly natural discharge simulation in the baseline period of 1961—2008 with relative error of less than 1.0%. The simulated natural annual runoff in the human-disturbance period of 2009—2020 is about 371.8 mm, which is 6.8% less than that in baseline period. The reduction is induced by climate change. ③ Reservoirs construction and operation is the utmost human activity in the Lancang River. Human activities are the main reason of runoff decrease in the reservoir impoundment period of 2009—2013, while climate change is principal driver of runoff reduction in the reservoir operation period of 2014—2020, which contribution is about 61.7% of total runoff reduction. ④ The reservoirs operation makes runoff decrease by 44.3% in flood season from June to November and increase by 134.3% in dry season from December to May for period of 2014—2020. The regulation function of reservoirs on the Lancang River for decreasing flood discharge and increasing low flow has been guaranteeing security of water supply and flood control for the middle and lower reaches of the Mekong River.

Key words: climate change; human activities; runoff; RCCC-WBM model; attribution analysis on runoff change; Lancang River basin

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 92047301; No. 52121006).