

变化环境下澜沧江—湄公河流域径流演变及 年内分配特征

李 杨¹, 王 婕^{2,3}, 唐雄朋^{2,3}, 罗 贤⁴, 谈晓珊⁵, 王国庆^{2,3,6}

(1.内蒙古自治区水资源与水权收储中心, 呼和浩特 010020;

2.南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;

3.水利部 应对气候变化研究中心, 南京 210029; 4.云南大学 国际河流与生态安全研究院,

昆明 650500; 5.水利部 南京水利水文自动化研究所, 南京 210012; 6.长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098)

摘 要:澜沧江—湄公河(简称:澜湄流域)是亚洲重要的国际河流,分析径流演变特征是跨境流域国进行水资源开发利用的重要基础工作。基于澜沧江—湄公河干流 8 个水文站 1960—2012 年的实测径流资料,在进行区间划分及区间径流量计算的基础上,采用 Mann-kendall 趋势检验及有序聚类突变诊断方法分析了径流时空演变特征。结果表明:(1)旧州和穆达汉站实测径流量呈现非显著性增加趋势,其余 6 个水文站实测年径流量呈现减少趋势,其中允景洪站径流减少显著;呈现增加或减少趋势的区间径流量各占一半。(2)站点及区间径流量均存在有突变特征,最早的突变发生在 20 世纪 60 年代,最晚的突变年份发生在 2008 年;并且区间径流量和站点径流量在 20 世纪 90 年代及其以后的时期发生突变的占比明显高于前期。(3)环境变化特别是水电开发对允景洪—万象区间干流水文站径流年内分配的影响较为明显,1990—2012 年期间主汛期流量较 1960—1989 年期间流量减小,但后期非汛期流量较前期略有增大,说明以水电开发为主的环境变化对该区间站点径流的影响主要体现为削峰补枯,该影响在一定程度上减轻了澜沧江—湄公河的防洪压力。

关键词:澜沧江—湄公河流域;径流量;演变趋势;年内分配;国际跨境河流

中图分类号:TV121.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0141-08

Characteristics of Runoff Variation and Seasonal Pattern of Lancang-Mekong River in the Context of Environment Change

LI Yang¹, WANG Jie^{2,3}, TANG Xiongpeng^{2,3},

LUO Xian⁴, TAN Xiaoshan⁵, WANG Guoqing^{2,3,6}

(1.Administration Center for Water Resources and Water Right of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhehot 010020, China; 2.State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3.Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4.Institute of International River and Eco-security, Yunan University, Kunming 650500, China; 5.Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Nanjing 210012, China; 6.Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Lancang-Mekong River (abbreviated as LM River) is an important trans-boundary river in Asia. It is of significance to investigate characteristics of runoff variation for supporting sustainable water resources utilization between riparian countries of the LM River Basin. Based on recorded runoff at the eight hydrometric stations on the LM River with time series span of 1960—2012 and segment of sub-regions, the variation trends of annual regional runoff and seasonal patterns of site runoff were analyzed by using Mann-Kendall test and cluster analysis methods. The results show that: (1) the recorded runoff at Jiuzhou and Mukdahan stations presented an increasing trend during the period 1960—2012 while that gauged at the other

收稿日期:2020-03-29

修回日期:2020-06-27

资助项目:国家自然科学基金项目(92047301);国家“十三五”重点研发计划专项课题(2016YFA0601501,2016YFA0601601)

第一作者:李杨(1988—),女,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,工程师,主要从事气候变化、水资源管理等方面的研究。E-mail:363852209@qq.com

通信作者:王国庆(1971—),男,山东成武人,博士,教授级高工,主要从事气候变化、水文水资源、流域水文模型等方面的研究。E-mail: gqwang@nhri.cn

six hydrometric stations exhibited a decreasing trend with a significant decrease occurring at the Yunjinghong station; half of the eight regional runoff tended to decrease with a significant decrease occurring at the region from Jiuzhou to Yunjinghong while the other four regional runoff had increasing trends with significant runoff increase occurring in two regions of region from Cangdu to Jiuzhou and region from Vientiane to Mukdahan; (2) both site runoff and regional runoff were detectable in abrupt changes with the earliest abrupt change occurring in the 1960s and the latest occurring in 2008; It was also found that the number of abrupt changes in 1990—2012 was more than that in the previous period 1960—1989; (3) environment changes, particularly hydropower development in the upper reaches of the LM River basin exerted a certain impact of seasonal pattern of stream runoff gauged from Yunjinghong to Vientiane station; discharges in flood season of 1990—2012 were commonly lower than those of 1960—1989 while discharges in dry season of the later period were higher than those in the earlier period of 1960—1989, which could effectively reduce flood control pressure.

Keywords: Lancang-Mekong River basin; runoff; variation trend; seasonal pattern; international trans-boundary river

近半个世纪以来,由于全球气候变化和人类活动的影响,全球乃至区域的河川径流普遍发生一定的变化,并且大部分干旱脆弱区径流变化显著^[1-2]。河川径流作为主要的地表水资源,其变化特征直接影响着水资源管理及社会经济的可持续发展^[3-4],对于跨境河流来说,河川径流的变化甚至影响到地区或国家之间的水资源分配或战争^[5-6]。因此,研究河川径流演变特征对流域水资源高效利用、科学配置等方面均具有重要意义^[7]。

变化环境下流域水文响应是国际水文科学协会(International Association of Hydrological Sciences, IAHS)新一轮十年计划(Panta Rhei—Everything Flows)的核心主题^[8],一直是国内外水文学者及流域管理部门关注的重要内容^[9-13]。鲍振鑫等利用Mann-Kendall方法分析了1956—2016年期间黄河流域径流的演变规律,发现除源头区年径流变化不显著以外,黄河流域其余地区径流呈现出显著的下降趋势^[11];黄河最大支流渭河流域自20世纪70年代以来的大规模水土保持措施是中游径流减少的主要原因^[12]。肖紫薇等采用线性倾向估计法、Mann-Kendall非参数检验法及滑动T检验等多种数理统计方法相结合的途径,研究了长江流域1954—2008年的径流演变规律,发现径流年内分配不均匀性存在较为明显的时间变化和空间变化^[13],大型水利工程运行调度气候因素是径流季节变化的重要原因之一^[14]。刘静等对塔里木河等中国西部流域的研究结果表明,阿克苏河和叶尔羌河径流量增长趋势明显,和田河径流呈现轻微增长趋势^[15]。目前已有研究表明,Mann-Kendall非参数检验法是径流演变最为常用和有效的分析方法;河川径流对气候变化响应敏感,强烈人类活动对水文节律影响显著,变化环境下河川径流演变对水资源利用提出新的挑战^[16-17]。

澜沧江—湄公河是一条贯穿东南亚的重要跨国河流,受不同气候带和季风影响,在旱季及雨季的流量差异极大,其径流量对沿岸国家在农业灌溉、水电、渔业和生态等方面有显著影响^[18-20]。孙周亮等对澜湄流域干流径流的演变特征分析认为,干流实测径流量呈现丰枯交替的演变态势^[21]。王若兰对澜沧江—湄公河水资源竞争利用情况进行了分析,认为未来澜湄流域国水资源需求将更加多元化和复杂化,变化环境下水资源利用冲突可能会进一步加剧^[5]。目前对澜湄流域径流变化的研究多集中在干流水文站径流特性的分析^[5,18-21],而区间径流的演变趋势、变异特征及年内分配变化对水资源利用及下游航运等方面具有更为直接的影响。基于澜沧江—湄公河流域8个干流水文站1960—2012年的实测径流资料,本文重点分析区间径流量演变趋势和变异特征,以及变化环境特别是水电开发下不同阶段实测径流季节分配的变化,以期为澜湄流域水资源开发利用和水电开发决策提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 流域概况及资料来源

澜沧江—湄公河地处 94° — 107° E和 10° — 34° N,流域面积81.1万 km^2 ,是东南亚地区最大的国际河流。该河发源于青藏高原唐古拉山北麓,自西北向东南流经中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南6个国家,干流全长4 880 km,是世界第9长河。湄公河在中国的部分称为澜沧江,流域面积16.5万 km^2 ,约占全流域的20%。流出中国国境以后称湄公河,流域包括了几乎整个老挝以及柬埔寨、泰国的大部分地区。澜沧江—湄公河流域上窄下宽,支流众多;大于5 000 km^2 的支流有22条,主要集中在中下游地区。

河流上游落差较大,水电资源丰富;下游地势相对平坦,洪涝灾害突出。流域 5—9 月受西南季风的影响,气候炎热潮湿;11 月至次年 3 月受东北季风影响,气候干燥少雨。收集整理了湄公河干流昌都、旧州、允景洪、清盛、琅勃拉邦、万象、穆达汉和上丁站共 8 个水文站 1960—2012 年的实测径流量资料,表 1 给出

表 1 澜沧江—湄公河流域干流水文站基本信息

水文站名	昌都	旧州	允景洪	清盛	琅勃拉邦	万象	穆达汉	上丁
所属国家	中国	中国	中国	泰国	老挝	老挝	泰国	柬埔寨
流域面积/km ²	53800	88051	141779	189000	268000	299000	391000	635000
年径流量/10 ⁸ m ³	150	305	548	842	1216	1396	2478	4076

1.2 研究方法

1.2.1 澜沧江—湄公河流域区划及区间径流量计算
为分析径流量的空间变化,根据水文站点将澜沧江—湄公河流域上丁站以上划分为 8 个区域,分别为:(1) 一区:昌都以上,(2) 二区:昌都—旧州,(3) 三区:旧州—允景洪,(4) 四区:允景洪—清盛,(5) 五区:清盛—琅勃拉邦,(6) 六区:琅勃拉邦—万象,(7) 七区:万象—穆达汉,(8) 八区:穆达汉—上丁。

上述 8 个区间的河长距离多在 700 km 之内,在年尺度区间径流量计算上可以不考虑区间汇流过程,因此,区间年径流量可根据下式计算:

$$W_{\text{区}}=W_{\text{上}}-W_{\text{下}} \tag{1}$$

式中: $W_{\text{区}}$ 为区间年径流量; $W_{\text{上}}$ 和 $W_{\text{下}}$ 分别为区间上下站年径流量。

1.2.2 水文序列趋势与突变诊断方法 Mann-Kendall 法是一种常用于水文、气象系列变化趋势诊断的分析方法。该方法为通过非正态分布数据系列计算统计量 Z_s ($M-K$ 值),当 $Z_s<0$ 时,为递减趋势,当 $Z_s>0$ 时,系列为递增趋势。若统计量 Z_s 不满足

了水文站的基本信息。澜湄流域水资源丰富,多年平均径流量 4 750 亿 m³,居东南亚主要江河首位。上丁站多年平均年径流量 4 076 亿 m³,占流域径流量的 86%,该站径流量的变化基本上代表了整个流域的水资源丰枯情势。澜沧江允景洪站多年平均径流量 548 亿 m³,约占下游上丁站年径流量的 13.4%。

$-Z_{1-\alpha/2}\leq Z\leq Z_{1-\alpha/2}$ (α 为给定的显著水平)时,即表明序列趋势显著,反之,则趋势不显著。

有序聚类分析法是广泛应用于水文、气象等序列变异性诊断的数理统计方法,该方法的原理是优化寻找最佳分割点,使同类之间的离差平方和较小,而异类之间的离差平方和较大;总离差平方和计算如下:

$$S_n(\tau)=\sum_{i=1}^{\tau}(X_i-\overline{X}_{\tau})^2+\sum_{i=\tau+1}^n(X_i-\overline{X}_{n-\tau})^2 \tag{2}$$

式中: \overline{x}_{τ} 、 $\overline{x}_{n-\tau}$ 分别为 τ 前后两部分的均值

当满足 $S=\text{Min}_{2\leq \tau\leq n-1}[S_n(\tau)]$ 时, τ 为最优二分割点,可推断为最可能的突变点。

2 结果与分析

2.1 1960—2012 年实测年径流量演变趋势

采用 Mann-Kendall 趋势检验法诊断了 8 个水文站及区间实测年径流量的演变趋势(表 2),由于一区为源头区,区间径流量即为昌都站实测径流量,图 1 给出了 8 个区间 1960—2012 年径流量距平百分率过程。

表 2 澜沧江—湄公河流域区间及站点 1960—2012 年实测年流量趋势诊断

区间	一区	二区	三区	四区	五区	六区	七区	八区
M-K 值	-0.38	2.20*	-3.10*	0.43	-1.24	0.23	2.53*	-1.63
倾向率(m ³ ·s ⁻¹ ·a ⁻¹)	-0.77	2.00	-7.92	1.53	-5.72	1.85	24.13	-20.92
水文站	昌都	旧州	允景洪	清盛	琅勃拉邦	万象	穆达汉	上丁
M-K 值	-0.38	1.14	-2.61*	-1.27	-1.87	-1.64	0.91	-0.51
倾向率(m ³ ·s ⁻¹ ·a ⁻¹)	-0.77	1.23	-6.69	-5.16	-10.88	-9.47	14.66	-6.26

注:*表示超过置信水平 0.05 的显著性检验。

由表 2 可以看出:(1) 旧州站和穆达汉站实测径流量为非显著性增加趋势,平均线性倾向率分别为 1.23、14.66 m³/(s·a);其余 6 个水文站的实测年径流量均呈现减少趋势,其中,允景洪站减少趋势显著,平均线性递减率为 -6.69 m³/(s·a);(2) 在区间径流量的变化方面,一区、三区、五区和八区年径流量呈现减少趋势,其中,三区(旧州—允景洪)径流量减少趋势显著,平均线性递减率为 -7.92 m³/(s·a);

其余 4 个区间径流量为增加趋势,二区和七区年径流量为显著性增加,线性增加率分别为 2.00、24.13 m³/(s·a);(3) 径流量的倾向率变化与站点或区间径流量的大小和径流变化趋势的显著性都有很大的关系;一般来说,径流量较大的站点或区间,其线性倾向率一般也会较大;譬如,尽管允景洪站实测径流量显著减小,琅勃拉邦和万象站为非显著性减小,但琅勃拉邦和万象站径流量的线性倾向率高于允景洪站。

(4) 区间径流量汇入下游站点,势必对下游站点径流量的变化有一定影响,有时会产生非常显著的影响。如昌都站径流量呈现减少趋势,由于二区径流量的显著增多,导致下游旧州站实测径流量呈现增加趋势。(5) 相比而言,旧州、允景洪、穆达汉和上丁站径流量变化主要受该站的上游区间来水影响明显;而清盛、万象站径流量的变化受上游区间的入流站点的影响明显。

由图 1 可以看出:(1) 一区(昌都站以上)最大和最小径流量均发生在 1980 年之前,在 20 世纪 60 年代水量相对偏丰,70 年代相对偏枯;实测径流量以自然波动为主,变化幅度有减小趋势;六区(琅勃拉邦—万象)径流

量变化特征与一区相反,极值流量出现在 2000 年之后,变化幅度具有增大趋势。(2) 四区(允景洪—清盛)和七区(万象—穆达汉)径流量演变态势类似,均为先减小后增加的趋势,这两个区间在 20 世纪 70、80 年代为一个近 20 a 的相对枯水期。(3) 三区(旧州—允景洪)和八区(穆达汉—上丁)径流量在 2000 年之前均为自然波动,21 世纪以来出现明显的减少态势。(4) 二区(昌都—旧州)径流量变化兼并具有二区和四区径流的演变特征,区间径流量在 20 世纪 80 年代中期之前具有减少趋势,随后上升趋势明显,在 2000 年前后达到峰值然后下降。而五区(清盛—琅勃拉邦)径流量以自然波动为主,最初和最后的两个十年径流量均相对偏低。

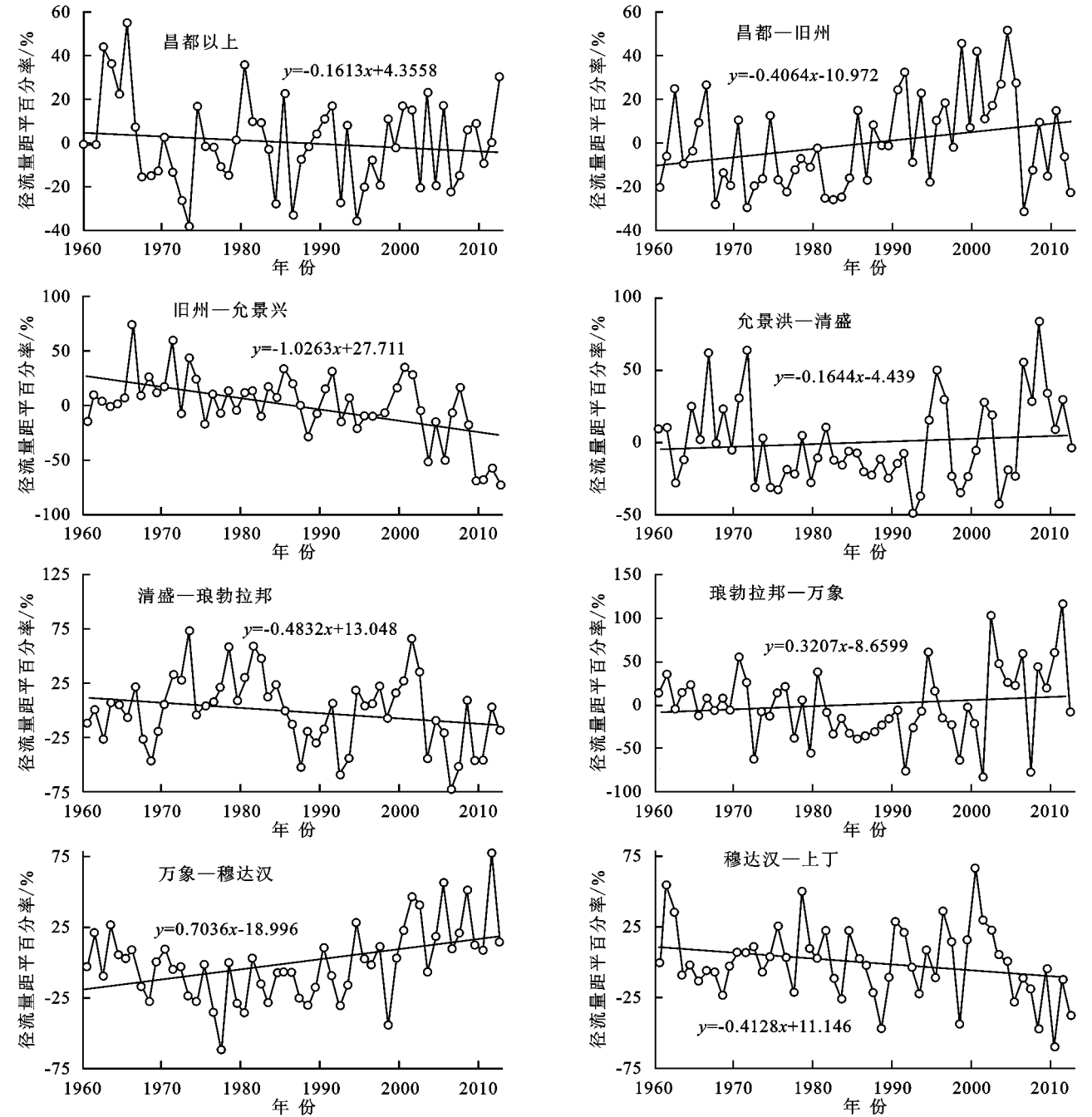


图 1 1960—2012 年澜沧江—湄公河区间年径流量距平过程

图 2 统计给出了湄公河 8 个区间在 1960—2012 年期间各个年代的年径流距平百分率及其多元趋势过程。可以看出:(1) 有 4 个区间径流量年代际变化趋势总体一致,分别为昌都以上、允景洪—清盛、琅勃拉邦—万象和万象—穆达汉区间,均表现为先减少后增加的趋势。(2) 昌都—旧州和清盛—琅勃拉邦区间径流量年代际变化趋势总体相反,昌都—旧州

在 1990s 和 2000—2012 年径流量较多年均值分别增加 13.2% 和 8.7%,而清盛—琅勃拉邦区间径流量在这两个时期较多年均值分别减少 4.9% 和 12.2%。(3) 穆达汉—上丁区间径流量年代际变化具有明显的丰枯交替特征,而旧州—允景洪区间径流量则出现较为明显的减少趋势,该区间 2000—2012 年径流量较多年均值偏少 25.2%。

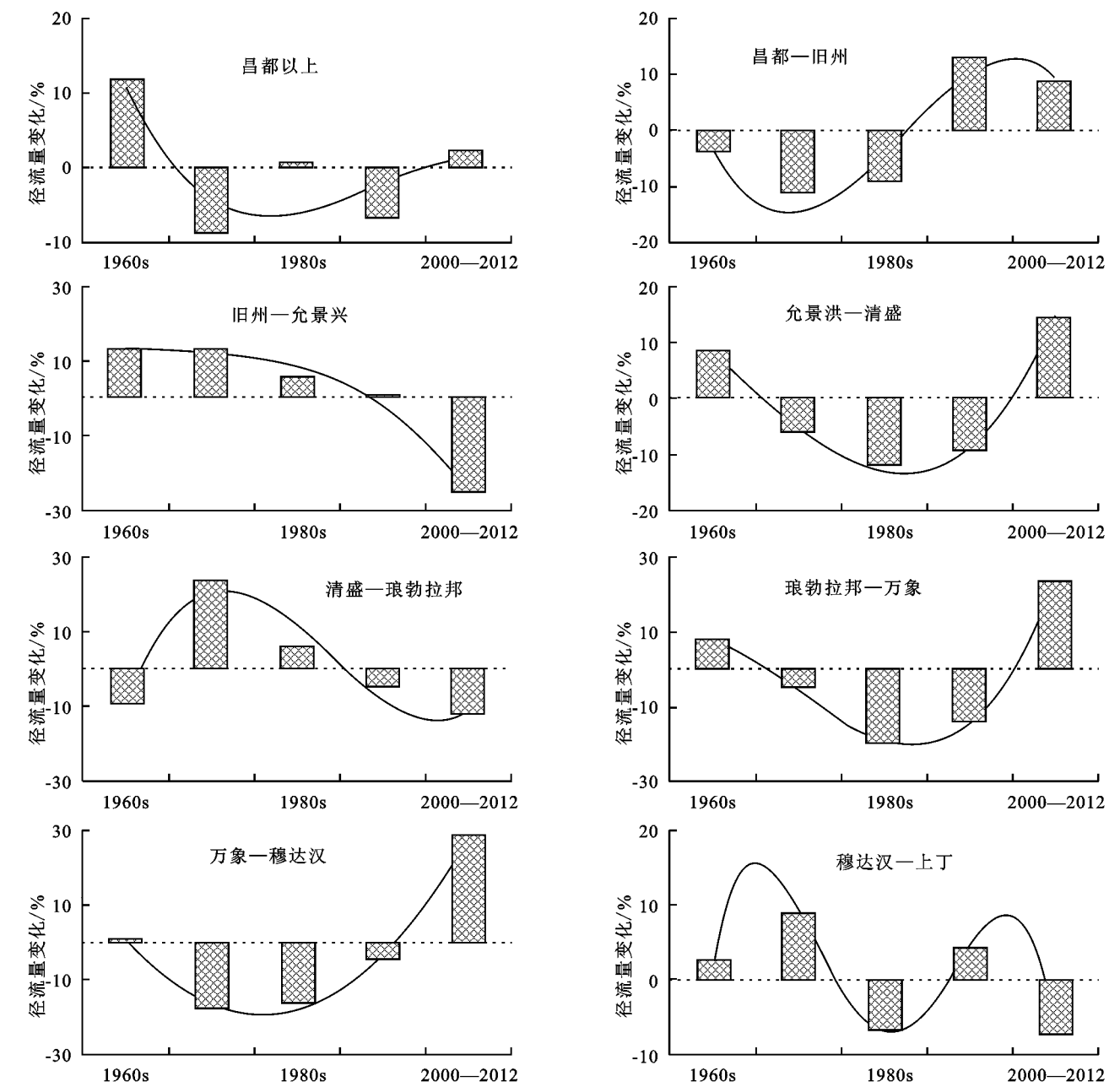


图 2 澜沧江—湄公河流域 8 个区间年代径流量距平过程

2.2 干流水文站及区间径流量的变异特征

当流域受到气候要素的剧烈变化或者高强度人类活动的影响,水文过程会相应地发生突然增加或减少的变化。采用有序聚类方法诊断了站点及区间径流量系列的突变点(表 3),图 3 给出了清盛、琅勃拉邦及清盛—琅勃拉邦区间径流量离差平方和序列过程。

区间下游站流量不同程度上受区间径流量和区间上游站流量的影响,清盛站径流量在 1973 年发生突变,琅勃拉邦站及清盛—琅勃拉邦区间径流量均在 1985 年和 2003 年发生突变。琅勃拉邦径流量突变特征与其上游区间径流量突变特征完全一致,与区间上游站清盛站突变特征不同,说明琅勃拉邦站径流量

变化主要受区间来水影响,相对来说,受区间上游入流影响相对较小(图 3)。

表 3 澜沧江—湄公河流域站点及区间径流量突变年份诊断结果

参数	一区	二区	三区	四区	五区	六区	七区	八区
突变年份	1966	1987	2002,2008	2005	1985,2003	1999,2008	1999	2004
	昌都	旧州	允景洪	清盛	琅勃拉邦	万象	穆达汉	上丁
突变年份	1966	1966,1987,1996	2002,2008	1973	1985,2003	1985	1999	1964,2004

注:红色表示突变发生在 1990 年之后的年份。

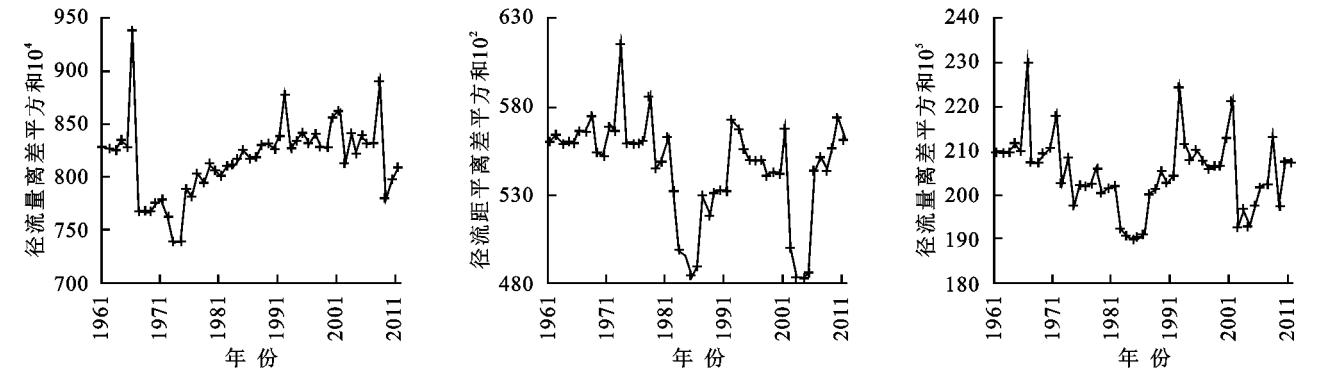


图 3 湄公河第五区间(清盛—琅勃拉邦)及区间入流站、出流站径流量突变诊断

由表 3 可以看出:(1) 7 个区间实测径流量突变年份存在差异;三区、五区和六区实测径流量序列存在两个突变年份,另外 4 个区域径流量只存在一个突变年份;最早的突变点发生在 1985 年(五区径流量),最晚的突变点发生在 2008 年(三区和六区径流量)。(2) 8 个水文站中有 4 个水文站(昌都、清盛、万象和穆达汉)的径流量只存在一个突变年份,另外 4 个水文站实测径流量存在 2 个或 3 个突变点,最早的突变点发生在上丁站径流量系列的 1964 年,最晚的突变年份发生在 2008 年(允景洪站)。(3) 区间径流量突变年份多集中在 1999 年及其以后的时期,只有二区和五区径流量的两个突变年份发生在 20 世纪 80 年代;与区间径流量不同,站点径流量的突变年份多发生在 20 世纪,其中,超过一半的突变年份(7 个)发生在 20 世纪 90 年代之前。(4) 区间径流量变异点之间的关联性不大;相比而言,一些站点径流量变异点与其上游区间径流量的变异性密切相关,譬如,三区(旧州—允景洪区间)径流量在 2002 年、2008 年发生突变,与区间下游允景洪站径流量序列突变特征完全一致。

2.3 变化环境下澜沧江—湄公河径流量的年内分配特征

水电能源开发是澜湄流域重要的人类活动之一。统计结果表明,截至 2016 年,在澜沧江—湄公河干支流上修建了 259 座水库,其中,泰国修建水库数量最多,超过 150 座,其次为越南,为 51 座,老挝和中国修建的水库数量分别为 29,30 座。已有研究表明,水库

等水利工程的修建在运行初期,由于水库蓄水会对年径流量产生一定影响,水库蓄水完成后的运行调度期间,其对年径流量的影响相对较小,但对径流年内分配的影响相对明显^[22]。

以干流水文站实测月径流量资料为基础,图 4 统计给出了 8 个水文站前期(1960—1989 年)和后期(1990—2012 年)两个时期径流量年内分配的变化过程,图 4 中灰色区域上下边界分别为 1969—1989 年期间各月径流量变化的范围,黑色圆点线为该时期多年平均月径流量;上下灰色虚线和星号灰色虚线分别代表 1990—2012 年时期各月最大值、最小值和多年均值。

由图 4 可以看出:(1) 澜沧江—湄公河从上游到下游所有 8 个水文站径流量年内分配模式一致,7—9 月份是流量较大的主汛期,12 月份到次年的 4 月份流量偏低,是湄公河的枯水季节。(2) 1990—2012 年时期 3 个峰值月份的最大流量和最小流量大多小于 1960—1989 年,特别是允景洪到万象之间的站点,峰值月份径流量变化区间普遍下移,下游穆达汉站和上丁站峰值月份流量变化区间在两个时段基本相当;说明由于环境变化的影响,允景洪至万象站主汛期流量变小,湄公河该河段的防洪压力会有所减轻。(3) 1990—2012 年时期枯水季节各月的最大流量大多高于前期(1960—1989 年)相应各月的最大流量;同时发现,后期枯水季节各月的最小流量也大多小于前期相应月份的最小流量;说明 1990—2012 年期间枯水季节月径流量变化幅度大于前期。枯水季节各月最大流量变大

有利于湄公河枯季航运和沿河工农业发展用水,而各月最小流量的减小会对沿河两岸用水需求满足带来一定挑战。(4) 从多年平均来看,旧州、穆达汉和上丁站在 1990—2012 年的各月多年流量大多高于前期(1960—1989 年)多年平均流量,尽管对枯期水资源利用有利,

但同时增大了汛期的防洪压力;昌都源头区后期平均各月流量多低于前期,虽然利于防洪,但不利于水资源利用;允景洪至万象之间的 4 个水文站后期(1990—2012 年)多年平均 8 月、9 月份流量低于前期均值,可以有效减轻沿岸的防洪压力。

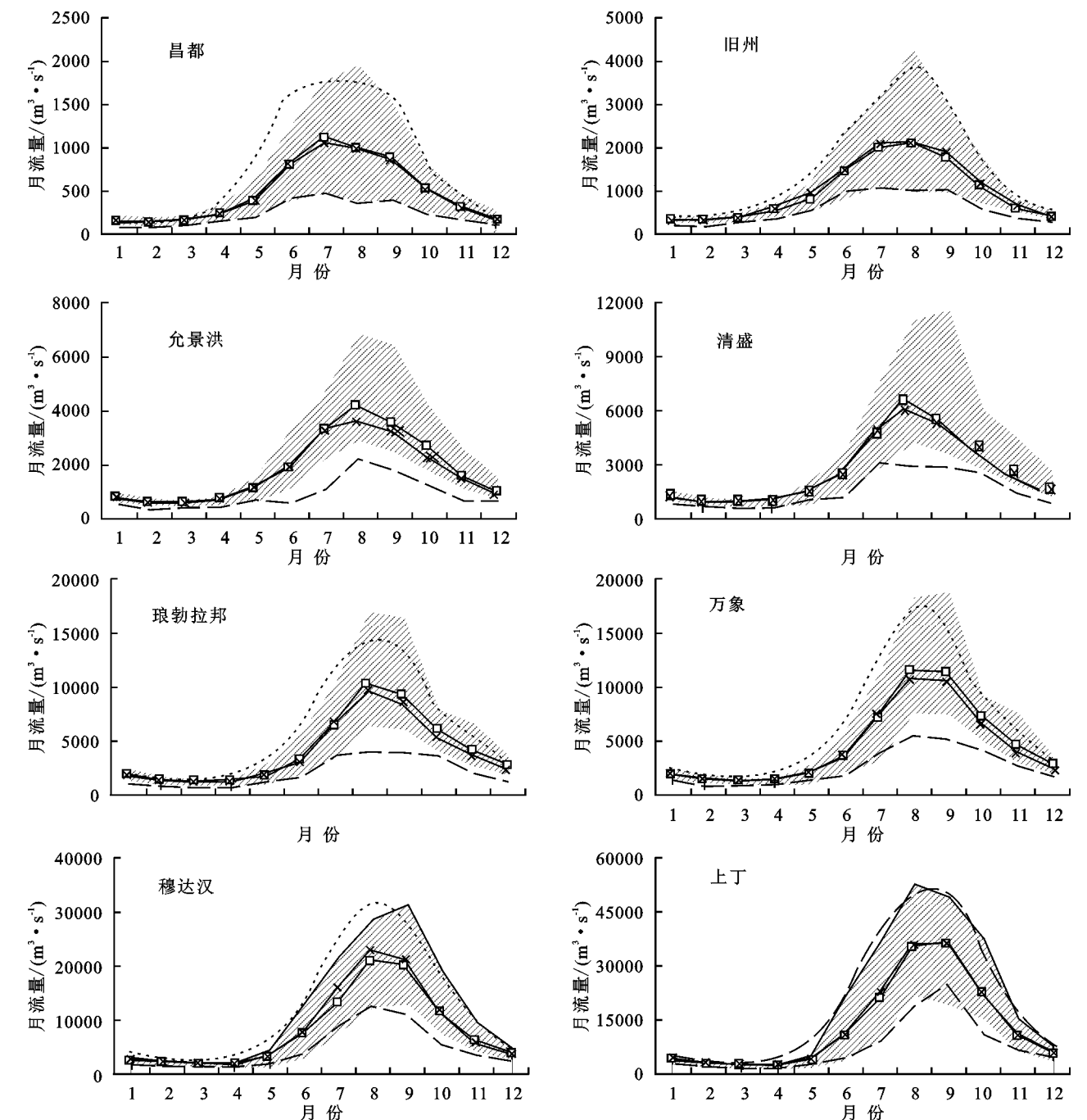


图 4 澜沧江—湄公河干流水文站 1960—1989 年和 1990—2012 年时期径流量的年内月分配过程

2.4 讨论

目前已有研究多集中在澜沧江—湄公河干流水文站实测径流量的演变分析^[18-21],由于干流水文站实测径流量的变化反映了该站以上整个区域的水文情势,并不能较好的体现区域径流量的变化态势。本文在计算区间径流量的基础上,分析了不同区域径流量及其演变情

势,可以更好地支撑区域水资源利用与管理。

气温升高、降水变化通过改变水文循环进而对区域径流量产生影响,而水库建设、水电开发和工农业发展引起的用水量增加均对河川径流量产生直接的影响^[4,22-24]。尽管不同区域径流量呈现丰枯交替的演变特征,但一些区域的最近十年径流量明显偏低

(旧州—允景洪区间)或偏高(万象—穆达汉区间),同时,一些站点径流量年内分配也发生了一定的变化。这些区域径流量及其年内分配变化是由气候因素造成的自然变化还是人类活动影响造成的趋势性变化,是需要值得进一步研究的科学问题。

3 结论

(1) 受变化环境的影响,澜沧江—湄公河流域上丁站以上的 8 个子区间径流量均出现不同程度的变化,其中,旧州—允景洪区间径流量呈现显著性减少趋势,而昌都—旧州和万象—穆达汉区间径流量呈现显著性增加趋势,其余区域径流量演变趋势均未达到显著性水平。

(2) 澜沧江—湄公河区间径流量及上下水文站径流量的突变年份大多具有一定的相依性,说明上游入流、区间径流对区间出口径流具有一定的影响;但也存在三者突变年份完全不同的情况。从 1960—2012 年系列来看,2000 年以后径流突变发生的频次明显高于前期。

(3) 以 1960—1989 年为基准,1990—2012 年期间允景洪、清盛、琅勃拉邦、万象 4 个水文站汛期径流量变化范围较基准期明显下移,水电开发对该区间河川径流削峰补枯的调节作用明显,对下游防洪压力减小起到了积极的作用。

参考文献:

[1] Dai A, Qian T, Trenberth K E, et al. Changes in Continental Freshwater Discharge from 1948 to 2004 [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(10): 2773-2792.

[2] 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.

[3] Immerzeel W W, Beek L P H V, Bierkens M F P. Climate change will affect the asian water towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.

[4] 王国庆, 管晓祥, 王乐扬, 等. 气候变化和人类活动对黄河重点区间径流的影响[J]. *人民黄河*, 2019, 41(10): 26-30, 39.

[5] 王若兰. 澜沧江—湄公河流域 5 国水资源利用差异分析[D]. 昆明: 云南大学, 2019: 1-8.

[6] 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.

[7] 水利部水利水电规划设计总院. 中国水资源及其开发利用

调查评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.

[8] 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.

[9] 胡慧杰, 崔凯, 曹茜, 等. 黄河近百年径流演变特征分析[J]. *人民黄河*, 2019, 41(9): 14-19.

[10] 蔡宜晴, 李其江, 刘希胜, 等. 三江源区径流演变规律分析[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(10): 1-5.

[11] 鲍振鑫, 严小林, 王国庆, 等. 1956—2016 年黄河流域河川径流演变规律[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 52-57.

[12] 王小杰, 姜仁贵, 解建仓, 等. 渭河干流径流变化趋势及突变分析[J]. *水利水电工程学报*, 2019(2): 33-40.

[13] 肖紫薇, 石朋, 瞿思敏, 等. 长江流域径流演变规律研究[J]. *三峡大学学报*, 2016, 38(6): 1-6.

[14] 周建军, 张曼. 近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(6): 1471-1488.

[15] 刘静, 龙爱华, 李江, 等. 近 60 年塔里木河三源流径流演变规律与趋势分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(12): 10-17.

[16] 吴迪, 赵勇, 裴源生, 等. 气候变化对澜沧江—湄公河中游径流的影响研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(9): 1569-1582.

[17] 陈俊旭, 赵红玲, 吕燕, 等. 红河流域径流演变分异及其特征[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(10): 22-26.

[18] 孙周亮, 刘艳丽, 刘冀, 等. 澜沧江—湄公河流域水资源利用现状与需求分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(4): 67-73.

[19] 余涛, 谢平, 桑燕芳, 等. 基于 LWHM-LUCC 模型的澜沧江流域径流演变驱动机制分析[J]. *黑龙江大学学报*, 2019, 10(4): 1-9.

[20] 钟华平, 王建生. 湄公河干流径流变化及其对下游的影响[J]. *水利水电工程学报*, 2011, 32(3): 48-52.

[21] 孙周亮, 刘艳丽, 刘冀, 等. 1960—2012 年湄公河干流径流时空演变[J]. *南水北调与水利科技*, 2020, 18(1): 51-65.

[22] 黎云云, 畅建霞, 涂欢, 等. 黄河干流控制性梯级水库联合运行对下游水文情势的影响[J]. *资源科学*, 2014, 36(6): 1183-1190.

[23] 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.

[24] 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.