

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.04.01

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

谈晓珊^{1,2}, 王婕^{3,4}, 唐雄朋^{3,4}, 杨娜^{3,4}, 罗贤⁵, 李杨⁶, 王国庆^{3,4}

(1. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012; 2. 水利部水文水资源监控工程技术研究中心, 江苏 南京 210012; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 4. 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, 江苏 南京 210029; 5. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500; 6. 内蒙古自治区水资源与水权收储中心, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 气候变化是河川径流变化的主要驱动因素, 分析流域气候变化及径流响应对有效适应气候变化具有重要意义。基于普林斯顿全球气象驱动数据集资料和澜沧江 - 湄公河(简称澜湄流域)干流 8 个水文站的实测径流资料, 分析了澜湄流域不同区间气温、降水的演变趋势以及不同阶段降水 - 径流的响应关系。结果表明: 1960 - 2012 年期间, 澜湄流域不同区间年气温呈现显著性升高趋势, 其中, 上游区间升温幅度较大, 超过 0.2℃/10a; 同期, 澜湄流域的 8 个区间只有“旧州 - 允景洪”区间年降水量呈现减少趋势, 其余各区年降水量均为不同程度的增加趋势; 此外, 所有区间春季降水量均为增加趋势, 冬季降水量大多为减少趋势; 8 个区间的年径流系数序列突变大多发生在 20 世纪 60 年代; 澜湄流域不同区间降水 - 径流关系存在一定的差异, 不同阶段降水 - 径流关系发生了不同程度的改变; 相同降水条件下, “琅勃拉邦 - 穆达汉”区间在 2000 年以后的产流量大多高于前期, 而“旧州 - 允景洪”区间和“清盛 - 琅勃拉邦”区间后期径流量大多低于第 1 阶段径流量。

关键词: 气候变化趋势; 径流响应; 气温; 降水; 澜沧江 - 湄公河流域

中图分类号: TV121⁺.1; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0001-08

Variation trends of climate change and hydrological responses of individual regions in Lancang - Mekong River Basin from 1960 - 2012

TAN Xiaoshan^{1,2}, WANG Jie^{3,4}, TANG Xiongpeng^{3,4}, YANG Na^{3,4},
LUO Xian⁵, LI Yang⁶, WANG Guoqing^{3,4}

(1. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Nanjing 210012, China; 2. Research Center for Hydrology and Water Resources Monitoring & Engineering Technology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China; 3. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 5. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunan University, Kunming 650500, China; 6. Administration Center for Water Resources and Water Rights of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010020, China)

Abstract: Climate change is the principal driving factor for the changes of runoff in the rivers. Analyzing the climate change in the basin and the hydrological response of runoff is of great significance to the effective adaptation of global warming. Using Princeton Global Forcing Database and the monitored runoff data of eight hydrological stations in the mainstream of Lancang - Mekong River Basin, variations of temperature and precipitation in different regions, and hydrological responses of runoff to climate change in different hydrological phases during 1960 - 2012 were investigated. Results show that the variation of annual temperature presented a significant rising trends during 1960 - 2012 for all of the eight regions in the ba-

收稿日期: 2020-03-29; 修回日期: 2020-04-27

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划专项课题(2016YFA0601501、2016YFA0601602、2016YFA0601601、2017YFC1502702)

作者简介: 谈晓珊(1986-), 女, 江苏连云港人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文水资源、水利信息化、GIS 等方面的研究。
通讯作者: 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。

sin exceeding $>0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$. Meanwhile, annual precipitation in the region of Jiuzhou – Yunjinghong decreased while the rest of the seven regions increased to various degrees. At seasonal scale, spring precipitation increased for all of the eight regions while winter precipitation decreased for most regions. Abrupt changes in annual runoff coefficient series mainly occurred in the 1960s. The interaction between precipitation and runoff varied from region to region and phase to phase. Under the same condition of precipitation, runoff yield after 2000 was much higher than that in the previous phases for the region of Luang Prabang – Mukdahan; however, runoff yield in the later phase was mostly lower than that in the first phase for the regions of Jiuzhou – Yunjinghong and Chiang Saen – Luang Prabang.

Key words: climate change trend; runoff response; temperature; precipitation; Lancang – Mekong River basin

1 研究背景

全球气候变暖已是不争的事实,根据 IPCC 第五次气候变化评价报告,近 100 年来全球陆地平均气温升高 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1880 – 2012 年)^[1]。气候变化将对社会、生态、自然等各个方面产生重要影响,全球变暖已成为世界各国普遍关注的重要环境问题^[2-3]。水资源是支撑经济社会发展的制约性因素,同时也是受气候变化最为敏感的领域^[4],气候变化及河川径流响应的变异性特征以不同的方式影响着流域系统和生态功能^[5-7],分析区域气候变化及径流响应,对流域的水资源可持续利用和生态保护具有重要科学意义和实践价值。

在全球变暖背景下,自 20 世纪以来,中国区域气温变化呈波动上升趋势,从增温速率来看,中国北方地区气温增暖速度明显高于南方地区^[8]。基于中国近百年的降水序列,李庆祥等^[9]发现近百年中国降水量呈现减少趋势,但降水量的趋势变化具有明显的季节性以及地域性差异。从中国降水变化趋势的空间分布来看,20 世纪 60 年代以来,降水显著增加的区域主要位于东南部地区和西部地区,其中西部地区增加较为明显^[10-12]。河川径流源于降水,气候变化对径流量具有直接影响。卢璐等^[13]研究发现 1951 – 2010 年长江上游金沙江流域气候变暖显著,降水变化以及积雪、冰川消融引起攀枝花站径流量呈现增加趋势。干旱区河川径流不仅受降水多寡制约,同时受人类活动影响显著^[14];大规模水土保持和水利工程导致黄河、海河等流域大多数支流降水径流关系改变,使河川径流锐减^[15-18]。澜沧江 – 湄公河(简称澜湄流域)是亚洲重要的国际性河流,上游源于青藏高原,气候变化是引起湄公河流域洪旱灾害加剧的主要原因^[19];气候变化背景下澜湄流域水量的丰枯变化对沿河流域国工农业发展至关重要,因此备受关注。基于近 50 年的气候再分析资料和干流实测流量资料,分析了澜湄流域不同区

间气温、降水的变化及不同阶段降水径流响应关系,期为澜湄流域经济社会发展提供支持。

2 资料与方法

2.1 流域概况及资料来源

澜沧江 – 湄公河是东南亚地区最大的国际河流,发源于中国青海省,上游中国境内部分称之为澜沧江,从云南出境后,称为湄公河,湄公河流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南。澜沧江 – 湄公河干流全长 $4\ 880\text{ km}$,流域面积 $81.1 \times 10^4\text{ km}^2$,根据河流长度,湄公河为世界第 9 大河。

湄公河地貌类型复杂多样,上游源于青藏高原,多高山峡谷;中游为丘陵,地势崎岖多阶地;下游为冲积平原,地势平坦涝灾频发。澜沧江 – 湄公河南北跨越近 13 个纬度,几乎涵盖了除热带沙漠气候之外的全球所有气候类型,上游严寒少雨,中游干湿季节特征明显,下游酷热湿润。澜湄流域面积与黄河基本相当,但水资源非常丰富,多年平均径流量约 $4\ 750 \times 10^8\text{ m}^3$,约为黄河多年平均径流量的 9 倍。收集整理了澜湄流域干流 8 个水文站 1960 – 2012 年的实测径流量,其中 3 个水文站位于中国境内;气温、降水数据来源于普林斯顿全球气象驱动数据集(<http://hydrology.princeton.edu/data.php>),为分辨率 0.5° 的格点逐月资料。图 1 给出了湄公河水系及水文站点与流域内普林斯顿气象驱动数据格点空间位置。

为分析澜湄流域气候变化的空间差异性,根据水文站位置,将湄公河上丁站以上划分为 8 个区间,分别为:昌都站以上为一区,昌都 – 旧州为二区,旧州 – 允景洪为三区,允景洪 – 清盛为四区,清盛 – 琅勃拉邦为五区,琅勃拉邦 – 万象为六区,万象 – 穆达汉为七区,穆达汉 – 上丁为八区。为分析不同季节的气候变化趋势,综合考虑澜湄流域上下游气候特点,将冬季定义为 12 – 次年 2 月,春季为 3 – 5 月,夏季为 6 – 8 月,秋季为 9 – 11 月。

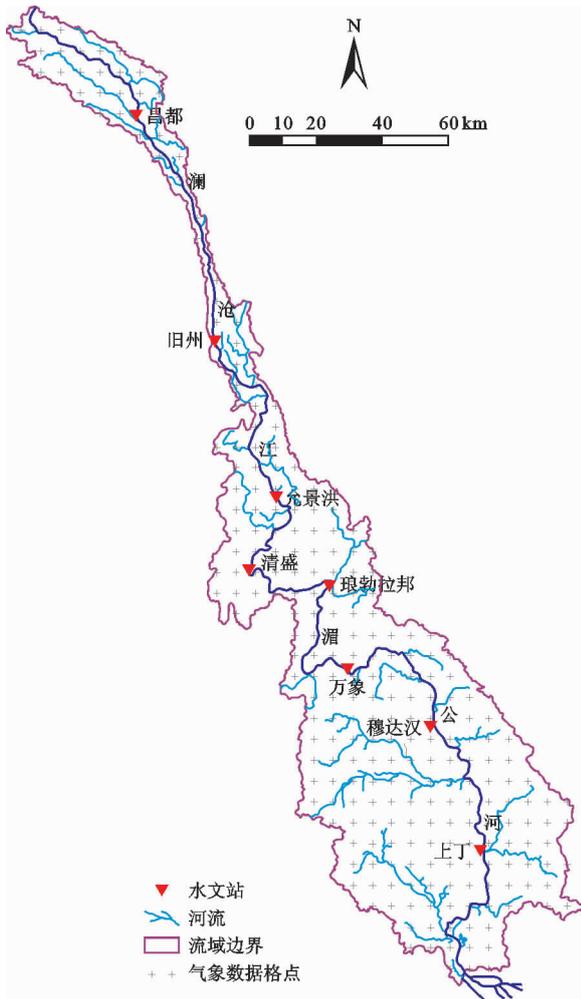


图 1 澜沧江-湄公河流域水系及水文站点与气象要素格点位置

2.2 Mann-Kendall 非参数检验方法

Mann-Kendall 是一种非参数序列趋势诊断方法,该方法具有检验范围宽、受人为影响较小的特点,通过计算标准化统计量 Z_s (M-K 值) 进而确定序列变化的趋势及其显著性^[20-21]。其计算公式为:

$$\tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \quad (1)$$

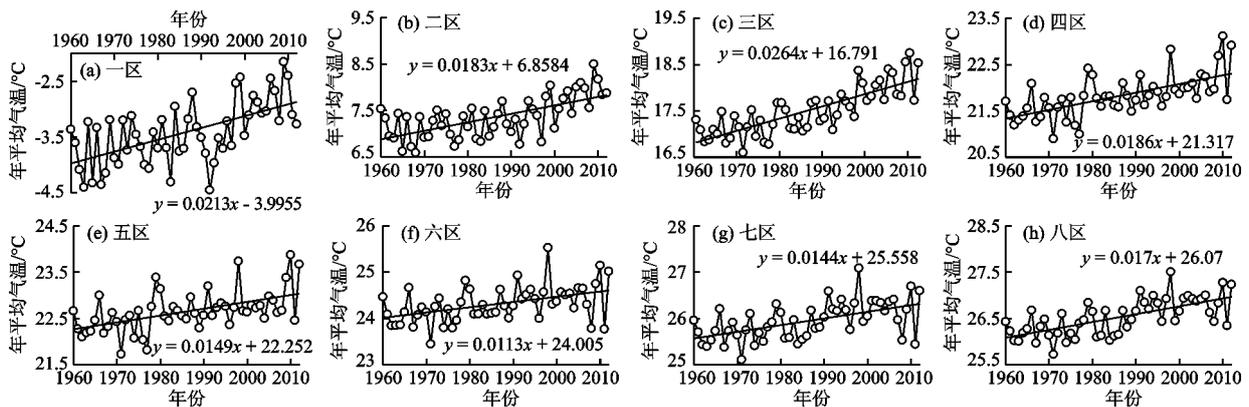


图 2 1960-2012 年澜湄流域各区间年均气温变化过程

$$\sigma^2 = \frac{2(2N+9)}{9N(N-1)} \quad (2)$$

$$Z_s = \tau / \sigma \quad (3)$$

式中: P 为研究系列的所有对偶观测值中 $x_i < x_j$ 出现的次数; N 为系列长度。

当统计量 $Z_s > 0$ 时,说明序列呈现增加趋势,反之,则为减小趋势。若 Z_s 不满足 $-Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \leq Z_s \leq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ (α 为给定的显著水平) 时,即表明序列具有显著的变化趋势,反之,趋势不显著。给定显著水平 $\alpha = 0.05$ 时的临界值为 ± 1.96 。

2.3 基于径流系数的水文阶段性划分与诊断方法

相比实测径流量系列,年径流系数系列的变化可以更好地反映流域人类活动对水文过程的影响^[14];因此,基于年径流系数突变点的诊断进行水文变化阶段性划分。采用有序聚类方法诊断径流系数突变年份,计算公式为^[21-22]:

$$\alpha_i = R_i / P_i \quad (4)$$

$$S_n(\tau) = \sum_{i=1}^{\tau} (\alpha_i - \bar{\alpha}_{\tau})^2 + \sum_{i=\tau+1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha}_{n-\tau})^2 \quad (5)$$

式中: α_i 为年径流系数; $S_n(\tau)$ 为径流系数总离差平方和; R_i 、 P_i 分别为年径流深度和年降水深度,mm; $\bar{\alpha}_{\tau}$ 、 $\bar{\alpha}_{n-\tau}$ 分别为 τ 前、后时期径流系数的均值。

当满足 $S = \min_{2 < \tau < n-1} [S_n(\tau)]$ 时, τ 为最优二分点,可推断为最可能的突变年份。

3 结果与分析

3.1 气温变化

基于普林斯顿全球气象驱动数据集气温资料,计算 1960-2012 年澜湄流域各区间的年及四季平均气温,图 2 给出了 8 个区间年均气温的变化过程;采用 Mann-Kendall 非参数检验方法诊断了各区年和季节气温演变的趋势及其显著性,其结果见表 1。

表1 1960-2012年澜湄流域各区间年和季节气温变化趋势诊断结果

项目	季节	一区	二区	三区	四区	五区	六区	七区	八区
M-K 值	年	4.35*	4.69*	6.46*	5.09*	4.04*	3.47*	4.34*	4.89*
	春季	2.64*	4.85*	3.76*	1.95	1.44	0.81	0.63	1.63
	夏季	3.11*	2.32*	6.06*	3.76*	2.35*	1.63	3.21*	4.27*
	秋季	2.70*	3.25*	5.25*	3.97*	3.15*	3.02*	4.54*	5.11*
	冬季	4.02*	3.18*	5.63*	4.66*	4.28*	3.33*	3.67*	4.60*
倾向率/ ($^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$)	年	0.213	0.183	0.264	0.186	0.149	0.113	0.144	0.170
	春季	0.155	0.101	0.197	0.109	0.082	0.035	0.045	0.080
	夏季	0.154	0.139	0.193	0.122	0.076	0.050	0.092	0.118
	秋季	0.173	0.165	0.264	0.183	0.140	0.127	0.167	0.182
	冬季	0.369	0.327	0.400	0.330	0.297	0.240	0.272	0.299

注:表中*表示升温趋势达到置信水平为0.05的显著性水平。

由图2可以看出:(1)澜湄流域各个区间气温差异较大,具有自北向南逐渐升高的空间变化特征;一区海拔高气温低,年均气温均在 0°C 以下,二区年均气温介于 $6.5 \sim 8.5^{\circ}\text{C}$ 之间,四区及其以南的各区间年均气温均在 20°C 以上,其中,八区年均气温最高,在 $25.5 \sim 27.5^{\circ}\text{C}$ 之间变化。(2)所有各区间气温均为升高趋势,但各区间升温幅度存在差异。一区和三区年均气温的升幅较大,平均线性升温率超过 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,二区和四区升温幅度次之,分别为 0.183 、 $0.186^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;流域中部的第五、六、七区间平均线性升温速率低于 $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其中,六区线性升温速率最低,约为 $0.11^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。(3)1960-2012年澜湄流域各区最高年均气温总体一致,但存在差异;其中,一区和二区的年均气温最大值发生在2009年,而三区至五区年均气温最大值发生在2010年;六区至八区的年均气温最大值发生在1998年。说明在全球变暖的背景下,澜湄流域上游地区依然保持了较大的升温态势,而中下游地区自1998年以

来,升温趋势相对较缓。

由表1可以看出:(1)所有各区年气温、秋季气温和冬季气温均为显著性升温趋势;对春季气温来说,允景洪以上的3个区域升温显著,以下的5个区域为非显著性升温趋势;夏季气温只有六区为非显著性升温趋势,其余各区升温趋势均超过了置信水平为0.05的显著性水平。(2)从季节气温升温速率来看,冬季气温升温速率最大,其次为秋季气温;琅勃拉邦以下的3个区域夏季气温升温速率高于春季气温升温速率,琅勃拉邦以上的5个区域春、夏季气温升率基本相当。(3)在区域分布上,三区各季节气温升温速率最大,其次为一区;二区和四区季节气温升率总体相当,六区季节气温升率最小。

3.2 降水量变化

图3给出了1960-2012年澜湄流域8个区间年降水量的变化过程,采用Mann-Kendall非参数检验方法诊断了各区年和季节降水的演变趋势及其显著性,其结果见表2。

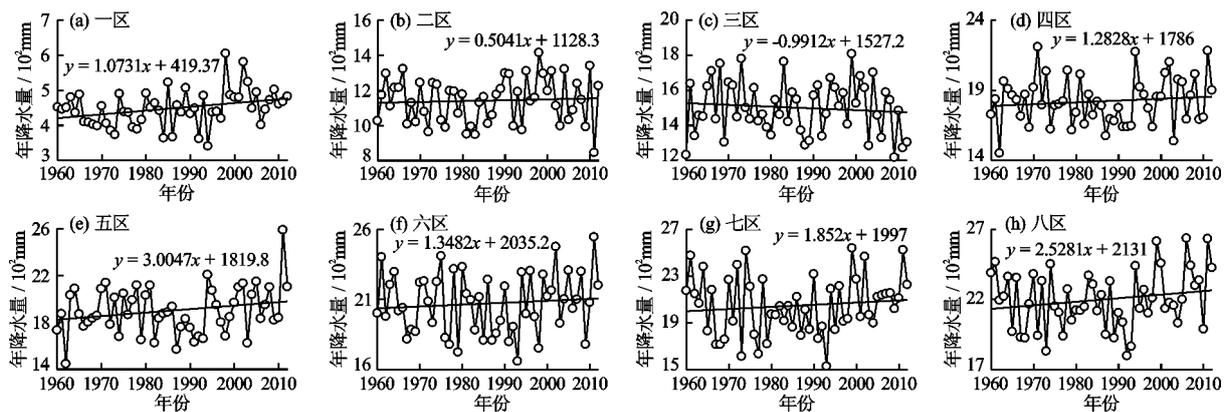


图3 1960-2012年澜湄流域各区间年降水量变化过程

表 2 1960-2012 年澜湄流域各区间年和季节降水量变化趋势诊断结果

项目	季节	一区	二区	三区	四区	五区	六区	七区	八区
M-K 值	年	2.07*	0.48	-0.77 ⁽⁻⁾	0.43	1.21	0.51	1.12	0.92
	春季	3.54*	1.52	1.92	2.78*	3.22*	1.07	0.66	1.37
	夏季	1.03	-0.48 ⁽⁻⁾	-1.38 ⁽⁻⁾	0.78	1.09	0.64	-0.63 ⁽⁻⁾	-0.86 ⁽⁻⁾
	秋季	0.97	1.21	-0.02 ⁽⁻⁾	-1.32 ⁽⁻⁾	-1.40 ⁽⁻⁾	-0.91 ⁽⁻⁾	0.26	1.69
	冬季	1.81	-0.49 ⁽⁻⁾	-0.60 ⁽⁻⁾	-1.04 ⁽⁻⁾	-0.84 ⁽⁻⁾	0.84	-0.51 ⁽⁻⁾	-0.64 ⁽⁻⁾
倾向率/ (mm · (10a) ⁻¹)	年	10.73 ⁽⁺⁾	5.04	-9.91 ⁽⁻⁾	12.83	30.05	13.48	18.52	25.28
	春季	4.09 ⁽⁺⁾	7.89	10.74	18.44 ⁽⁺⁾	21.89 ⁽⁺⁾	8.08	4.72	9.84
	夏季	4.44	-7.62 ⁽⁻⁾	-15.42 ⁽⁻⁾	5.37	18.05	9.67	-7.83 ⁽⁻⁾	-7.13 ⁽⁻⁾
	秋季	1.88	5.33	-2.06 ⁽⁻⁾	-8.07 ⁽⁻⁾	-8.27 ⁽⁻⁾	-6.77 ⁽⁻⁾	22.65	24.45
	冬季	0.32	-0.56 ⁽⁻⁾	-3.17 ⁽⁻⁾	-2.91 ⁽⁻⁾	-1.63 ⁽⁻⁾	2.50	-1.02 ⁽⁻⁾	-1.87 ⁽⁻⁾

注:表中 * 和 (+) 表示降水量为显著性增加趋势, (-) 表示降水量为非显著性减少趋势,其余为降水量为非显著性增加趋势。

由图 3 可以看出:(1)澜湄流域上、下游降水量差异显著,具有自北向南逐步增多的空间分布格局;一区多年平均年降水量约为 450 mm,而六区到八区的年降水量均在 2 000 mm 以上,其中,八区平均年降水量约 2 200 mm,约为一区年降水量的 5 倍。(2)所有区间年降水量均具有丰枯交替的演变特征,大多数区间年降水量具有不同程度的增加趋势,只有三区年降水量为减少趋势。(3)年降水量年际变化幅度总体具有增大趋势,多数区间年降水量极值发生在 20 世纪 90 年代以来的近 20 年之内,例如,一区的最小和最大年降水量分别发生在 1994 年和 1998 年,21 世纪以来降水量普遍偏高;三区最大和最小年降水量分别发生在 1999 年和 2009 年,年降水量自 21 世纪以来呈现明显的减小趋势;五区最大年降水量发生在 2011 年,接近 2 600 mm,约为该区间多年平均降水量的 1.36 倍。

由表 2 可以看出:(1)季节和年降水量变化趋势多不显著,只有个别季节和地区的降水量具有显著性增加趋势;在年尺度上,只有一区年降水量呈现显著性增加,其余地区年降水量变化趋势均不显著;有 3 个地区的春季降水量为显著性增加,分别为一

区、四区和五区,其余区间的春节降水量为非显著性变化趋势;所有 8 个区间的夏、秋和冬季降水量均为非显著性变化。(2)季节降水量尽管多为非显著性趋势变化,但演变趋势存在差异;所有各区间春季降水量均为增加趋势;8 个区间夏季和秋季降水量增减趋势各占一半,其中,秋季降水量呈现减少趋势的区间主要集中在澜湄流域中部的三区-六区;冬季降水量大多呈现减少趋势,只有一区和六区冬季降水量为增加趋势。(3)一、二、四、五区春季降水量增加幅度较大,而七、八区秋季降水量增加幅度较大,这些季节降水量的增加是上述区间年降水量呈现增加趋势的主要因素;对于三区来说,夏、秋和冬季降水量均呈现减少趋势,其中夏季线性减少幅度最大,约为 -15.42 mm/10a,对年降水量呈现显著性减少特征的贡献最大。

3.3 水文阶段性划分及降水径流响应关系

根据湄公河 8 个区间年径流量序列,采用有序聚类方法进行突变年份诊断,进而进行水文阶段性划分。

为了清晰说明起见,图 4 给出了五区和三区年径流系数离差平方和过程。

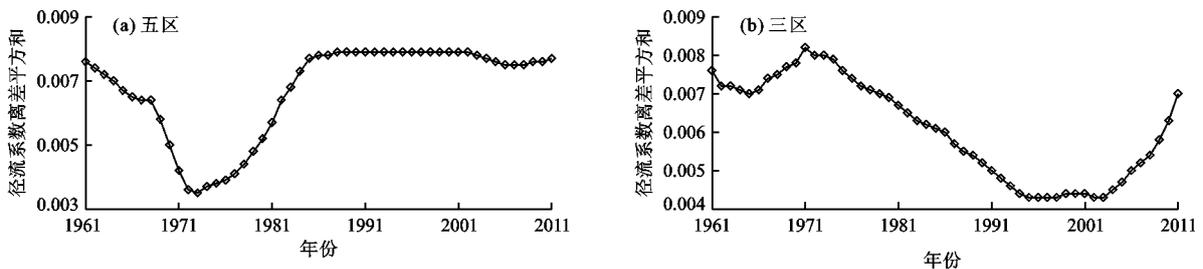


图 4 1960-2012 年澜湄流域五区和三区年径流系数离差平方和过程

由图4可以看出,五区年径流系数离差平方和具有明显的1个最小值,根据该最小值的时间可判断系列在1973年发生了较为明显的突变。然而,三区年径流系数在1995-1999年均处于非常接近的最小值范围,说明系列自1995年起发生突变,到1999年变异性更加明显,1995-1999年的系列即可以划归为1995年之前的系列,也可以划归为1999年之后的系列,本着优先前期的原则,将该区间的变异点确定为1999年。

表3给出了澜湄流域各区间年径流系数序列突变诊断结果。由于随着澜沧江-湄公河水资源开发利用程度的不断提高,澜湄流域各国非常关注2000年之后的水文情势变化^[23],因此,将1999年作为特定年份,将2000-2012年作为特定水文阶段。综合年径流系数序列突变诊断结果,表3同时给出了各区间水文阶段划分结果。

由表3可以看出:(1)8个区间年径流系数序列突变大多发生在20世纪70年代,只有上游的二区和三区径流系数序列突变发生在1999年,八区突变发生年份最早,为1965年,说明澜湄流域特别是中下游地区自20世纪60、70年代区域自然环境和人类活动就发生了较为明显的变化。(2)由于二、三区年径流系数序列突变年份与特定的水文阶段划分年份一致,因此,这两个区间只有两个水文阶段;对

于其他区间,由于年径流系数序列突变发生的年份较早,因此包括了基于年径流系数序列突变划分的两个水文阶段和特定的水文阶段。

年降水径流响应关系反映了某种下垫面和人类活动背景下的区域产流状况,在年降水径流响应关系图中,若降水径流关系点群靠上,说明在同样降水条件下的区域产流量更大一些,反之,则区域产流条件较弱,同样降水条件下的产流量较低。根据表3中澜湄流域各区间水文阶段划分结果,点绘出湄公河8个区间在不同水文阶段的年降水径流响应关系,结果见图5。

表3 1960-2012年澜湄流域各区间年径流系数突变年份诊断及水文阶段划分

区间	突变年份	水文阶段(年份)划分
一区	1966	1960-1966, 1967-1999, 2000-2012
二区	1999	1960-1999, 2000-2012
三区	1999	1960-1999, 2000-2012
四区	1976	1960-1976, 1977-1999, 2000-2012
五区	1973	1960-1973, 1974-1999, 2000-2012
六区	1978	1960-1978, 1979-1999, 2000-2012
七区	1974	1960-1974, 1975-1999, 2000-2012
八区	1965	1960-1965, 1966-1999, 2000-2012

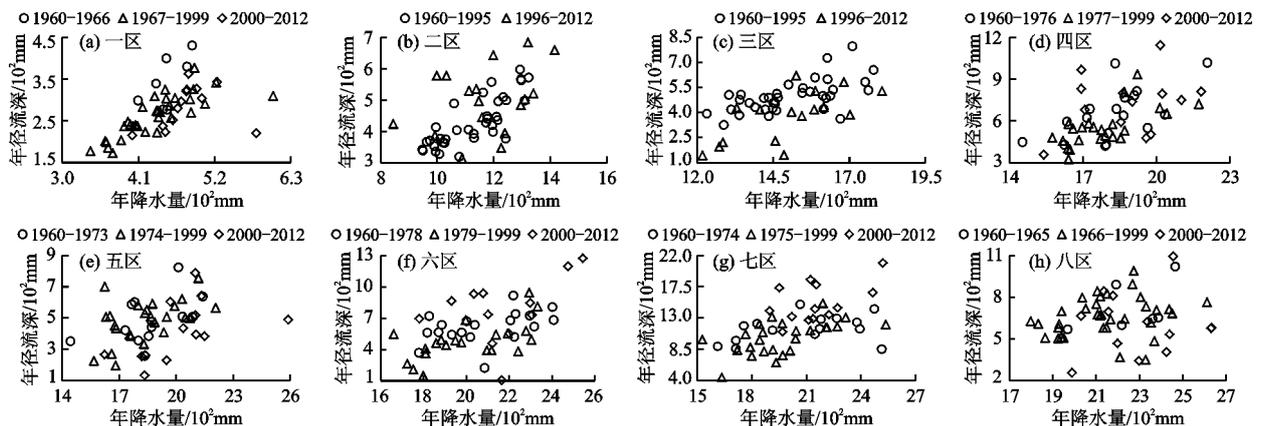


图5 湄公河8个区间在不同阶段的年降水径流响应关系

由图5可以看出:(1)不同区间降水径流关系存在一定的差异,不同阶段降水径流关系发生了不同程度的改变。(2)对于上游的3个区间来说,一区在第1阶段的降水径流关系点群普遍靠上,后两个阶段的点群有不同程度的下移;二区在1960-1995年降水径流相关性较好,第2个阶段降水径流关系点群变得散乱;三区第1阶段降水径流关系点

群靠上,第二阶段的点群大多位于下部。(3)对于澜湄流域中下游的5个区间来看,四区在3个阶段的降水径流关系点群没有明显的分带性,但2000年之后的降水径流关系点群变得更为散乱;五区和八区在第3阶段的降水径流关系点群偏下,而六区和七区在第3阶段关系点群相对位于上部。(4)结合不同阶段降水径流关系点群的变化可以发现,在同

样降水条件下一区、三区、五区和八区在2000年之后的产流量明显低于各自区间在第1个时段的产流量,而六区和七区在2000年第3个时段的产流量大于第1个时段的产流量,对于二、四区来说,不同时段的产流量没有明显变化。

4 讨论

研究跨境流域气候变化最大的难点是基础站点资料的收集,而且不同国家气象资料监测的标准和质量控制标准也存在差异。已有研究表明,普林斯顿全球气象驱动数据集具有相对较好的区域普适性^[24]。因此,本研究基于这一数据集分析澜湄流域气温、降水的变化。

全球变暖是目前最重要的环境问题之一,在全球变暖背景下,气温普遍升高但存在区域差异^[1];1900年以来中国平均气温上升趋势为 $1.56 \pm 0.20^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,明显大于全球大陆平均趋势($1.0^{\circ}\text{C}/100\text{a}$)^[25],1960年以来中国区域平均气温上升率约为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[26]。澜湄流域是位于中国西南部和东南亚的跨界流域,1960年以来年平均气温升温幅度介于 $0.112 \sim 0.264^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间,低于中国平均水平。澜湄流域降水较多,自1960年以来区间年降水量大多呈现增加趋势,与IPCC第五次评估报告结论总体一致^[1-2]。

跨境河流研究另一问题就是流域内人类活动、环境要素变化调研难度大。研究表明,环境变化特别是剧烈高强度取用水人类活动会显著改变河流的水文情势,具体表现为降水径流关系的改变^[27-28]。澜湄流域各区间在不同阶段的降水径流关系存在不同程度的变化,由此说明不同区域存在不同程度的人类活动。充分利用实测水文资料和气象资料,通过分析不同阶段的降水径流关系及其变化,为反演区域人类活动概况提供了简便但有效的途径。

5 结论

(1)澜湄流域各个区间气温差异较大,气温空间分布具有自北向南逐步升高的空间分布格局。1960-2012年,所有区间年均气温均为显著升高趋势,多年平均线性升温速率具有南北两端高、中间低的区域分布特征;相比而言,澜湄流域上游昌都以上地区和旧州至允景洪区间升温幅度最大,平均线性升温速率超过 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,琅勃拉邦至万象区间升温速率最低,约为 $0.11^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

(2)澜湄流域上、下游降水量差异显著,空间分

布上自北向南逐步增多,上游昌都以上多年平均年降水量约450 mm,而琅勃拉邦以下地区年降水量均在2000 mm以上;1960-2012年,所有区间年降水量均具有丰枯交替的演变特征,其中,旧州~允景洪区间的年降水量呈现减少趋势,其余各区间年降水量均为增加趋势。

(3)变化环境下澜湄流域不同区间降水径流关系存在一定的差异,不同阶段降水径流关系发生了不同程度的改变;在同样降水条件下,澜湄流域一区、三区、五区和八区在2000年之后的产流量低于前期产流量,而琅勃拉邦以下的六区和七区在2000年以后的后期产流量则高于前期。定量评估澜沧江-湄公河河川径流变化的原因是未来需要深入研究的重要科学问题。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] IPCC. Climate change 2013: Impacts, adaptation, and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 丁永建,穆穆,林而达. 中国气候与环境演变2012:影响与脆弱性[M]. 北京:气象出版社,2012.
- [4] BATES B C, KUNDZEWICZ Z W, WU S, et al. Climate change and water. Technical paper of the intergovernmental panel on climate change [R]. Geneva: IPCC Secretariat, 2008.
- [5] YANG Xiaoying, WARREN R, HE Yi, et al. Impacts of climate change on TN load and its control in a river basin with complex pollution sources [J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 1155-1163.
- [6] 万思成,曾瑞,张建云,等. 海河上游典型流域植被动态演变规律及其对气候因子的响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(6):25-31.
- [7] LUO Pingping, SUN Yutong, WANG Shuangtao, et al. Historical assessment and future sustainability challenges of Egyptian water resources management [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121154.
- [8] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [9] 李庆祥,彭嘉栋,沈艳. 1900-2009年中国均一化逐月降水数据集研制[J]. 地理学报,2012,67(3):301-311.
- [10] 殷刚,李兰海,孟现勇,等. 新疆1979-2013年降水量时空变化特征和趋势分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(5):19-27.

- [11] MA Chong, PAN Suli, WANG Guoqing, et al. Changes in precipitation and temperature in Xiangjiang River Basin, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123(3-4): 859-871.
- [12] PENG Dongdong, ZHOU Tianjun. Why was the arid and semiarid Northwest China getting wetter in the recent decades?: Wetting trend in Northwest China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(17): 9060-9075.
- [13] 卢璐,王琼,王国庆,等. 金沙江流域近60年气候变化趋势及径流响应关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(5): 16-21.
- [14] 王国庆,唐雄朋,刘佩瑶,等. 山西省岚河流域水文气象要素演变及响应关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(4): 67-70+83.
- [15] YAN Xiaolin, BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, et al. Quantifying contributions of climate change and local human activities to runoff decline in the upper reaches of the Luanhe River Basin[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2020, 28: 67-74.
- [16] 赵建华,刘翠善,王国庆,等. 近60年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(3): 1-5+12.
- [17] 贺瑞敏,张建云,鲍振鑫,等. 海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J]. *水科学进展*, 2015, 26(1): 1-9.
- [18] 张成凤,鲍振鑫,杨晓甜,等. 黄河源区水文气象要素演变特征及响应关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6): 15-19.
- [19] 陈兴茹,王兴勇,白音包力皋,等. 渭公河流域洪旱灾害损失分析[J]. *水利经济*, 2019, 37(1): 54-58.
- [20] 管晓祥,张建云,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.
- [21] 李保敏,张俊芝,吴旭,等. 基于Mann-Kendall法和有序聚类法的径流变化特征研究[J]. *海河水利*, 2012(2): 37-38+44.
- [22] 陈远中,陆宝宏,张育德,等. 改进的有序聚类分析法提取时间序列转折点[J]. *水文*, 2011, 31(1): 41-44.
- [23] 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.
- [24] SHEFFIELD J, GOTETI G, WOOD E F. Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(13): 3088-3111.
- [25] CAO Lijuan, YAN Zhongwei, ZHAO Ping, et al. Climatic warming in China during 1901-2015 based on an extended dataset of instrumental temperature records [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(6): 064005.
- [26] CAO Lijuan, ZHU Yani, TANG Guoli, et al. Climatic warming in China according to a homogenized data set from 2419 stations [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(13): 4384-4392.
- [27] 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.
- [28] LYU Jiqiang, MO Shuhong, LUO Pingping, et al. A quantitative assessment of hydrological responses to climate change and human activities at spatiotemporal within a typical catchment on the Loess Plateau, China [J]. *Quaternary International*, 2019, 527: 1-11.

喜 讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database,简称CSCD)收录为2019-2020年度来源期刊(核心库);2008-2020年连续13年被中国科学技术信息研究所评为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)。