

澜沧江流域水文气象要素变化特征分析

李海川¹, 王国庆², 郝振纯^{1,3}, 刘翠善², 刘佩瑶¹, 吴辰¹, 谷一¹, 徐梦珂¹, 付晓雷⁴

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

3. 河海大学 水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098; 4. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要:以澜沧江流域为对象,采用气候倾向率、MK 检验、Pearson 相关性分析等方法,分析 1958-2015 年气温和降水的空间分布、年内分配及演变趋势,揭示径流演变的驱动要素。结果表明:澜沧江流域气温空间分布不均,上游温度低降水少,下游温度高降水多;降水和径流年内分配不均,主要集中于夏秋两季,径流峰值比降水峰值滞后一个月;1958-2015 年气温呈上升的趋势,降水和径流呈下降趋势;2005 年为径流出现突变的年份,年径流减少 21.5%;气温升高、降水量减少对径流减少有一定贡献;气温与径流的相关性较差,降水径流相关性于 2005 年之后变差,尤其是夏秋两季。

关键词:气象要素;降水;气温;径流突变;相关性;澜沧江流域

中图分类号:P333.1;P467

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)04-0021-07

Characteristics analysis of hydrometeorological elements in Lancang River Basin

LI Haichuan¹, WANG Guoqing², HAO Zhenchun^{1,3}, LIU Cuishan², LIU Peiyao¹,
WU Chen¹, GU Yi¹, XU Mengke¹, FU Xiaolei⁴

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro - Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Taking Lancang River Basin as a study object, the spatial distribution, intra - annual distribution and evolution trends of temperature and precipitation between 1958 to 2015 were analyzed by using climate tendency rate, MK - test and Pearson correlation analysis, and the driving factors of runoff evolution were revealed. Results indicate that the spatial and intra - annual distribution of the temperature and precipitation is uneven. The upstream has low temperature and few rainfall, while the downstream is on the contrary. The precipitation and runoff distributed uneven in the year, mainly in the summer and autumn. The runoff peak comes one month later than rainfall peak. From 1958 to 2015, the trend of temperature is rising and the trends of rainfall and runoff are falling. Runoff mutation occurred in 2005 and the annual runoff decreased by 21.5%. Runoff reduction is mainly associated with rising temperature and decreasing rainfall. Temperature is weakly correlated to runoff. Precipitation was well correlated to runoff before 2005 while poorly correlated after 2005, especially in summer and fall.

Key words: meteorological elements; precipitation; temperature; runoff mutation; correlation; the Lancang River basin

收稿日期:2017-05-09; 修回日期:2017-06-05

基金项目:国家“十三五”重点研发计划(2016YFA0601501,2016YFA0601601,2016YFC0402704,2016YFA0601602);国家自然科学基金项目(41330854,41371063,41371047);中国工程院重大咨询项目(2015-ZD-07);河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金面上项目(2015490311)

作者简介:李海川(1993-),女,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为水文及水资源。

通讯作者:王国庆(1971-),男,山东成武人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水文及水资源。

1 研究背景

全球气候变暖对区域水文循环产生了重要的影响^[1]。在经济全球化及区域可持续发展的背景下,国际跨境河流水资源的分配、管理和利用问题引发了广泛的关注。

湄公河是亚洲的一条跨越6个国家的国际性河流,水文特性复杂,径流主要为降雨补给,冰雪融水和地下水补给为辅^[2]。气候变化对湄公河水文具有显著影响,毕彦杰等^[3]和吴迪等^[4]认为温度是径流变化最主要的原因,而赵付竹等^[5]和尤卫红等^[6-8]则认为澜沧江跨境径流对降水变化的响应较温度敏感。人类活动也是河川径流变化的另一重要驱动要素,水电站的建立对下游径流有增枯减汛的功能^[9-12]。毕彦杰等^[3]、何大明等^[13]和雷四华等^[14]认为水库运行对下游径流的年际变化的影响不明显,顾颖等^[9]指出漫湾、大朝山电站对下游径流调节作用较小,小湾、糯扎渡和景洪电站建成后对径流的调节较大,上游水电站开发有利于流域防洪和水资源的综合利用。目前为止,尚没有学者以径流突变年为分界对澜沧江流域气温降水以及径流进行综合分析。本文系统分析澜沧江流域气温和降水的空间分布及演变趋势,揭示径流演变的驱动要素,研究日渐剧烈的人类活动和气候变化对湄公河流域径流产生的影响对解决跨境水资源的分配管理具有重要的意义。

2 资料与研究方法

2.1 研究流域概况

澜沧江是跨境河流湄公河上游在中国境内河段,发源于青海省唐古拉山,流域面积约 $16.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,主流总长度 2 139 km,界于东经 $94^\circ \sim 102^\circ$ 、北纬 $21^\circ \sim 34^\circ$ 之间。澜沧江流域横跨寒带、亚热带和热带三个气候带,上下游气候差异较大。澜沧江蕴含着巨大的水能,云南省在澜沧江有兴建 8 个梯级水电站的计划,已经建成的有漫湾、大朝山、小湾、景洪、糯扎渡等,水电站将改变澜沧江乃至湄公河流域的生态环境和自然资源^[9]。

允景洪水文站是澜沧江干流中国出境前最后 1 个干流国家级水文站,控制流域面积 $141\,779 \text{ km}^2$,径流数据来源于允景洪站 1958 - 2015 年逐月径流量。澜沧江境内及周边共有 19 个国家地面气象基本站,监测有长序列的降水、气温资料。此外,水文部门设立有 19 个雨量站、12 个蒸发站分别进行降

水和蒸发观测。多数站点具有较好的长序列资料(1958 - 2015),部分站点设站年份较晚,本文仅在分析气温、降水空间分布的时候使用到所有气象站的数据。所采用的水文、气象、雨量、蒸发站点的位置分布见图 1。

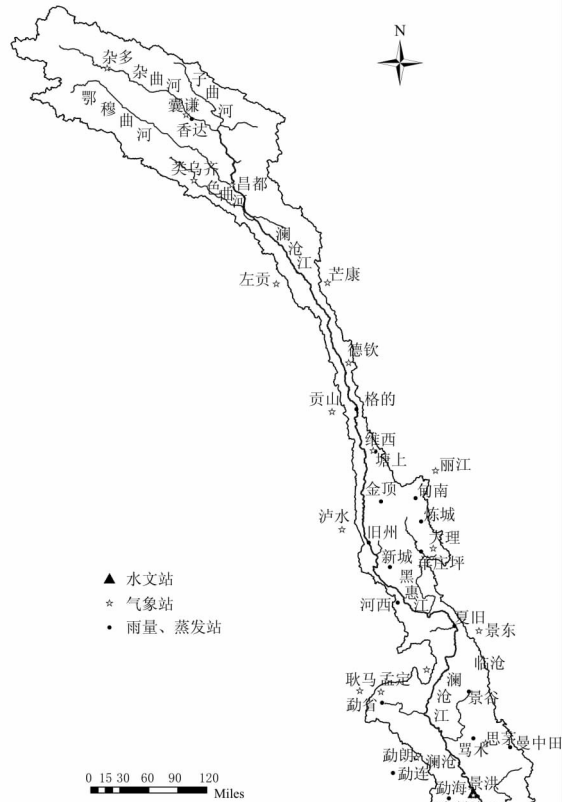


图 1 澜沧江流域水文、气象、雨量、蒸发站点分布图

在研究澜沧江流域的降雨量时,由于资料序列不一致,必须先进行资料的插补延长。首先计算 31 个站的 1960 - 1985 年降雨量的多年平均各月降水量 P_1 ,然后计算 12 个长序列气象站 1958 - 2015 年面平均降雨量的多年年内分布 P_2 ,求各月两者比值 P_1/P_2 ,以长序列降雨量为基值,调整得到 1958 - 2015 年具有相对一致性的面平均降雨量序列^[15]。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析

气候倾向率反映气候的变化趋势^[16],设定某个气象要素的时间序列为: $z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n$,可用一个多项式来表示:

$$\hat{z}_n(t) = p_0 + p_1 \times t + p_2 \times t^2 + \dots + p_m \times t^m \quad (m < n) \quad (1)$$

式中: t 为时间, a ; p_i 为多项式的拟合系数。

通常,某要素的趋势可用线性方程定量描述,即 $\hat{z}_n(t) = p_0 + p_1 \times t$,则要素变化率为 $d\hat{z}(t)/dt = p_1$, $p_1 \times 10$ 称作气候倾向率,即要素每 10 年变化率。

2.2.2 突变分析 突变分析采用 Mann - kendall 非参数统计检验。MK 检验是 1945 年由 Mann 和 Kendall 提出的一种统计检验方法,提出后被世界气象组织推荐并广泛使用^[17],它对样本分布情况要求不高,并且受异常值干扰影响较小,多适用于类型变量和顺序变量^[18],计算简单方便,易于操作。

该方法是指对于一个样本容量为 N 的时间序列 X ,求其第 i 时刻数值 X_i 大于第 j 时刻数值 X_j 个数的累计数 S_k ,又称为秩序列。

假定时间序列 X 是随机独立的,计算其均值 $E_{(S_k)}$ 和方差 $Var_{(S_k)}$,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E_{(S_k)}}{\sqrt{Var_{(S_k)}}} \quad (k = 1, 2, 3 \cdots, n) \quad (2)$$

式中:令 $UF_1 = 0$

按时间序列 X 顺序 X_1, X_2, \cdots, X_n 计算出的统计量记为 UF_k ,按时间序列 X 逆序 $X_n, X_{n-1}, \cdots, X_1$ 计算出的统计量记为 UB_k ,使 $UB_k = -UF_k, k = n, n-1, \cdots, 1, UB_n = 0$ 。 UF_k 与 UB_k 呈标准正态分布,在给定的显著性水平 α (一般取 $\alpha = 0.05$, 则 $U_\alpha = U_{0.05} = \pm 1.96$) 下,分析根据 UF_k 与 UB_k 绘出的曲线情况。

首先根据 UF_k 与 0 的大小分析序列的变化趋势,之后根据 UF_k 与两条临界直线 ($U_{0.05} = \pm 1.96$) 之间的情况分析序列变化趋势的显著性:若超过了临界线则表明其上升或者下降的趋势显著;最后根据 UF_k 与 UB_k 两条曲线的交点情况确定突变的开始时间:两条曲线在临界线之间的交点即为突变开始的时间。

(3) 相关性分析。Pearson 相关系数用来衡量两个数据的集合 x_i, y_i 是否在一条线上面,用来衡量定距变量间的线性关系。相关系数 r 的计算公式为:

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (3)$$

相关系数的绝对值越大,相关性越强,相关系数越接近于 1 或 -1,相关度越强,相关系数越接近于 0,相关度越弱。

3 结果与讨论

3.1 气温、降水的空间分布

对澜沧江流域内的各气象站和雨量站的多年平均气温、多年平均降雨量采用反距离平方法进行插值,绘制平均气温和降水的等值线图,得到两个气象要素的空间分布状况(图 2)。

澜沧江流域的平均气温上下游跨度较大,上游位处高寒地区,中游为亚热带地区,下游为热带气候,气温的空间分布表现为:纬度较高的北部地区气温较低,纬度较低的南部地区气温较高。其中,中上游的昌都站比周边温度高一些。昌都站以上年平均气温约 0 ~ 4℃,昌都站多年平均气温约 7℃,昌都站以下至德钦,年平均气温约 4 ~ 6℃,德钦以下至临沧,多年平均气温约 11 ~ 18℃,临沧以下至出口,多年平均气温约 18 ~ 22℃。

多年平均降水的空间差异性较大,降水的空间分布变现为:纬度较高的上游地势较高,降水较少,纬度较低的下部地区地势较低,降水较多。其中,中上游的贡山出现降水高值区,多年平均降水达 1700 mm,贡山站以上地区多年平均降水约 500 ~ 800 mm,贡山站以下至大理,多年平均降水约 700 ~ 1 000 mm,大理以下地区降雨空间分布不均匀,东南部受东南季风影响,降雨量较多,约 1 600 ~ 2 000 mm,西南地区的澜沧附近次之,约 1 400 ~ 1 600 mm,下游的中部地区降雨量相对较少,约 1 200 ~ 1 400 mm。

3.2 气温、降水、径流年代际变化

绘制 1958 - 2015 年澜沧江流域面平均气温、面平均降水、面平均实测蒸发及允景洪站径流深的变化过程线及线性趋势线(图 3),得出 4 个要素的变化趋势。

从图 3 可以看出:(1)澜沧江流域面平均气温呈显著的上升趋势,以 0.26℃/10a 的倾向率逐年波动上升,平均最低气温出现在 1959 年,为 12.2℃,平均最高气温出现在 2009 年,为 14.1℃。(2)面平均降水量呈波动下降的趋势,倾向率为 -4.2 mm/10a,降雨量最大的年份为 2014 年,为 1 266 mm,最小值出现在 1966 年,为 933 mm。(3)径流总体呈波动下降趋势,倾向率为 14.9 mm/10a,径流最大值出现在 1966 年,达 555.5 mm,最小值出现在 2012 年,为 222.6 mm。(4)面平均实测蒸发呈波动上升的趋势,倾向率为 4.2 mm/10a,最大最小蒸发量分别出现在 2009 年和 2000 年,分别为 1205 mm 和 945 mm。(5)气温和蒸发变化一致,均为上升趋势,可以认为气温升高,致使蒸发增大,下面仅讨论气温降水两个要素与径流的关系。径流和降水的变化一致,均为下降趋势。

计算 1958 - 2015 年间不同季节和年气温、降水、径流的倾向率,并采用 Mann - Kendall 秩次相关检验方法诊断其显著性(表 1)。

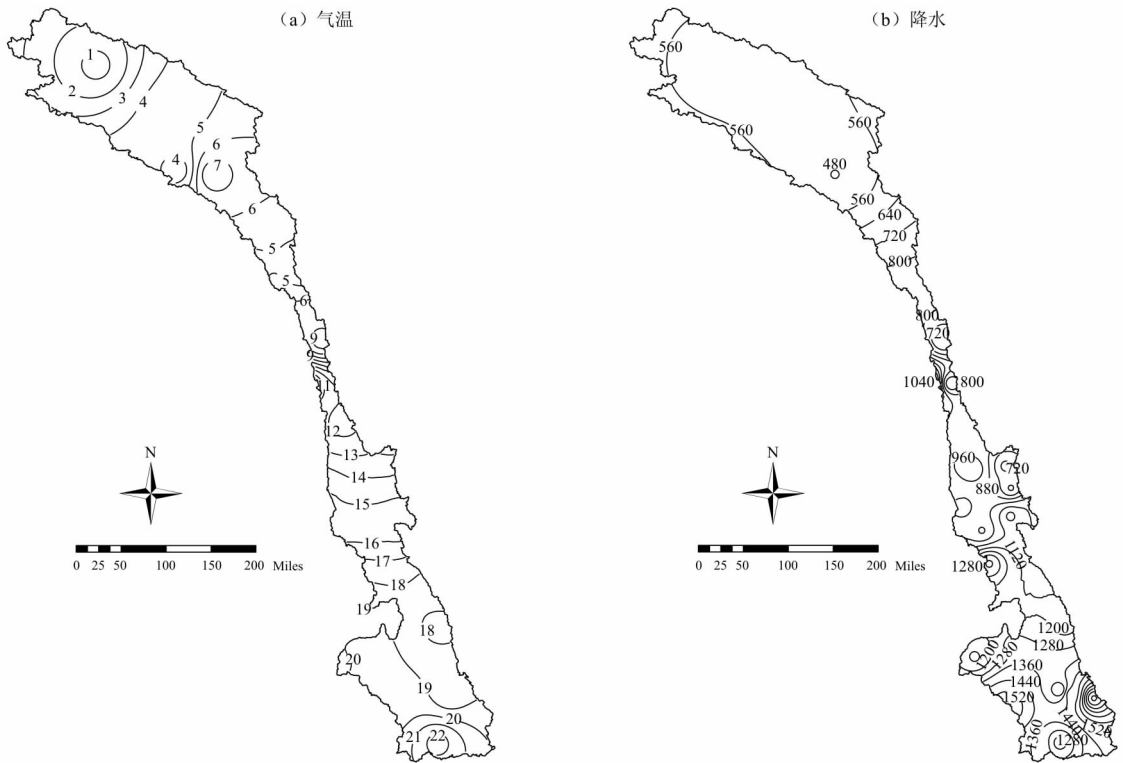


图2 澜沧江流域气温降水等值线图

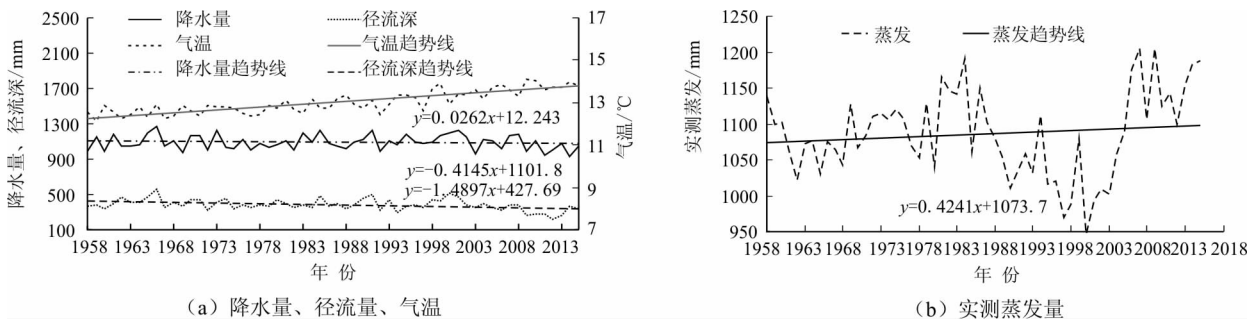


图3 澜沧江流域面平均气温、降水、实测蒸发、径流深1958-2015年际变化过程

表1 澜沧江流域1958-2015年气温、降水、径流倾向率及变化趋势诊断

要素	年		春季(3-5)		夏季(6-8)		秋季(9-11)		冬季(12-2)	
	倾向率	MK值	倾向率	MK值	倾向率	MK值	倾向率	MK值	倾向率	MK值
气温	0.26	6.96*	0.24	5.31*	0.24	7.00*	0.23	5.14*	0.33	5.63*
降水	-4.1	-0.23	4.20	1.06	-6.90	-1.11	-0.82	-0.11	-0.59	-0.11
径流	-14.9	-2.86*	3.50	2.56*	-12.00	-3.62*	-7.00	-2.33*	0.64	-0.36

从表1中可以看出:(1)气温在四季均呈上升趋势,与年变化趋势一致,其中冬季的倾向率最大,不同季节和年平均气温均呈显著性变化趋势,以夏季最为显著。(2)年降水量和四季降水量的变化均不显著,其中年降水量和夏、秋、冬三季的变化趋势一致,为非显著下降趋势,春季降水呈非显著上升趋势,

以夏季的倾向率最大。(3)年径流和夏、秋、冬三季径流的变化均为下降趋势,其中冬季不显著下降,春季径流呈显著上升的趋势,夏季径流变化最为显著。

对允景洪站1958-2015年径流深进行MK检验,得出2005年为突变点,根据检验结果,以2005

年为界将径流整个序列分为两个阶段:1958-2004、2005-2015。以1958-2004年作为基准期,表2统计给出了两个阶段气温、降水和径流及第二阶段与基准期的相对变化。

表2 澜沧江流域两个阶段气温、降水、径流及其变化量统计

阶段	气温/ ℃	变化 量/℃	降水 量/mm	变化 率/%	径流 深/mm	变化 率/%
1958-2004年	12.8		1098		400	
2005-2015年	13.8	1.0	1053	-4.1	314	-21.5

年均气温在2005年之后气温上升了1.0℃,符合前面的趋势分析,年均降水在2005年之后减少了4.1%,年均径流减少了21.5%。径流的减少的较多,有两个原因,其一是气温,气温升高致使蒸发增大(图3b),导致径流减少。其二是降雨量,由上文分析降水量减少,势必引起流域径流减少。已有研究表明,降水变化10%通常会引起径流量变化15%~25%,气温升高1℃情况下,径流量可能减少4%~8%左右^[19],由于澜沧江流域气温升高和降水减少可能会导致径流量减少11%~19%。其三,澜沧江干流水电站的兴建等人类活动也会引起径流量的变化;至2005年,澜沧江干流已建成电站有漫湾电站一期工程与大朝山电站,在建的电站有小湾和景洪,漫湾和大朝山电站的建立对下游径流的影响很小^[13],小湾水电站于2004年10月25日截流,景洪电站于2005年1月右岸工程顺利分流,左岸二期围堰2月成功截流^[12],对夏秋两季汛期径流量影响较大。突变点出现在2005年,符合小湾和景洪电站开始截流的时间,然而水电站主要影响径流年内变化^[9],水库面积的增加也会引起径流量的减小,同时,流域内社会经济的发展引起用水量的增多,也会导致径流量的减小。

3.3 气温、降水、径流年内变化趋势

绘制平均气温、降水、径流深的年内分配图(图4),得到澜沧江流域面平均气温、面平均降水和径

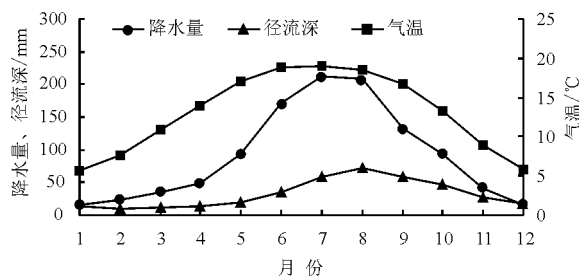


图4 澜沧江流域面平均气温、面平均降水年内分配图

流深的年内分配状况。

从图4中可以看出:(1)澜沧江流域面平均气温年内变化明显,6-8月份气温是全年最高,其中7月份为气温峰值,为19℃,12月和1月份气温最低,年内变化较为均匀平滑。(2)降水量年内差异较大,较为剧烈,主要集中于6-9月份,约占全年降雨量的66%。夏季受东南季风影响,降雨峰值出现在7月份,为212.4 mm,冬季受西南季风的影响,降水最少,最少降雨量出现在1月份,为15.8 mm。(3)径流主要集中在7-10月份,约占全年总径流的61%。径流峰值出现在8月份,为71.1 mm,比降雨峰值滞后一个月;径流最小值出现在2月份,比降水最小值滞后一个月。径流于夏秋季较大,春冬两季较小。

以2005年为界,绘制两个阶段气温、降水、径流的年内分配的变化图(图5),得到2005年前后3个要素年内分配的变化状况。从图5可以看出:(1)2005年之后的各月气温均上升,每个月气温上升的幅度在0.5~1.5℃之间,其中以2月上升幅度最大,10月的上升幅度最小。(2)2005年之后的降水在年内各月有增加有减少,没有明显的规律,其中在6、11月减少率较大,1月份增加率较大。(3)径流于2005年之后变化的规律比较明显,6-11月径流减少,其余月份径流增加,7、8、9月份减少率最大,径流量年内月分配的变化与水利工程兴建和运行调度有一定关系。

3.4 气温、降雨与径流的相关关系

本部分以2005年为分界线,分别绘制年尺度和季尺度上1958-2004年和2005-2015年的气温径流及降雨径流的相关图(图6)。

从图6(a~e)中可以看出:(1)气温和径流的相关关系季节性差异较大。从年尺度上分析,径流深随着气温升高而减少,2005年之后,减少的趋势变得剧烈,随着气温的升高,径流减少得更加显著;从季尺度上分析,2005年前后,春季和冬季气温径流相关关系变化较大,2005年前,春季径流随着气温

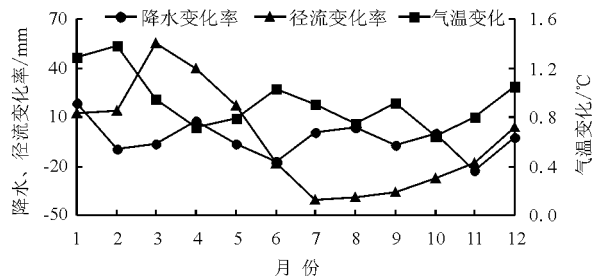


图5 澜沧江流域气温、降水、径流年内分配变化图

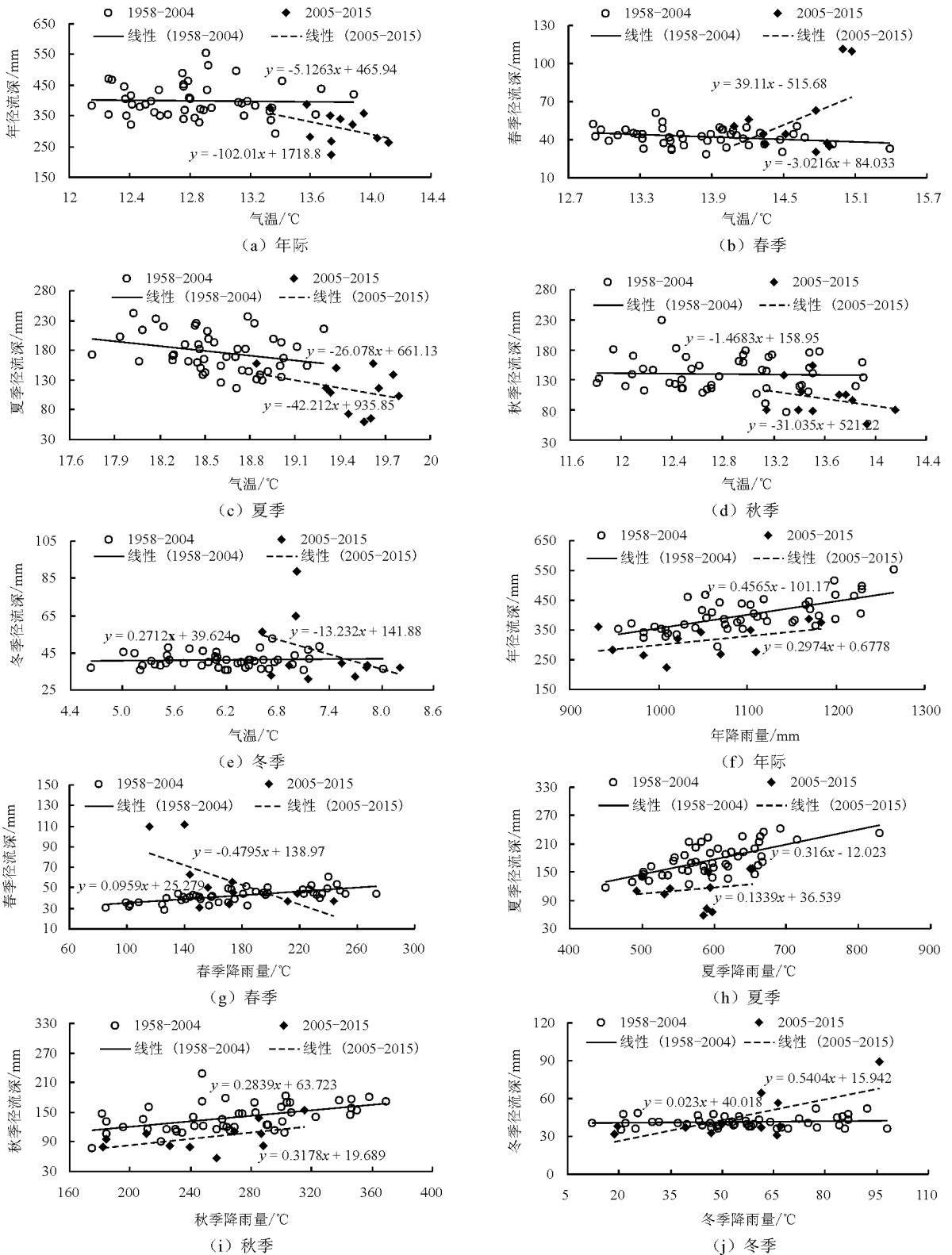


图6 气温径流及降雨径流相关图

的升高而减小,冬季径流随着气温的升高而增大,2005年之后,春季径流冬季径流随着气温的升高而显著增大,冬季径流随着气温的升高而显著减小。夏秋两季径流均随气温的升高而减小,2005年之后

减少的趋势更加显著。

(2)降水和径流的相关关系季节性差异也较大图6(f~j),从年尺度上分析,2005年前后,年径流均随着年降雨的增大而增大,2005年后增大趋势不

如之前显著;从季尺度上分析,同气温径流一样,2005年前后春季和冬季降雨径流相关关系变化较大,2005年前,春季径流随着降水的增大而增大,2005年之后,随着降水的增大而显著减小。2005年前后夏秋冬三季的径流均随着降水的增大而增大,其中夏秋季变化不大,冬季径流在2005年后随着降雨增大的趋势变得显著。

利用 SPSS 中 Pearson 双变量相关性检验,得到年尺度和季尺度的气温径流和降雨径流相关系数

(表3)。从表3中可以看出:(1)整个序列的气温径流在0.01水平上显著相关,其中以夏季相关性最好。由于澜沧江流域面积较大,气象站点较少,得到的两个阶段的气温径流的相关性较差,2005年之前基本上没有相关性,2005年之后相关性稍好一些。(2)2005年之前,降水径流在年尺度和春夏秋3季均在0.01水平上显著相关,其中春季相关性最好,2005年后,受水电站修建的影响,降水径流在年尺度和夏季的相关性较差,春季和冬季相关性较好。

表3 气温径流、降水径流相关系数

要素	时间段	相关系数				
		年尺度	春季	夏季	秋季	冬季
气温径流	1958 - 2015	-0.420 **	0.203	-0.590 **	-0.298 *	0.041
	1958 - 2004	-0.038	-0.254	-0.271	-0.028	0.044
	2005 - 2015	-0.427	0.463	-0.313	-0.331	-0.387
降水径流	1958 - 2015	0.637 **	0.067	0.540 **	0.504 **	0.303 *
	1958 - 2004	0.667 **	0.695 **	0.664 **	0.497 **	0.114
	2005 - 2015	0.462	-0.645 *	0.199	0.501	0.678 **

注:**在0.01水平(双侧)上显著相关;*在0.05水平(双侧)上显著相关。

4 结论

(1)澜沧江流域的平均气温和降水均空间分布不均,上下游差异较大,上游高寒地区气温低降水少,下游热带地区气温高降水多。

(2)多年平均气温整体呈上升趋势,多年降水和径流整体呈下降趋势,其中降水下降趋势不显著,径流下降趋势显著。降水和径流年季节性差异较大,主要集中在夏秋两季,径流峰值比降水峰值滞后一个月。

(3)气温、降水与径流均在1958-2015整个序列上显著相关。由于流域面积较大,气象站点较少,两个阶段的气温径流相关性较差。2005年前后,降雨径流的相关性差异较大,降雨径流的相关性不如2005年之前,季尺度上的相关性变化显著,夏秋季由于水电站修建,降雨径流相关性变差,冬季降雨径流相关性变好。

(4)径流在2005年出现突变,径流减少了21.5%,温度上升、降水量减少对径流减少的有一定贡献。同时,上游小湾和景洪水电站兴建运行,也改变了径流的季节变化。综合考虑其他人类活动的影响,定量分析不同因素对河川径流的影响是未来研究的重要内容。

参考文献:

- [1] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [2] 何大明. 澜沧江——湄公河水文特征分析[J]. 云南地理环境研究, 1995, 7(1):58-74.
- [3] 毕彦杰, 赵勇, 肖伟华, 等. 气候变化和水库运行对径流影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1):29-33.
- [4] 吴迪, 赵勇, 裴源生, 等. 气候变化对澜沧江-湄公河上中游径流的影响研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9):1569-1582.
- [5] 赵付竹, 张春花, 郝丽清. 澜沧江跨境径流对气候变化的敏感性分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2008, 30(S2):329-333.
- [6] 尤卫红, 何大明, 段长春. 云南纵向岭谷地区气候变化对河流径流量的影响[J]. 地理学报, 2005, 60(1):95-105.
- [7] 尤卫红, 赵付竹, 吴湘云. 夏季澜沧江跨境径流量变化与夏季风的关系[J]. 高原气象, 2007, 26(5):1059-1066.
- [8] 尤卫红, 何大明, 郭志荣. 澜沧江径流量变化与云南降水量场变化的相关性特征[J]. 地理科学, 2005, 25(4):420-426.
- [9] 顾颖, 雷四华, 刘静楠. 澜沧江梯级电站建设对下游水文情势的影响[J]. 水利水电技术, 2008, 39(4):20-23.

(下转第34页)

45.33%、34.62%~51.09%和35.43%~52.04%，而TSS、COD和TP的削减率分别仅为2.92%~7.36%、2.83%~12.01%和2.59%~16.07%。

参考文献:

- [1] 王文亮,李俊奇,宫永伟,等. 基于SWMM模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 中国给水排水,2012,28(21):42-44.
- [2] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 基于SWMM模型的城市雨洪模拟与LID效果评价——以北京市清河流域为例[J]. 水力发电学报,2016,35(11):84-93.
- [3] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护,2017,33(2):31-36.
- [4] 吴建立. 低影响开发雨水利用典型措施评估及其应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [5] 何爽,刘俊,朱嘉祺. 基于SWMM模型的低影响开发模式雨洪控制利用效果模拟与评估[J]. 水电能源科学,2013,31(12):42-45.
- [6] 李霞,石宇亭,李国金. 基于SWMM和低影响开发模式的老城区雨水控制模拟研究[J]. 给水排水,2015,31(5):152-156.
- [7] 胡爱兵,任心欣,丁年,等. 基于SWMM的深圳市某区域LID设施布局与优化[J]. 中国给水排水,2015,31

(21):96-100.

- [8] 许萍,何俊超,任心欣,等. 基于SWMM模型的城市道路LID设施设计参数优化研究[J]. 水电能源科学,2016,34(2):21-25.
- [9] Jorge G, Larry A R, Jennifer D. Storm water management model: applications manuals [EB/OL]. (2009-07) [2016-12-01]. http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5_apps_manual.pdf.
- [10] Rossman L A. Storm water management model user's manual version 5.0 [EB/OL]. (2010-07) [2016-12-01]. http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5_user_manual.pdf.
- [11] 黄国如,聂铁锋. 广州城区雨水径流非点源污染特性及污染负荷[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(2):142-148.
- [12] 聂铁锋. 广州市城区暴雨径流非点源污染负荷核算技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [13] 乔梦曦. 区域开发不同尺度雨水系统关系研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.
- [14] 戚海军. 低影响开发雨水管理措施的设计及效能模拟研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.
- [15] 苏义敬,王思思,车伍,等. 基于“海绵城市”理念的下沉式绿地优化设计[J]. 南方建筑,2014(3):39-43.

(上接第27页)

- [10] 陈丽晖,何大明. 澜沧江-湄公河水梯级开发的生态影响[J]. 地理学报,2000,55(5):577-586.
- [11] 陈翔,赵建世,赵钢铁,等. 发电调度对径流情势及生态系统的影响分析——以小湾、糯扎渡水电站为例[J]. 水力发电学报,2014,33(4):36-43.
- [12] 钟华平,王建生. 澜沧江干流水电开发对径流的影响分析[J]. 水利水电技术,2010,41(12):72-74.
- [13] 何大明,冯彦,甘淑,等. 澜沧江干流水电开发的跨境水文效应[J]. 科学通报,2006,51(S2):14-20.
- [14] 雷四华,刘静楠,顾颖,等. 澜沧江干流水电站建设前后出境点径流变化分析[J]. 云南大学学报:自然科学版,2010,32(1):58-62.
- [15] 王国庆,庞慧,荆新爱,等. 清涧河流域的水文情势变化阶段及其特征[J]. 中国水土保持科学,2005,3

(2):23-27.

- [16] 王秀芬,杨艳昭,尤飞. 近30年来黑龙江省气候变化特征分析[J]. 中国农业气象,2011,32(S1):28-32.
- [17] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备,2008(5):35-37+40.
- [18] 刘学锋,任国玉,范增禄,等. 海河流域近47年极端强降水时空变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(8):85-90.
- [19] Wang Guoqing, Zhang Jianyun, He Ruimin, et al. Run-off sensitivity to climate change for hydro-climatically different catchments in China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2017,31(4):1011-1021.