

澜沧江流域中下游主要水文气象要素变化相关性分析

黎清霞¹, 李佩怡², 何艳虎^{2*}, 陈栋为³

(1. 广州市白云区水务工程建设管理中心, 广州 510600; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广州 510275; 3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院, 贵阳 550081)

摘要:【目的】探索澜沧江流域水资源在变化环境下的响应机制。【方法】基于1967—2006年的水文气象资料,通过线性回归、相关分析法和随机森林重要性评分法分析了澜沧江中下游的水文气象要素月变化及其相关性。【结果】①1967—2006年澜沧江中下游月均降水量变化不显著;月均气温显著上升;月均蒸发量变化不明显,中游整体呈下降趋势,下游整体呈上升趋势;旱季(11—4月)月均径流量显著增加;②总体上,澜沧江中下游平均径流量雨季(5—10月)与气温负相关,旱季时与气温正相关;③径流量在湿季受蒸发量和降水量影响较大;旧州站径流量11—次年2月主要受气温和降水量影响,3—4月则是受降水量和蒸发量影响较大,与重要度评分结果大体一致;夏旧站干季时与径流量相关系数较大者依次为降水量和气温,重要度评分较大者依次为气温和蒸发量;④旧州站月均流量与各气象要素的相关系数绝对值均在0.9以下,夏旧站月均流量与各气象要素的相关系数绝对值均在0.5以下。【结论】变化环境下澜沧江中下游月均径流量的响应受时空变化的影响,旧州站雨季月均流量受气候变化影响较大,相较于气象要素变化,夏旧站月均流量主要受梯级电站建设和运行等人类活动影响。

关键词:澜沧江;水文气象;相关分析;随机森林

中图分类号:P339

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0614

黎清霞,李佩怡,何艳虎,等. 澜沧江流域中下游主要水文气象要素变化相关性分析[J]. 灌溉排水学报,2018,37(9): 100-107.

0 引言

1880—2012年,气候变化导致全球地表平均温度上升了0.85℃,尤其1983—2012年可能是北半球最热的30 a^[1]。水是大气环流和水文循环过程中的重要组成部分,全球气候变化直接影响这2个过程,引起水资源在时空分布上的变化,国内外学者对此做了不少研究。

张树磊等^[2]基于Budyko假设的流域水热耦合平衡方程分析中国主要流域径流量减少原因时,发现气候较湿润地区径流对气候和下垫面的变化均不敏感,而气候较干旱地区径流对二者的变化都较为敏感,且区域差异性更明显。陈忠升^[4]利用M-K突变检验、Lee-Heghinian检验、集合经验模态分解(EEMD)和小波变换等方法对西北干旱区河川径流变化进行归因定量分析,发现气候变化对出山径流影响显著。陈玲飞等^[5]利用水文气候模型对气候变化下的中国小流域径流进行敏感性分析,发现大部分地区径流与降水变化趋势一致,与气温变化趋势相反;干旱区如内蒙古高原地区气温对径流的影响更显著,湿润区如长江中下游、华东华南等地区降水对径流影响更显著。陈学凯等^[6]通过研究发现,影响贵州省干旱的主要气象因素为降水量,温度次之。Nguyen等^[7]、Samuel等^[8]、Anil等^[9]通过SWAT模型、大气环流模型和水土评估工具模型等对变化环境下的水文响应进行评估和预测,并提出相应的解决方法。

澜沧江发源于有“亚洲水塔”之称的青藏高原,对全球气候变化响应十分显著,是全球气候变化的“指示器”^[10]。澜沧江流域跨度大,且位于三江并流区域,山川并列、高山峡谷相间,地形复杂,受东南季风和西南季

收稿日期:2017-10-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51509127,91547202,51210013)

作者简介:黎清霞(1971-),女,广东阳春人。主要从事水环境保护与水资源管理研究。

通信作者:何艳虎(1986-),男,河南息县人。副研究员,博士,主要从事变化环境的水资源响应研究。E-mail: heyanhut3@mail.sysu.edu.cn

风的交互影响,覆盖6种气候带,气候类型丰富,形成独特的地理气候环境,是我国的气候敏感区和脆弱区^[11],流域内水资源对气候变化的响应尤为敏感。因此,开展变化环境下澜沧江流域的水资源响应研究,对科学合理开发澜沧江流域水资源,减少用水国际纷争具有重要意义。目前关于澜沧江流域水文气象要素的变化趋势已做出了不少成果,如赵付竹等^[12]利用不同水文模拟途径和假定气候方案对澜沧江流域跨境径流量对气候变化的敏感性进行研究。刘波等^[13]通过多模式集成的21世纪不同情景下气候变化模拟实验,发现气候变化下1967—2008年澜沧江降水减少,气温上升,但在1967—2008年降水表现为明显上升趋势。李斌等^[14]通过研究发现澜沧江流域极端降水频率明显增加,1960—2005年非汛期径流有下降趋势。影响径流变化的因素复杂多变,而当前关于各主要气象要素对径流影响程度的定量识别研究仍不多见。

为此,综合采用相关分析和随机森林算法,定量识别和对比澜沧江中下游主要气象要素变化及其与径流的相关性,分析各气象要素对径流变化的影响程度,为流域水资源开发利用与生态环境保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

澜沧江地处中国西南地区,位于94°—102°E,21°—34°N,流域面积约16.74万km²,干流长2161km,发源于青海省玉树藏族自治州杂多县的吉富山^[15],流经青海、西藏、云南省(自治区),水电资源丰富,理论蕴藏量占全国的14%^[16]。

澜沧江流域径流总体以降水补给为主,地下水和融雪补给为辅。全流域属西南季风气候,旱、雨季分明,一般5—10月为湿季,11—次年4月为干季,暴雨多发在7、8月。上游暴雨较少,中游暴雨强度较大,为流域的主要暴雨区^[17]。

1.2 数据资料

资料数据包括:①澜沧江下游云南省境内旧州水文站(99.13°E,25.47°N)和戛旧水文站(100.46°E,24.60°N)1967年1月—2006年12月的逐月径流量观测数据;②澜沧江流域26个气象站点1967年1月—2006年12月的月平均降水量、月平均气温和逐日小型蒸发量;所选气象站信息见图1。

水文站径流数据包括上游区域流入的径流量,数据源自云南省水文局,水文序列资料完整;26个气象站点的气象数据为中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)收集所得,月平均降水量和月平均气温序列资料完整,月平均蒸发量由逐日小型蒸发量累积算得,部分年份只有大型蒸发量,则根据小型蒸发量与大型蒸发量二者关系进行换算,求出小型蒸发量,缺乏蒸发量数据部分通过插补延长方法求得。采用的数据资料符合“三性”审查。

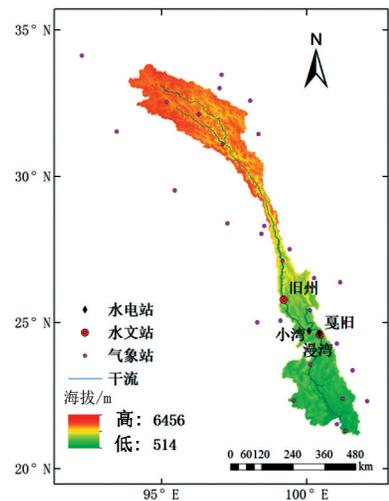


图1 澜沧江流域图

1.3 研究方法

兹采用线性回归对水文和气象要素的变化趋势进行分析,用相关分析法对径流和降水、气温、蒸发之间的关系进行分析,并用随机森林的变量重要性评分各要素的重要程度,进一步验证相关分析法所得结果。

1.3.1 相关分析法

相关系数的计算方法以英国统计学家皮尔逊(Karl Pearson)的积差法最常用^[18],其计算公式为:

$$r = \frac{SS_{XY}}{\sqrt{(SS_{XX})(SS_{YY})}} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

式中: r 为相关系数,指根据样本计算的2个变量之间线性相关程度的统计量; x 和 y 分别表示2种现象的观测值。相关系数 r 的取值范围限于 $-1 \leq r \leq +1$ 。相关系数与相关程度关系见表1。

表1 相关系数与相关程度关系

相关系数 r	0	0~±0.3	±0.3~±0.5	±0.5~±0.8	±0.8~±1
相关程度	无相关	弱正负相关	低度正负相关	中度正负相关	高度正负相关

相关系数在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下的临界值为 $r_{0.05}=0.3044$,当 r 超过临界值,则认为相关性显著,否则为

相关性不显著^[19]。

1.3.2 随机森林方法

随机森林(Random Forest, RF)是一种由树形结构分类器 $\{h(X, \theta_k), k=1, 2, 3, \dots\}$ 组合而成的分类器集合^[20]。RF采用组合方法(Ensemble Method)的思想,对于每棵树,构建基于样本子空间的 k 棵分类回归树,其中样本子空间是采用bootstrap方法由原始训练数据集中抽取。 k 个袋外数据(Out-Of-Bag, OOB)包含了未被抽到的样本。将生成的多棵树组成随机森林,用随机森林对新的数据进行分类,分类结果按树分类器多数投票策略而定^[20-21]。RF在构建分类器的过程中,通过对变量重要性排序进行变量重要性评分(Variable Importance Measure, VIM)。Importance函数属于4种变量重要性度量中的一种方法,包括平均精度下降(Mean Decrease Accuracy, MDA)重要性评分和Gini指数^[20]。MDA是通过变量值的置换计算其重要性,后者是通过基尼(Gini)指数计算其重要性,前者比后者具有更好的非偏倚性能^[22]。

采用基于袋外数据分类准确率的变量重要性度量^[23]。在RF的每棵树中,使用随机抽取的训练自助样本建树,并计算OOB的预测错误率,然后随机置换变量 X_j 的观测值后再次建树并计算OOB的预测错误率,最后计算2次OOB错误率的差值经过标准化处理后在所有树中的平均值即为变量 X_j 的置换重要性 VIM_j 。

变量 X_j 在第 i 棵树的 VIM_j 为:

$$VIM_j = \frac{\sum_{p=1}^{n_0^i} I(Y_p = Y_p^i)}{n_0^i} - \frac{\sum_{p=1}^{n_0^i} I(Y_p = Y_{p, \pi_j}^i)}{n_0^i}, \quad (2)$$

式中: n_0^i 为第 i 棵树OOB数据的观测例数; $I(\bullet)$ 为指示函数; $Y_p \in \{0, 1\}$ 为第 p 个观测值; $Y_{p, \pi_j}^i \in \{0, 1\}$ 表示第 i 棵树对OOB数据第 p 个观测的预测结果。若变量 j 没有在第 i 棵树中出现,则 $VIM_{ij}=0$ 。

变量 X_j 在RF中的置换重要性定义为:

$$VIM_j = \frac{\sum_{i=1}^n VIM_{ij}}{n}, \quad (3)$$

式中: n 为RF中分类树的数量^[24]。

2 结果与分析

2.1 水文气象要素月尺度变化

2.1.1 中游气象要素逐月变化趋势

1967—2006年澜沧江中游地区1—3、5—6、8—10月的月均降水量整体呈上升趋势,其中8月月均降水量上升最快,以7.87 mm/10 a的增幅上升,6月月均降水量上升最慢,增幅为0.27 mm/10 a(表2)。4、7、11、12月的月均降水量整体呈下降趋势,其中4月月均降水量下降最快,以1.54 mm/10 a的降幅下降,12月月均降水量下降最慢,降幅为0.26 mm/10 a。1967—2006年,7月月均降水量的变化波动最小,变差系数为0.16,12月月均降水量的变化波动最大,变差系数为1.00。在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,1967—2006年1—12月月均降水量的变化都是不显著的。

1—2月的平均气温均整体呈上升趋势,其中2月平均气温上升最快,增幅为0.47 °C/10 a,6月平均气温上升最慢,增幅为0.06 °C/10 a。1967—2006年,8月平均气温的变化波动最小,变差系数为0.037,12月平均气温的变化波动最大,变差系数为40.56。在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,1967—2006年3、5、9、10月平均气温的变化都是不显著的,其他月份变化均是显著的。

1月和12月的平均蒸发量整体呈上升趋势,其中1月平均蒸发量上升最快,增幅为1.39 mm/10 a,12月平均蒸发量上升最慢,增幅为0.11 mm/10 a。2—11月的平均蒸发量均整体呈下降趋势,其中5月平均蒸发量下降最快,降幅为11.72 mm/10 a,11月平均蒸发量下降最慢,降幅为0.28 mm/10 a。1967—2006年12个月中,11月平均蒸发量的变化波动最小,变差系数为0.10,2月平均蒸发量的变化波动最大,变差系数为0.17。在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,1967—2006年5、8月平均蒸发量的变化是显著的,其他月份平均蒸发量的变化都是不显著的。

旧州站1967—2006年各月平均流量整体呈上升趋势,其中4月的年际变化量最小,以10.93 m³/(s·10 a)

的增幅增加,9月的年际变化量最大,以 $179.97 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 的增幅增加。1—4月、11月、12月的月平均流量变化波动相对较小,5—10月波动相对较大,其中2月变化波动最小,变差系数为0.12,8月变化波动最大,变差系数为0.36。在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下1967—2006年4—5月、8月、10月的平均流量变化是不显著的,其他月份的变化都是显著的。

表2 澜沧江中游(旧州站)水文气象要素月变化参数(显著性水平 $Z_{0.05}=0.2157$)

要素	参数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
降水量	年代际变化/ ($\text{mm} \cdot 10^4 \text{ a}^{-1}$)	0.75	0.32	3.25	-1.54	6.60	0.27	-0.58	7.87	4.35	2.63	-0.50	-0.26
	Cv	0.66	0.57	0.59	0.44	0.44	0.27	0.16	0.28	0.29	0.59	0.72	1.00
	Z	0.06	0.02	0.08	0.09	0.22	0.00	-0.04	0.18	0.14	0.10	-0.02	-0.03
	显著性	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
气温	年代际变化/ ($^{\circ}\text{C} \cdot 10^4 \text{ a}^{-1}$)	0.42	0.47	0.26	0.29	0.06	0.35	0.23	0.19	0.16	0.19	0.32	0.33
	Cv	1.54	0.96	0.20	0.12	0.064	0.058	0.044	0.037	0.060	0.13	0.26	-52.94
	Z	0.31	0.28	0.19	0.26	0.08	0.34	0.28	0.28	0.15	0.15	0.29	0.34
	显著性	显著	显著	不显著	显著	不显著	显著	显著	显著	不显著	不显著	显著	显著
蒸发量	年代际变化/ ($\text{mm} \cdot 10^4 \text{ a}^{-1}$)	1.39	-0.57	-3.14	-2.25	-11.72	-3.23	-1.36	-6.26	-0.76	-2.42	-0.28	0.11
	Cv	0.13	0.17	0.13	0.104	0.16	0.121	0.110	0.134	0.129	0.116	0.102	0.11
	Z	0.03	-0.03	-0.11	-0.09	-0.31	-0.13	-0.06	-0.24	-0.07	-0.18	-0.04	0.03
	显著性	不显著	不显著	不显著	不显著	显著	不显著	不显著	显著	不显著	不显著	不显著	不显著
平均流量	年代际变化/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^4 \text{ a}^{-1}$)	13.13	15.21	21.53	10.93	39.71	101.07	119.84	114.51	179.97	66.24	34.86	27.84
	Cv	0.14	0.12	0.19	0.19	0.23	0.25	0.23	0.36	0.33	0.26	0.18	0.18
	Z	0.29	0.35	0.22	0.05	0.17	0.21	0.25	0.15	0.23	0.18	0.28	0.35
	显著性	显著	显著	显著	不显著	不显著	不显著	显著	不显著	显著	不显著	显著	显著

2.1.2 下游气象要素逐月变化趋势

1967—2006年澜沧江下游地区2、3、5、10月的平均降水量整体呈上升趋势,其中5月平均降水量上升最快,增幅为 $11.23 \text{ mm}/10 \text{ a}$,2月平均降水量上升最慢,增幅为 $0.88 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (表3)。1、4、6—9、11、12月的平均降水量整体呈下降趋势,其中9月平均降水量下降最快,降幅为 $9.41 \text{ mm}/10 \text{ a}$,4月平均降水量下降最慢,降幅为 $0.29 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。1967—2006年12个月中,7月平均降水量的变化波动最小,变差系数为0.20,12月平均降水量的变化波动最大,变差系数为1.18。在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,1967—2006年1—12月平均降水量的变化都是不显著的。

1—2月的平均气温均整体呈上升趋势,其中2月平均气温上升最快,增幅为 $0.50 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$,5月平均气温上升最慢,增幅为 $0.02 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 。1967—2006年12个月中,7月平均气温的变化波动最小,变差系数为0.195,12月平均气温的变化波动最大,变差系数为0.08。在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,1967—2006年5月平均气温的变化都是不显著的,其他月份变化均是显著的。

1、4、6—12月的平均蒸发量整体呈上升趋势,其中4月平均蒸发量上升最快,增幅为 $7.58 \text{ mm}/10 \text{ a}$,12月平均蒸发量上升最慢,增幅为 $0.20 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。2、3、5月的平均蒸发量均整体呈下降趋势,其中5月平均蒸发量下降最快,降幅为 $6.34 \text{ mm}/10 \text{ a}$,2月平均蒸发量下降最慢,降幅为 $0.63 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。1967—2006年12个月中,12月平均蒸发量的变化波动最小,变差系数为0.02,9月平均蒸发量的变化波动最大,变差系数为0.20。在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,1967—2006年4、11月平均蒸发量的变化是显著的,其他月份平均蒸发量变化均不显著。

夏旧站1967—2006年各月平均流量整体呈上升趋势,其中4月的年际变化量最小,以 $19.90 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 的增幅增加,9月的年际变化量最大,以 $148.63 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 的增幅增加。1—5月、11月、12月的月平均流量变化波动相对较小,6—10月波动相对较大,其中1月变化波动最小,变差系数为0.15,8月变化波动最大,变差系数为0.29。在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下1967—2006年1—3月、12月的平均流量变化显著,其他月份变化均不显著,这与干季漫湾电站的水库调节有关,使径流量年内分配更均匀。

表3 澜沧江下游(夏旧站)水文气象要素月变化参数(显著性水平 $Z_{0.05}=0.2157$)

要素	参数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
降水量	年际变化/ ($\text{mm} \cdot 10^4 \text{a}^{-1}$)	-1.04	0.88	2.13	-0.29	11.23	-5.96	-0.82	-7.45	-0.88	3.74	-9.41	-1.43
	C_v	0.85	0.72	0.71	0.53	0.51	0.27	0.20	0.23	0.25	0.40	0.78	1.18
	Z	-0.10	0.05	0.05	-0.07	0.13	-0.09	-0.04	-0.08	-0.04	0.05	-0.17	0.04
	显著性	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
气温	年际变化/ ($^{\circ}\text{C} \cdot 10^4 \text{a}^{-1}$)	0.43	0.50	0.36	0.45	0.02	0.25	0.16	0.25	0.14	0.35	0.30	0.35
	C_v	0.068	0.070	0.051	0.052	0.036	0.023	0.019	0.021	0.022	0.042	0.052	0.078
	Z	0.47	0.46	0.35	0.39	0.02	0.39	0.28	0.47	0.25	0.36	0.32	0.30
	显著性	显著	显著	显著	显著	不显著	显著	显著	显著	显著	显著	显著	显著
蒸发量	年际变化/ ($\text{mm} \cdot 10^4 \text{a}^{-1}$)	3.39	-0.63	-0.79	7.58	-6.34	1.28	0.59	1.53	5.57	1.81	3.66	0.20
	C_v	0.110	0.113	0.107	0.124	0.185	0.121	0.109	0.110	0.197	0.113	0.109	0.085
	Z	0.18	0.01	-0.01	0.25	-0.14	0.07	0.06	0.09	0.13	0.12	0.27	0.03
	显著性	不显著	不显著	不显著	显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	显著	不显著
平均流量	年际变化/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^4 \text{a}^{-1}$)	31.62	24.89	42.78	19.90	39.86	101.27	113.31	41.19	148.63	50.86	37.90	41.19
	C_v	0.15	0.16	0.17	0.20	0.22	0.26	0.21	0.29	0.28	0.27	0.21	0.19
	Z	0.40	0.31	0.45	0.13	0.15	0.18	0.18	0.06	0.18	0.16	0.18	0.31
	显著性	显著	显著	显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	显著

由表3可知,澜沧江中游1、12月和下游6—9月雨季、1、12月冬季降水量呈减少趋势,气温和蒸发呈上升趋势,表明存在暖干化趋势,这些时段发生干旱的风险增大,该情况与塔里木河流域相反^[25]。中下游的气温变化均是冬春季上升明显,夏秋季上升缓慢,这与长江流域的气温变化趋势一致^[26]。

2.2 水文气象要素月尺度变化的相关性

2.2.1 中游水文气象月变化相关性

由表4可知,旧州站逐月平均径流量与中游平均降水量呈正相关关系,其中6—10月的相关性显著;1—5月、11—12月与气温呈正相关关系,6—10月呈负相关关系,其中1—2、11月相关性显著;与平均蒸发量呈负相关关系,其中6—10月的相关性显著。用相关分析法分析水文气象要素相关性时发现,5—10月湿季蒸发量占主要作用,其次是降水量,其中8月蒸发量对径流量反作用最强;2月、12月气温占主要作用(图2)。随机森林重要度评分中,平均径流量4月受降水和气温影响较大,11月受气温和蒸发影响较大(图3),其他均与相关分析法所得结果相同,二者分析相对应。

表4 旧州站逐月平均径流量与气象要素相关系数 r

月份	降水量	气温	蒸发量
1	0.08	0.39*	0.17
2	0.26	0.35*	-0.05
3	0.65*	0.01	-0.45*
4	0.27	0.01	-0.14
5	0.24	0.07	-0.29
6	0.40*	-0.27	-0.58*
7	0.29	-0.16	-0.76*
8	0.74*	-0.29	-0.85*
9	0.41*	-0.17	-0.44*
10	0.54*	-0.11	-0.60*
11	-0.16	0.46*	0.12
12	0.03	0.26	-0.03

注 *代表通过0.05显著性检验。

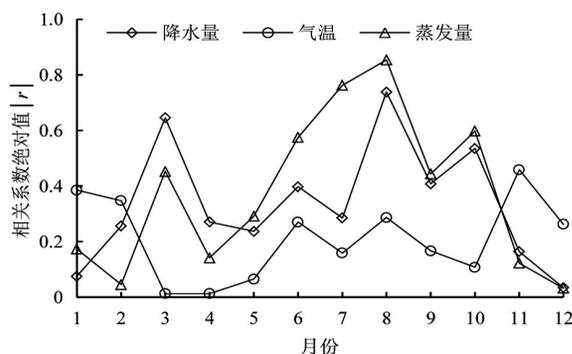


图2 旧州站逐月平均流量与气象要素相关系数绝对值变化曲线

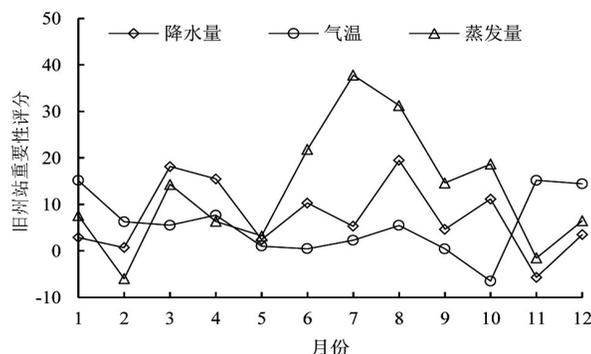


图3 旧州站逐月平均流量与气象要素重要性评分

2.2.2 下游水文气象月变化相关性

由表5可知,夏旧站逐月平均径流量与澜沧江下游地区平均降水量呈正相关关系,其中3、8、10月的相关性显著;1—4月、11—12月与气温呈正相关关系,5—10月呈负相关关系,其中只有1月相关性显著;与平

均蒸发量呈负相关关系,其中5—6、8、10月的相关性显著。用相关分析法分析径流量与气候因素相关性可得出,5—10月雨季蒸发量占主要作用,其中5—7月气温影响比降水量高,8—10月降水量影响比气温高,2、12月中气温占主要作用(图4),随机森林重要度评分结果与相关分析法所得结果大致相同,不同之处为相关分析法得出旱季径流量受降水和气温影响较大,而随机森林法得出径流量受蒸发和气温影响较大(图5)。

表5 夏旧站逐月平均径流量与气象要素相关系数 r

月份	降水量	气温	蒸发量
1	0.08	0.42 *	0.02
2	0.18	0.22	-0.15
3	0.31 *	0.22	-0.19
4	0.07	0.07	-0.07
5	0.25	-0.25	-0.37 *
6	0.13	-0.21	-0.42 *
7	-0.08	-0.15	-0.28
8	0.32 *	-0.11	-0.41 *
9	0.19	0.08	-0.22
10	0.33 *	-0.22	-0.34 *
11	0.04	0.02	-0.13
12	-0.05	0.16	0.07

注 *代表通过0.05显著性检验。

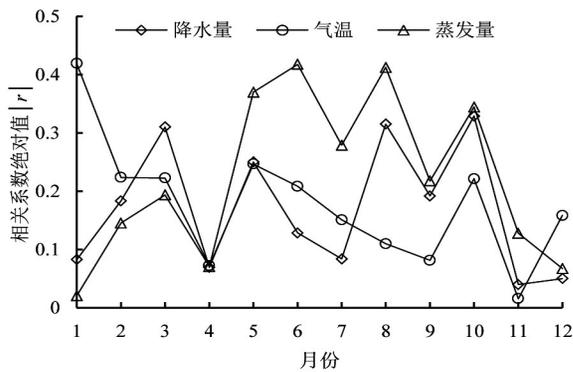


图4 夏旧站逐月平均流量与气象要素相关系数绝对值变化曲线

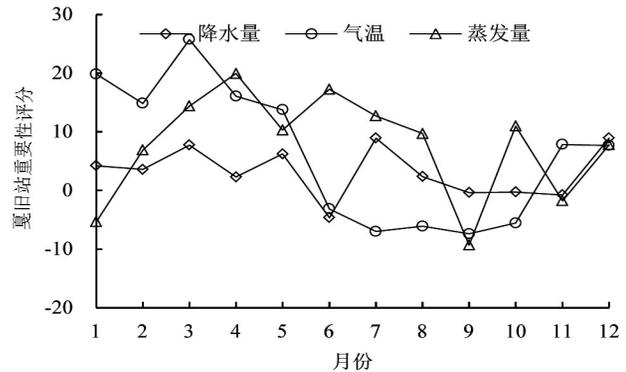


图5 夏旧站逐月平均流量与气象要素重要性评分

由于澜沧江流域冬夏二季受不同的大气环流影响和控制,降水量在季节分配上不均匀,主要集中在雨季(5—10月),雨季径流量增加。由图4可知,6—10月澜沧江中下游径流量与气温均呈弱负相关,说明气温对径流的增加起到了某种程度的削弱作用,一方面是由于中下游的冰川和积雪覆盖面积较小,高山冰雪融水对河流补给的贡献较小,另一方面是由于气温上升导致蒸发增加,在供给减少的情况下对径流增加起到削弱作用,且与黑河上游地区情况相似,冬季径流对气温变化响应发生了一定的滞后性^[27]。

旧州站雨季的月平均径流量受气候变化影响较大,同时也受到人类活动的影响。夏旧站平均径流量与各气象要素的相关系数绝对值均在0.5以下,平均径流量受气象变化影响较小,主要是受人类活动影响。如1995年漫湾电站建成,2002年小湾电站开始动工,水电站建站前夏旧站雨季平均径流量为旱季的3.40倍,建站后为3.22倍。

3 讨论

研究表明,气象变化对径流的影响因素中,降水较为活跃,温度相对较为迟钝^[27],径流还受蒸发和湿度等的影响,但不同区域表现不同。渭河源区降水量是引起年径流量衰减的主要气象因素^[28];黑河流域径流变化主要是降水和气温引起的^[29];洞庭湖流域径流量受降水和蒸发量影响较大^[30];尤卫红等^[31]研究表明云南降水量场的变化是澜沧江跨境径流量变化的主要原因,春节影响较大,其次为夏秋季。研究表明,近年来澜沧江流域降水减少^[13],但极端降水频率明显增加,这可能与气候系统的随机性变强有关^[14]。本文采用相关分析法对主要的水文气象要素的相关性进行分析,并用随机森林重要度评分进一步验证,所得结果与前人^[13-31]研究所得结果趋势大致相同,个别月份气象因子的影响重要度结果有所不同,这是由于使用不同方法、时间尺度、时间序列和区域所导致。要探讨气候变化对澜沧江水文的影响,支持流域水资源开发利用与生态环境保护工作,本文所做的研究是远远不够的,未来将对变化环境下水文响应机制进行进一步探讨,并且延伸到

气候对流域水生态的影响,包括水质、水量、水生物和水环境等,还要考虑复杂的人类活动影响,尤其是水利枢纽建设的影响。

4 结论

1)澜沧江中游降水量变化不显著,其中4、7、11—12月呈减少趋势,其他月份呈增加趋势;气温整体呈上升趋势,其中2、4、6—8、11—12月变化十分显著;蒸发量整体呈下降趋势,只有5月和8月变化显著,其他月份均为不显著。澜沧江下游降水量变化不显著,其中2—3、5、10月呈增加趋势,其他月份均呈减少趋势;气温整体呈上升趋势,只有5月气温变化不显著,其他月份变化均十分显著;蒸发量整体呈上升趋势,其中2—3、5月呈下降趋势,只有4月和11月变化显著,其他月份均不显著。

2)戛旧站平均径流量多于旧州站,且变化趋势一致,均为增加趋势,戛旧站径流量变化滞后于旧州站,受上游径流量影响较大。旧州站1—3、7、9、11—12月径流量变化显著,戛旧站3、12月径流量变化显著,2个水文站12个月的平均径流量都是呈上升趋势。

3)旧州站和戛旧站总体上平均月径流量与降水量正相关,与蒸发量负相关,雨季时与气温负相关,旱季时与气温正相关。旧州站雨季受蒸发量和降水量影响较大,相关系数绝对值总体分别在0.4和0.25以上,二者的重要度评分排名前列,旱季的主要影响要素变化波动大,呈季节性变化,相关分析法和重要度评分所得结果一致,均是2、11—12月主要受气温和降水量影响,3—4月则是受降水量和蒸发量影响较大。戛旧站在用2种方法分析影响因子时所得结果差异较大,雨季时二者变化一致,总体上受降水量和蒸发量的影响,旱季时相关分析法所得结果为降水量和气温,重要度评分结果为气温和蒸发量。

4)旧州站雨季的月平均径流量受气候变化影响较大,同时也受到人类活动的影响。戛旧站月均径流量与各气象要素的相关系数绝对值均在0.5以下,受气象要素变化影响较小,主要是受梯级电站建设和运行等人类活动影响。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability[EB/OL]. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- [2] 中国天气网. IPCC第五次评估第一工作组报告宣讲会全文[EB/OL]. <http://weather.news.sina.com.cn/news/2013/1028/091095698.html>.
- [3] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960-2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(5):605-613.
- [4] 陈忠升. 中国西北干旱区河川径流变化及归因定量辨识[D]. 上海:华东师范大学, 2016.
- [5] 陈玲飞, 王红亚. 中国小流域径流对气候变化的敏感性分析[J]. 资源科学, 2004(6):62-68.
- [6] 陈学凯, 徐建新, 雷宏军, 等. 贵州省干旱时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 灌溉排水学报, 2015,34(8):72-81.
- [7] TRANG N T T, SHRESTHA S, SHRESTHA M, et al. Evaluating the impacts of climate and land-use change on the hydrology and nutrient yield in a transboundary river basin: A case study in the 3S River Basin (Sekong, Sesan, and Srepok)[J]. Science of the Total Environment, 2017,576:586-598.
- [8] KUSANGAYA S, TOUCHER M L W, VAN GARDEREN E A, et al. An evaluation of how downscaled climate data represents historical precipitation characteristics beyond the means and variances[J]. Global and Planetary Change, 2016,144:129-141.
- [9] ACHARYA A, PIECHOTA T C, TOOTLE G. Quantitative Assessment of Climate Change Impacts on the Hydrology of the North Platte River Watershed, Wyoming[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012,17(10):1 071-1 083.
- [10] 刘少华. 怒江上游流域水循环演变规律及其对气候变化的响应[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2017.
- [11] 李立科. 云南澜沧江流域植被时空动态及对区域气候变化的响应[D]. 上海:华东师范大学, 2011.
- [12] 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.
- [13] 刘波, 肖子牛. 澜沧江流域1951-2008年气候变化和2010-2099年不同情景下模式预估结果分析[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(3):170-174.
- [14] 李斌, 李丽娟, 李海滨, 等. 1960-2005年澜沧江流域极端降水变化特征[J]. 地理科学进展, 2011, 30(3):290-298.
- [15] 周长进, 关志华. 澜沧江(湄公河)正源及其源头的再确定[J]. 地理研究, 2001(2):184-190.
- [16] 李菊根, 史立山. 我国水力资源概况[J]. 水力发电, 2006(1):3-7.
- [17] 李丽娟, 李九一, 陈异晖, 等. 澜沧江流域水资源与水环境研究[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- [18] 彭克宏. 社会科学大词典[M]. 北京:中国国际广播出版社, 1989:321.
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第2版. 北京:气象出版社, 2007.
- [20] 蔡林霖. 随机森林的模型选择及其并行化方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [21] 姚登举, 杨静, 詹晓娟. 基于随机森林的特征选择算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(1):137-141.
- [22] 张晓凤, 侯艳, 李康. 基于AUC统计量的随机森林变量重要性评分的研究[J]. 中国卫生统计, 2016(3):537-540.
- [23] VERIKAS A, GELZINIS A, BACAUSKIENE M. Mining data with random forests: a survey and results of new tests[J]. Pattern Recognition, 2011,44(2):330-349.

- [24] 杨凯, 侯艳, 李康. 随机森林变量重要性评分及其研究进展[EB/OL]. <http://www.doc88.com/p-6601591138244.html>.
- [25] 牛建龙, 柳维扬, 王家强, 等. 塔里木河干流流域气候变化特征及其突变分析[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2):106-112.
- [26] 钟晨晨, 崔宁博, 谭畅, 等. 近53 a长江流域气温的时空变化特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(12):88-96.
- [27] 丁霞, 牛最荣, 黄维东, 等. 气候变化对黑河上游径流量的影响研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(8):23-26.
- [28] 余涛. 气候变化对我国北方典型流域年径流影响研究[D]. 保定:华北电力大学, 2015.
- [29] 崔延华, 宋悦, 粟晓玲. 祁连山区气候变化对黑河出山径流的影响[J]. 人民黄河, 2017, 39(5):15-20.
- [30] 程俊翔, 徐力刚, 姜加虎, 等. 洞庭湖流域径流量对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11):2 146-2 153.
- [31] 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(4):38-44.

Correlative Analysis of Major Hydro-meteorological Factors in the Downstream of the Lancang River

LI Qingxia¹, LI Peiyi², HE Yanhu^{2*}, CHEN Dongwei³

(1. Baiyun District Center of Water Engineering Construction and Management, Guangzhou 510600, China;

2. Research Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: **【Objective】** Water resources in a region depends on combined effects of a number of hydro-metrological factors and this paper analyzed the correlation of monthly hydro-meteorological factors. **【Method】** We took the middle and down reaches of the Lancang River as an example and calculated the correlation of various hydro-metrological factors measured from 1867 to 2006, using linear regression, correlation analysis and random forest method. **【Result】** In the past 40 years, the monthly precipitation and evaporation in the region did not show noticeable change, but the temperature and the runoff during the dry season had increased remarkably. The monthly evaporation had been in decline in the middle reached while risen in the low reaches. The monthly runoff in the middle and low reaches was affected by climate change, with the runoff positively related to precipitation and negatively correlated with evaporation. It negatively related to temperature in rainy seasons and positively in dry season. The runoff at Jiuzhou Hydrologic Station was mainly affected by the temperature and precipitation from November to February but by the precipitation and evaporation from March to April. Correlation analysis showed that during the dry season, the main influencing climate factors at Gajiu Hydrologic Station were precipitation and temperature, while the Random forest revealed that the temperature and the evapotranspiration were the driving force. We also found that the absolute correlation coefficient at Jiuzhou Hydrologic Station was less than 0.9, and at Hydrologic Station was less than 0.5. **【Conclusion】** The response of the monthly average runoff in the middle and low reaches of the Lancang River changed spatiotemporally. The runoff at Jiuzhou Hydrologic Station was mainly affected by the climate in rainy season, while the runoff at Gajiu Hydrologic Station was affected mainly by human activities, including construction and operation of hydropower Stations.

Key words: Lancang River; hydro meteorological elements; correlation analysis; random forest

责任编辑:白芳芳