

长江上游降水对三峡水库蓄水 关键月入库流量的影响

张 灵¹, 张 俊^{2*}, 杜良敏¹, 高雅琦¹

(1. 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2. 三峡梯调通信中心, 湖北 宜昌 443000)

摘 要: 论文基于长江上游 271 个气象站点 1961—2017 年逐日降水量数据及三峡水库日入库流量资料, 辅以差异 t 检验、合成分析、相关分析和聚类分析等方法, 就长江上游降水对三峡水库入库流量的影响进行了分析, 结果表明: ① 三峡水库蓄水期关键月的入库流量受同年 8 月及 9 月的降水影响最为明显; ② 依据降水特征将长江上游进行分区的结果是在沿江及以南遵循自然流域划分, 长江以北则不同, 6 个区分别为: I 区(嘉陵江流域南部)、II 区(金沙江上游、岷沱江北部、嘉陵江北部)、III 区(重庆—宜昌)、IV 区(乌江)、V 区(宜宾—重庆)、VI 区(金沙江流域中下游); ③ 6 个区对三峡水库蓄水关键月的入库流量贡献: I 区和 III 区的降水量最大, 汇流距离短, 相较其他 4 个区, 贡献最大; II 区站点稀疏, 降水量最少, 汇流距离长, 贡献最小; 其他 3 个区(IV、V、VI 区)贡献相近; ④ 分析 2003 年以来蓄水期遭遇的 3 次流量峰值超 50000 m³/s 的洪水过程, 其中 2014 年 9 月 11—18 日 I 区出现连续强降水, 同时叠加 III 区过程性强降水, 导致了 19—20 日三峡水库入库出现超过 50000 m³/s 的超大洪峰, 证实了 I 区和 III 区降水对三峡入库流量的高贡献影响分析结论可靠, 该结论也对三峡水库合理蓄水调度具有一定的参考价值。

关键词: 三峡水库; 蓄水关键月; 入库流量; 长江上游降水

三峡水电站是当今世界上最大的水利枢纽工程之一, 自 2003 年开始初期蓄水, 2008 年成功蓄水至 175 m 以来, 历年蓄水期时, 汛后库容大, 蓄水任务重, 加上汛后天然来水量逐步下降, 要提高长江水资源配置, 做到安全蓄水、水电效益最大化, 同时协调蓄水期间各方的需求、全面发挥三峡水库综合利用效益, 亟需提高水文预报预估的精度, 用以提升水库调度技术。

研究表明, 长江是雨洪型河流, 三峡水库在地理上处于四川盆地与长江中下游平原的结合部, 上游降水对库区来水至关重要^[1], 但上游跨度大, 流域地形复杂, 既受东南季风和西南季风影响, 又受青

藏高原影响, 环境条件多样, 不同地区降水差异相对较大^[2], 且气候变暖背景下, 上游不同区域响应特征不同^[3-5], 正是气候的复杂性导致了上游降水可预报性较低^[6]。降水的差异, 加上汇水条件的不同, 使得汇水贡献不一致, 因此识别长江上游对三峡水库来水有高影响的降水区, 有利于预测对象的聚焦、成因机理的深入研究, 有助于提高预报能力, 为准确预测水文特征提供科学依据, 对于实现水库优化调度、创造发电效益最大化具有重要意义。

截至目前, 长江上游降水—流量的研究工作已开展较多, 例如采用实测资料, 分析长江上游降水气候特征、变化趋势及其对流量的影响^[7-8], 利用模

收稿日期: 2019-05-09; 修订日期: 2020-01-21。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502306); 中国气象局与长江电力股份有限公司合作项目(2417020001)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC1502306; CMA & CYPCC Cooperation Program, No. 2417020001.]

第一作者简介: 张灵(1985—), 女, 湖北武汉人, 硕士生, 高级工程师, 主要研究方向为长江流域、区域气候异常成因诊断及预测。E-mail: zhanglingwh2011@163.com

*通信作者简介: 张俊(1986—), 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 长期从事长江流域短中长期气象预报预测工作。E-mail: zhang_jun8@ctg.com.cn

引用格式: 张灵, 张俊, 杜良敏, 等. 长江上游降水对三峡水库蓄水关键月入库流量的影响[J]. 地理科学进展, 2020, 39(7): 1117-1125. [Zhang Ling, Zhang Jun, Du Liangmin, et al. Influences of precipitation in the upper reaches of the Yangtze River on the key monthly inflow of the Three Gorges Reservoir. Progress in Geography, 2020, 39(7): 1117-1125.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.07.005

式资料,分析未来上游气候变化对流量的影响^[9-10],以及探寻影响长江上游流量的影响因子、分析两者之间的关系等^[11]。这些研究工作说明了上游降水的重要性,但都将上游视作整体。虽然长江流域气象中心在提供专业专项预报服务时,是按照自然子流域划分,但也存在没有区分出各子流域降水影响差异的问题,这就使得开展降水高影响区识别的工作很有必要。迄今为止,长江上游的各类区划和分级工作开展得相当完备^[12-13],然而缺乏基于水文特点结合气象特征进行的分区。基于此,本文结合流量,对上游降水特征进行聚类分区,尝试在不考虑人为等其他因素影响的条件下,单纯地研究各分区降水对水库入库流量的贡献及可能的重要影响时段,并通过2003年以来蓄水期的3次超大洪峰来简单验证结论。

1 资料与方法

1.1 资料来源

研究中选用的三峡水库入库流量的水文控制站点为宜昌站,处于111°17'E、30°42'N,高程55.9 m,地处湖北省宜昌滨江公园,具体的水文站点位置见图1。采用的宜昌站流量的资料为日资料,时间长度为1961—2017年,该资料来源于三峡水库梯级调度中心。降水数据为长江上游271个气象站逐日降水资料,来自国家气象信息中心,时间长度为1961—2017年,具体的气象站点分布如图1。

1.2 研究方法

(1) 聚类分析

聚类方法是一种多元统计方法,根据观测对象之间的彼此相似程度达到“物以类聚”的目的^[14],其原

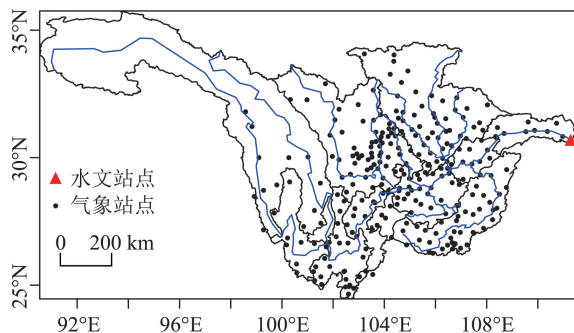


图1 长江上游气象站点及三峡水库水文代表站分布
Fig.1 Distribution of meteorological stations over the upper reaches of the Yangtze River and the hydrological station of the Three Gorges Reservoir

则是根据事物本身的特征研究个体分类的规律^[15-16],通过把一个没有类别标记的样本集按照某种相似性划分为若干类,将相似的样本尽可能地归为一类,不相似的样本尽量划分到不同的类中,类内样本距离尽量小,而不同类之间的距离尽可能大。

本文采用系统聚类法,用 G 表示类,假定 G 中有 m 个元素(即样品或变量),用列向量 $x_i(i=1,2,\dots,m)$ 来表示, d_{ij} 表示第 i 个样品 x_i 和第 j 个样品 x_j 之间的距离, \bar{d} 表示类内的平均距离, G_{ij} 表示类 G_i 与类 G_j 之间的距离, \bar{G} 表示并类平均距离。类与类之间用不同的方法定义距离,如最短距离法、中间距离法、最长距离法、重心法、类平均法、离差平方和等。

文中将对使用不同的系统聚类法和各种不同的距离方法,使得系统聚类数的相关系数 R 达最大, R 的计算方法为:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=j+1}^m (d_{ij} - \bar{d})(G_{ij} - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=j+1}^m (d_{ij} - \bar{d})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=j+1}^m (G_{ij} - \bar{G})^2}} \quad (1)$$

相关系数 R 反映了聚类效果的好坏,相关系数越接近于1,说明聚类效果越好。

(2) 差异 t 检验

本文差异 t 检验采取的是双总体检验中的独立样本 t 检验,检验2个样本平均数与其各自所代表的总体的差异是否显著。

独立样本 t 检验统计量公式为:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (2)$$

式中: \bar{X}_1 和 \bar{X}_2 分别为2个样本的平均值, S_1 和 S_2 分别为2个样本方差; n_1 和 n_2 分别为2个样本容量。

(3) Lasso回归

Lasso回归被广泛应用于参数估计和变量选择中,Lasso回归分析是由Tibshirani^[17]结合岭回归和子集选择法两者的优点而提出的,其计算结果体现出子集选择的可解释性以及岭回归的稳定性。相比于一般的多元线性回归,针对 n 组因变量 y_i 和自变量 $x_i(i=1,2,\dots,n)$,Lasso回归在使误差平方和最小的基础上添加了对回归系数的1范数约束,其公式为:

$$\begin{aligned} (\alpha, \beta) &= \arg \min \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha_i - x_i \beta)^2 \\ \text{s.t. } \|\beta\|_1 &< t \end{aligned} \quad (3)$$

将约束条件加入到式(3)中可得到如下形式:

$$(\alpha, \beta) = \arg \min \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - x_i \beta)^2 + \lambda \|\beta\|_1 \right] \quad (4)$$

式中: x_i 为第 i 组自变量, 是行向量; α 和 β 为回归系数, 其中 β 是列向量, $\|\beta\|_1$ 代表 1 范数, 是向量中元素的绝对值的和; y_i 为对应于 x_i 的因变量的值; n 为用于回归建模的数据组数; λ 和 t 为不同形式的 Lasso 回归的参数。其中参数 λ 控制了 β 中非零元素的多少, 也即控制了被选中因子的多少, 因此可以通过改变 λ 来增减被选中的因子。 λ 越大, 对回归系数的惩罚项 $\lambda \|\beta\|_1$ 会相对变大, 使得计算得到的 β 中的非零元素绝对值变小, 直到等于 0 为止, 此时该非零元素对应的因子从被选中变成没被选中, 而 λ 变小时则相反; 并且由于 Lasso 的稳定性, λ 较大时能被选中的因子在 λ 变小时依然会被选中, 所以各因子有一个被选中的次序。

2 降水分区方案

2.1 影响三峡入库流量的降水关键月

长江流域为雨洪型河流, 入库流量的大小与降水的多寡密不可分。主汛期结束, 三峡水库进入蓄水期(9—11月), 根据水库调度规程, 9月开始蓄水, 为蓄水的关键月, 为此挑选出 1961—2017 年历年 9 月入库流量极大年和极小年(图 2), 通过对相应年份的降水进行差异性 t 检验, 寻找对 9 月入库流量有重要影响的降水月份。

以大于/小于入库流量平均值一个标准差作为标准, 挑选出 9 月极大流量年有 13 个年份, 分别为 1964、1965、1966、1968、1973、1974、1979、1982、1985、1988、1993、2001 及 2014 年; 9 月极小流量有 11 个年份, 分别为 1961、1972、1977、1992、1994、

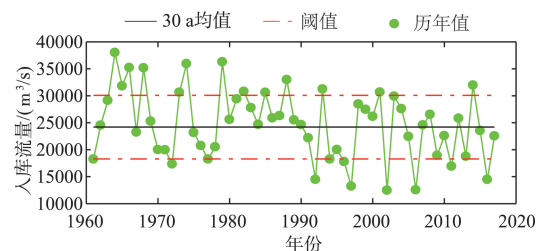


图2 1961—2017年9月月均流量

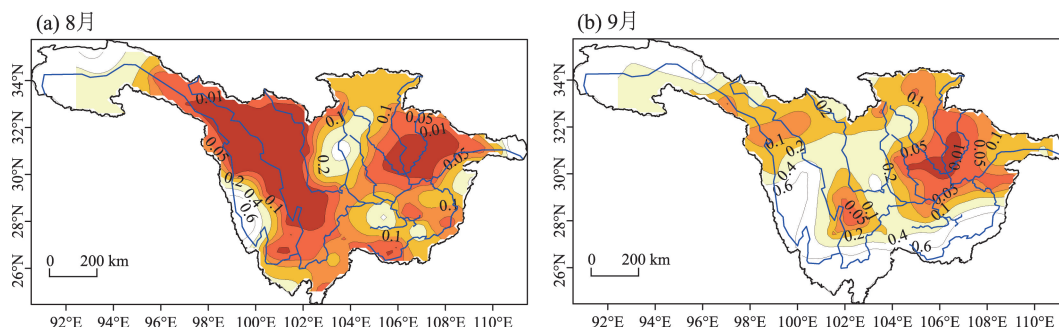
Fig.2 Monthly inflow of September, 1961–2017

1996、1997、2002、2006、2011 及 2016 年。分别将极大/极小流量年对应的同年 1—9 月各月及汛期的长江上游降水进行差异 t 检验(图 3), 结果表明, 相对 9 月而言, 8 月长江上游降水的多寡与 9 月入库流量的大小关系更为密切, 这一结论与施晓辉等^[11]研究的结论一致。入库流量极大(小)年同年 8 月, 长江上游大部降水偏多(少), 尤其是在嘉陵江南部, 这一区域也是 9 月差异 t 检验的异常显著区。

2.2 降水聚类分区结果

长江上游气象站点按照自然流域进行划分, 虽然简单、计算方便, 但上游某些流域所跨纬度较大, 且不属于同一气候带, 流域内自然特征差异大, 在此考虑依据降水的特征进行聚类分区, 这种方案计算虽相对复杂, 但可弥补自然流域内降水气候特征差异大的不足。

鉴于同年 8 月降水对于蓄水调度影响较大, 而 9 月又是蓄水关键月, 将长江上游历年 8—9 月逐日降水数据, 采用聚类分析方法, 以站点观测区分聚类, 挑选使相关系数 R 值最大的聚类法和距离法, 最终将长江上游划分为 6 个区(图 4)。其中 I 区包含嘉陵江流域南部的 23 站, II 区为金沙江上游、岷沱江北部、嘉陵江北部共计 64 站, III 区包含重庆—宜昌的 42 站, IV 区包含乌江流域的 46 站, V 区包含宜



注: 数值代表不同显著性水平, 阴影区代表通过 0.05 的显著性检验水平。

图3 9月入库流量极大/小年(a)8月、(b)9月降水差异 t 检验

Fig.3 Precipitation difference field of (a) August and (b) September in maximum/minimum September inflow years

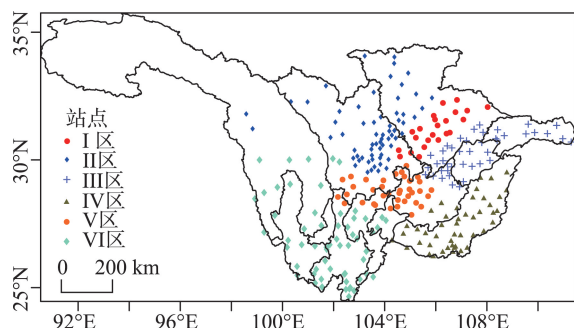


图4 长江上游流域蓄水期降水的聚类分区示意图

Fig.4 Cluster division of precipitation in the upper reaches of the Yangtze River

宾—重庆的37站,VI区包含金沙江流域中下游的59站。由图4可见,聚类分区结果在长江沿江及其以南符合自然流域的划分,但在沿江以北差异较大。这也正好反映出长江上游沿江及以南的自然流域(宜昌—重庆、乌江、宜宾—重庆)所跨纬度小,所属气候带单一,降水特性较为一致,但沿江以北的自然流域(嘉陵江、岷沱江、金沙江)所跨纬度大,地形复杂,属于不同气候带,流域内降水特征差异大,如依照长江上游北部的自然流域划分,面雨量预测难度加大,增加了入库流量预报预测的不确定性。该聚类分区结果避免了同一分区内的降水特征存在较大的不一致,让降水预测的聚焦区域更为集中,也有利于降水成因及机理的深入研究。

3 分区面雨量对入库流量的时效性分析

累积面雨量与流量的超前滞后相关,用以分析对入库流量有重要影响的面雨量时段,为便于理解,在此解释文中提及的累积面雨量与超前天数。

依据表1中聚类分区站点,计算出I~VI区各区逐日的面雨量。 N 天累积面雨量为某一时段内(共计 N 天)的面雨量之和。超前天数是面雨量超前流量的天数。

表1 6个分区范围及对应站点数

Tab.1 Range and number of stations in the six zones

| 分区 | 范围 | 站点数 |
|------|--------------------|-----|
| I区 | 嘉陵江流域南部 | 23 |
| II区 | 金沙江上游、岷沱江中北部、嘉陵江北部 | 64 |
| III区 | 重庆—宜昌 | 42 |
| IV区 | 乌江 | 46 |
| V区 | 宜宾—重庆 | 37 |
| VI区 | 金沙江流域中下游 | 59 |

累积10 d面雨量、在超前0 d与流量的相关,相关时段为当天与前0~9 d;

累积10 d面雨量、在超前1 d与流量的相关,相关时段为当天与前1~10 d;

.....

累积10 d面雨量、在超前10 d与流量的相关,相关时段为当天流量与前9~18 d;

依此类推。

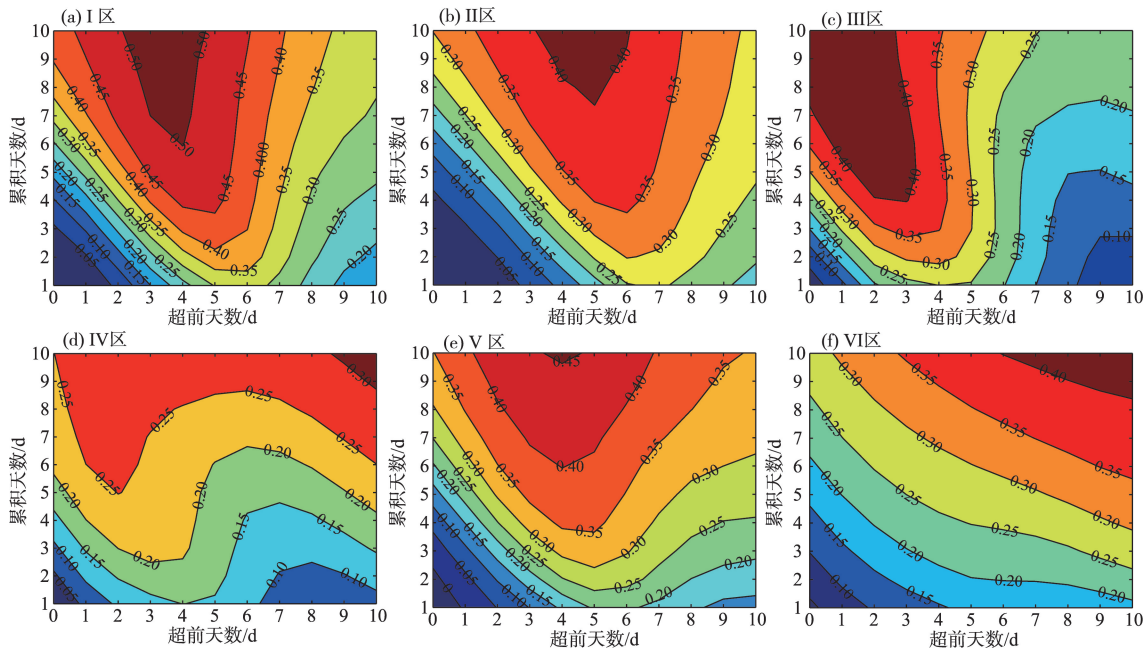
由图5可见,I、II、III、V区的相关系数随累积天数及超前天数的变化较为相似,呈现出“V”型。结合I、II、III、V区的地理位置可知,此4区相邻,都处于长江沿江及其以北,降水变化与流量的变化较为一致,间接说明沿江及其以北的降水特征存在相似性。此4区对应的最大相关系数分别为0.52、0.42、0.46、0.45。I区在超前2~4 d、累积5~10 d,相关系数为0.52,最早达0.52的时段为前4~7 d(后面简称对应时段);III区在超前1~3 d、累积5~10 d时,相关系数为0.46,对应时段为1~9 d。综合可知,虽然整体而言,I区降水与流量相关最为密切,其次是III区,但从图5a与5c看出,超前4 d时,III区降水与流量的关系更为密切,这主要是由于汇水距离III区更近,降水的影响更快更直接。

江南的IV区和VI区相关系数图差异较大,分别呈现出向左旋转90°的“S”型和“浅L”型,且最大的相关系数分别为0.32和0.40。对比发现,流量与江南降水变化的同步性不如沿江及以北地区的。

选择6个分区中不同累积天数、不同超前天数下的面雨量为自变量,将流量作为因变量,将自变量和因变量标准化后进行多元线性回归分析,计算各自对应的残差平方和,残差平方和越小,说明对应时段的面雨量对于流量的拟合度越高,为预报预测重点参考时段。图6的残差平方和呈现出“V”型分布,与I、II、III、V区面雨量与流量的相关系数图类似,在累积8~10 d、超前2~6 d时的残差非常小,对应的最小残差时段是在前2~12 d。综合来看,对蓄水期入库流量有高影响时段的降水为前2~12 d。

4 分区面雨量对入库流量的贡献分析

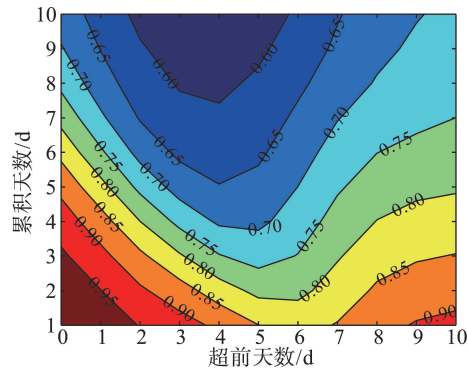
为了解各分区面雨量对于流量的贡献,将累积面雨量天数确定为 N 天,标准化的I~VI区累积 N 天面雨量矩阵作为自变量,标准化的流量序列作为因



注:图中填色及等值线为面雨量与流量的相关系数。

图5 各区不同累积天数面雨量与流量的相关系数随不同超前天数的变化

Fig.5 Correlation coefficient between inflow and surface rainfall of different cumulative days varies with different days ahead in the six zones



注:图中填色及等值线为面雨量与流量回归的残差平方和。

图6 蓄水期6个区不同累积天数面雨量与流量的回归残差平方和随不同超前天数的变化

Fig.6 Regression residual between inflow and surface rainfall of different cumulative days varies with different days ahead in the six zones

变量,进行 Lasso 回归计算,输出不同 λ 值对应的交叉验证均方误差,挑选出交叉验证均方误差最小时对应的 $\lambda(\lambda_{\min})$,为便于比较,将 λ_{\min} 对应的回归的模型系数归一化到0~1之间,并乘以100,称为归一化回归系数,系数越大,贡献率越高,贡献率高的区域也是水文流量预报过程中着重参考的降水区域。

累积面雨量天数设定为1~10 d时,归一化的回归系数如表2。从平均归一化系数来看,I区为91.2,II区为0,III区为88.5,IV区为46.8,V区为48.9,VI区为56.7,即I区和III区贡献率较大,远大于其他4个区,II区最小。

在累积天数为1 d时,III区贡献最大,为100;I区其次,为88;II区最小,为0;V区次小,为9。随着天数的增多,长江沿江及以南的各区之间(III区、IV

表2 流量与各区不同累积天数的面雨量 Lasso 回归中最小 λ 值对应的归一化回归系数

Tab.2 Normalized regression coefficient between inflow and rainfall of different cumulative days

| 分区 | 累积天数/d | | | | | | | | | |
|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| I | 88 | 94 | 81 | 78 | 90 | 91 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| III | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 88 | 71 | 63 | 63 |
| IV | 74 | 68 | 53 | 52 | 51 | 50 | 45 | 29 | 23 | 23 |
| V | 9 | 32 | 50 | 57 | 60 | 63 | 57 | 51 | 52 | 58 |
| VI | 85 | 54 | 48 | 49 | 51 | 57 | 57 | 56 | 55 | 55 |

注:表中归一化回归系数为回归模型系数归一化到0~1之间后乘以100的结果。

区和V区)贡献差异出现减小,且存在着随着累积天数增多,贡献逐渐下降,但下降得不明显的特征;长江沿江以北的各区(I区、II区、VI区)之间贡献的差异仍维持较大,即最北边的II区贡献最小,I区贡献逐渐增加并稳定,而VI区贡献总体保持稳定,无明显变化。下面从位置和气候背景分析其原因。

(1) 面雨量累积天数为1~6 d时,III区(重庆—宜昌)回归系数大于I区(嘉陵江南部),即III区降水对三峡水库入库流量贡献最高,次高的为I区。面雨量累积天数为7~10 d,I区贡献反超III区,为最高,即I区贡献占比增大。结合气候背景实况,I区常年平均降水量为6个区中最多,III区次多,但前者汇流入库需时相对后者长,这也是累积天数在7 d以内时,III区最高,超过7 d后,I区最高的直接原因。

(2) VI区(金沙江中下游)、V区(宜宾—重庆)与I、III区同处长江上游沿江地区,位于西南—东北向的水汽输送带上,但常年平均降水量略少于I区和III区,且汇流入库距离明显偏远,使得VI区和V区贡献相对I区、III区低。

(3) II区(金沙江上游、岷沱江中北部及嘉陵江北部)位于长江上游北部,贡献最低,主因是II区远离三峡水库,范围大,站点分布异常不均匀,且平均降水量为6个区中最少。

(4) IV区(乌江)位于长江上游南部,汇水距离相对近,但由于处在西南—东北走向水汽输送带的南侧,常年平均降水量仅略多于II区,且随华北雨季结束,西太平洋副热带高压逐步南撤,乌江强降水在时间上相较其他区更为分散,导致乌江贡献相对较小。

5 超大洪水过程中雨量与流量的变化

2003—2019年,三峡水库在蓄水期间共计遭遇3次流量峰值超50000 m³/s的洪水过程,分别出现在2004年9月8—10日、2012年9月3日及2014年9月19—20日。

2004年9月3日I区出现超强降水,面雨量达67 mm,次日流量变化较小,且4日I区、III区出现强降水,5日III区强降水持续,流量增量明显,达6000 m³/s,6日III区仍为强降水,7日停歇,直至8日达峰值59132 m³/s。

2012年9月3日超大洪水过程前的8月30日I区发生面雨量为20 mm的强降水,次日为61 mm的超强降水,但流量增量小,至9月1日I区超强面雨量持续,且流量增量大于6000 m³/s,同时III区和V区出现强降水,次日流量超40000 m³/s,3日流量达此次洪水过程峰值。

这2次超大洪水过程较为类似,I区超强降水发生后,由于汇水需时,次日三峡入库流量增量小,隔日流量增长明显,后期由于III区和V区过程性的强降水,最终形成超大洪水过程。

2014年蓄水期间,在超大洪水峰值入库前,9—13日I区(嘉陵江南部)发生持续强降水,其中9日面雨量超40 mm,其他区面雨量较小,同日三峡入库流量23900 m³/s,10日入库流量并未加大,为23800 m³/s,11日开始入库流量增大,至12日三峡入库流量达29600 m³/s。由9—12日I区强降水汇入三峡水库引起流量变化来看,I区对三峡汇流贡献较大,且汇流至水库引起流量变化约需2 d。13日,I区和III

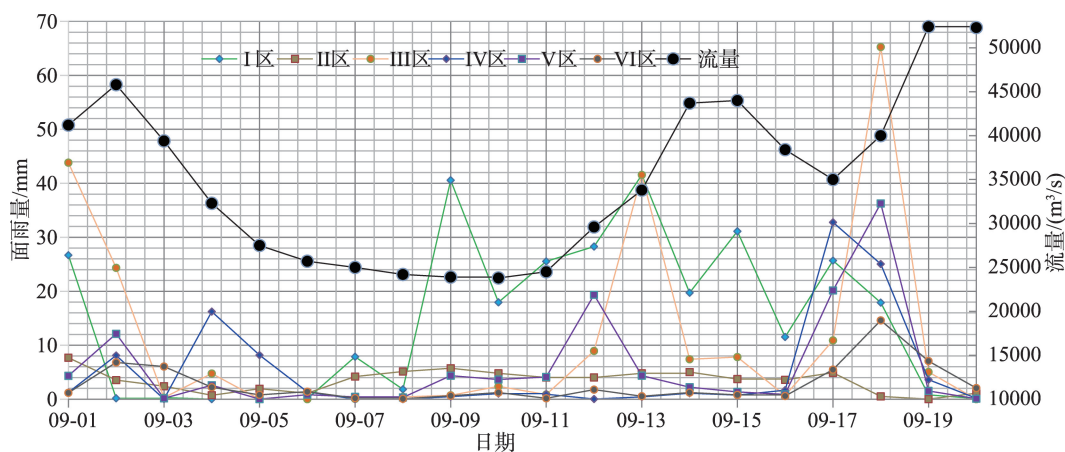


图7 2014年9月1—20日6个区面雨量及流量的变化曲线

Fig.7 Variation curves of rainfall and inflow in the six zones from 1 September to 20 September 2014

区同时发生大暴雨,面雨量都超过40 mm以上,在其他区面雨量非常小的情况下,同入库流量迅速突破30000 m³/s,可见III区(重庆—宜昌)汇流速度明显快于I区,对入库流量的贡献也较大,即在短时间内III区贡献率大于I区,与前文结论一致。I区14—18日强降水继续,III区、IV区(乌江)、V区(宜宾—重庆)在17—18日出现过程性超强降水,I区持续性强降水、其他区短暂的过程性强降水在19—20日都转为弱降水,19日三峡水库入库流量达峰值52400 m³/s,维持至20日,可见当I区持续强降水,其他区(II区除外)过程性强降水助力下,易引起入库流量达到较大的峰值。

6 结论与讨论

长江上游气候复杂,降水特征差异明显,受地形及汇水距离等影响,对于三峡水库入库流量的汇水贡献不同,通过差异 t 检验、合成分析、相关分析和聚类分析等方法,结合水文特点及降水特征对长江上游降水进行分区,识别各区降水对三峡水库蓄水期入库流量影响。主要得到如下结论:

蓄水期入库流量受同年8月及9月的降水影响较大,尤其是8月。结合水文特征及8—9月降水特征可将长江上游分为6个降水区,分区结果在长江上游沿江及以南分区遵循自然流域,以北则不同:I区为嘉陵江流域南部,II区为金沙江上游、岷沱江北部、嘉陵江北部,III区为重庆—宜昌,IV区为乌江流域,V区为宜宾—重庆,VI区为金沙江流域中下游。长江沿江及以北的区(I、II、III、V区)降水特征类似,与流量变化关系更为密切,其中I区相关性最好,III区其次,两者的贡献相近,但I区贡献略高,同时I区也为长江上游各区中贡献最高的区,次高为III区,贡献最小的为II区。造成这些的原因主要是I区降水量最大、III区次多,汇流距离短,相较其他4个区,I、III区贡献明显大;II区站点稀疏,降水量最少,汇流距离长,贡献最小;其他3个区(IV、V、VI区)贡献相近。

径流变化的影响是极其复杂的,但众多研究表明,降水的气候变化和人类活动是影响径流的主要因素,且全球变暖加快了水循环,使得降水频次和强度发生较大的变化,从而影响径流的变化^[18-19]。本文研究仅基于长江上游降水和流量之间的关系,未考虑气候变暖带来蒸发加强等,当然人类活动,包

括对下垫面的改造、土地利用、水利建设和水土保持措施等,在本文研究中也未考虑,主要是因为引起长江上游地区流量年际和趋势变化的主要因子仍然是降水^[20],这也许会夸大降水对径流的影响贡献,今后可尝试排除长江上游其他水库调度的影响,再将均一性较好的温度、蒸发等气候因素加入研究中,以期水库优化调度提供科学依据。

参考文献(References)

- [1] 李林,王振宇,秦宁生,等. 长江上游流量变化及其影响因素关系分析[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 694-700. [Li Lin, Wang Zhengyu, Qin Ningshen, et al. Analysis of the relationship between runoff amount and its impacting factor in the upper Yangtze River. Journal of Natural Resources, 2004, 19(6): 694-700.]
- [2] 朱艳欣,桑燕芳. 青藏高原降水季节分配的空间变化特征[J]. 地理科学进展, 2018, 37(11): 1533-1544. [Zhu Yanxin, Sang Yanfang. Spatial variability in the seasonal distribution of precipitation on the Tibetan Plateau. Progress in Geography, 2018, 37(11): 1533-1544.]
- [3] 庞学勇,包维楷,吴宁. 岷江上游干旱河谷气候特征及成因[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(S1): 46-53. [Pang Xueyong, Bao Weikai, Wu Ning. Reasons of dry valley climate characteristics and its formation reason in upstream of Minjiang River. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(S1): 46-53.]
- [4] 马振峰,高文良. 青藏高原季风年际变化与长江上游气候变化的联系[J]. 高原气象, 2003, 22(S1): 8-16. [Ma Zhenfeng, Gao Wenliang. Relationship between interannual change over Qinghai-Xizang Plateau monsoon and climate change in upper reach of Changjiang River. Plateau Meteorology, 2003, 22(S1): 8-16.]
- [5] 晏红明,李清泉,王东阡. 云南雨季的时空特征及与大气环流变化的关系[J]. 热带气象学报, 2018, 34(1): 12-22. [Yan Hongming, Li Qingquan, Wang Dongqian. Studies on spatial-temporal characteristics of Yunnan rainy season and its relationship with atmospheric circulation. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(1): 12-22.]
- [6] 董谢琼,马开玉. 我国的降水资源及其稳定性与潜在可预报性(II)[J]. 气象科学, 1995, 15(1): 72-79. [Dong xieqiong, Ma Kaiyu. Precipitation resources and its stability and potential predictability over China (Part II): Potential predictability. Scientia Meteorologica Sinica, 1995, 15(1): 72-79.]
- [7] 冯亚文. 长江上游降水与流量特征分析及其预测研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2011. [Feng Yawen. Rainfall and runoff characteristic analysis and prediction in the Up-

- per Yangtze River. Zhengzhou, China: North China University of Water Resources and Electric Power, 2011.]
- [8] 王艳君, 姜彤, 施雅风. 长江上游流域1961—2000年气候及流量变化趋势 [J]. 冰川冻土, 2009, 27(5): 709-714. [Wang Yanjun, Jiang Tong, Shi Yafeng. Changing trends of climate and runoff over the upper reaches of the Yangtze River in 1961–2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 27(5): 709-714.]
- [9] 黄金龙, 王艳君, 苏布达, 等. RCP4.5情景下长江上游流域未来气候变化及其对径流的影响 [J]. 气象, 2016, 42(5): 614-620. [Huang Jinlong, Wang Yanjun, Su Buda, et al. Future climate change and its impact on inflow in the upper reaches of the Yangtze River under RCP4.5 scenario. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(5): 614-620.]
- [10] 孟德娟, 莫兴国. 气候变化对不同气候区流域年流量影响的识别 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(4): 587-594. [Meng Dejuan, Mo Xingguo. Identification of impact of climate change on annual runoff in typical basins of different climate zones. *Progress in Geography*, 2013, 32(4): 587-594.]
- [11] 施晓辉, 徐祥德. 三峡库区来水流量与长江流域上游前期降水的关系研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1062-1066. [Shi Xiaohui, Xu Xiangde. Relationship between runoff of the Three Gorges Reservoir zone and anterior precipitation in upstream of the Yangtze River Valley. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(9): 1062-1066.]
- [12] 何州杉月, 杨林. 中国降水区划模糊聚类软划分法 [J]. 气象科技, 2011, 39(5): 582-586. [He Zhoushanyue, Yang Lin. Precipitation regionalization based on fuzzy clustering algorithm. *Meteorological Science and Technology*, 2011, 39(5): 582-586.]
- [13] 高俊峰, 高永年, 张志明. 湖泊型流域水生生态功能分区的理论与应用 [J]. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1159-1170. [Gao Junfeng, Gao Yongnian, Zhang Zhiming. Theory and application of aquatic ecoregion delineation in lake-basin. *Progress in Geography*, 2019, 38(8): 1159-1170.]
- [14] Antonio P D S. Discarding variables in a principal component analysis: Algorithms for all-subsets comparisons [J]. *Computational Statistics*, 2002, 17(2): 251-271.
- [15] Glenn W M. A Monte Carlo study of thirty internal criterion measures for cluster analysis [J]. *Psychometrika*, 1981, 46: 187-199.
- [16] Forner-Cordero A, Levin O, Li Y, et al. Principal component analysis of complex multipoint coordinative movements [J]. *Biological Cybernetics*, 2005, 93(4): 63-78.
- [17] Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1996, 58(1): 267-288.
- [18] 戴仕宝, 杨世伦. 近50年来长江水资源特征变化分析 [J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 501-506. [Dai Shibao, Yang Shilun. Variations in water resources of the Yangtze River over the last five decades. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(4): 501-506.]
- [19] 杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 水文学研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 36-45. [Yang Dawen, Xu Zongxue, Li Zhe, et al. Progress and prospect of hydrological sciences. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 36-45.]
- [20] 冯亚文, 任国玉, 刘志雨, 等. 长江上游降水变化及其对径流的影响 [J]. 资源科学, 2013, 35(6): 1268-1276. [Feng Yawen, Ren Guoyu, Liu Zhiyu, et al. Rainfall and runoff trends in the upper Yangtze River. *Resources Science*, 2013, 35(6): 1268-1276.]

Influences of precipitation in the upper reaches of the Yangtze River on the key monthly inflow of the Three Gorges Reservoir

ZHANG Ling¹, ZHANG Jun^{2*}, DU Liangmin¹, Gao Yaqi¹

(1. Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 400074, China;

2. Three Gorges Cascade Dispatching and Communication Center, Yichang 443000, Hubei, China)

Abstract: Based on the data of daily precipitation of 271 meteorological stations in the upper reaches of the Yangtze River and the data of the Three Gorges Reservoir inflows during 1961–2017, this study analyzed the influence of precipitation in the upper reaches of the Yangtze River on the inflow of the Three Gorges Reservoir by using *t*-test, synthetic analysis, correlation analysis, and cluster analysis. The results show that: 1) The precipitation in August and September has the greatest influence on the key monthly inflow of the Three Gorges Reservoir. 2) According to the precipitation characteristics, the upper reaches of the Yangtze River can be divided into six zones, in which the regions along and in the south of the Yangtze River is divided based on the natural watersheds: Zone I (the south of the Jialing River), Zone II (the upper reaches of the Jinsha River, the north of the Mintuojiang River, and the north of the Jialing River), Zone III (Chongqing–Yichang), Zone IV (the Wu River), Zone V (Yibin–Chongqing), and Zone VI (the middle and lower reaches of the Jinsha River). 3) The contributions of the six zones to the key monthly inflow of the Three Gorges Reservoir are as follow: with the largest precipitation and the shortest catchment distance, Zone I and Zone III have the greatest contribution in these six zones; Zone II has sparse and unevenly distributed stations, and due to the lowest precipitation and longest catchment distance, it makes the least contribution; and the remaining three zones (Zone IV, V, and VI) make similar contributions. 4) The analysis on the three great floods with peak flow over 50000 m³/s since the Three Gorges Reservoir began to fill in 2003 finds that the continuous heavy precipitation in Zone I during 11 to 18 September 2014 and the intermittent heavy precipitation in Zone III were the root causes for the occurrence of the super food with peak flow exceeding 50000 m³/s. It also proves that the result drawn by analyzing the influence of the contribution of the precipitation in Zone I and Zone III is reliable and can provide references for the rational dispatching of water storage in the Three Gorges Reservoir.

Keywords: Three Gorges Reservoir; key months of water storage; inflow; precipitation in the upper reaches of the Yangtze River