

doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2018.134

章梦杰, 郭家力, 林伟, 等. 气候变化对水文季节性迁移的影响: 以水库汛期分期和极值降水为例 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (2): 158-166
Zhang M J, Guo J L, Lin W, et al. The impacts of climate change on hydrologic seasonal shift: taking flood season division and extreme precipitation as examples [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (2): 158-166



气候变化对水文季节性迁移的影响： 以水库汛期分期和极值降水为例

章梦杰¹, 郭家力¹, 林伟¹, 郭靖²,
舒章康^{1,3}, 李英海¹, 张静文¹

1 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002;

2 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014;

3 南京水利科学研究所, 南京 210029

摘要: 气候变化影响下水利工程的可靠设计和安全运行是广大决策者、研究者和公众共同关注的热点问题。以清江流域为研究对象, 首先采用模糊集合分析法对不同温室气体排放情景 (A2、A1B 和 B1) 下的逐日降水资料进行汛期分期, 再通过广义极值分布 (GEV) 函数对各分期的极值降水序列进行频率分析。结果表明, 降水季节性迁移直接影响汛期分期, 3 种排放情景下未来各时段 (2011—2030 年、2046—2065 年和 2080—2099 年) 的主汛期较基准期均推迟且有缩短趋势。对于极值降水量级, 未来情景下明显小于基准期, 且这种差距随着重现期的增大而增大; 主汛期明显大于前汛期和后汛期, 且在时段之间的差异明显大于排放情景之间的差异。

关键词: 气候变化; 汛期分期; 模糊集合; 季节性迁移; 广义极值 (GEV) 分布

引言

水文循环过程中具有诸多明显季节性的水文现象^[1]。典型的过程包括径流丰枯更替、暴雨洪涝往往在汛期发生、气温与蒸发的正弦 (余弦) 周期变化等^[2]。为了探索这些现象的水文规律, 人们进行了一系列相关的研究, 如降水集中度 (集中期)^[3]、径流的均匀性^[4]、水库的汛期分期^[5]和洪水遭遇^[6]等。基于对这些季节性水文规律的认识, 人们得以进行一系列有效的水资源利用和开发活动。

但是, 气候异常变化改变了水文循环的原有状

态, 对降水、气温、土壤湿度、蒸发、径流等水文要素造成了直接或间接的影响, 也导致水文现象的季节性发生改变^[7]。主要表现为极值降水、洪水和干旱等持续时间与发生时间的变化。国外的学者将其称为季节性迁移 (seasonal shift), 如 Matti 等^[8]研究发现斯堪纳尼亚地区以融雪为主的流域洪水只发生在春季和初夏, 且为强季节性的单峰; 而靠近大西洋和南部的流域, 其洪峰在全年内均等分布, 但洪水的量级在过去一个世纪发生了显著变化, 表现为夏季洪峰量级减小而冬季增大。Vormoor 等^[9-10]发现挪威北部和东南部,

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-11-27

资助项目: 国家自然科学基金项目 (51509141); 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室开放基金项目 (2015KJX02); 中国电建集团重大专项课题 (DJ-ZDZX-2016-02-09); 三峡大学学位论文培优基金项目资助 (2019SSPY005)

作者简介: 章梦杰, 女, 硕士研究生, 1092487486@qq.com; 郭家力 (通信作者), 男, 副教授, jiali.guo@ctgu.edu.cn

大洪水发生的时间从春季和初夏向秋冬季节迁移, 且由于气温的上升导致降水取代融雪成为主要的洪水生成控制过程。国内关于气候变化影响下的水文季节性迁移的研究较少, 更多是基于长序列的历史实测资料进行水文季节性现象的证实和趋势分析, 如陈海山等^[11]研究发现, 我国极端降水的发生频次存在明显的季节性差异; 长江以南地区春、冬季极端降水事件发生频次较高; 而全年、夏季以及秋季极端降水事件发生频次在西南地区较高, 在西北东部较低。王金星等^[12]研究发现南方流域冬春季的径流均呈现增加的趋势, 而北方流域各站冬春季径流呈现减少的趋势, 以海河流域各站以及松辽、黄河和淮河的主要站点减少趋势最为严重。顾西辉等^[13]研究发现, 受气候变化的影响, 塔河流域洪水序列呈现显著集聚性特征, 洪水发生频率高的时期往往也是大量级洪峰集中发生的时期, 这是塔河流域洪灾损失居高不下的主要原因。尽管这些研究在一定程度上揭示了既有的水文季节性规律, 但并未指明季节性迁移的方向和具体程度, 也未能结合实际的水资源开发行动评价其影响。

降水或径流等的季节性变化直接影响以此为基础的汛期分期结果。水库汛期分期是水库调度方案制定的基础(特别是协调水库兴利和防洪矛盾的汛限水位动态控制)。目前在汛期分期方面, 国内的学者多关注于案例研究, 即提供不同的方法进行比较, 包括定性分析法和定量算法两类, 其中定量算法又可大致分为统计分析法和聚类分析法等^[14]。在这些研究中, 鲜有考虑气候变化因素^[15-16], 通过耦合未来气候预估信息的汛期分期变异情况进行评判的研究。

因此, 本文以清江隔河岩水库集水区域为研究对象, 基于政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的未来气候变化情景预估, 结合统计降尺度方法的输出结果, 基于站点日降水数据采用模糊集合分析法分析汛期分期特征, 建立基于模糊集合分析的各分期极值降水拟合模型, 分析不同重现期下极值降水的变化情况。该研究可为应对气候变化影响下的水利工程可靠设计和安全运行风险控制提供科学依据。

1 研究区域和资料

1.1 研究区域

清江流域位于湖北省西南山区, 是长江在湖北省的第二大支流, 流域面积 17000 km², 干流全长 423 km。该流域属于亚热带季风气候, 流域多年平均气温为 16℃; 7 月份气温最高, 多年平均为 28℃; 1 月气温最低, 多年平均为 2℃; 极端最高气温为 42.1℃, 极端最低气温为 -15.4℃; 多年平均相对湿度为 70% ~ 80%, 多年平均降水量约 1460 mm。雨季通常自 4 月开始, 9 月底或 10 月结束; 雨量年内分配不均, 雨季降雨量占全年降雨量的 75% ~ 78%, 旱季(10 月至次年 3 月)占 24% 左右; 以 7 月降雨量最大, 占全年 16.8%; 多年平均径流量为 141.1 亿 m³。

1.2 资料来源

利用 IPCC 第四次评估报告中给出的 A2、A1B 和 B1 排放情景下的全球气候模式 HadCM3 的结果作降尺度处理, 生成清江隔河岩水库集水区域内 33 个雨量站点的逐日气象资料。这 3 种排放情景设定分别为: A2 代表人口持续增长, 新技术发展缓慢, 注重区域性合作, 属高排放情景; A1B 代表世界人口趋于稳定, 高新技术广泛应用, 全球合作, 经济快速发展, 各种能源平衡发展, 属中排放情景; B1 代表世界人口趋于稳定, 清洁能源的使用, 生态环境得到改善, 属低排放情景。A2、A1B 和 B1 排放情景分别对应第五次评估报告中给出的 RCP8.5、RCP4.5 和 RCP2.6 排放情景^[17]。

由于 LARS-WG 天气发生器内嵌了多种气候模式和温室气体排放情景, 可以方便地用于气候变化的评估。国外许多学者将 LARS-WG 和其他天气发生器进行了适用性比较^[18], 与其他天气发生器之间的最大区别就是 LARS-WG 利用半经验分布来预测降水量, 对罕见气候的模拟能力比二阶马可夫链更具有优势^[19]。为了消除数据来源不同引起的误差, 本文均采用 LARS-WG 天气发生器生成任意年份的随机天气序列, 结合未来的气候情景生成未来的随机天气序列, 分别得到基于模拟的基准期数

据(1961—2010年)和3种排放情景下未来2011—2030年(T1)、2046—2065年(T2)和2080—2099年(T3)3个时段的降水序列,由于LARS-WG天气发生器的特性是可以生成任意长度年份的数据,同时为了消除样本长度不同对计算结果的影响^[20],本文基准期和未来时段生成的降水序列长度均为50年。关于LARS-WG天气发生器生成天气序列的详细介绍可参看文献^[21],本文不作赘述。

2 研究方法

2.1 基于模糊集理论的汛期分期

汛期本就是一个“模糊现象”^[22],对汛期进行分期的时候同样存在模糊性,实现汛期分期的关键就是经验隶属函数的确定,采用陈守煜^[23]首次提出的直接模糊统计试验方法确定经验隶属函数,其具体步骤可参看文献^[24]。模糊集合分析的关键在于入汛标准的确定,而入汛标准的确定没有统一要求,本文结合舒章康等^[25]的相关研究,统一采用根据基准期和未来情景下有雨平均降雨序列,通过P-III分布拟合序列,采用频率为5%对应的降雨量9.8 mm作为流域出入汛标准。

采用陈守煜^[26]提出的半正态分布函数,对点进行拟合得到拟合隶属函数 $u_{A(t)}$,具体见式(1)。根据拟合隶属函数,确定隶属度为1.0时的两点作为主汛期区 $[a_1, a_2]$,在汛期论域 T (区间 $[x_1, x_3]$),根据确定的主汛期区间 $[a_1, a_2]$,将 $[x_1, a_1]$ 、 $[a_1, a_2]$ 和 $[a_2, x_3]$ 分别作为前汛期、主汛期和后汛期的分期结果以及分期极值降水的选样区间。

$$u_{A(t)} = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{a_1-t}{b_1}\right)^2\right] & t < a_1, b_1 < 0 \\ 1 & a_1 \leq t \leq a_2 \\ \exp\left[-\left(\frac{t-a_2}{b_2}\right)^2\right] & t > a_2, b_2 > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 a_1 、 a_2 为经验隶属函数中主汛期开始时间和结束时间, b_1 和 b_2 分别为升半正态参数、降半正态参数,可通过最小二乘法进行拟合得到。

2.2 极值分布拟合模型

本文拟采用广义极值分布(GEV)函数法描

述水文序列极值概率特征^[27],在进行频率分析之前,首先进行分布函数的拟合度检验,使用常用的Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验方法。K-S检验基本方法是通过构造统计量 D_n ,当该统计量小于临界值 D_n^α 时,表明样本服从该分布。由样本长度($n=50$)和显著性水平($\alpha=0.05$)查K-S的分位数表可得临界值为0.1884,经计算,在各种情况(情景+时期+分期)下计算得到的检验值均 < 0.1884 ,通过了0.05的显著性水平K-S检验。说明GEV分布适用于隔河岩水库汛期分期极值降水序列的拟合。根据研究的需要,分别提取全年、前汛期、主汛期、后汛期最大1 d降水作为各自的极值序列。GEV分布函数如式(2)所示。

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 - \gamma\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{\gamma}}\right\} \quad (2)$$

式中: α 、 β 和 γ 分别为分布函数的尺度参数、位置参数和形状参数。

本文首先利用极大似然法对GEV分布函数的参数进行估计,然后利用拟牛顿算法,以离差平方和(OLS)最小为准则,如式(3)所示对参数进行优化。

$$OLS = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[P_i - F_0(x_i) \right] \right\}^2 \quad (3)$$

式中: P_i 为频率, $F_0(x_i)$ 为不同频率对应的设计值。

3 结果分析

3.1 气候变化情景下的汛期分期

使用LARS-WG天气发生器,分别生成基准期和未来排放情景(A2、A1B和B1)不同时期(T1、T2和T3)的降水序列,分别采用2.1节所述的方法计算经验隶属度进而确定基准期及3种排放情景下3个时期的主汛期分期情况,结果如图1所示。

从隶属度的拟合情况看,无论是基准期还是未来排放情景,均可以得到较好的拟合效果,特别是未来排放情景,散点与曲线基本一致。可以确定基准期主汛期为6月14日—8月5日,未来3种排

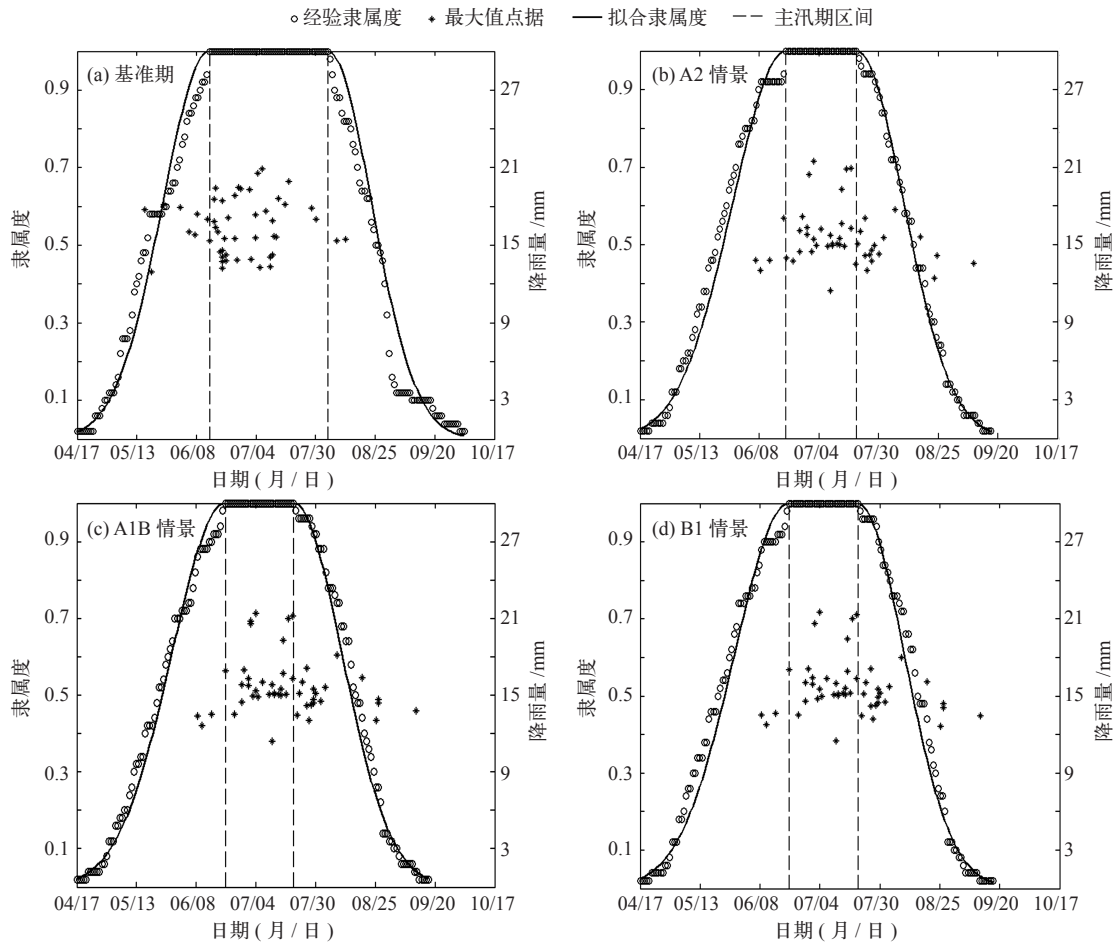


图 1 不同情景下的汛期经验和拟合隶属度

Fig. 1 Empirical membership degree and fitted membership degree under different scenarios (a) baseline period, (b) A2 emission scenario, (c) A1B emission scenario, (d) B1 emission scenario

放情景下主汛期分别为 6 月 20 日—7 月 21 日 (A2 情景)、6 月 21 日—7 月 21 日 (A1B 情景) 和 6 月 21 日—7 月 21 日 (B1 情景)。

为了对比气候变化背景下主汛期在不同排放情景和不同时间段的相对变化情况, 本文绘出了主汛期的时长变化图 (图 2)。模糊集合分析法确定的汛期分期在基准期和未来时期差别较大, 在未来时期主汛期起始时间比基准期晚, 而终止时间比基准期早。对比未来时期, 主汛期起始时间除 A2、B1 情景下的 T2 时段较早外, 其余情况下均比较接近, 在 6 月 20 日左右; 在不同情景不同时段下, 主汛期终止时间基本一致, 在 7 月 22 日左右。

此外, 由该图还可看出不同情景下主汛期时长变化情况。3 种排放情景下, 主汛期时长相比基准期均有缩短趋势。在 3 个时期内, A1B 排放情景

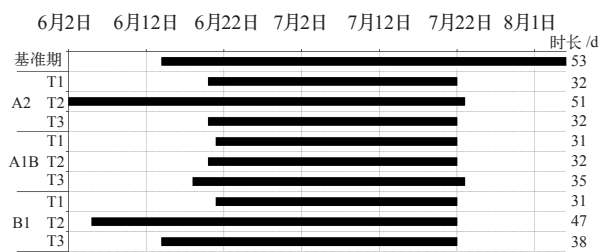


图 2 不同情景下主汛期时长变化

Fig. 2 Main flood season under different scenarios

主汛期缩短幅度均最大, 与基准期相比分别缩短 42%、40% 和 34%。刘攀等^[28] 基于实测流量资料进行汛期分期的研究表明, 清江流域隔河岩水库主汛期时间为 6 月 21 日—7 月 31 日, 而本文利用天气发生器模拟的未来不同排放情景下的主汛期结束时间均为 7 月 21 日, 与历史实测数据相比, 主汛期绝大多数情况开始时间相同, 但结束时间均提前,

提前约 10 d 左右。

根据马永胜等^[29]研究表明,主汛期缩短,水库蓄水量增多,水库提前进入汛末期,后汛期来水量多少对下游影响较小,来水少不需泄洪,也不会因蓄水造成防汛紧张局面,来水多,仅需开部分泄洪孔泄洪。由于蓄水增多,对于旱季农田灌溉和发电会产生效益,对下游泄洪少对下游河道安全也不会造成影响。而对于隔河岩水库这样具有兴利防洪功能的水库而言,其水库调度规则的制定,需要进一步从影响梯级水库的兴利和防洪风险等角度进一步分析研究。

3.2 汛期变化情况下的降雨极值选样

基准期以及 3 种排放情景下 T1 时段年最大极值降水的分布如图 1 中米字型符号离散点据。极值分布情况差别较大。年最大极值降水在基准期主要集中于主汛期,而在 3 种排放情景下主要集中于主汛期和后汛期。这种差异可能来自于两个方面:(1)年最大极值降水在基准期和不同排放情景下的发生时间有差异,从年最大极值降水发生的时间跨度可以看出,基准期最晚发生于 8 月上旬,开始的时候是 5 月下旬,而在未来情景下,年最大极值降水最早发生在 6 月上旬,最晚到 9 月中旬。(2)不同情景下汛期的划分不同,从图中可以看出,基准期的主汛期开始时间较早,而结束时间较晚,主汛期历

时跨度更大。林壬萍等^[30]曾指出,在全球变暖的背景下,降水特征的改变体现为降水总量和降水结构两方面的变化。而从这里可以看出,在以往研究中,更多的是气候变化导致降水总量的变化,而较少关注降水结构的变化。降水结构的变化涉及降水的历时、量级、强度、发生时间等以及它们之间的相关关系。

气候条件的变化导致不同情景不同时期汛期划分的变化,从而造成极值降水序列(年最大 1 d 降水量)取样的改变,进而在各分期内分布情况也会发生一定改变,而作为季节性表征类型之一,年最大 1 d 降水量在各分期内的分布情况发生改变,将导致水文季节发生改变。极值点据占主汛期百分比如表 1 所示,至少有 52% 的极值点位于主汛期区间内。得益于 A2 情景下的 T2 时期, B1 情景下的 T2 和 T3 时期有较长的主汛期历时,所以这 3 种情况下年极值降水时间发生于主汛期的比例较大,分别为 74%、72% 和 84%,而其他情况下最大不超过 60%。

3.3 极值降水序列的影响评估

3.3.1 分布函数参数优化

未来 3 种情景(A2、A1B 和 B1)和 3 个时段(T1、T2 和 T3)的前汛期、主汛期、后汛期的优化参数结果见图 3。尺度参数 α 在主汛期和后汛期基本接

表 1 年最大极值降水在各分期内分布情况表

Table 1 The distribution of annual maximum precipitation in each period of the flood season

情景	时段	前汛期	主汛期	后汛期	主汛期占比/%
基准期	1961—2010 年	8	40	2	80
A2	T1	3	30	17	60
	T2	1	37	12	74
	T3	6	26	18	52
A1B	T1	3	28	19	56
	T2	3	28	19	56
	T3	1	30	19	60
B1	T1	3	28	19	56
	T2	3	36	11	72
	T3	1	42	7	84

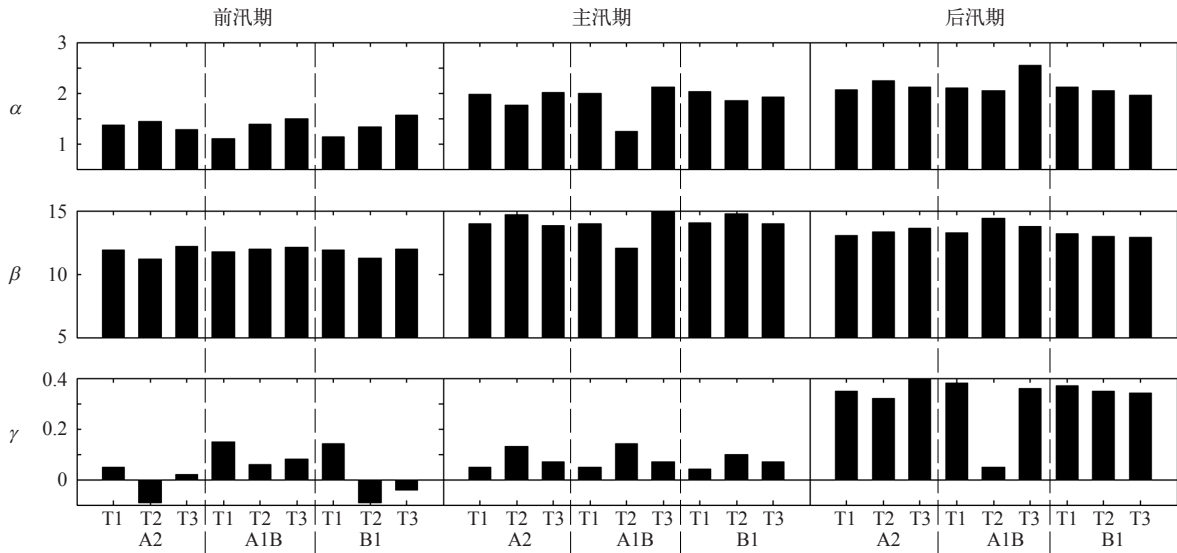


图3 分布函数的优化参数结果
Fig. 3 Optimized parameters of the distribution function

近。位置参数 β 在前汛期、主汛期和后汛期各分期下变化不大。尺度参数 α 和位置参数 β 在前汛期略小于主汛期和后汛期。形状参数 γ 却是在后汛期表现出与其余两个分期不同, 即明显大于前汛期和主汛期, A1B 情景下的 T2 时段除外。此外, 在不同排放情景下参数变化并未表现出明显的规律, 但在某些条件下参数却与时间趋势有关, 如随时间推移递增, 特别是主汛期, 尺度参数 α 和形状参数 γ 在 3 种情景下均呈现出一致的时间变异性, 即不同时段的变化规律一致, 尺度参数 α 均是 T1 和 T3 时段大, T2 时段最小。形状参数 γ 是 T2 时段大于 T1 和 T3 时段。位置参数 β 在 A2 和 B1 情景下, T2 时段最大, 而在 A1B 情景下, T2 时段最小。由此可见, 基于气候变化影响下的隔河岩水库汛期分期极值降水分布函数参数并没有呈现出鲜明的规律。

为了直观地反映分布函数参数变化在各分期对极值降水频率的影响, 这里将基准期极值降水采用频率曲线的形式展现出来, 连同各分期的参数如图 4 所示。主汛期整体偏大, 而前汛期和后汛期的极值降水比较接近, 这符合汛期分期的基本规律。对于极大或极小概率的极值降水, 均属前汛期极值降水偏大, 而在其他情况下, 后汛期极值降水较大。从频率曲线的特征可以看出, 前汛期比后汛期更加

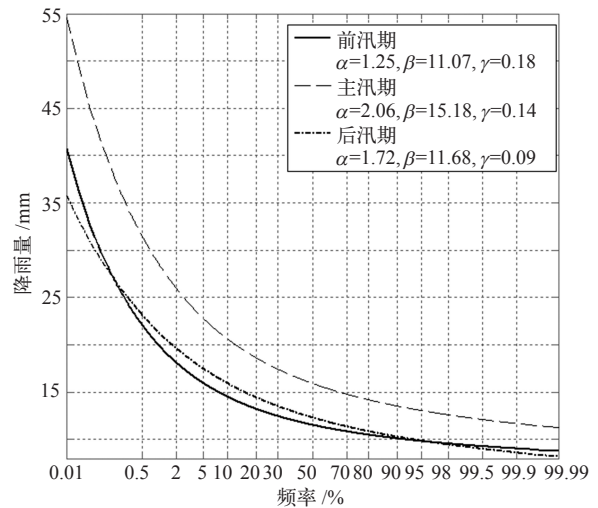


图4 基准期各分期优化频率曲线
Fig. 4 Optimal frequency curve for each period of baseline period

陡峭, 说明其偏差系数比较大。

3.3.2 极值降水重现期影响评估研究

极值降水的频率计算是洪水风险评估及防洪设施工程设计中重要的参数, 采用 GEV 分布研究各分期降水量重现期特征, 将从不同情景同一时段和同一情景不同时段两个方面来考虑不同重现期下极值降水的变化, 分别探讨温室气体排放情景和气候时变趋势造成的影响, 重现期分别取 10 a、20 a、50 a、100 a、200 a。

(1) 同一时段不同情景极值降水重现期变化分析

同一时段不同情景(本文取 T1 研究时段)不同重现期的极值降水对比情况如图 5 所示。未来排放情景与基准期有较大差别,未来情景均小于基准期,3 种情景下各重现期下的极值降水比较一致,相互之间基本无明显差别。随着重现期的增大,未来情景下的极值降水量级与基准期差别亦增大。从量级上看,同一重现期的极值降水,主汛期最大,

其次为前汛期,后汛期最小。这与不同情景下的降水总量变化有很大差异的特征不同。

(2) 同一情景不同时段极值降水重现期变化分析
同一情景下(以 A2 排放情景为例)不同时段不同重现期极值降水情况如图 6 所示。未来不同时期与基准期有较大差别,且不同时期,极值降水的量级之间层次比较分明。随着重现期的增大,不同

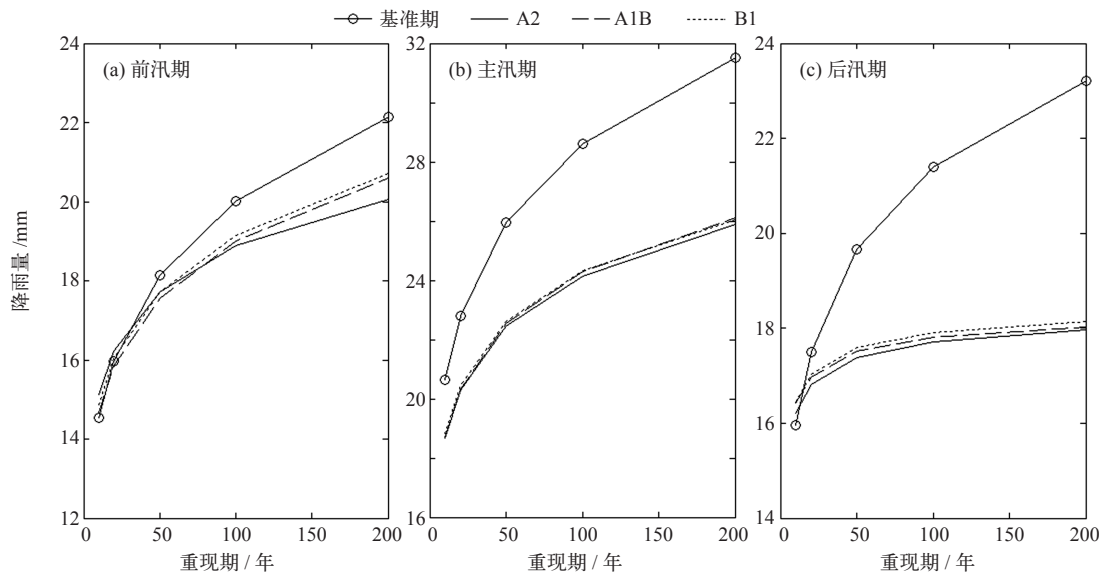


图 5 T1 时段不同情景下极值降水对比

Fig. 5 Comparison of extreme precipitation for different scenarios in the T1 period (a) pre-flood season, (b) main flood season, (c) post-flood season

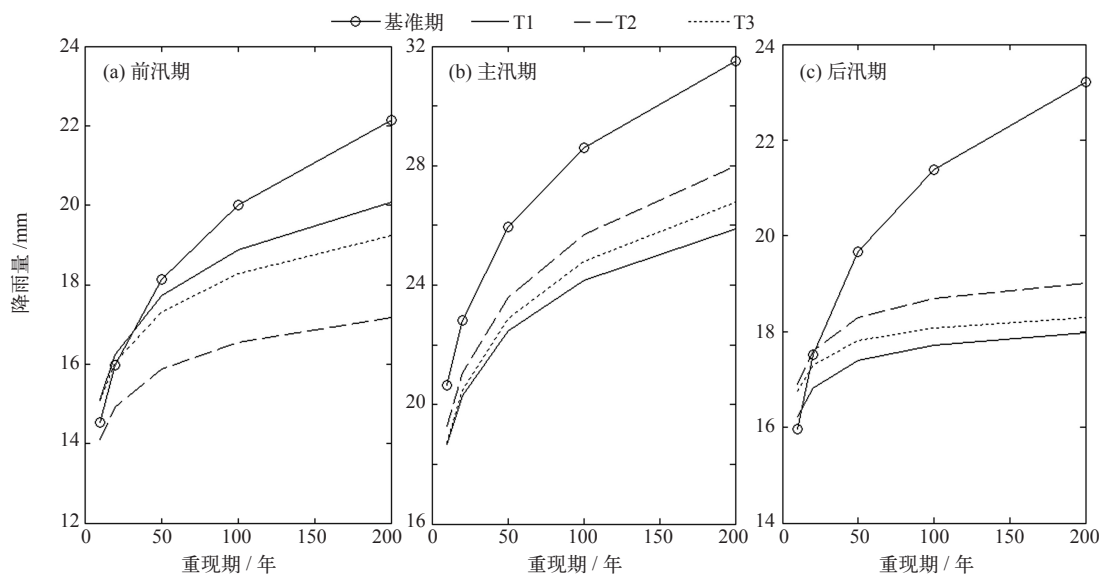


图 6 A2 情景不同时段下极值降水对比

Fig. 6 Comparison of extreme precipitation for different future periods under A2 scenario (a) pre-flood season, (b) main flood season, (c) post-flood season

时期的极值降水量级与基准期差别亦增大, 前、主、后汛期均是如此。从极值降水的量级上看, 同一重现期的极值降水, 在前汛期, $T1 > T3 > T2$; 而在主汛期和后汛期, $T2 > T3 > T1$ 。在现有的研究中, 降水总量在未来时期间的变异性^[31], 对于基于分期的极值降水而言并未出现。

4 结论

本文以清江流域隔河岩水库集水区域为研究对象, 采用气候变化情景下的 LARS-WG 天气发生器模拟研究区域内 33 个雨量站点的逐日降水数据, 利用模糊分析法进行汛期分期, 基于分期结果进行极值降水取样后, 使用 GEV 极值分布函数进行拟合, 进而评估了气候变化影响下以水库汛期分期和极值降水为例的降水季节性迁移特征, 得到如下结论。

(1) 基于模糊分析法的汛期分期结果发现, 未来不同排放情景下, 主汛期起始时间、终止时间和时长均有显著变化。主汛期与基准期相比较, 基本呈推迟且缩短的趋势, 原因在于气候变化引起的降水结构变化。

(2) 未来情景下的极值降水明显小于基准期, 且这种差距随着重现期的增大而增大。不同未来排放情景和时期的主汛期极值降水明显大于前汛期和后汛期。同一分期下, 不同排放情景之间差异较小, 而不同时期差异较大。

气候变化改变了降水的季节性特征, 但目前的研究结果主要是基于气候情景输出和统计降尺度方法。未来需要考虑不同大气环流模式和降尺度方法的差异, 以及结合最新的气候情景模式, 进行进一步的研究。■

参考文献

- [1] Manabe S, Jr J L H. The seasonal variation of the hydrologic cycle as simulated by a global model of the atmosphere [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 31 (12): 1617-1649
- [2] Marengo J A, Cavalanti I F A, Satyamurty P, *et al.* Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA

- atmospheric GCM [J]. *Climate Dynamics*, 2003, 21 (5-6): 459-475
- [3] 孔锋, 方佳毅, 刘凡, 等. 1951—2012 年中国降水集中度和集中期的时空格局 [J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2015 (4): 404-411
- [4] 李东龙, 王文圣, 李跃清. 中国主要江河年径流变化特性分析 [J]. *水电能源科学*, 2011 (11): 1-5
- [5] 姜洋. 基于集中度的大伙房水库汛期分期探讨 [J]. *水利水电技术*, 2016, 47 (5): 119-123
- [6] 陈璐, 郭生练, 张洪刚, 等. 长江上游干支流洪水遭遇分析 [J]. *水科学进展*, 2011, 22 (3): 323-330
- [7] 张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30 (11): 1370-1379
- [8] Matti B, Dahlke H E, Dieppois B, *et al.* Flood seasonality across Scandinavia: evidence of a shifting hydrograph? [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31 (24): 4354-4370
- [9] Vormoor K, Lawrence D, Heistermann M, *et al.* Hydrological model parameter (in) stability: implications for the assessment of climate change impacts on flood seasonality [J]. *Orbit*, 2014, 33 (7): 477
- [10] Vormoor K, Lawrence D, Heistermann M, *et al.* Climate change impacts on the seasonality and generation processes of floods: projections and uncertainties for catchments with mixed snowmelt/rainfall regimes [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2015, 19 (2): 913-931
- [11] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近 50a 极端降水事件变化特征的季节性差异 [J]. *大气科学学报*, 2009, 32 (6): 744-751
- [12] 王金星, 张建云, 李岩, 等. 近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势 [J]. *水科学进展*, 2008, 19 (5): 656-661
- [13] 顾西辉, 张强, 刘剑宇, 等. 新疆塔里木河流域洪水过程集聚性及低频气候影响 [J]. *水科学进展*, 2016, 27 (4): 501-511
- [14] 蒋海艳, 莫崇勋, 韦逗逗, 等. 水库汛期分期研究综述 [J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32 (3): 75-80
- [15] 李浩, 周义仁. 气候变化对汛期分期的影响研究 [J]. *水力发电*, 2018, 44 (6): 22-26
- [16] 莫崇勋, 阮俞理, 莫桂燕, 等. 水文变异对水库汛期分期及汛限水位确定的影响 [J]. *水利水电技术*, 2018 (2): 1-7
- [17] 董思言, 高学杰. 长期气候变化: IPCC 第五次评估报告解读 [J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10 (1): 56-59
- [18] Richardson C W, Wright D A. WGEN: a model for generating daily weather variables [J]. *Agricultural Research Service*, 1984, 97-118
- [19] Semenov M, Brooks R, Barrow E, *et al.* Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates [J]. *Climate Research*, 1998, 10 (2): 95-107
- [20] 祝薄丽, 郭家力, 郭靖, 等. 基于多模式耦合的赣江流域设计暴雨估算 [J]. *人民长江*, 2016, 47 (13): 6-11
- [21] 张徐杰, 林盛吉, 马冲, 等. HadCM3 模式下钱塘江流域设计暴雨估算 [J]. *水文*, 2013, 33 (1): 21-26
- [22] 许士国, 陈守煜. 水文分期描述的模糊统计方法 [J]. *大连理工大学学报*, 1990, 30 (5): 585-598
- [23] 陈守煜. 从研究汛期描述论水文系统模糊集分析的方法论 [J]. *水科学进展*, 1995, 6 (2): 133-138
- [24] 陈守煜. 工程水文水资源系统模糊集合分析理论与实践 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1998

- [25] 舒章康, 刘冀, 董晓华, 等. 基于模糊集合分析的汛期分期降雨极值分布研究 [J]. 水力发电学报, 2017, 36 (7): 55-64
- [26] 陈守煜. 基于可变模糊集的辩证法三大规律数学定理及其应用 [J]. 大连理工大学学报, 2010, 50 (5): 838-844
- [27] 胡宜昌. 中国不同强度降水时空变化特征 [J]. 气象科技进展, 2013 (3): 59-66
- [28] 刘攀, 郭生练, 李玮, 等. 变点分析方法在隔河岩水库汛期分期中的应用 [J]. 长江科学院院报, 2007 (1): 8-11
- [29] 马永胜, 黄强, 王义民, 等. 基于模糊集理论的石泉水库分期汛限水位确定 [J]. 水电能源科学, 2008 (3): 47-49
- [30] 林壬萍, 周天军. 参加 CMIP5 计划的四个中国模式模拟的东亚地区降水结构特征及未来变化 [J]. 大气科学, 2015, 39 (2): 338-356
- [31] 刘向培, 王汉杰, 何明元. 应用统计降尺度方法预估江淮流域未来降水 [J]. 水科学进展, 2012, 23 (1): 29-37

The impacts of climate change on hydrologic seasonal shift: taking flood season division and extreme precipitation as examples

ZHANG Meng-Jie¹, GUO Jia-Li¹, LIN Wei¹, GUO Jing²,
SHU Zhang-Kang^{1,3}, LI Ying-Hai¹, ZHANG Jing-Wen¹

¹ College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

² Huadong Engineering Corporation Limited, Power China, Hangzhou 310014, China;

³ Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

Abstract: Under the influence of climate change the reliable design and safe operation of hydraulic engineering has become a hot issue for decision makers, researchers and the public. Taking the Qingjiang River Basin as the research target, and using fuzzy set analysis method to classify the daily rainfall data generated under different greenhouse emission scenarios (e.g., A2, A1B and B1), the extreme precipitation series were simulated by generalized extreme value distribution (GEV) function. The results show that climate change has changed the precipitation structure, and its seasonal shift directly affects the flood season division. Under the three emission scenarios, the main flood season in the future will be postponed and shortened compared with the baseline period. The extreme precipitation in the future (e.g., 2011–2030, 2046–2065 and 2080–2099) is less than the baseline period, and this difference increases with the increase of the return period. The extreme precipitation in the main flood season is notably larger than that in the pre-flood season and post flood season. For extreme precipitation, the differences between periods are remarkably greater than those of emission scenarios.

Keywords: Climate change; Flood season division; Fuzzy set; Seasonal shift; Generalized extreme value (GEV) distribution