

# 气候变化及水利工程综合影响下的三峡水库超标准设计洪水

熊丰<sup>1,2</sup>, 郭生练<sup>1\*</sup>, 杨浩<sup>3</sup>, 秦鹏程<sup>4</sup>

<sup>1</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

<sup>2</sup>长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

<sup>3</sup>中国气象局武汉暴雨研究所, 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 湖北 武汉

<sup>4</sup>武汉区域气候中心, 湖北 武汉

Email: \*slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2021年8月12日; 录用日期: 2021年10月18日; 发布日期: 2021年10月25日

## 摘要

采用全球气候模式嵌套变网格模式进行动力降尺度预估三峡水库以上各分区降水量, 基于多输入单输出模型计算三峡水库受气候变化和水利工程综合影响下的超标准设计洪水。研究发现: 气候变化情景下长江上游降水强度增加, 导致三峡水库设计洪水增加, 长江上游干支流大型水库群的调蓄对三峡水库设计洪水有削减作用, 梯级水库群的调蓄影响要显著高于气候变化影响。三峡水库受气候变化和水利工程综合影响的千年一遇设计洪峰流量和30 d洪量分别为87,323 m<sup>3</sup>/s和1398.9亿m<sup>3</sup>, 相比设计值分别削减了11.6%和12.0%。

## 关键词

三峡水库, 超标准设计洪水, 气候变化, 水利工程

# Hyper Standard Design Flood of Three Gorges Reservoir under the Influence of Climate Change and Hydraulic Engineering

Feng Xiong<sup>1,2</sup>, Shenglian Guo<sup>1\*</sup>, Hao Yang<sup>3</sup>, Pengcheng Qin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>Hubei Key Laboratory of Heavy Rain Monitoring Warning Research, Institute of Heavy Rain, Wuhan Hubei

<sup>4</sup>Wuhan Regional Climate Center, Wuhan Hubei

作者简介: 熊丰(1993-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 工程师, 主要从事水文分析计算方面的研究。

\*通讯作者。

## Abstract

The dynamic downscaling method was adopted to simulate the future precipitation intensity variation of different sub-basins in the upper Yangtze River under climate change scenario. Based on the predicted precipitation, the hyper standard design flood of Three Gorges Reservoir (TGR) under the influence of climate change and hydraulic engineering was analyzed. Results reveal that the future design flood of TGR will increase under climate change scenario and decrease by the regulation of upstream cascade reservoirs. The impact of upstream reservoir regulation is greater than that of climate change scenario. 1000-year design flood peak and 30 d volumes are 87,323 m<sup>3</sup>/s and 139.9 billion m<sup>3</sup>, and decrease by 11.6% and 12% respectively.

## Keywords

Three Gorges Reservoir, Hyper Standard Design Flood, Climate Change, Hydraulic Engineering

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

三峡工程是综合治理开发长江的关键工程, 具有巨大的防洪、发电、航运、供水等综合利用效益。三峡水库初设洪水(建设期设计洪水), 依据三峡工程的建设规模和开发任务等, 基于天然年最大洪水系列并考虑历史洪水, 采用皮尔逊 III 型分布和适线法推求了洪水统计参数和设计洪水特征值, 并据此确定了三峡大坝和溢洪道尺度, 水库库容及特征水位。三峡水库采用千年一遇设计洪水(98,800 m<sup>3</sup>/s)和万年一遇加大 10%为校核洪水(124,300 m<sup>3</sup>/s) [1] [2]。这些设计值选用了最恶劣的组合, 从偏安全的角度取外包值加安全系数[3] [4]。

目前长江上游干支流已形成和在建一批库容大、调节性能好的梯级水库群。受上游梯级水库群联合调度的影响, 三峡水库的水文情势和功能需求与建设期相比已发生了显著变化[5] [6]。水库调度运行管理若沿用建设期设计洪水, 而忽略了上游梯级水库群的调蓄影响, 必然导致其汛期运行水位偏低、综合利用效益有待提高等问题。另一方面, 自第二次工业革命后期以来, 随着人类社会的不断发展, 大气中的二氧化碳浓度也在显著升高。至 2017 年, 大气层二氧化碳浓度已达 405 ppm, 为 80 万年来的最高浓度水平, 且目前二氧化碳和其他温室气体浓度仍在持续上升中。由于大气成分、辐射强迫以及气候系统的能量平衡发生改变, 导致自然环境和生态系统的演化过程亦发生了显著变化[7] [8]。大量研究表明全球气候变暖已成为不争的事实[9] [10] [11] [12]。气候变化和人类活动影响(主要是水库运行调度)作为变化环境的两个最重要的组成部分, 其对水文过程产生的影响受到国内外的广泛关注。但目前大多数研究仍聚焦于单一气候变化或水库运行调度对水文过程变化的影响, 而很少有研究同时考虑两种变化对径流极值产生的综合影响。

本文基于典型浓度路径情景下全球气候模式对长江上游气候变化预估结果, 综合考虑现有水利工程设施, 驱动多输入单输出模型, 模拟分析了三峡水库受气候变化和水利工程综合影响下的超标准设计洪水。研究可为三峡水库的科学调度和管理提供参考。

## 2. 长江上游气候变化预估

采用第五次耦合模式比较计划(CMIP5)的 3 个全球气候模式(GCM)在中等排放情景下(RCP4.5)的预估结果, 嵌套 LMDZ4 变网格模式进行动力降尺度, 获得 21 世纪初期长江上游气候变化情景, 所采用的模式及观测数据信息见表 1。本文采用的 3 个全球气候模式的模拟能力已经过全面有效评估, 各指标处于 CMIP5 多模式模拟范围内, LMDZ4 模式的强迫环流场来自上述 3 个全球模式。

Table 1. GCM and observation information

表 1. GCM 模式和观测资料信息

|     | 数据             | 来源         | 时间        | 精度(lat. × lon.) |
|-----|----------------|------------|-----------|-----------------|
| 模型  | LMDZ4          | 法国, LMD    | 1961~2005 | 0.5 × 0.5       |
|     | BCC-CSM1.1 (m) | 中国, BCC    | 1961~2005 | 1.125 × 1.125   |
|     | FGOALS-g2      | 中国, IAP    | 1961~2005 | 2.8125 × 2.8125 |
|     | IPSL-CM5A-MR   | 法国, IPSL   | 1961~2005 | 2.5 × 1.2676    |
| 观测值 | 降水             | Chen 等[13] | 1961~2005 | 0.5 × 0.5       |
|     | 气温             | Xu 等[14]   | 1961~2005 | 0.5 × 0.5       |

采用分位数校正法对预测值进行校正。该法基于实测值和模拟预测值, 考虑了变量的气候变化。计算公式如下[13]:

$$p_t = o_t + a\bar{\Delta} + b\Delta'_t \quad (1)$$

式中:  $p_t$  表示校正后的预测值,  $o_t$  表示观测值,  $t$  为逐日时次;  $\bar{\Delta}$  和  $\Delta'_t$  分别计算如下:

$$\Delta_t = m_{ft} - m_{ht} \quad (2)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \Delta_t = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (m_{ft} - m_{ht}) = \overline{m_f} - \overline{m_h} \quad (3)$$

$$\Delta'_t = \Delta_t - \bar{\Delta} \quad (4)$$

$a$ 、 $b$  为校正参数, 分别计算如下:

$$a = \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T o_t}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T m_{ht}} = \frac{\bar{o}}{\bar{m}_h} \quad (5)$$

$$b = \frac{Q_o}{Q_{m_h}} = \begin{cases} \frac{(Q_{0.75} - Q_{0.25})_o}{(Q_{0.75} - Q_{0.25})_{m_h}}, & \text{气温} \\ \frac{(Q_{0.9} - Q_{0.1})_o}{(Q_{0.9} - Q_{0.1})_{m_h}}, & \text{降水} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $m_{ht}$  和  $m_{ft}$  分别表示历史时期、未来时期的降水或气温。

为克服模拟过程中的虚假降水偏差, 需得到校正后的未降雨天数  $z_p$ , 计算公式如下:

$$z_p = \frac{z_{m_{ft}} - z_o}{z_{m_{ht}}} \quad (7)$$

式中:  $z_{m_{ht}}$  和  $z_{m_{ft}}$  分别为模式得到的历史及未来的未降雨天数,  $z_o$  为实测未降雨天数。

取三个模式校正后的平均值  $V_{corr}$  作为输出, 表达式如下:

$$V_{corr} = \frac{1}{3} (V_{corr}^{LMDZ/BCC} + V_{corr}^{FGOALS/BCC} + V_{corr}^{IPSL/BCC}) \quad (8)$$

分析对比了分位数校正法对降水天数和日降水量的校正效果。选取 1966~1985 年作为率定期，1986~2005 年作为检验期。

降水天数误差率定义为：

$$R = (d_{sim} - d_{obs}) / d_{obs} \times 100\% \quad (9)$$

式中： $d_{sim}$  为模拟或校正后的降水天数， $d_{obs}$  为观测的降水天数。

全国降雨日数误差校正结果汇总于表 2 中，平均降雨量误差的空间分布如图 1 所示。结果显示降水天数的误差经校正后减幅明显。模型检验期全年的模拟误差高达 62.6%，经校正后减小到 4.1%。平均降雨量误差经校正后在全国范围内亦低于 20%。因此，分位数校正法得到的降水精度能基本满足本文的精度需求。

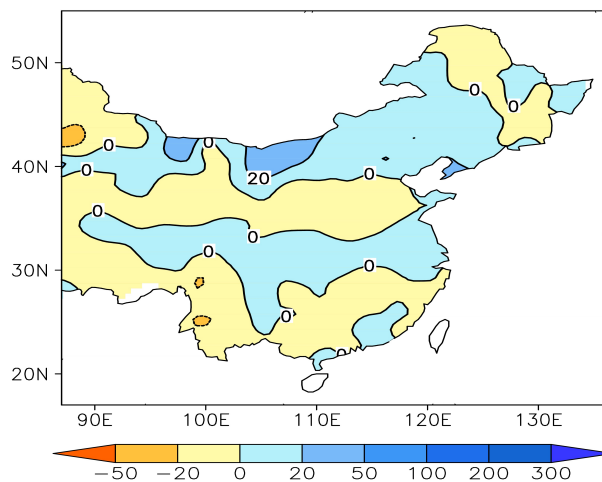
**Table 2.** Error correction results of national precipitation days (%)

**表 2.** 全国降水天数误差校正结果(%)

| 时段 | 率定期   |     | 检验期   |     |
|----|-------|-----|-------|-----|
|    | 校正前   | 校正后 | 校正前   | 校正后 |
| 全年 | 58.9  | 0.2 | 62.6  | 4.1 |
| 夏季 | 18.3  | 0.2 | 18.0  | 1.4 |
| 冬季 | 258.4 | 0.1 | 247.6 | 2.5 |

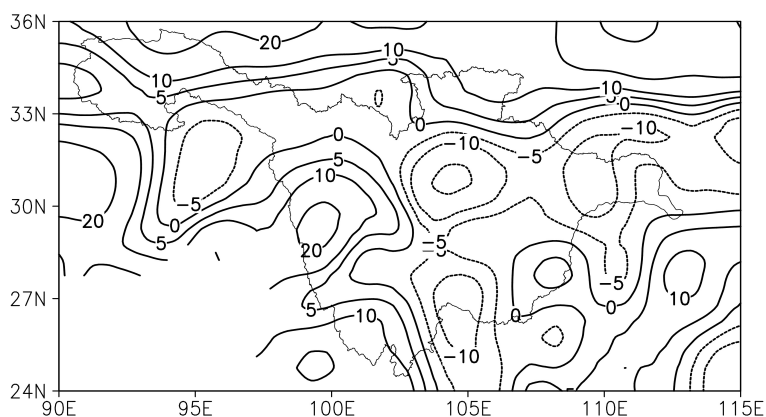
### 3. 气候变化影响下的三峡水库超标准设计洪水

对未来气候变化的预估选取 21 世纪初期(2021~2040)，将 1986~2005 年作为历史参考时段，采用分位数校正法分别对 1986~2005 年、2021~2040 年(21 世纪初期)时段内每个格点的日降水量进行校正。未来气候变化状态取经动力降尺度模型校正后 3 套气候模式结果的平均。采用降水强度(年总降水量/有雨天数)的变化来评估气候变化对未来降雨产生的影响。预测得到的 RCP4.5 情景下的 21 世纪初期长江上游流域降水强度变化率的空间分布如图 2 所示，统计得到的各个分区的降水强度变化率，如表 3 所示。可以看出相对于基准期而言，长江上游各个分区的降水强度均有一定程度的增强(2.1%~7.8%)。岷江流域和屏山 - 宜昌未控区间流域的变化幅度较小，而嘉陵江流域和乌江流域改变程度相对较大。



**Figure 1.** Spatial distribution of mean precipitation error

**图 1.** 平均降雨量误差的空间分布



**Figure 2.** Variation of precipitation intensity in the upper Yangtze River basin in the early 21st century under RCP4.5 scenario (%)

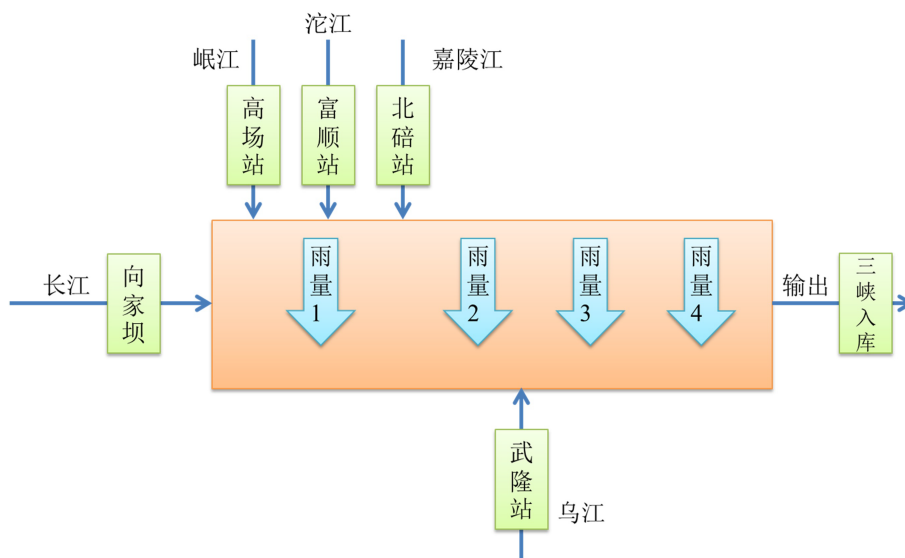
**图 2.** RCP4.5 情景下长江上游流域 21 世纪初期降水强度变化量(%)

**Table 3.** Variation of precipitation intensity in the upper Yangtze River basin in the early 21st century under RCP4.5 scenario (%)

**表 3.** RCP4.5 情景下长江上游各分区 21 世纪初期降水强度变化量(%)

| 干支流    | 金沙江  | 岷江   | 沱江   | 嘉陵江  | 乌江   | 屏山 - 宜昌<br>未控区间 |
|--------|------|------|------|------|------|-----------------|
| (控制站)  | (屏山) | (高场) | (富顺) | (北碚) | (武隆) |                 |
| 变化量(%) | 4.8  | 2.1  | 4.3  | 7.8  | 6.8  | 2.4             |

三峡水库承纳上游向家坝出库流量、支流入流以及区间降雨径流的输出结果。图 3 绘出向家坝至三峡水库未控区间流域多输入单输出模型(MISO)模型结构示意图, 共有金沙江、岷江、沱江、嘉陵江和乌江干支汇入和未控区间的降雨输入。



**Figure 3.** Sketch diagram of MISO model structure for uncontrol inter-basin of TGR

**图 3.** 向家坝至三峡水库未控区间流域 MISO 模型结构示意图

根据降雨强度变化按同倍比放大各分区的洪水过程线, 并输入到多输入单输出模型中, 可以得到气候变化条件下三峡水库的超标准设计洪水。多输入单输出模型计算式如下[6]:

$$y_t = G \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m(j)} u_k^{(j)} x_{t-k+1}^{(j)} + e_t \quad (10)$$

式中： $u^{(j)}$ 和  $m(j)$ 分别第  $j$  个输入系列的标准脉冲响应函数的纵坐标值和记忆长度； $e_t$ 为误差项； $n$ 为输入的个数。模型的关键在于求解脉冲响应函数的纵坐标值  $h$  以及确定记忆长度  $m$  的大小。脉冲响应函数  $\hat{H}$  可采用最小二乘法进行估计。

采用 2003~2016 年向家坝出库(视为屏山站)流量、高场、富顺、北碚、武隆、宜昌站的汛期 6 h 洪水资料进行分析计算。其中宜昌站 2003~2016 年洪水序列由三峡同时段入库洪水资料(视为清溪场站流量资料)采用马斯京根法演进至宜昌站得到。由于需要模拟的重点是大洪水过程,因此采样了宜昌站 2003~2016 年流量超过 40,000  $m^3/s$  的洪水过程,共计 16 场。前 11 场洪水用来率定模型,后 5 场洪水检验模拟效果。采用纳什效率系数(NSE)和水量平衡误差(RE)来衡量模型的模拟效果。模型在率定期和检验期的 NSE 分别为 0.94 和 0.9, RE 分别为-0.4% 和-1.4%, 因而结果表明 MISO 模型的模拟结果较好。

以千年一遇设计洪水为例,三峡水库受气候变化条件影响下的 1954、1981、1982 和 1998 典型年的洪水过程线如图 4 所示。可以看出 1954、1982 和 1998 典型年的设计洪水过程线受气候变化的影响相对较小;而 1981 典型年来水主要来源是嘉陵江,设计洪水过程线受气候变化的影响最大。

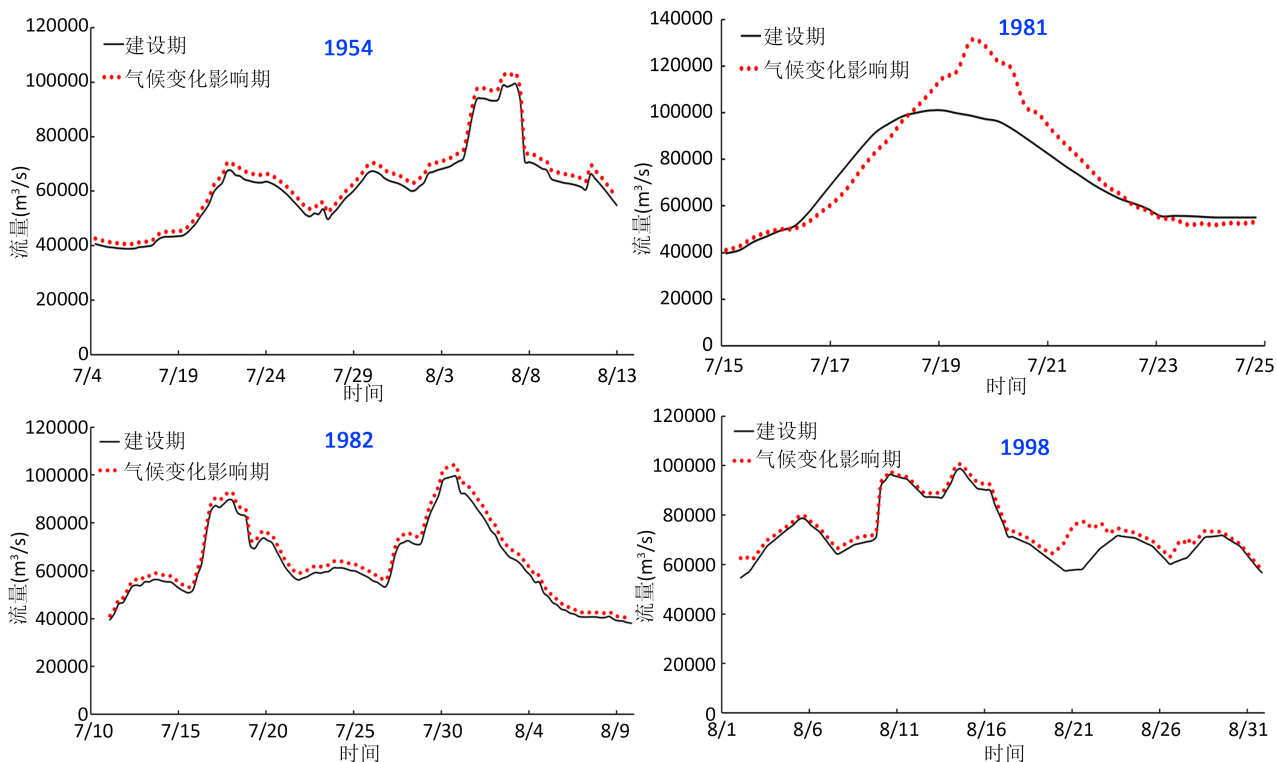


Figure 4. 1000-year design flood hydrographs of TGR in the early 21st century under RCP4.5 scenario with different typical years  
图 4. RCP4.5 情景下 21 世纪初期三峡水库不同典型年千年一遇设计洪水过程线

## 4. 气候变化及水利工程综合影响下的三峡水库超标准设计洪水

### 4.1. 气候变化和水利工程综合影响下的各支流设计洪水过程线

分析计算不同典型年受气候变化和水利工程综合影响下的各支流控制站设计洪水,图 5 绘出 1954 典型年的设计洪水过程线。从图中可以看出,干支流控制站受气候变化影响的设计洪水均略大于建设期设计洪水值,而经过梯



级水库调蓄后均变得平缓，气候变化后长江上游梯级水库群的调节作用仍能起到显著削减各分区设计洪水的作用。

#### 4.2. 气候变化及水利工程综合影响下的三峡水库超标准设计洪水

将干支流受气候变化和水利工程综合影响后的流量和未控区间的降雨过程输入 MISO 模型，计算三峡受气候变化和水利工程综合影响的超标准设计洪水。三峡按不同典型年放大的受气候变化和水利工程综合影响的千年一遇设计洪水过程线如图 6 所示，各个典型年的综合影响期设计洪水特征值如表 4 所示。

**Table 4.** Reduction of 1000-year design flood in different typical years during integrated impact period of TGR

**表 4.** 三峡水库综合影响期不同典型年千年一遇设计洪水削减量

| 变量                             | 时期    | 1954            | 1981           | 1982            | 1998            | 平均削减量 |
|--------------------------------|-------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-------|
| $Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s) | 建设期   | 99,208          | 101,000        | 99,300          | 98,800          | 11477 |
|                                | 综合影响期 | 83,064 (-16.3%) | 10,100 (-0%)   | 83,959 (-15.4%) | 84,375 (-14.6%) |       |
| $W_{3d}$ (亿 m <sup>3</sup> )   | 建设期   | 247.0           | 251.1          | 239.0           | 247             | 30.2  |
|                                | 综合影响期 | 195.0 (-21.1%)  | 229.9 (-8.4%)  | 217.5 (-9.0%)   | 221.1 (-10.5%)  |       |
| $W_{7d}$ (亿 m <sup>3</sup> )   | 建设期   | 486.8           | 489.2          | 489.0           | 486.9           | 64.4  |
|                                | 综合影响期 | 404.5 (-16.9%)  | 425.4 (-13.0%) | 419.1 (-14.3%)  | 445.4 (-8.5%)   |       |
| $W_{15d}$ (亿 m <sup>3</sup> )  | 建设期   | 911.8           | /              | 910.6           | 912             | 121.6 |
|                                | 综合影响期 | 764.8 (-16.1%)  | /              | 788.6 (-13.4%)  | 816.1 (-10.5%)  |       |
| $W_{30d}$ (亿 m <sup>3</sup> )  | 建设期   | 1590.0          | /              | 1589.8          | 1590.2          | 191.2 |
|                                | 综合影响期 | 1393.2 (-12.4%) | /              | 1406.1 (-11.6%) | 1397.1 (-12.1%) |       |

从表 4 可以看出：1) 不同典型年情况下，气候变化和水利工程对设计洪水产生的综合影响具有一定差异。1954 典型年的洪峰及 3 d、7 d、15 d 洪量削减相对较多，均高于 16%；而 1981、1982 和 1998 典型年的 3 d 洪量削减相对较少，均为 9% 左右。各个典型年特征变量受气候变化和水利工程综合影响的变化具有明显差异。2) 除 1981 典型年千年一遇设计洪峰流量受气候变化和水利工程综合影响的改变率为 0 之外，其他典型年设计洪峰和不同时段洪量均有一定程度的削减。四个典型年在综合影响期千年一遇设计洪峰、3 d、7 d、15 d 和 30 d 洪量的平均削减量，分别为 11,477 m<sup>3</sup>/s、30.2、64.4、121.6 和 191.2 亿 m<sup>3</sup>。

根据四个典型年设计洪水特征值的平均变化量，统计给出三峡水库受气候变化和水利工程综合影响的千年一遇设计洪水特征值，如表 5 所示。从表 5 中可见：三峡受综合影响的千年一遇设计洪峰流量、3 d、7 d、15 d 和 30 d 洪量，分别为 87,323 m<sup>3</sup>/s、216.8、422.4、790.2 和 1398.9 亿 m<sup>3</sup>；相比建设期设计值的削减率分别为 11.6%、12.2%、13.2%、13.3% 和 12.0%。研究结果表明：气候变化对三峡水库超标准设计洪水有增加作用，长江上游干支流大型水库群的调蓄作用对三峡水库超标准设计洪水有削减作用，水库调蓄影响要显著高于气候变化产生的影响。

**Table 5.** 1000-year design peak discharge and flood volumes of TGR in integrated impact period

**表 5.** 三峡水库综合影响期千年一遇设计洪峰和洪量

| 变量                             | 建设期    | 综合影响期  | 变化率    |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| $Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s) | 98,800 | 87,323 | -11.6% |
| $W_{3d}$ (亿 m <sup>3</sup> )   | 247    | 216.8  | -12.2% |
| $W_{7d}$ (亿 m <sup>3</sup> )   | 486.8  | 422.4  | -13.2% |
| $W_{15d}$ (亿 m <sup>3</sup> )  | 911.8  | 790.2  | -13.3% |
| $W_{30d}$ (亿 m <sup>3</sup> )  | 1590   | 1398.9 | -12.0% |

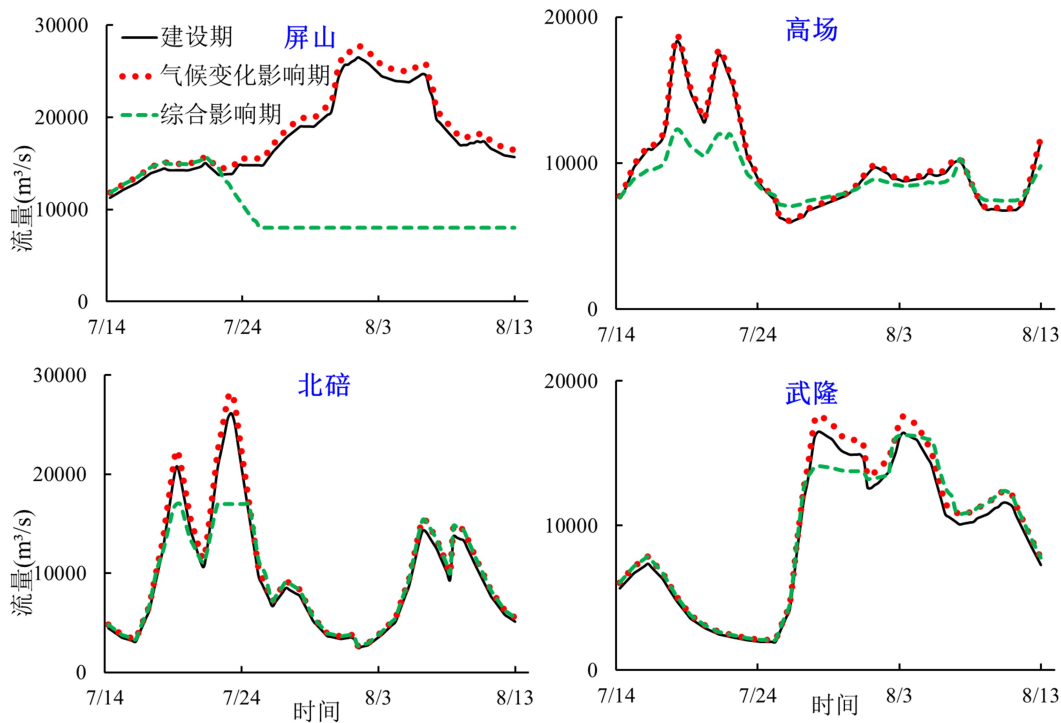


Figure 5. 1000-year design flood hydrographs at main control stations in the upper Yangtze River under the integrated influence of climate change and reservoir operation based on 1954 typical year flood

图 5. 长江上游干支流控制站受气候变化和水利工程综合影响的千年一遇(1954 典型年)设计洪水过程线

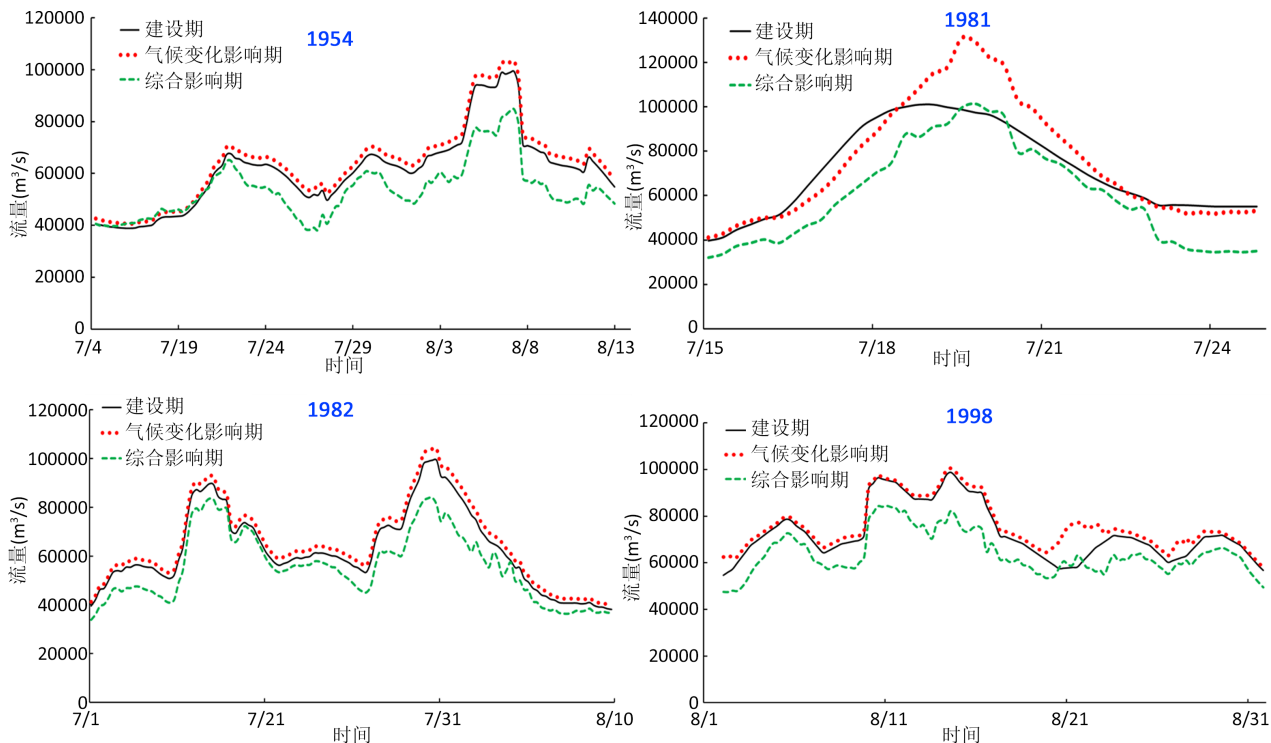


Figure 6. 1000-year design flood hydrographs of TGR under the integrated influence of climate change and reservoir operation

图 6. 三峡受气候变化和水利工程综合影响的千年一遇设计洪水过程线



## 5. 结论

受全球气候变化和上游梯级水库联合调度的影响,下游洪水的时程分配和量级均发生了很大的变化。因此,下游断面的设计洪水、防洪标准及水库特征水位等都将随之改变。本文基于洪水地区组成理论和方法,开展了长江上游梯级水库群受气候变化和水利工程综合影响的三峡水库超标准设计洪水研究,主要研究结论如下:

- 1) RCP4.5 情景下 21 世纪初期长江上游各分区流域降水强度呈增加趋势,岷江流域变化幅度较小(2.1%),而嘉陵江流域和乌江流域改变程度相对较大(7.8%)。
- 2) 气候变化对三峡水库超标准设计洪水有增加作用,长江上游干支流大型水库群的调蓄对其有削减作用,梯级水库群的调蓄影响要显著高于气候变化影响,气候变化后长江上游梯级水库群的调节作用仍能起到显著削减各分区设计洪水的作用。
- 3) 三峡水库在综合影响期千年一遇设计洪峰流量,3 d、7 d、15 d 和 30 d 洪量,分别为 87,323 m<sup>3</sup>/s、216.8、422.4、790.2 和 1398.9 亿 m<sup>3</sup>; 相比建设期的设计值,分别削减了 11.6%、12.2%、13.2%、13.3%和 12.0%。
- 4) 当发生超标准设计洪水时,可能会引起小型水库工程溃坝。溃坝洪水一般发生时间短,洪峰流量大,淹没范围广,具有低概率、高风险的特征。坝体一旦溃决,将对下游人民生命财产安全造成极大的威胁。因此,有必要进一步开展超标准洪水条件下水库溃坝洪水风险分析研究。

## 基金项目

受国家重点研发计划(2018YFC1508001)和长江三峡集团有限公司科技项目(0799254)资助。

## 参考文献

- [1] 魏山忠, 等, 编著. 长江巨型水库群防洪兴利综合调度研究[M]. 武汉: 长江出版社, 2016.  
WEI Shanzhong, *et al.* Comprehensive operation of flood control and utilization for large-scale reservoir group in Yangtze River. Wuhan: Changjiang Press, 2016. (in Chinese)
- [2] 周建中, 李纯龙, 陈芳, 等. 面向航运和发电的三峡梯级汛期综合运用[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 31-40.  
ZHOU Jianzhong, LI Chunlong, CHEN Fang, *et al.* Integrated utilization of the Three Gorges Cascade for navigation and power generation in flood season. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(1): 31-40. (in Chinese)
- [3] 熊丰, 郭生练, 陈柯兵, 等. 金沙江下游梯级水库运用期设计洪水[J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 401-410.  
XIONG Feng, GUO Shenglian, CHEN Kebing, *et al.* Design flood for cascade reservoirs during operation period in the downstream Jinsha River. Advances in Water Science, 2019, 30(3): 401-410. (in Chinese)
- [4] 郭生练, 熊丰, 尹家波, 陈柯兵. 水库运用期设计洪水理论和方法[J]. 水资源研究, 2018, 7(4): 327-339.  
GUO Shenglian, XIONG Feng, YIN Jiabo, CHEN Kebing. Theory and method of design flood in reservoir operation period. Journal of Water Resources Research, 2018, 7(4): 327-339. (in Chinese) <https://doi.org/10.12677/JWRR.2018.74037>
- [5] 李安强, 张建云, 仲志余, 等. 长江流域上游控制性水库群联合防洪调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 59-66.  
LI Anqiang, ZHANG Jianyun, ZHONG Zhiyu, *et al.* Joint flood control operation of reservoir group in the upper Yangtze River basin. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 59-66. (in Chinese)
- [6] 郭生练, 熊丰, 王俊, 等. 三峡水库运行期设计洪水及汛控水位初探[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1311-1317.  
GUO Shenglian, XIONG Feng, WANG Jun, *et al.* Preliminary exploration of design flood and control water level of Three Gorges Reservoir in operation period. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11): 1311-1317. (in Chinese)
- [7] IPCC (2014) Impacts adaptation and vulnerability and climate change: mitigation of climate change. Contribution of working group-II and working group-III to the fifth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, New York.
- [8] ALLEN, M. R. and INGRAM, W. J. (2002) Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. Nature, 419: 224-232. <https://doi.org/10.1038/nature01092>
- [9] OKI, T. and KANAE, S. (2006) Global hydrological cycles and world water resources. Science, 313: 1068-1072. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- [10] PIAO, S. L., CIAIS, P., HUANG, Y., *et al.* (2010) The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 467: 43-51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>

- [11] BARNETT, T. P., ADAM, J. C. and LETTENMAIER, D. P. (2005) Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438: 303-309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
- [12] SONG, X. M., KONG, F. Z. and ZHAN, C. S. (2011) Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin city of China. *Water Resource Management*, 25(3): 857-873. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9730-9>
- [13] CHEN, D., OU, T., GONG, L., *et al.* (2010) Spatial interpolation of daily precipitation in China: 1951-2005. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(6): 1221-1232. <https://doi.org/10.1007/s00376-010-9151-y>
- [14] XU, Y., GAO, X. and SHEN, Y. (2009) A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(4): 763-772. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-9029-z>