三峡及上游梯级水库群特大洪水防洪能力研究

张尚弘^{1*}, 荆柱¹, 安文杰¹, 张荣琪¹, 易雨君²

1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206;

2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875

*E-mail: zhangsh928@126.com

收稿日期: 2020-12-03; 接受日期: 2021-02-24; 网络版发表日期: 2021-08-18

国家自然科学基金(批准号: 52025092, 51979105)资助项目

摘要 三峡上游大规模梯级水库群的建成, 极大地改变了三峡水库入库洪水的原始形态, 使得三峡水库实际运行时的来水情况与最初设计时发生了很大变化, 对下游荆江地区的防洪风险造成了显著的影响. 本文通过建立三峡水库入库洪水随机模型和动库容调洪模型, 结合三峡水库对城陵矶地区进行防洪补偿的调度规则, 从入库洪水形态、调洪计算模型、防洪调度规程三个方面探究在三峡水库与上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库群联合调度下荆江地区的防洪安全. 结果表明, 仅三峡水库单独拦蓄千年一遇入库洪水, 所能控制的最大下泄流量为 $70160\sim 81160\text{ m}^3/\text{s}$, 荆江地区的分蓄洪量为 $72.95\sim 102.08$ 亿立方米, 大于荆江地区 72.76 亿立方米的蓄洪容积, 难以保证完全分洪. 为避免启用荆江分蓄洪区造成的巨大损失, 在不同入库洪水形态和对城陵矶地区进行防洪补偿的调度规则下, 三峡上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库群需要预留的最小拦蓄库容为 $72.11\sim 94.74$ 亿立方米. 研究成果可以为长江上游梯级水库群联合防洪调度提供参考.

关键词 三峡水库, 梯级水库群, 特大洪水, 洪水随机模拟, 动库容调洪

1 引言

中国是世界上洪涝灾害发生最频繁的国家之一, 在2008~2017年期间, 受洪涝灾害影响, 全国受灾人口平均值为11015万人/年, 农作物受灾面积平均值为 $92361\text{ km}^2/\text{年}$, 直接经济损失占当年GDP的百分比平均值为 $0.41\%/\text{年}$ ^[1]. 中国洪灾发生最集中频繁的区域是长江中下游地区, 对全流域乃至全国国民经济的影响重大. 三峡工程位于长江上游与中下游交界处, 是世界最大的水利枢纽工程, 能直接控制下游荆江河段洪水

来量的95%以上, 是长江防洪体系中不可替代的主要组成部分. 自三峡大坝建成以来, 长江上游又逐渐兴建了以乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝为代表的多个大型水库. 截至2018年, 长江上游已建成大型水库(总库容在1亿立方米以上)共102座, 总调节库容800余亿立方米^[2]. 三峡上游梯级水库群建成后的蓄水和泄水过程, 极大地改变了三峡水库入库洪水原有形态, 也在一定程度上降低了下游荆江地区的防洪风险. 2020年6月23日, 水利部批复《2020年长江流域水工程联合调度运用计划》, 乌东德水电站正式纳入2020年度

引用格式: 张尚弘, 荆柱, 安文杰, 等. 三峡及上游梯级水库群特大洪水防洪能力研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 795–806
Zhang S H, Jing Z, An W J, et al. Flood-control ability of the Three Gorges Reservoir and upstream cascade reservoirs during catastrophic flooding (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 795–806, doi: [10.1360/SST-2020-0479](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0479)

长江流域联合调度范围。2020年7月1日,《三峡(正常运行期)-葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》(2019年修订版)^[3]正式获水利部批准,将兼顾城陵矶地区的防洪补偿控制水位由155 m提高至158 m,遇超标准洪水时将减少长江中下游分洪量近25亿立方米,进一步提高了对城陵矶地区的防洪作用。在三峡上游多个大型水库陆续建成和新版调度规程出台的背景下,全面评估三峡及其上游梯级水库群的防洪能力意义重大。

针对三峡水库及其上游梯级水库群的防洪能力,专家学者从入库洪水模拟和库区调洪演算方面做了大量的研究工作^[4-15]。在入库洪水模拟方面,熊明^[16]采用随机模拟方法对三峡水库的防洪安全风险进行了计算,证明了三峡工程采用1981, 1982, 1954年典型设计洪水过程线推求防洪特征水位是偏于安全的。Fang等人^[17]利用一维河网数学模型,选择长江流域1954和1998年典型洪水作为三峡入库洪水进行计算,结果表明三峡水库现有的防洪能力低于预期,需要和长江下游分蓄洪工程进行有效的结合来共同防御洪水。Huang等人^[18]基于copula函数对三峡水库的入库洪水进行随机模拟,与传统的计算方法进行比较,可以更加有效地评估三峡水库在运行期间的防洪风险。

在库区调洪演算方面,仲志余等人^[19]基于动库容调洪的基本原理,构建了瞬时水面线法、普林斯曼隐式差分法和三级河网算法三种不同的动库容调洪计算模型,结果表明在千年一遇来水情况下,可以通过防洪调度使枝城流量不超过72000 m³/s。周建军^[20]采用三峡梯级和长江上游水库群数学模型、长江中游河网水动力学模型对1998和1954年全流域洪水进行了仿真模拟,认为三峡水库全面拦洪条件下的长江中游防洪形势仍十分严峻。李安强等人^[21]选取溪洛渡、向家坝与三峡水库组成的水库群为对象,基于大系统分解协调原理对长江上游梯级水库群联合调度的防洪能力进行计算,结果表明联合调度方案可以减少长江中下游分洪量,有助于提高整个流域防洪减灾水平。顿晓晗等人^[22]提出一种基于长系列历史实测径流资料的防洪库容频率曲线推算方法,分析了三峡水库汛期不同时段实时防洪风险,提出合理利用水库群防洪库容的互用性可有效降低三峡水库防洪风险。

上述研究成果从多个角度对三峡及上游梯级水库群的防洪能力进行了评估。一方面,大多数研究成果基于历史上1954, 1981, 1982年等实测洪水过程进行计

算,但就水文过程的不确定性而言,仅以历史上实测洪水过程为代表模拟计算河道型水库的防洪能力是不全面的。部分研究成果虽然实现了对入库洪水的随机模拟,但大多是直接模拟坝址洪水过程或采用水量平衡法对入库洪水进行计算,不足以准确反映河道型水库动库容对入库洪水的调蓄过程,难以准确论证水库的防洪能力。另一方面,现有研究通过建立水动力学模型对库区内洪水演进的过程进行模拟,但部分研究成果基于三峡蓄水至正常蓄水位前建立的调洪模型得出,缺乏在正常蓄水情况下对模型的率定与验证,且所用地形资料仅为库区大断面资料,对河道型水库两岸河湾、小支流等对水流的槽蓄作用缺乏考虑,调洪模型的准确性也需要进一步验证。此外,现有研究较少考虑对城陵矶地区的防洪补偿调度,需要依据2019年修订版调度规程重新设定三峡水库调洪调度规则。

本文拟对三峡水库及其上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库群联合调度下的防洪能力进行研究。(1) 基于三峡库区主要入库站点长系列日径流数据,建立三峡库区入库洪水随机模型。基于高精度库区DEM数据,考虑库区支岔槽蓄量,建立动库容调洪模型。根据1954年洪水和随机模拟洪水过程生成三峡水库千年一遇入库洪水过程。(2) 根据三峡水库调洪调度规则和长江上游梯级水库群对三峡水库入库洪水的拦蓄策略,通过三峡库区动库容调洪模拟计算,探究三峡及其上游梯级水库群在千年一遇特大洪水下的防洪能力。

2 研究区域

长江上游已建有三峡、溪洛渡、向家坝等一大批防洪库容大、调节能力强的大型水库,不仅极大地保障了长江上中游地区人民的生命和财产安全,更借助发电、供水等综合利用措施,发挥出了巨大的经济效益。长江上游在2020年度共纳入联合调度范围的水库共22座,总调节库容440亿立方米,防洪库容387亿立方米,总装机容量86380 MW。其中,三峡、乌东德、溪洛渡、向家坝四库防洪库容合计301亿立方米,占长江上游参与联合调度总防洪库容的78%。此外,拟逐步纳入联合调度的重要大型水库还包括即将建成的白鹤滩水库,水库总库容206亿立方米,调节库容104亿立方米,规划预留最大防洪库容75亿立方米,是长江防洪体

系的重要组成部分. 因此, 本文选择乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝四座水库组成三峡上游梯级水库群, 各水库基本情况见表1. 在三峡下游, 荆江地区设置分蓄洪区有荆江分洪区、垸市扩大区、人民大垸及虎西备蓄区共4处, 蓄洪容积72.27亿立方米. 其中, 枝城站是荆江河段的重要控制站, 其流量可以直接反映荆江河段遇大洪水时的分洪量. 长江上游重要水库、水文站点地理位置见图1.

3 方法

本文旨在对千年一遇特大洪水下三峡水库与上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库群联合调

度下的防洪能力进行研究, 研究方法分为以下两个部分.

(1) 基于三峡库区主要入库站点(朱沱站、北碚站、武隆站)50年长系列实测日径流数据和高精度库区DEM数据, 分别建立三峡库区入库洪水随机模型和一维库容调洪计算模型. 采用寸滩和宜昌洪量同频率组合法, 将1954年历史典型洪水和随机模拟得到的大量入库洪水过程分别放大为千年一遇频率的入库设计洪水. 通过三峡水库库容调洪计算, 以三峡水库所能控制的最大下泄流量为依据挑选出最危险的入库洪水过程.

(2) 根据三峡上游梯级水库群的防洪能力, 对三峡水库千年一遇频率下1954年历史典型洪水和随机模拟的最危险入库洪水进行预先拦蓄. 基于预先拦蓄后的

表 1 长江上游重要水库基本情况表

Table 1 Technical parameters of important reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River

水库名称	控制流域面积 (万平方千米)	正常蓄水位 (m)	调节库容 (亿立方米)	防洪库容 (亿立方米)	装机容量 (MW)
三峡	100	175	165	221.5	22500
乌东德	40.61	975	30	24.4	10200
白鹤滩	43.03	825	104	75	14000
溪洛渡	45.44	600	64.62	46.51	13860
向家坝	45.88	380	9.03	9.03	6400

图 1 (网络版彩图)长江上游重要水库、水文站点地理位置示意图

Figure 1 (Color online) Location of important reservoirs and hydrological stations in the upper reaches of the Yangtze River.

入库洪水方案, 通过动库容调洪模拟计算三峡水库所能控制的最大下泄流量. 考虑三峡下游荆江地区的防洪现状, 计算为避免启用荆江分蓄洪区时梯级水库群需要预留的最小拦蓄库容, 探究三峡及上游梯级水库群在千年一遇特大洪水下的调度策略及防洪能力.

3.1 三峡水库入库洪水生成

由于水文过程的不确定性, 一场或数场偏于危险的历史实测洪水过程难以代表未来可能发生洪水中最危险的情况. 通过洪水随机模拟方法, 大量增加入库洪水的样本, 以水库所能控制的最大下泄流量为依据, 寻求水库在某一设计频率下最危险入库洪水过程, 以此评价水库的防洪能力更具有全面性和代表性. 本文基于三峡库区主要入库站点(朱沱站、北碚站、武隆站)1957~2006年共50年实测日径流数据, 通过建立日径流分期平稳自回归模型实现对三峡库区入库洪水过程的随机模拟. 日径流分期平稳自回归模型的基本思路是根据日流量自相关结构的变化特性, 将一年分成几个时期, 在各个时期内, 由于日流量自相关结构特性较一致, 据此在每一个时期建立相应的平稳自回归模型. 就全年日流量过程而言, 可由几个分期平稳模型组合起来表示整体的随机变化特性. 相较于其他自回归模型, 分期平稳自回归模型从原理上既可以反映年内日流量过程在相同水文时期内自相关结构的统一性, 又可以体现日流量过程在不同水文时期内自相关结构的差异性, 模型的主要形式见式(1)^[23,24]:

$$Z_t = \begin{cases} \sum_{i=1}^{P_1} \phi_i^1 Z_{t-i} + \varepsilon_t^1, & 1 \leq t \leq T_1, \\ \sum_{i=1}^{P_2} \phi_i^2 Z_{t-i} + \varepsilon_t^2, & T_1 < t \leq T_2, \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{P_r} \phi_i^r Z_{t-i} + \varepsilon_t^r, & T_{r-1} < t \leq 365, \end{cases} \quad (1)$$

式中, Z_j 为通过计算得到的第 j 个截口正态标准化日流量模拟序列; $T_d(d=1, 2, \dots, r-1)$ 为分期门限值, r 为分期数; $\phi_1^j, \phi_2^j, \dots, \phi_{P_j}^j$ 为第 j 分期自回归模型的自回归系数, P_j 为第 j 分期自回归模型阶数($j=1, 2, \dots, r$); ε_t^j 为第 j 分期的正态独立随机变量(均值为0、方差为 $\sigma_{\varepsilon_t^j}^2$).

基于上述模型, 一般使用长序列法或短序列法模拟生成模拟序列. 其中, 长序列法是由模型模拟出一个长度为 N 且不间断的模拟序列, 相较于短序列法更

有利于保持模拟序列与实测序列各项统计参数的一致性. 因此, 采用长序列法分别模拟生成朱沱站、北碚站、武隆站6000年的日流量过程, 选出各站点模拟序列中各年最大30 d洪量对应的洪水过程作为动库容调洪中模拟入库洪水的总样本. 朱沱站为三峡水库干流洪水入库站点, 北碚站、武隆站入库水量相对较少, 对最终调洪结果影响较小. 因此, 朱沱站选择2000场洪水过程, 北碚站选择2场洪水过程, 武隆站选择1场洪水过程, 最终随机组合生成入库方案共4000种.

在三峡库区下游, 枝城站的流量直接反映了经三峡水库调蓄后荆江河段泄洪能力和防洪安全. 同时, 枝城站的洪水主要来自寸滩站, 根据统计, 寸滩站各时段洪量约占枝城站洪量的90%~95%. 因此, 采用寸滩站和枝城站洪量同频率组成法将4000种随机入库洪水和1954年历史典型洪水分别放大为千年一遇频率下的入库设计洪水, 既可保证入库设计洪水的主要组成部分的峰、量设计标准, 同时又可避免不同典型洪水的影响, 使总的入库设计洪水成果符合设计标准. 其中, 寸滩站以上来水(包括朱沱站、北碚站、五岔站及朱沱站到寸滩站区间流量)采用寸滩站倍比用7, 15, 30 d三段控制放大, 寸滩站以下来水(包括武隆站及寸滩站到枝城站区间流量)采用寸滩站、枝城站相同频率15, 30 d两段洪量的相应区间洪量倍比放大, 各河段千年一遇频率下设计洪量如表2所示.

采用一维非恒定流模型对三峡水库入库洪水进行调洪演算, 模型基于圣维南方程, 并采用普林斯曼隐式差分求解^[25], 计算公式如下.

连续方程:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q; \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0, \quad (3)$$

式中, t 为时间(s); x 为沿河道的距离(m); Z , Q 分别为某一断面(距离基准面的距离为 x)任一时刻 t 的水位(m)、流量(m^3/s); A 为过水断面面积(m^2); B 为断面的水面宽(m); q 为单位长度旁侧入流量(m^2/s); g 为重力加速度(m/s^2); K 为流量模数(m^3/s).

在采用一维非恒定流进行调洪演算过程中, 河段

表 2 三峡库区各河段千年一遇频率洪水设计洪量**Table 2** Design flood volumes for different river sections at the 1000-year frequency

时段洪量 (d)	寸滩站 (亿立方米)	枝城站 (亿立方米)	寸滩站-枝城站区间 河段 (亿立方米)
7	453.8	506.3	52.5
15	815.0	948.3	133.3
30	1403.0	1653.6	250.6

被概化为以大断面为端面的棱柱体, 水流在棱柱体内满足连续方程与动量方程。但由于棱柱体与实际地形的差异, 棱柱体外支流、河湾等地的水流吞吐量是圣维南方程本身无法模拟的^[26]。水位越高, 支流和河湾对水流的槽蓄作用越明显, 会严重影响水面线和库容模拟的准确性。为了反映河道的天然情况, 提升模型模拟的准确性, 结合 2.5 m 分辨率 DEM 数据, 对因断面地形概化而未考虑真实地形情况下的天然库容进行水量不平衡修正, 从而提高了模型对实际洪水过程模拟的科学性^[27]。最后, 通过三峡水库动库容调洪计算, 以三峡水库所能控制的最大下泄流量为依据挑选出各个频率下的最危险入库洪水过程。

3.2 梯级水库群联合防洪计算

根据《三峡(正常运行期)-葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》(2019 年修订版)和动库容调洪模型进行演算, 计算遭遇千年一遇频率下不同入库洪水时三峡水库所能控制的最大下泄流量。其中, 为避免启用三峡下游荆江地区分蓄洪区, 减小分洪造成的损失, 需要保证枝城站安全流量为 $60793 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[27]。千年一遇频率下 1954 年洪水中三峡到枝城站区间流量平均值为 $1816 \text{ m}^3/\text{s}$, 则认为当三峡下泄流量不超过 $59000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 不必启用下游荆江分蓄洪区即可保证下游行洪的安全。依据调度规则, 设置三峡水库动库容调洪计算流程具体如下。

(1) 初始水面线取坝前 145 m 时的多年平均水面线。

(2) 根据入库洪水过程, 以坝前保持 145 m 为下游边界条件, 计算相应的坝前流量过程。

(3) 在不同坝前水位下, 依据入库流量分别控制不同的下泄流量, 具体见表 3。其中在 145~158 m 水位下, 结合三峡在兼顾航运、供水等方面时的特征流量, 对

表 3 三峡水库不同坝前水位下调洪调度规则**Table 3** Discharge of the Three Gorges Reservoir at different water levels

坝前水位 (m)	入库流量 Q_1 (m^3/s)	下泄流量 Q_2 (m^3/s)
145~158	Q_1	25000, 35000, 45000
	$Q_1 > 55000$	55000
158~171	$45000 < Q_1 < 55000$	$= Q_1$
	$Q_1 < 45000$	45000
	$Q_1 > 80000$	80000
171~175	$55000 < Q_1 < 80000$	$= Q_1$
	$Q_1 < 55000$	55000

城陵矶地区进行防洪补偿的控制流量分别为 25000, 35000, 45000 m^3/s 三种。

(4) 在计算三峡水库所能控制的最大下泄流量时, 在坝前水位上涨至 171 m 时, 通过试算调整大坝下泄流量使得坝前最高水位为 175 m, 则该泄流量即为该场入库洪水下的三峡水库所能控制的最大泄流量。

本文选择乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝四座水库对三峡干流朱沱站入库洪水进行联合拦蓄, 四库防洪库容合计 154.94 亿立方米。《2018 年度长江上中游水库群联合调度方案》^[2]明确规定: 在川渝河段, 当预报朱沱洪峰流量超过 $52600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 朱沱上游以溪洛渡、向家坝为主的梯级水库群需要通过补偿调度, 控制朱沱洪峰流量不超过 $52600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。以此为依据, 设计三峡及上游梯级水库群拦蓄洪水的方案如下。

方案 1: 单独启用三峡水库调蓄千年一遇入库洪水。

方案 2: 启用梯级水库群预先拦蓄, 使得朱沱站流量不超过 $52600 \text{ m}^3/\text{s}$, 再通过三峡水库动库容调蓄洪水。

方案 3: 启用梯级水库群预先拦蓄, 使得朱沱站流量不超过 $52600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在三峡坝前水位达到 171 m 预警水位后, 利用多余防洪库容加大对入库洪水的拦蓄, 使得四库合计 154.94 亿立方米防洪库容全部用尽, 再通过三峡水库动库容调蓄洪水。

方案 4: 启用梯级水库群预先拦蓄, 使得朱沱站流量不超过 $52600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在三峡坝前水位达到 171 m 预警水位后, 利用多余防洪库容加大对入库洪水的拦蓄。试算梯级水库群需要预留的最小拦蓄库容, 使得三峡水库最大下泄流量为 $59000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 经动库容调洪后

坝前水位不超过175 m, 避免启用荆江分蓄洪区。

4 结果

4.1 三峡水库入库洪水生成结果

对三峡入库各站点6000年日径流模拟序列从截口统计参数、不同时段洪量统计参数、洪水过程峰型特征三个方面进行了定量分析检验。结果表明, 所建立各站点分期平稳自回归模型不仅能够保持单日流量的统计特性, 也能很好地体现日流量加和后各时段最大洪量的统计特性, 可以实现对三峡水库入库洪水的随机模拟^[23]。其中, 时段洪量统计参数属于间接参数, 其检验是模型实用性分析的重要组成部分。检验的时段有1, 3, 7, 15和30日五种, 检验参数有时段洪量均值 $\bar{X}$ 、变差系数 C_v 。以朱沱站为例, 不同时段洪量统计参数检验成果见表4, 各时段洪量统计参数中模拟值与实测值相对误差的均值仅为2%, 表明该模型对不同时段洪量模拟效果较好。

以2012年7月的洪水过程对动库容调洪模型进行验证, 结果表明模型计算水位值与测站实测水位值符合较好, 典型断面与测站的水位误差范围在0.02~0.33 m之间, 能够满足动库容调洪计算的要求^[28]。以寸滩站和奉节站为例, 水位的实测值与模拟值见图2。

基于三峡水库千年一遇设计频率下4000场随机入库洪水, 通过三峡水库动库容调洪计算, 以三峡水库所能控制的最大下泄流量为依据挑选出最危险的入库洪水。调洪结果显示, 在对城陵矶地区的补偿控制流量为

表4 朱沱站不同时段洪量统计参数检验成果 (亿立方米)

Table 4 Statistical parameters of flood volume at different periods for the Zhutuo Station (10^8 m^3)

洪量	参数	朱沱		
		实测	模拟	相对误差
1日	$\bar{X}$	28	28.4	1%
	C_v	0.24	0.24	0
3日	$\bar{X}$	76.5	78.1	2%
	C_v	0.23	0.22	4%
7日	$\bar{X}$	160	164.3	3%
	C_v	0.21	0.21	0
15日	$\bar{X}$	308.4	315.9	2%
	C_v	0.2	0.19	5%
30日	$\bar{X}$	554.4	563.1	2%
	C_v	0.18	0.18	0

25000 m^3/s 的调度规则下, 为保证三峡坝前水位最高不超过175 m, 基于1954年实测洪水放大后的千年一遇入库洪水, 三峡水库所能控制的最大流量为72230 m^3/s ; 基于随机模拟生成的4000种洪水放大后的千年一遇入库洪水, 在最危险的情况下三峡水库所能控制的最大下泄流量为81160 m^3/s , 比实测1954年入库洪水中所能控制的最大下泄流量大8930 m^3/s , 两场洪水各站点入库流量及调洪演算后的坝址流量见图3。

4.2 梯级水库群联合防洪计算结果

基于千年一遇设计频率下1954年典型洪水和最危

图2 (网络版彩图)部分测站水位实测值与模拟值。(a) 寸滩站; (b) 奉节站

Figure 2 (Color online) Measured and simulated water level of two typical hydrological stations. (a) Cuntan Station; (b) Fengjie Station.

图 3 (网络版彩图)千年一遇频率下不同入库洪水各站点入库流量及调洪演算后的坝址流量. (a) 朱沱站; (b) 北碚站; (c) 武隆站; (d) 坝址

Figure 3 (Color online) The inflow of each station and the simulation flow of the dam site at the 1000-year frequency. (a) Zhutuo Station; (b) Beibei Station; (c) Wulong Station; (d) dam site.

险入库洪水, 通过三峡及上游梯级水库群拦蓄洪水方案, 分别对不同入库设计洪水进行拦蓄处理. 其中, 千年一遇最危险入库设计洪水中朱沱站在不同防洪方案拦蓄处理后的入库洪水过程见图4(调度规则采用对城陵矶地区 $25000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的补偿控制流量).

根据三峡水库动库容调洪计算流程, 对拦蓄方案1~3下的千年一遇1954年入库洪水和最危险入库洪水进行模拟计算, 得出在不同拦蓄方案和调度规则下, 三峡水库坝前最高水位不超过 175 m 时所能控制的最大下泄流量, 计算结果见表5. 其中, 不同调度规则对城陵矶地区的补偿保护时间见表6.

由表5和6可以看出, 在不同入库洪水和调度规则下, 采用拦蓄方案1时, 三峡水库所能控制的最大下泄流量为 $70160 \sim 81160 \text{ m}^3/\text{s}$; 采用拦蓄方案2时, 三峡水库所能控制的最大下泄流量为 $63760 \sim 70540 \text{ m}^3/\text{s}$; 采用拦蓄方案3时, 三峡水库所能控制的最大下泄流量都

图 4 (网络版彩图)千年一遇最危险入库洪水中朱沱站在不同防洪方案拦蓄后的入库洪水过程

Figure 4 (Color online) Inflow flood at Zhutuo Station under different flood control scheduling schemes for the most dangerous flood with a design frequency of 0.1%.

小于 $55000\text{ m}^3/\text{s}$; 各方案下对城陵矶地区的补偿保护时间为115~205 h. 其中, 方案1和2中的最大下泄流量都大于避免启用下游荆江分蓄洪区所需的安全下泄流量

$59000\text{ m}^3/\text{s}$, 需要采取分洪措施才可以保证荆江地区的防洪安全, 方案3则可以充分保证下游荆江地区防洪安全, 不需要启用荆江分蓄洪区. 因此, 基于方案1和2中三峡水库下泄流量过程和三峡到枝城区间流量过程, 计算各方案下所需的分洪量, 计算结果见表7.

由表7可以看出, 在不同入库洪水和调度规则下, 采用拦蓄方案1时, 荆江地区的分蓄洪量为72.95~102.08亿立方米, 大于荆江地区72.76亿立方米

的蓄洪容积, 难以完全分洪. 采用拦蓄方案2时, 荆江地区的分蓄洪量为27.20~70.00亿立方米, 小于荆江地区72.76亿立方米的蓄洪容积, 可以安全分洪.

方案3可以充分保证下游荆江地区防洪安全, 但容易造成上游梯级水库群防洪库容的过度使用, 增大三峡上游相关区域的防洪风险. 因此, 在方案4中, 试算梯级水库群需要预留的最小拦蓄库容, 使得三峡水库最大下泄流量为 $59000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 经动库容调洪后坝前水位不超过175 m, 计算结果见表8. 在不同入库洪水和调度规则下, 为避免启用荆江分蓄洪区, 三峡上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库群需要预留的最小拦蓄库容为72.11~94.74亿立方米.

表 5 不同拦蓄方案和调度规则下三峡水库所能控制的最大下泄流量 (m^3/s)

Table 5 The maximum discharge that can be controlled by the Three Gorges Reservoir under different flood control scheduling schemes and regulation rules (m^3/s)

拦蓄方案	补偿城陵矶流量-25000		补偿城陵矶流量-35000		补偿城陵矶流量-45000	
	1954洪水	最危险洪水	1954洪水	最危险洪水	1954洪水	最危险洪水
方案1	72230	81160	71410	80580	70160	77970
方案2	66090	70540	65320	70150	63760	68353
方案3	53510	53669	53510	53550	53300	53800

表 6 不同拦蓄方案和调度规则下对城陵矶地区的补偿保护时间 (h)

Table 6 Flood protection time for Chenglingji area under different flood control scheduling schemes and regulation rules (h)

拦蓄方案	补偿城陵矶流量-25000		补偿城陵矶流量-35000		补偿城陵矶流量-45000	
	1954洪水	最危险洪水	1954洪水	最危险洪水	1954洪水	最危险洪水
方案1~3	115	126	152	171	201	205

表 7 不同拦蓄方案和调度规则下荆江地区的分蓄洪量 (亿立方米)

Table 7 Flood diversion and storage volume of Jingjiang area under different flood control scheduling schemes and regulation rules (10^8 m^3)

拦蓄方案	补偿城陵矶流量-25000		补偿城陵矶流量-35000		补偿城陵矶流量-45000	
	1954洪水	最危险洪水	1954洪水	最危险洪水	1954洪水	最危险洪水
方案1	93.93	102.08	85.27	98.83	72.95	83.35
方案2	45.52	70.00	38.23	58.00	27.20	43.62

表 8 梯级水库群需要预留的最小拦蓄库容(亿立方米)

Table 8 Minimum storage capacity to be reserved for cascade reservoirs (10^8 m^3)

拦蓄方案	补偿城陵矶流量-25000		补偿城陵矶流量-35000		补偿城陵矶流量-45000	
	1954洪水	最危险洪水	1954洪水	最危险洪水	1954洪水	最危险洪水
方案4	87.70	94.74	83.60	91.53	72.11	76.02

5 讨论

本文对千年一遇特大洪水条件下三峡水库与上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库群联合调度时的防洪能力进行研究. 结果表明, 当遭遇千年一遇特大洪水时, 不同的拦蓄方案和调度规则下的防洪能力差异显著. 从梯级水库群拦蓄方案方面来讲, 方案2中仅依照现有联合调度规程, 控制朱沱站流量不超过 $52600 \text{ m}^3/\text{s}$ 进行拦蓄, 虽然可以安全分洪, 但上游梯级水库群实际使用的拦蓄库容量仅为 $35.64 \sim 49.17$ 亿立方米, 远小于 154.94 亿立方米的总防洪库容, 容易造成梯级水库群防洪能力的浪费. 且一旦启用荆江分洪区, 不仅受灾人口数量多, 经济损失巨大, 且如何在短时间内迁移安置分洪区内人口, 减少淹没损失也是难题. 因此, 为避免启用荆江分蓄洪区, 经方案4计算, 在不同入库洪水和调度规则下, 三峡上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库群需要预留的最小拦蓄库容为 $72.11 \sim 94.74$ 亿立方米. 此外, 当白鹤滩水库建成运行后, 在联合防洪调度时应考虑进一步降低朱沱站 $52600 \text{ m}^3/\text{s}$ 的入库控制流量, 可以更加充分地使用长江上游梯级水库群的防洪库容, 有效地提升长江中下游地区的防洪安全.

就三峡水库调度规则而言, 对城陵矶地区进行防洪补偿的控制流量分为 $25000, 35000, 45000 \text{ m}^3/\text{s}$ 三种. 随着补偿控制流量的增加, 对城陵矶地区的补偿保护时间增大, 不同方案下最大增加 $79 \sim 86 \text{ h}$; 三峡水库可控制的最大下泄流量减小, 不同方案下最大减少 $2070 \sim 3190 \text{ m}^3/\text{s}$; 荆江地区所需的分蓄洪量减小, 不同方案下最大减少 $18.3 \sim 26.4$ 亿立方米. 对城陵矶地区短时间的防洪安全而言, 三峡水库对城陵矶地区进行防洪补偿的下泄流量越小, 就越容易控制城陵矶地区不超过防洪保证水位 34.4 m . 但从整场洪水过程而言, 在保证城陵矶地区不超过保证水位的前提下, 尽可能加大三峡水库的补偿下泄流量, 为后期预留更多的防洪库容, 不仅有助于从整体上增加对城陵矶地区的补偿保护时间, 更能大幅减少在特大洪水下荆江地区所需的分蓄洪量. 同时, 在实际防洪调度中, 依据城陵矶地区实时的水位情况和三峡水库未来的入库洪水情况, 确定对城陵矶进行防洪补偿的控制流量至关重要.

整体的研究思路及计算模型方面, 与现有成果多

基于坝址洪水随机模型相比, 本文从三峡水库上游入库站点着手, 构建入库洪水随机模型, 并且考虑梯级水库群对三峡入库洪水的多种拦蓄方案. 同时, 基于库区高精度DEM数据, 将传统一维水动力学模型中忽略的支岔槽蓄量纳入调洪计算中, 结合最新的调度规程, 对入库洪水进行准确的动库容调洪模拟. 根据计算结果, 基于千年一遇1954年典型洪水, 若考虑入库洪水形态的影响, 最危险入库洪水经动库容调洪后的最大下泄流量增加 $8930 \text{ m}^3/\text{s}$, 占比 12.4% ; 若不考虑支岔槽蓄量的影响, 最大下泄流量增加 $6390 \text{ m}^3/\text{s}$, 占比 8.9% . 由此可见, 充分考虑入库洪水形态和大型河道型水库支岔槽蓄量的影响, 对三峡水库入库洪水进行随机模拟和动库容调洪计算, 对于探究河道型水库的实际防洪能力是确有必要的. 由于受梯级水库群资料限制, 对上游梯级水库群仅从宏观角度加以考虑, 对梯级水库群内各个水库之间的洪水传播和库容变化缺乏精细化的考量, 后续将就梯级水库群防洪调度的精细化模拟作进一步的研究.

6 结论

本文从入库洪水形态、调洪计算模型、防洪调度规程三个方面, 对千年一遇特大洪水下三峡水库与上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库群联合调度下的防洪能力进行研究. 主要结论如下.

(1) 建立了三峡库区入库洪水随机模型和改进的一维动库容调洪计算模型. 计算结果表明, 基于千年一遇1954年典型洪水, 入库洪水形态和支岔槽蓄量对计算结果的影响分别占比 12.4% 和 8.9% . 因此, 通过洪水随机模拟方法寻求水库在某一设计频率下最危险入库洪水过程, 充分考虑水库中洪水的传播特性进行动库容调洪模拟, 对于探究梯级水库群联合调度下的防洪能力是确有必要的.

(2) 仅三峡水库单独拦蓄千年一遇入库洪水, 所能控制的最大下泄流量为 $70160 \sim 81160 \text{ m}^3/\text{s}$, 荆江地区的分蓄洪量为 $72.95 \sim 102.08$ 亿立方米, 大于荆江地区 72.76 亿立方米的蓄洪容积, 难以保证完全分洪. 为避免启用荆江分蓄洪区造成的巨大经济损失, 在不同入库洪水和调度规则下, 三峡上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库群需要预留的最小拦蓄库容为 $72.11 \sim 94.74$ 亿立方米.

(3) 三峡水库对城陵矶地区进行防洪补偿的控制流量若从 $25000 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $45000 \text{ m}^3/\text{s}$, 对城陵矶地区的补偿保护时间将增加79~86 h; 三峡水库可控制的最大下泄流量将减少2070~3190 m^3/s ; 荆江地区所需的分蓄洪量将减少18.3~26.4亿立方米. 降低三峡水库对

城陵矶地区的补偿下泄流量, 有利于在短时间内提升城陵矶地区的防洪安全, 但会减少在整场洪水中的有效保护时间, 增大特大洪水下荆江地区的分蓄洪量. 因此, 依据实时防洪情况, 确定合理的防洪补偿流量至关重要.

参考文献

- 1 Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Flood and Drought Disaster Bulletin in 2018 (in Chinese). 2019 [中华人民共和国水利部. 2018中国水旱灾害公报. 2019]
- 2 Yangtze River Flood Control and Drought Relief Headquarters. The Joint Dispatching Plan for Reservoir Groups in the Upper and Middle Reaches of the Yangtze River in 2018 (in Chinese). 2018 [长江防汛抗旱总指挥部. 2018年度长江上中游水库群联合调度方案. 2018]
- 3 Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Cascade dispatching rules of Three Gorges Project and Gezhouba Dam (for normal runtime) (Revised in 2019) (in Chinese). 2020 [中华人民共和国水利部. 三峡(正常运行期)—葛洲坝水利枢纽梯级调度规程(2019年修订版). 2020]
- 4 Cai Q H. The flood control and regulation of Three Gorges Project (in Chinese). Eng Sci, 2011, 13: 15–19, 37 [蔡其华. 三峡工程防洪与调度. 中国工程科学, 2011, 13: 15–19, 37]
- 5 Wang B W, Tian F Q, Hu H P. Analysis of the effect of regional lateral inflow on the flood peak of the Three Gorges Reservoir. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 914–923 [王佰伟, 田富强, 胡和平. 三峡区间入流对三峡库区洪峰的影响分析. 中国科学: 技术科学, 2011, 41: 981–991]
- 6 Ouyang S, Zhou J Z, Zhang R, et al. Study on optimal scheduling of multi-objective joint flood control for lower Jinsha River cascade reservoirs and Three Gorges reservoir (in Chinese). J Hydroelectric Eng, 2013, 32: 43–49, 56 [欧阳硕, 周建中, 张睿, 等. 金沙江下游梯级与三峡梯级多目标联合防洪优化调度研究. 水力发电学报, 2013, 32: 43–49, 56]
- 7 Chen J. An approach on flood control strategy in middle and lower reaches of Yangtze River after the completion of the Three Gorges Dam project (in Chinese). Adv Water Sci, 2014, 25: 745–751 [陈进. 三峡水库建成后长江中下游防洪战略思考. 水科学进展, 2014, 25: 745–751]
- 8 Chen L, Lu W W, Zhou J Z, et al. Effect of streamflow forecast uncertainty on reservoir operation (in Chinese). J Hydraul Eng, 2016, 47: 77–84 [陈璐, 卢伟伟, 周建中, 等. 水文预报不确定性对水库防洪调度的影响分析. 水利学报, 2016, 47: 77–84]
- 9 Zhang J, Min Y W, Chen L, et al. Determination of highest water level for flood routing based on dynamic reservoir capacity curves (in Chinese). J China Hydrol, 2016, 36: 63–68 [张俊, 闵要武, 陈力, 等. 基于库容曲线的水库调洪高水位查算方法研究. 水文, 2016, 36: 63–68]
- 10 Zheng S R. The Three Gorges Project and the Yangtze River flood control system (in Chinese). Changjiang News, 2016-07-30(005) [郑守仁. 三峡工程与长江防洪体系. 人民长江报, 2016-07-30(005)]
- 11 Zhang M, Zhou J J, Huang G X. Flood control problems in middle reaches of Yangtze River and countermeasures (in Chinese). Water Res Protection, 2016, 32: 1–10 [张曼, 周建军, 黄国鲜. 长江中游防洪问题与对策. 水资源保护, 2016, 32: 1–10]
- 12 Xu B, Zhong P A, Chen Y T, et al. The multi-objective and joint operation of Xiluodu cascade and Three Gorges cascade reservoirs system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 823–831 [徐斌, 钟平安, 陈宇婷, 等. 金沙江下游梯级与三峡-葛洲坝多目标联合调度研究. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 823–831]
- 13 Hu T, Chen G Q, Wang Y, et al. Joint operation of cascade reservoirs on the mainstream of Yangtze River (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 882–890 [胡挺, 陈国庆, 汪芸, 等. 长江干流梯级水库群联合调度. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 882–890]
- 14 Zhou Y L, Guo S L, Chang F J. Explore an evolutionary recurrent ANFIS for modelling multi-step-ahead flood forecasts. J Hydrol, 2019, 570: 343–355
- 15 Zhang X, Duan K, Dong Q. Comparison of nonstationary models in analyzing bivariate flood frequency at the Three Gorges Dam. J Hydrol, 2019, 579: 124208
- 16 Xiong M. Risk research of flood protection for the Three Gorges Project (in Chinese). Water Resour and Hydropower Eng, 1999, 2: 39–42 [熊明. 三峡水库防洪安全风险研究. 水利水电技术, 1999, 2: 39–42]
- 17 Fang H, Han D, He G, et al. Flood management selections for the Yangtze River midstream after the Three Gorges Project operation. J Hydrol, 2019, 579: 124208

2012, 432-433: 1-11

- 18 Huang K, Ye L, Chen L, et al. Risk analysis of flood control reservoir operation considering multiple uncertainties. *J Hydrol*, 2018, 565: 672-684
- 19 Zhong Z Y, Li W J, An Y G. Study on dynamic reservoir capacity and flood control capacity of Three Gorge Reservoir (in Chinese). *Water Resour Power*, 2010, 28: 36-38 [仲志余, 李文俊, 安有贵. 三峡水库动库容研究及防洪能力分析. *水电能源科学*, 2010, 28: 36-38]
- 20 Zhou J J. Situation of the mid-Yangtze flood after the commencement of the Three Gorges Project and the countermeasures (I) (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2010, 28: 60-68 [周建军. 三峡工程建成后长江中游的防洪形势和解决方案(I). *科技导报*, 2010, 28: 60-68]
- 21 Li A Q, Zhang J Y, Zhong Z Y, et al. Study on joint flood control operation for leading reservoirs in the upper Changjiang River (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2013, 44: 59-66 [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. *水利学报*, 2013, 44: 59-66]
- 22 Dun X H, Zhou J Z, Zhang Y C, et al. Real-time flood control risk estimation of reservoir and analysis on the interoperability of storage capacity of multi-reservoir regulation (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2019, 50: 209-217, 224 [顿晓晗, 周建中, 张勇传, 等. 水库实时防洪风险计算及库群防洪库容分配互用性分析. *水利学报*, 2019, 50: 209-217, 224]
- 23 Jing Z, An W J, Zhang S H, et al. Flood control ability of river-type reservoirs using stochastic flood simulation and dynamic capacity flood regulation. *J Clean Prod*, 2020, 257: 120809
- 24 Wang W S, Ding J, Deng Y R. Study on stochastic model for simulation of daily flow time series (in Chinese). *J Sichuan Union Univ*, 1997, 4: 43-50 [王文圣, 丁晶, 邓育仁. 日流量过程随机模拟模型的探讨. *四川联合大学学报(工程科学版)*, 1997, 4: 43-50]
- 25 Chen S L, You Z Q, Ji C M. Research on the flood-regulation method of reservoir backwater storage (in Chinese). *Water Resour Power*, 1999, 17: 27-30 [陈森林, 游中琼, 纪昌明. 水库动库容调洪方法研究. *水电能源科学*, 1999, 17: 27-30]
- 26 Zhang S, Jing Z, Yi Y, et al. The dynamic capacity calculation method and the flood control ability of the Three Gorges Reservoir. *J Hydrol*, 2017, 555: 361-370
- 27 Zhang S H, Jing Z, Li W D, et al. Study of the flood control scheduling scheme for the Three Gorges Reservoir in a catastrophic flood. *Hydrol Processes*, 2018, 32: 1625-1634
- 28 Ai X S, Chen S L, An Y G, et al. Dynamic capacity calculation of reservoir research (in Chinese). *Yangtze River*, 2002, 33: 43-44 [艾学山, 陈森林, 安有贵, 等. 水库动库容调洪计算方法研究. *人民长江*, 2002, 33: 43-44]

Flood-control ability of the Three Gorges Reservoir and upstream cascade reservoirs during catastrophic flooding

ZHANG ShangHong¹, JING Zhu¹, AN WenJie¹, ZHANG RongQi¹ & YI YuJun²

¹ School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

² School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

A large number of artificial cascade reservoirs upstream of the Three Gorges Reservoir (TGR) have significantly changed the actual flow conditions of the TGR from the original/design baseline, which has negatively affected flood management in the downstream Jingjiang area. In this study, a stochastic model of inflow floods and a dynamic capacity-based river regulation model for the TGR are established. Based on the TGR's flood-control compensation rules for the Chenglingji area, the flood-control risk in the Jingjiang area under the joint operation of the TGR and the upstream Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba cascade reservoirs is fully assessed in terms of inflow-flood type, flood propagation model, and flood regulation rules. The results show that, with respect to relying on the TGR alone to intercept a 1000-year flood, the maximum discharge within a safety control margin is 70160–81160 m³/s, and the flood diversion capacity of the Jingjiang area is 7.295–10.208 billion m³, which exceeds the threshold of the effective flood diversion capacity of 7.276 billion m³ specified for the Jingjiang area. Obviously, it is difficult to ensure general safety with the current flood diversion program with respect to large and unprecedented flood events. To avoid this, the upstream Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba cascade reservoirs must have a collective minimum storage capacity of 7.211–9.474 billion m³ under the conditions of different inflow-flood forms and the flood-control compensation rules of the Chenglingji area. This study can be used as a scientific reference for the joint flood-control operation of cascade reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River.

Three Gorges Reservoir, cascade reservoirs, catastrophic flood, stochastic flood simulation, dynamic capacity flood regulation

doi: [10.1360/SST-2020-0479](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0479)