

文章编号:0559-9350(2019)11-1318-08

## 基于库容风险频率曲线的水库群联合防洪调度研究

周建中<sup>1</sup>, 顿晓晗<sup>1,2</sup>, 张勇传<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430014)

**摘要:** 水库实时防洪调度决策是一类多目标、多阶段、多约束的复杂决策问题, 风险分析是实时防洪决策的重要环节和依据, 本文提出一种基于防洪库容风险频率曲线的梯级水库群防洪风险共担理论及水库风险-调度-决策理论体系, 并结合溪洛渡、向家坝、三峡水库实际情况, 运用自主研发的梯级水库群联合防洪调度风险分析模型, 分析梯级水库群在汛期不同时间段的防洪风险, 并将风险率引入实时防洪调度决策, 以为水库群防洪调度提供决策依据, 提高联合防洪调度系统综合利用效益。研究表明, 实时调度过程中考虑风险率因素能够在保证防洪安全的同时有效提高水库群综合效益, 风险-调度-决策理论能够为水库群调度方案优选提供依据。

**关键词:** 联合防洪调度; 库容频率曲线; 风险分析; 决策优选

**中图分类号:** TV697.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20190457

## 1 研究背景

随着流域大型控制性水库相继建成投运, 流域大规模联合防洪调度格局已初步形成, 研究联合调度系统汛期运用方式对于水库群安全运行及综合利用具有重要意义, 而水库群调度需考虑气象水文、洪水遭遇、水库运行等多种因素的影响, 并涉及到上下游之间和多功能之间的利害冲突, 是一个复杂的决策优化问题, 因此, 梯级联合防洪调度规则的制定及实时防洪调度决策理论成为研究重点。

1980年代开始, 防洪系统调度研究从系统分析理论方法研究<sup>[1-3]</sup>, 已扩展到防洪调度决策支持系统研究, 并已成为当前防洪减灾领域研究的热点。丁毅等<sup>[4]</sup>拟定了长江上游干支流水库规划防洪库容的原则与运用方式, 并提出了梯级水库协调防洪与发电关系调度方式, 提出了上游各支流预留防洪库容方案; 陈桂亚<sup>[5]</sup>对长江上游干流沿江重要城市河段进行了防洪计算分析, 提出了相应的防洪标准和调度方式, 同时提出了提高上游支流防洪标准应采取的调洪措施, 以及配合三峡水库实施中下游防洪补偿的调度方式; 李安强等<sup>[6]</sup>基于大系统分解协调原理, 通过逐次分解各防洪区域对溪洛渡、向家坝两库预留防洪库容的要求, 在结合区域间洪水遭遇关联性分析的基础上, 提出了两库防洪库容在协调川江与长江中下游两区域防洪中的分配方案; 邹强等<sup>[7]</sup>根据武汉地区防洪规划和防洪形势, 探明了武汉地区防洪控制需求, 研究了上游水库群配合三峡水库对长江中下游联合防洪调度的方式; 张睿等<sup>[8]</sup>探讨了川渝河段及长江中下游重点区域防洪对溪洛渡、向家坝梯级水库防洪库容的预留要求, 确定了防洪库容分配方案, 提出了科学、合理、可行的金沙江溪洛渡、向家坝梯级配合三峡水库联合防洪的调度方式; 顿晓晗等<sup>[9]</sup>提出了一种基于库容频率曲线评估水库实时防洪风险的方法, 并表明了其对水库运行的指导意义。

由于水库调度中存在多种水文、水力、人为决策等不确定性因素, 导致防洪调度系统存在不同程度的防洪风险, 因此有必要对当前的运行方案、自动决策方案以及即将要执行方案的风险情况进行

收稿日期: 2019-06-26; 网络首发时间: 2019-11-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20191126.1634.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91547208); 国家自然科学基金雅砻江联合研究基金重点项目(U1865202)

作者简介: 周建中(1959-), 教授、博士生导师, 主要从事水电能源及其复杂系统分析研究。E-mail: jz.zhou@hust.edu.cn

行分析，以便掌握当前水库运行的状态，钟平安<sup>[10]</sup>建立了流域实时防洪调度风险因子集，提出了水库与下游河道的风险分析方法，并根据“实时”调度的“动态”性提出了预报精度分类控制、水库水位分级控制和汛限水位动态控制等水库实时防洪调度风险控制技术；王丽萍等<sup>[11]</sup>构建了梯级水库群联合防洪调度风险估计模型，给出了基于模拟最大熵理论的求解方法；张验科<sup>[12]</sup>建立了综合利用水库调度风险分析的基本理论与方法体系，从风险与效益的协调优化、库群联合调度和防洪与兴利协调机制等不同角度，深入探讨了综合利用水库调度风险管理问题。

以上调度决策研究主要考虑了洪水组成或水文气象因素，风险分析研究偏向于风险率估计及调度方案的评价优选，其风险率未支持库群实时防洪调度决策。同时，作者前期成果<sup>[9]</sup>中提出了一种基于防洪库容风险频率曲线的防洪风险分析方法，表明各个水库不同时刻不同水位对应的风险率均有差异，本文基于此，建立溪洛渡、向家坝与三峡水库联合防洪调度风险分析模型，在现有水库防洪调度及风险分析理论研究的基础上，提出一种基于防洪库容频率曲线的梯级水库防洪风险共担理论及水库风险-调度-决策理论体系，分析联合调度系统中不同水库不同时期防洪风险，并将风险率引入实时防洪调度决策，以期水库防洪调度提供决策依据，提高联合防洪调度系统综合利用效益。

## 2 工程概况

长江是我国第一大河流，水能资源丰富，是中国水资源配置的战略水源地、水电开发的主要基地，金沙江下游梯级规划有乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝4座控制性水库，随着溪洛渡、向家坝和三峡水库的建成投运，长江中下游防洪能力有了较大的提高，但由于长江洪水组成复杂，同时运用流域防洪体系中的水库、堤防等共同抵御洪水灾害。

川江河段及长江中下游平原地区是重点防护对象，一旦发生洪水灾害，对宜宾、泸州、重庆等城市危害极大，溪洛渡-向家坝梯级水库与川江河段邻近，且规划设计时防洪库容较大，是长江防洪系统中的重要工程，肩负着川江(自宜宾至宜昌)沿岸宜宾、泸州、重庆等重要城市和配合三峡水库对长江中下游防洪调度的多重防洪任务，是长江流域防洪体系的重要组成部分，增强了三峡水库对长江中下游的防洪能力，在一定程度上缓解了长江中下游的防洪压力。溪洛渡、向家坝、三峡水库工程特性见表1，地理位置见图1。

表1 溪洛渡、向家坝、三峡水库工程特性参数

枢纽名称	正常蓄水位/m	汛限水位/m	防洪库容/亿 m <sup>3</sup>	调节库容/亿 m <sup>3</sup>	装机容量/MW
溪洛渡	600	560	46.5	64.6	13860
向家坝	380	370	9.03	9.03	6400
三峡	175	145	221.5	165	22400

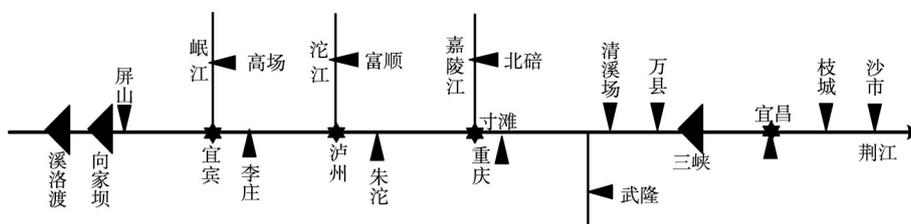


图1 溪洛渡、向家坝、三峡水库地理位置示意图

从大的区域上来讲，川江河段防洪主要是通过溪洛渡、向家坝梯级水库拦洪削峰，长江中下游主要是拦蓄洪量。但根据防洪调度原则“水库所在河流有防洪要求时，应首先满足所在河流的防洪要求”，因此，本文中溪洛渡、向家坝水库主要防洪对象为宜宾、泸州、重庆，同时配合三峡对长江中下游防洪调度。

(1) 宜宾市洪水主要来自金沙江、岷江，宜宾城区地处两江洪水组合地带，洪水的不利组合给宜

宾市带来巨大的洪灾损失，据历史洪灾资料统计，岷江洪水占83%，金沙江洪水占50%，其中，岷江与金沙江洪水同时遭遇次数占33%，即造成洪灾次数最多的是岷江洪水。本文中确保宜宾防洪安全，控制防洪控制站李庄洪峰流量在 $51\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下。

(2)泸州长、沱江河段汛期洪水峰高量大且持续时间长，淹没时间可达1周之多。由于上游地处著名的大暴雨区，洪水具有峰高量大、洪峰持续时间长、洪枯水位变幅大的特点。两江汇合口处及以下的区段以长江干流朱沱站为防洪控制点，本文控制朱沱洪峰值不超过 $52\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

(3)重庆主城区由于被长江、嘉陵江分割为多个区域，洪水组成复杂，洪涝灾害频繁，洪灾损失很大。本文控制寸滩洪峰值不超过 $83\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

(4)通过溪洛渡、向家坝拦蓄洪水能够直接削减三峡入库，综合长江中上游梯级水库地理位置、控制面积、洪水组成及防洪库容多方面分析，认为溪洛渡、向家坝梯级对三峡水库入库洪水具有持续、稳定的削减作用，可使下游三峡水库水文情势发生较大变化，对三峡水库运行方式产生重要的影响。因此，认为溪洛渡、向家坝在配合三峡调度时有不可替代的重要作用。

三峡工程设计防洪调度方式为对荆江防洪调度，荆江河段是长江防洪形势最严峻的河段，其防洪控制点为沙市站，三峡水库建成后可确保荆江河段达到百年一遇防洪标准，在遭遇千年以下洪水时，在分洪区与其他蓄滞洪区配合下，可确保避免发生溃堤等毁灭性的灾害。因此，本文仍采用前期成果，即先按照规划堤防标准即在遭遇百年一遇洪水时，三峡水库按沙市站水位不高于 $44.5\ \text{m}$ 进行控泄，最高调洪水位不得超过 $171\ \text{m}$ ，水库水位 $171\sim 175\ \text{m}$ 时控制补偿枝城站不超过 $80\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，配合分蓄洪措施控制沙市水位不高于 $45\ \text{m}$ 。

### 3 溪洛渡、向家坝与三峡水库联合防洪风险共担分析

为获得梯级水库群联合防洪调度系统实时防洪风险情况，基于前期成果<sup>[9]</sup>建立溪洛渡、向家坝与三峡水库群联合防洪调度风险分析模型，为水库群实时防洪调度决策提供指导，以实现梯级水库群风险共担、效益共享。

**3.1 梯级水库群防洪风险分析** 设6月1日—9月30日为汛期，联合调度过程中，上游溪洛渡、向家坝水库考虑下游李庄、朱沱、寸滩安全流量及三峡水库流量控制下泄，三峡水库考虑荆江河段防洪需求控制下泄，其最大下泄不超过 $55\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，按照先上游再下游的拦蓄原则，建立联合防洪调度体系。将梯级1954—2010年57年同期历史径流资料代入模型调洪演算，将溪洛渡、向家坝聚合成一个等效水库，得到上游梯级及三峡水库逐年所需拦蓄洪量数据，通过排频计算，可得到该调度期的防洪库容风险频率曲线从而进行防洪调度风险分析计算。其具体计算步骤如下：(1)按照文献[6]所述水库拦蓄方式建立联合防洪调度模型。(2)将梯级1954—2010年57年同期历史径流资料代入模型调

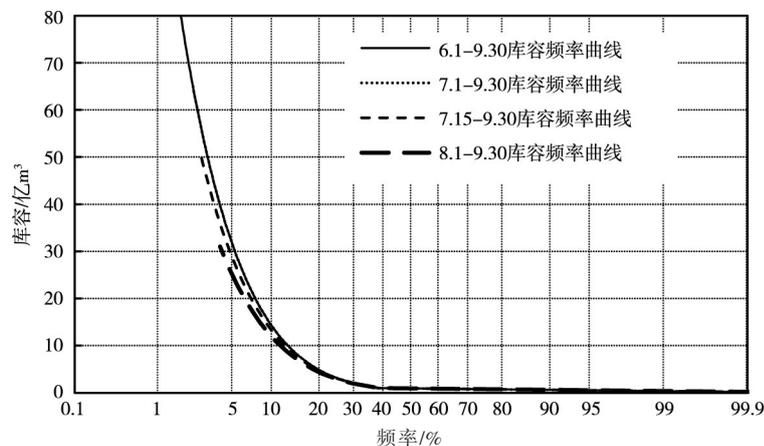


图2 溪洛渡、向家坝4个时段库容频率曲线

洪演算，得到溪洛渡、向家坝梯级及三峡水库各年各时段拦蓄洪量  $V_{i,j}^{xx}$ ， $V_{i,j}^{sx}$ ， $i=1, 2, \dots, 57$ ， $j=1, 2, \dots, 122$ 。(3)将每个时段中拦蓄洪量系列从大到小排序并计算经验频率，进而拟合频率曲线。

其中溪洛渡、向家坝梯级4个时段拟合曲线如图2。由图2可见，随着调度时段逐渐缩短，其防洪库容频率曲线逐渐下移，但由于洪水大多发生在7—8月，因此6月1日—9月30日曲线与7月1日—9月30日曲线基本重合。

考虑57年实测系列中并未发生特大洪水，多为一般水平年，联合调度时经上游削峰调度，三峡水库入库洪峰较小，按  $55\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  调度时其拦蓄洪量较小，拟合频率曲线较为困难，因此拦蓄时拟定三峡水库固定泄量为  $43\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $46\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $49\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  和  $52\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  共4种方案，以提高三峡水库拦蓄洪量，分别拟合各个方案频率曲线，通过分析其变化规律插补出固定泄量为  $55\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  时三峡水库所需防洪库容。其各个方案拟合曲线如图3。

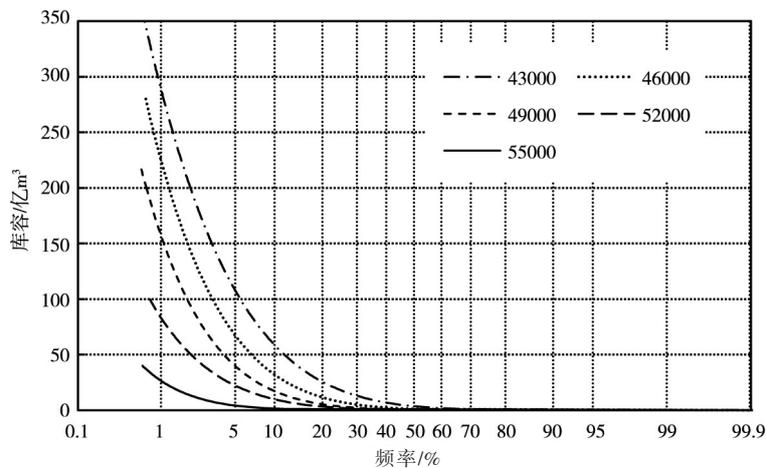


图3 三峡水库不同方案6.1—9.30库容频率曲线

具体推求方法为：假设规定的风险率为0.01，则根据各个时段(即6.1—9.30、6.2—9.30等时段)频率曲线可得4个方案所需防洪库容分别为  $V_t^{43000}$ 、 $V_t^{46000}$ 、 $V_t^{49000}$ 、 $V_t^{52000}$ ， $t=1, 2, \dots, 122$ ，通过拟合防洪库容-流量函数，并代入  $55\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，可得其对应的防洪库容。

**3.2 梯级水库群防洪调度风险共担** 现阶段水库群防洪调度技术研究正在由“方法导向”向“问题导向”转移，对成果的可操作性与实用性的要求越来越高。在水库实时防洪调度过程中，如何做出科学合理的调度决策是一个复杂的决策优化问题，以往对于水库面临时刻  $T$ ，决策时往往考虑的因素有水库当前水位  $L_T$ 、下游水库当前水位  $L_{d,T}$ 、水库当前来入库流量  $Q_T$ 、下游预报流量  $Q_{d,T+t}$ ，及最高最低水位约束、泄流能力约束、水量平衡约束等，可得水库  $T$  面临时刻下泄流量  $q_T = f(L_{d,T}, Q_T, Q_{d,T+t})$ ，此过程并未考虑实时防洪风险率约束。风险分析结果表明，各个水库不同时段、不同水位对应的风险率均有差异，在实时调度决策过程中，需结合实时风险形势，发电效益等因素，进一步辅助决策，实现水库综合效益最大的目标，即  $q_T = f(L_{d,T}, Q_T, Q_{d,T+t}, p_{u,T}, p_{d,T})$ ，实现防洪调度风险均衡。若上下游水库规定的设计标准风险率为  $P_{u,s}$ 、 $P_{d,s}$ ，某一时刻上游水库实时防洪风险率为  $p_{u,T}$ ，下游水库实时防洪风险率为  $p_{d,T}$ ，且  $p_{u,T} > P_{u,s}$ 、 $p_{d,T} < P_{d,s}$ ，则上游水库决策时应加大下泄，以降低防洪风险，下游水库可加大拦蓄，维持防洪风险不高于  $P_{d,s}$ ；反之若  $p_{u,T} < P_{u,s}$ 、 $p_{d,T} > P_{d,s}$ ，则上游水库可加大拦蓄，减小下泄，下游水库可加大下泄以降低风险率，实现防洪调度风险共担，效益共享。

#### 4 水库防洪风险-调度-决策理论体系

结合上文梯级水库防洪风险共担分析，提出了水库防洪风险-调度-决策理论体系，即首先通过

控制风险确定水库防洪调度的边界条件，并基于此开展水库实时防洪调度，最后对调度方案进行决策优选，为提高水库综合效益提供参考。体系结构如图4。

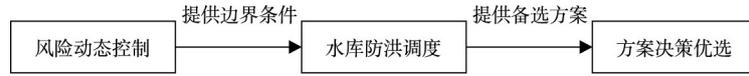


图4 水库防洪风险-调度-决策理论体系

**4.1 风险控制** 前述研究成果表明根据所得防洪库容频率曲线可推求水库在给定的防洪风险率下对应所需预留防洪库容，且同一防洪风险率下对应的防洪库容存在逐渐减少的趋势。对于某一特定水库，若其防洪库容频率曲线描述为  $v_t = f_t(p)$ ，其中  $p$  为风险率， $f_t$  为汛期  $t$  时刻防洪库容频率曲线， $v_t$  为控制风险率为  $P$  时  $t$  时刻水库需预留的防洪库容下限。则据此可求出水库整个汛期内所需预留的防洪库容下限  $v_t$ ， $t = 1, 2, \dots, 122$ ，利用水位库容关系可将其转化为水位约束，则  $t$  时刻水库需控制水库水位上限为  $L_t = f_{lc}(f_{lc}(L_{防}) - v_t)$ ，其中  $L_{防}$  为水库对应设计标准的防洪高水位， $f_{lc}$  为水库水位库容关系，根据各时段水位上限可实时调整水库运行方式以实现防洪调度风险动态控制。

针对溪洛渡、向家坝、三峡联合防洪调度系统，分别计算上游等效水库及下游三峡水库防洪库容频率曲线，并根据不同的风险率计算各时段水位上限，进而开展防洪调度方案研究。其中，等效水库按 0.02、0.03 和 0.04 三个风险率控制，三峡水库按 0.01、0.008 和 0.005 三个风险率控制，以寻求最优运行方式，其中等效水库与三峡水库各时段预留防洪库容下限如图 5、图 6，随着控制风险率逐渐升高，水库所需预留防洪库容逐渐减小。由于洪水大多发生于 7—8 月，因此水库前期需长期保留较大库容，而 8 月之后频率曲线精度下降，可拟合点数逐渐减少，因此 8 月之后预留防洪库容下限与 7 月末保持一致。实际运行中，当水库运行至时刻  $t$  时，其防洪调度决策需考虑气象水文预报、水库风险、生态、航运等多种因素，后续时段水库所需预留防洪库容需综合考虑后确定。

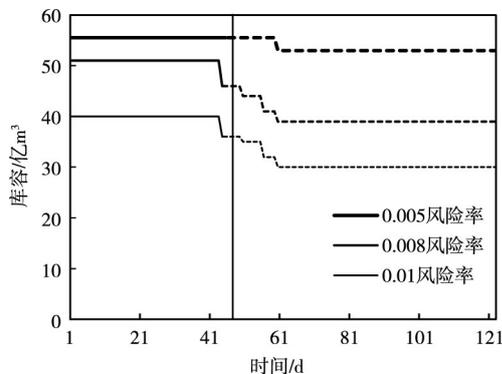


图5 等效水库预留防洪库容下限

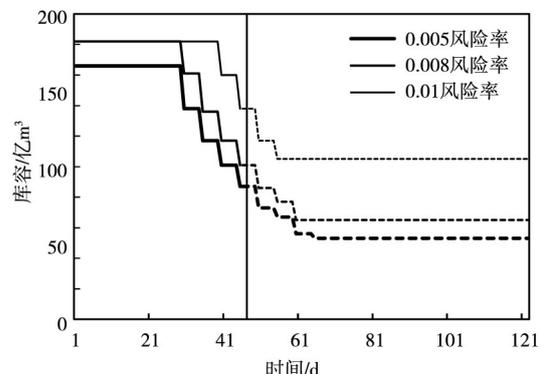


图6 三峡水库预留防洪库容下限

**4.2 联合防洪调度效益分析** 将上述计算结果转换为水位约束，并选取上下游不同的风险率组合共 9 个方案进行调洪演算，以 1954 年实测典型洪水过程放大至百年一遇以检验调度方案优劣，各个方案计算结果如表 2。总体来看，控制三峡水库风险率不变时，随着等效水库风险率升高，三峡最高调

表2 各方案计算结果

指标	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七	方案八	方案九
等效水库风险率	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
三峡水库风险率	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01
溪洛渡最高调洪水位/m	600	600	600	600	600	600	600	600	600
向家坝最大下泄/(m³/s)	25000	25000	25000	22738	22738	22738	22738	22738	22738
向家坝最高调洪水位/m	380	380	380	380	380	380	380	380	380
向家坝最大下泄/(m³/s)	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000
三峡最高调洪水位/m	159.39	164.69	166.08	160.58	165.72	167.07	161.80	166.79	168.09
梯级总发电量/(亿 kW·h)	1043.51	1052.81	1058.20	1043.89	1053.47	1058.96	1046.12	1055.70	1061.19

洪水位呈现上升趋势，同时梯级总发电量提升，反之亦然，但总体来说各水库均未超过防洪高水位，防洪控制点流量未超过安全流量。因此水库群防洪风险与发电效益呈现相反趋势，需根据实际情况选择较优方案。

**4.3 调度方案决策优选** 梯级水库防洪调度过程中不仅要统筹考虑水库上下游的防洪矛盾，还要统筹考虑防洪与兴利的矛盾，是一个典型的多目标、多属性、多阶段、多约束、非线性的复杂决策问题<sup>[13]</sup>。由于各调度目标相互矛盾、不可公度，使调度方案决策优选的科学性、客观性和实时性成为防洪调度问题研究的难点<sup>[14]</sup>。水库防洪调度方案间隐藏的相互关系及各指标间相互作用的耦合关系使调度方案具有关联性，因此，本文引入基于加权广义马氏距离的TOPSIS方法<sup>[15]</sup>实现调度方案集的决策优选，选取属性指标为等效水库风险率、三峡水库风险率、向家坝最大下泄、三峡最高调洪水位及梯级总发电量，其中梯级总发电量为效益型指标，其余为成本型指标，其方案决策优选步骤如下：(1)采用标准0-1变换法<sup>[16]</sup>对方案集进行标准化处理，变换后每个属性的最优值为1，且最差值为0，得到相对隶属度矩阵；(2)向量规范化，变换后同一属性下的各方案数值的平方和为1，方便用于计算各方案与理想解的距离；(3)综合考虑各个指标重要性，其中防洪为主要目标，发电为次要目标，确定各属性指标的主观权重为： $\omega' = 0.2, 0.2, 0.25, 0.3, 0.05$ 。计算得属性指标客观熵权为： $\omega'' = 0.18, 0.17, 0.43, 0.09, 0.13$ 。将主客观权重进行合并，得组合权重为： $\omega = 0.17, 0.16, 0.51, 0.13, 0.03$ ；(4)确定正理想解和负理想解，并计算各备选方案至正、负理想解的加权广义马氏距离；(5)计算各备选方案相对于理想解的贴近度，并根据贴近度对方案排序，确定最佳方案，结果如表3。

表3 联合防洪调度方案贴近度评价结果

	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七	方案八	方案九
贴近度	0.6483	0.4671	0.3604	0.6748	0.4995	0.3947	0.6295	0.4560	0.3517
排序结果	2	5	8	1	4	7	3	6	9

从表4可看出，方案四为最优方案，基本按照三峡水库防洪风险率排序，其中上游水库风险率不变的条件下三峡水库风险率为0.005时对应方案均较风险率为0.008、0.01时更优。最优方案对应的等效水库风险率并不是最低，三峡水库风险率最低，三峡水库最高调洪水位接近最低，梯级总发电量略大于方案一。这是由于设置主观权重时以防洪为主要目标，发电为次要目标，其中三峡水库最高调洪水位主观权重设置为0.3，梯级总发电量主观权重设置为0.05。说明防洪风险率是方案决策的重要影响因素，可为实时防洪调度提供参考。方案四调度过程中，考虑等效水库及三峡水库风险率约束，上游水库超出控制水位后及时加大下泄，同时三峡水库加大拦蓄，体现了梯级水库防洪调度风险共担。

进一步采用多个典型年检验方案四调度规则可靠性，1968、1969、1980、1983、1988、1996和1998年计算结果如表4，各水库均未超过防洪高水位，保证了防洪安全性，因此，方案四可为水库实时防洪调度提供参考。

表4 各方案计算结果

指标	1968年	1969年	1980年	1983年	1988年	1996年	1998年
溪洛渡最高调洪水位/m	578.29	581.27	600	595.52	597.79	567.29	600
向家坝最大下泄/(m <sup>3</sup> /s)	24974	23566	25000	17508	20764	22472	27250
向家坝最高调洪水位/m	380	380	380	380	380	380	380
向家坝最大下泄/(m <sup>3</sup> /s)	55000	55000	55000	55000	55000	49725	55000
三峡最高调洪水位/m	161.57	158.91	165.92	163.82	158.56	158.06	166.24
梯级总发电量/(亿kW·h)	1098.80	1034.68	1096.95	1106.17	1041.20	1030.30	1041.55

## 5 结论

本文在现有水库群防洪调度及风险分析理论研究的基础上,提出了一种基于防洪库容风险频率曲线的梯级水库群防洪风险共担理论及水库风险-调度-决策理论体系,根据梯级水库群防洪形势及各水库当前风险情况,决策者可实时调整水库运行状态。以溪洛渡、向家坝、三峡水库梯级联合防洪调度系统为例,建立了联合防洪调度风险分析模型,分析了梯级水库群在汛期不同时间段的实时防洪风险;并据此提出了梯级水库群防洪风险共担理论;最后将风险率引入实时防洪调度决策,提出了实时调度中考虑风险率的决策方法,形成了水库风险-调度-决策理论体系,结果表明,实时调度过程中考虑风险率因素能够有效在保证防洪安全的同时有效提高水库群综合效益,风险-调度-决策理论能够为水库调度方案优选提供依据,结果对于水库群实时防洪调度决策及提高水库综合效益具有重要的现实意义。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] WINDSOR J S . A programming model for the design of multireservoir flood control systems[J] . Water Resources Research, 1975, 11(1): 30-36 .
- [ 2 ] 付湘,纪昌明.防洪系统最优调度模型及应用[J].水利学报,1998(5): 49-53 .
- [ 3 ] 梅亚东.梯级水库防洪优化调度的动态规划模型及解法[J].武汉水利电力大学学报,1999(5): 10-12 .
- [ 4 ] 丁毅,纪国强.长江上游干支流水库防洪库容设置研究[J].人民长江,2006, 37(9): 50-52 .
- [ 5 ] 陈桂亚.长江上游控制性水库群联合调度初步研究[J].人民长江,2013, 44(23): 1-6 .
- [ 6 ] 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 .
- [ 7 ] 邹强,胡向阳,张利升,等.长江上游水库群联合调度对武汉地区的防洪作用[J].人民长江,2018,49(13): 19-25 .
- [ 8 ] 张睿,李安强,丁毅.金沙江梯级与三峡水库联合防洪调度研究[J].人民长江,2018, 49(13): 26-30 .
- [ 9 ] 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[J].水利学报,2019, 50(2): 209-217 .
- [ 10 ] 钟平安.流域实时防洪调度关键技术研究与应用[D].南京:河海大学,2006 .
- [ 11 ] 王丽萍,黄海涛,张验科,等.梯级水库群联合防洪调度风险估计模型[J].中国农村水利水电,2014(1): 69-72 .
- [ 12 ] 张验科.综合利用水库调度风险分析理论与方法研究[D].北京:华北电力大学,2012 .
- [ 13 ] 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[J].水力发电学报,2013, 32(6): 43-49 .
- [ 14 ] 李英海,周建中.基于改进熵权和Vague集的多目标防洪调度决策方法[J].水电能源科学,2010, 28(6): 38-41 .
- [ 15 ] 关宏艳,李宗坤,葛巍,等.基于加权广义马氏距离的TOPSIS方法在水库防洪调度决策中的应用[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016, 49(12): 56-61 .
- [ 16 ] 周惠成,张改红,王国利.基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用[J].水利学报,2007, 38(1): 100-106 .

## Study on joint flood control dispatching of reservoir groups based on reservoir capacity risk frequency curve

ZHOU Jianzhong<sup>1</sup>, DUN Xiaohan<sup>1, 2</sup>, ZHANG Yongchuan<sup>1</sup>

(1. School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Real-time flood control operation decision-making of reservoirs is a complex decision-making problem with multi-objective, multi-stage and multi-constraints. Risk analysis is an important link and basis for real-time flood control decision-making. This paper presents a theory system of risk-sharing and reservoir risk-dispatching-decision-making for cascade reservoirs based on the frequency curve of flood control reservoir capacity. Combining with the actual situation of Xiluodu, Xiangjiaba and Three Gorges Reservoirs, the flood control risk of cascade reservoirs in different periods of flood season is analyzed by using self-developed risk analysis model of joint flood control operation of cascade reservoirs, and the risk rate is introduced into real-time flood control operation decision-making, in order to provide decision-making basis for flood control operation of reservoirs and improve the comprehensive utilization benefit of joint flood control operation system. The results show that considering risk factor in real-time dispatching can effectively improve the comprehensive benefits of reservoirs while ensuring flood control safety. The risk-dispatching-decision theory can provide basis for the optimization of reservoir dispatching schemes.

**Keywords:** joint flood control dispatching; reservoir capacity frequency curve; risk analysis; decision-making optimization

(责任编辑: 王成丽)

---

(上接第 1317 页)

## Preliminary exploration of design flood and control water level of Three Gorges Reservoir in operation period

GUO Shenglian, XIONG Feng, WANG Jun, ZHONG Yixuan, TIAN Jing, YIN Jiabo

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Considering the impact of joint operation of reservoir group in the upper Yangtze River basin on Three Gorges Reservoir (TGR), the most likely regional composition and typical-year methods were adopted to derive the flood regional composition for each control hydrological station. The multi-inputs single-output (MISO) model was used to simulate the flood process between Xiangjiaba and TGR uncontrolled inter-basin. The design floods as well as the flood control water level of TGR during operation period are derived and analyzed. It is shown that: (1) the design floods of downstream reservoirs are significantly influenced by the operation of upstream reservoirs, particularly the cascade reservoirs in Jinsha River; (2) The 1000-year design peak discharge, 3d, 7d, 15d and 30d flood volumes of TGR are 81136m<sup>3</sup>/s, 18.8, 38.6, 72.7, 132.1 billion m<sup>3</sup>, decreasing by 18.2%, 23.8%, 20.6%, 20.2% and 16.9%, respectively; (3) the flood control (limited) water levels of TGR are 155(145) m without reducing the original flood prevention standards. The high flood control water level during TGR operation period can not only benefit navigation in the reservoir, sustain reservoir bank stability, and protect eco-environment of reservoir riparian zone, but also can increase hydropower generation, reduce the impact on downstream Dongting and Poyang Lakes during reservoir refill operation period, which has great social-economic and eco-environment benefits.

**Keywords:** three gorges reservoir; operation period; design flood; most likely regional composition; flood limited water level, flood control water level

(责任编辑: 王成丽)