

文章编号:1672-3031(2021)06-0550-07

# 大清河流域水利工程联合防洪调度研究

张忠波<sup>1</sup>, 张双虎<sup>1</sup>, 耿思敏<sup>2</sup>, 何晓燕<sup>1</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 田雨<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部发展研究中心, 北京 100038)

**摘要:** 白洋淀是大清河流域重要枢纽工程, 基于雄安新区建设对大清河流域防洪提出更高的要求, 大清河流域水利工程联合防洪调度研究显得尤为重要。本文以白洋淀最高水位最小作为联合防洪调度目标, 建立联合防洪调度模型并进行求解。在保证水库工程安全的前提下, 进行了不同洪水条件下的联合防洪调度研究, 通过优化调度, 可保证在遭遇百年一遇洪水不开启文安洼蓄滞洪区; 在一定程度上降低了白洋淀最高水位, 可有效减轻了堤防和白洋淀防洪压力, 为保障雄安新区防洪安全提供支撑。

**关键词:** 大清河流域; 防洪工程体系; 白洋淀; 联合防洪调度

**中图分类号:** TV697.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200136

## 1 研究背景

大清河是海河流域较大的河系, 源于太行山东麓, 东淀以上分为南、北两支。白洋淀上游主要是大清河山区, 其中大清河山区建有横山岭、口头、王快、西大洋、龙门和安格庄等6座大型水库, 除安格庄水库位于大清河北支, 其余5座水库均位于南支白洋淀上游。本文研究重点为水库较多的大清河南支。大清河南支为赵王河水系, 由潞龙河(其支流为磁河、沙河等)、唐河、清水河、府河、瀑河、萍河等组成, 各河均汇入白洋淀。

大清河流域防洪调度直接关系到北京市、天津市以及河北省安全问题。特别是在雄安新区建设过程中, 对海河流域特别是大清河流域防洪要求提出新的要求, 相对于防洪工程设计阶段, 其调度方式与调度条件已经发生了很大变化, 提出完善的防洪策略对流域防洪安全至关重要。大清河流域中水库工程设计规划阶段制定的单一水库调度规则很难满足当前形势变化后的防洪需求, 需要进一步完善与优化调度规则和调度方式<sup>[1]</sup>, 水库群与白洋淀形成了防洪工程体系<sup>[2]</sup>。在汛期大洪水来临之时, 流域中各个防洪工程相互联系, 包括水力联系与水文联系。为提高流域整体防洪能力, 仅调节或优化单个防洪工程调度方式, 难以找到一个防洪工程体系最优的运用调度方式<sup>[3]</sup>。必须统筹考虑相关工程设施(如堤防、滞洪区、分蓄洪区等)工情, 在保证水利设施自身安全的前提下, 尽量减轻流域洪水影响与损失, 提高流域整体防洪能力, 以期达到流域灾害损失最小化的目的<sup>[4-6]</sup>。

## 2 联合防洪调度模型及求解

**2.1 防洪工程体系联合防洪调度模型** 针对大清河流域防洪工程体系联合防洪调度, 首先分析防洪工程体系联合防洪需求建立联合防洪调度模型, 白洋淀以上主要保护新安北堤的防洪安全, 即在汛期白洋淀主淀区水位越低越好<sup>[7-8]</sup>, 如何通过上游水库联合运行, 使得白洋淀水位保持在安全范围内, 成为大清河上游防洪研究重点。

当流域遭遇一场洪水, 根据预报的洪水量级(峰、量、出现频率), 以流域或同一河流上的防洪

收稿日期: 2020-07-20; 网络首发时间: 2021-07-01

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210630.0953.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508004)

作者简介: 张忠波(1986-), 博士, 高级工程师, 主要从事水利工程联合调度研究。E-mail: iwhrzzb@126.com

工程系统为研究对象，首先识别当前系统蓄水状况及防洪库容，拟定按照保护对象对应的控制断面的洪水调度方案，最终实现防洪工程体系的联合调度。在模型建立过程中，考虑洪水流达时间，利用研究流域现有马斯京根演算模型，采用马斯京根法对防洪工程出流进行洪水演算，并叠加区间洪水下游防洪工程入流洪水<sup>[9]</sup>。

防洪工程体系联合防洪调度优化数学模型包括目标函数和约束条件两部分。以白洋淀对应控制断面最低准则来衡量防洪工程体系联合防洪优化调度的优劣程度，考虑区间入流、河道泄量约束、最高水位限制、水位变幅约束以及泄流能力等约束条件，建立对应联合防洪调度模型<sup>[10-11]</sup>。大清河流域防洪工程联合防洪优化调度是优化问题，由于白洋淀调度规则以十方院水位变化进行判断，当白洋淀水位大于汛限水位，下游枣林庄闸门枢纽全开，由于水位与泄流流量成正比，这样保证十方院水位不高，不仅保证周边堤防的安全，同时减小了最大下泄流量，在一定程度上缓解下游防洪压力。一般在防洪库容有限或已定的情况下<sup>[12-13]</sup>，数学模型主要涉及公式如下：

$$\text{Min} \left( \max_{t \in [t_0, t_d]} Z_{\text{白洋淀}}(t) \right) \quad (1)$$

在实现过程中，为了简便计算，把调度期时段进行离散化：

$$M = \frac{t_d - t_0}{\Delta t} \quad (2)$$

式(1)目标函数可写成：

$$\text{Min} \left( \max \left( Z_{\text{白洋淀}}(1), Z_{\text{白洋淀}}(2), \dots, Z_{\text{白洋淀}}(M) \right) \right) \quad (3)$$

防洪工程体系联合防洪联合调度模型中对应的约束条件主要有：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^M \left( \frac{Q_{j,i} + Q_{j+1,i}}{2} - \frac{q_{j,i} + q_{j+1,i}}{2} \right) \Delta t = \Delta V_i \\ q_{j,i} \leq Q_{j,i} \\ q_{j,i} \leq f_1(Z_{j,i}) \\ \frac{Q_{j,i} + Q_{j+1,i}}{2} - \frac{q_{j,i} + q_{j+1,i}}{2} = \frac{\Delta V_{j,i}}{\Delta t} \\ Q_{j+1,i+1} = c_0 \cdot Q'_{j+1,i} + c_1 \cdot Q'_{j,i} + c_2 \cdot Q_{j,i+1} \\ Q'_{j+1,i} = q_{j+1,i} + \Delta Q_{j+1,i+1} \\ Q'_{j,i} = q_{j,i} + \Delta Q_{j,i+1} \\ Z_i = f_2(V_i) \\ Z_{j,i} < Z_{\text{设定}}; \Delta Z_{j,i} < \Delta Z_{\text{设定}} \\ i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (4)$$

式中： $Q_{j,i}$  为第  $i$  个防洪工程第  $j$  时段入流流量； $q_{j,i}$  为第  $i$  个防洪工程第  $j$  时段出流流量； $\Delta Q_{j,i}$  为第  $i$  个防洪工程与控制断面之间的区间，在  $j$  时段的流量（并已逆向演算至第  $i$  个出流）； $Q'_{j,i}$  为第  $i$  级库第  $j$  时段出流流量（已含本防洪工程至下游区间流量）； $Z_{j,i}$  为第  $i$  级防洪工程第  $j$  时段水位； $Z_{j,i}$ 、 $Z_{\text{设定}}$  为第  $i$  级库第  $j$  时段水位及设定水位（防洪高水位或设计洪水位）； $\Delta Z_{j,i}$ 、 $\Delta Z_{\text{设定}}$  为第  $i$  级库第  $j$  时段水位变幅及设定水位变幅； $f_1(Z_{j,i})$  为第  $i$  级库第  $j$  时段水库泄流能力函数； $f_2(V_i)$  为第  $i$  级库水库库容曲线函数； $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  分别为马斯京根演算系数。

**2.2 防洪调度模型求解** 防洪工程联合防洪调度十分复杂，含有多种线性与非线性约束。用常规优化算法求解，通常存在计算量大和解的精度差等缺点。智能优化算法中粒子群算法(PSO算法)设计编程简单、计算工作量小、收敛速度快的优点，是求解联合调度优化比较有效的一种新算法<sup>[14-15]</sup>。选取智能算法作为求解手段，采用确定式采样选择方法及算法所适用的优化策略手段，产生流域水库群削峰效果较好且保证保护对象对应控制断面的最高水位最低的对应的最好的新一代群体。如此循

环,直到方案满足优化准则或已求得满意解。

针对联合优化调度目标函数,即追求保护对象水位最小化目标,通过约束条件的改变反映出各个模块的特点,但不妨碍采用统一的算法,因为变量的基本定义、目标函数和主要约束条件还是一致的。以*i*代表水库,设共有*n*个水库,依次编号为*i*=1,2,……,*n*,将调度周期划分为*M*个时段,以*j*代表时段变量,*j*=1,2,……,*M*。

应用PSO求解水库群防洪优化调度问题主要包括:初始群体的产生,即初始防洪调度方案对应决策变量的形成(个体);种群目标函数值计算;优化算子的实现。PSO算法求解的设计过程如下:

(1)初始群体的产生。PSO直接用决策变量的实值作为编码,编码的长度等于决策变量的个数,由各时段的防洪工程出流流量向量组成:

$$Q = (q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_M) \quad (5)$$

式中:  $q_1 = (q_1^1, q_2^1, \dots, q_n^1)^T$ ,  $\dots$ ,  $q_i = (q_1^i, q_2^i, \dots, q_n^i)^T$ ,  $\dots$ ,  $q_M = (q_1^M, q_2^M, \dots, q_n^M)^T$ 。

初始多个初始解,即对应多个联合调度方案,然后利用粒子群算法的求解策略进行迭代优化,最终求得问题的最优解。

在调度期内防洪工程入流洪水过程及区间入流过程已知,防洪工程初始水位已知,在实时防洪调度时,初始水位即为当前水位,参与防洪工程泄流的泄流设施,以及在各防洪工程泄流设施的泄流能力已知的条件下,联合防洪优化调度中各防洪工程的防洪出库流量过程有一定的约束,所以并不是所有的个体均可行。对应优化模型,要求各防洪工程各时段的防洪出库流量满足防洪工程的泄洪和过流能力约束、防洪工程初始防洪库容约束等。为此程序中每产生一个个体,都必须对其进行可行性验证。

(2)适应度计算。设定个体的适应度就等于相应的目标函数值,取目标函数值最小的解为最优解。算法中,泄流能力及人造洪水约束在调度方案的编码中自动满足,而其他约束条件如初始防洪库容约束及水量平衡等则在设计粒子群算子时予以考虑。适应度函数即为:

$$F = \text{Min} \left( \max_{t \in [t_0, t_d]} Z_{\text{白洋淀}}(t) \right) \quad (6)$$

(3)粒子群算法的设计。选定初始群体、确定适应度的计算方法后,采用确定式采样选择方法及算法所适用的优化策略手段,为保证全局收敛,在变异操作后采用最优个体保留策略,即在第*G*代中变异后保留该代群体中的最优个体及其适应值。如此循环,直到满足优化准则或已求得满意解。

### 3 联合防洪调度分析

**3.1 边界条件** 针对大清河流域防洪工程体系联合防洪调度目标函数,即追求白洋淀水位最低化为目标,根据防洪库容量级分类,由于横山岭、口头水库、龙门水库以及安格庄库容较小、调洪能力较弱,因此不参加与白洋淀的联合调度任务。通过研究白洋淀和西大洋水库、王快水库进行联合优化,其他水库按照设计调度规程进行调度。在优化过程中,考虑西大洋和王快两座水库都是500年一遇设计,在优化过程,由于典型洪水过程都低于500年一遇设计标准洪水,水库调节的最高水位不能接近设计洪水位(对应库容 $V_{\text{设计}}$ )。以规程调度水库最高水位(对应库容 $V_{\text{规程最高}}$ )为基础,优化调度主要挖潜规程调度对应最高水位与设计洪水位差值对应防洪库容( $V_{\text{挖潜}} = V_{\text{设计}} - V_{\text{规程最高}}$ ),优化过程中,50年一遇典型洪水以下设定可利用的最大库容为 $V_{\text{规程最高}} + V_{\text{挖潜}}/3$ ,50年一遇典型洪水及以上包括638洪水利用最大库容为 $V_{\text{规程最高}} + V_{\text{挖潜}}/2$ 。同时模型还需满足以下假定:假定白洋淀以上流域内洪水同频率;假定汛前流域上游各水库都维持在汛限水位,枣林庄枢纽闸门全开状态,这时水位越低可保证周边堤防安全,既能保证减少下游最大下泄流量。

根据国务院批准的《大清河防御洪水方案》(国函[2007]33号)和国家防汛抗旱总指挥部批准的《大清河洪水调度方案》(国汛[2008]11号)实施防御与调度,其对应白洋淀运用原则:白洋淀十方院水位

达9 m且继续上涨时,依次扒开障水埝、淀南新堤、四门堤、新安北堤,逐步扩大向周边洼淀分洪,以确保千里堤安全。同时白洋淀周边还有文安洼蓄滞洪区可以进行分洪,主要通过小关向文安洼蓄滞洪区进行分洪,文安洼运用规则:当东淀第六堡水位达到6.5 m,且继续上涨威胁天津市区安全时,在充分保持河道泄洪能力的情况下:(1)如白洋淀十方院水位小于9 m,则运用锅底闸并相机扒开该闸两侧堤埝,向贾口洼分洪。贾口洼充分运用后,东淀第六堡水位仍达到6.5 m且继续上涨时,则在滩里隔淀堤扒口向文安洼分洪;(2)如白洋淀十方院水位大于9 m,运用王村分洪闸及滩里隔淀堤扒口向文安洼分洪。(3)如白洋淀十方院水位达到9.85 m且继续上涨,威胁千里堤安全,则在小关扒口向文安洼分洪。

**3.2 典型洪水计算成果** 以大清河水系实际发生过的638洪水为分析对象,以此为基础得到不同设计标准洪水的设计洪峰、洪量和洪水过程线。根据国务院批准的《大清河防御洪水方案》(国函〔2007〕33号)和国家防汛抗旱总指挥部批准的《大清河洪水调度方案》(国汛〔2008〕11号)要求水库调度为现有调度方案,即对应各个水库设计规程调度方案。为检验本文提出联合调度是否有效,分别把638典型洪水、对应设计频率50年一遇洪水、100年一遇洪水以及200年一遇洪水作为输入条件,并与设计规程调度进行比较,其中十方院站水位代表白洋淀水位。

(1)典型638洪水。典型638洪水条件下,在规程调度与优化调度中,都开启了文安洼蓄滞洪区。王快水库、西大洋水库和白洋淀的入库、出库流量及水位调度成果如图1所示。

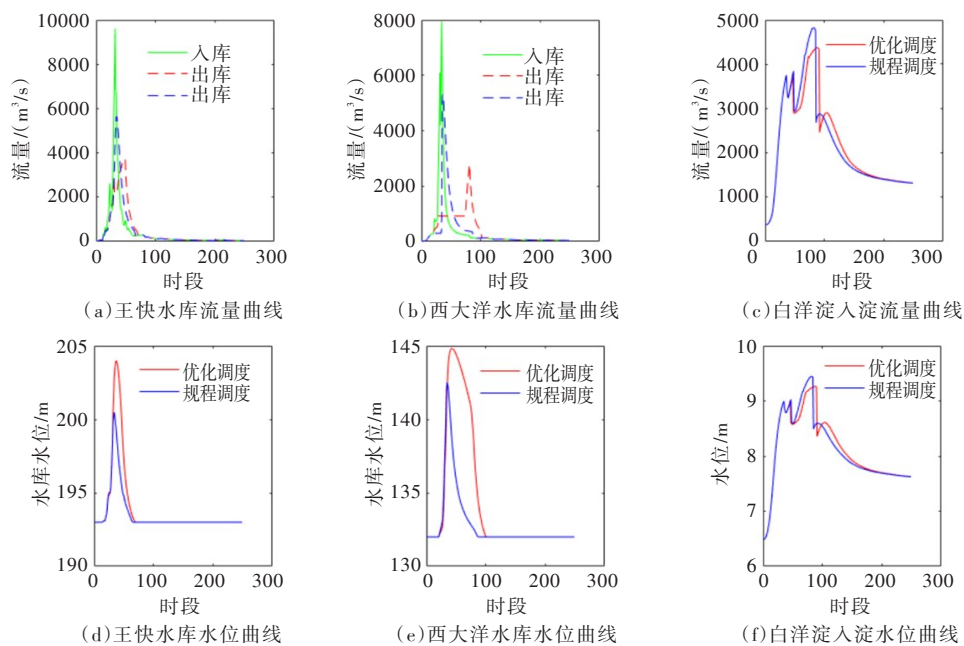


图1 典型638洪水条件下王快水库、西大洋水库及白洋淀调度成果

(2)典型50年一遇洪水。典型洪水暴雨中心50年一遇洪水条件下,在规程调度与优化调度中,都未启用文安洼蓄滞洪区。王快水库、西大洋水库和白洋淀的入库、出库流量及水位调度成果如图2所示。

(3)典型100年一遇洪水。典型洪水暴雨中心100年一遇洪水条件下,在规程调度中,开启了文安洼蓄滞洪区;而优化调度中未开启文安洼蓄滞洪区。王快水库、西大洋水库和白洋淀的入库、出库流量及水位调度成果如图3所示。

(4)典型200年一遇洪水。典型洪水暴雨中心200年一遇洪水条件下,在规程调度与优化调度中,都开启了文安洼蓄滞洪区。王快水库、西大洋水库和白洋淀的入库、出库流量及水位调度成果如图4所示。

**3.3 联合防洪调度成果分析** 针对大清河流域防洪工程体系联合运行进行了联合调度优化研究,王快与西大洋水库最大出库流量对比如表1所示,白洋淀十方院站最高水位对比分析如表2所示。



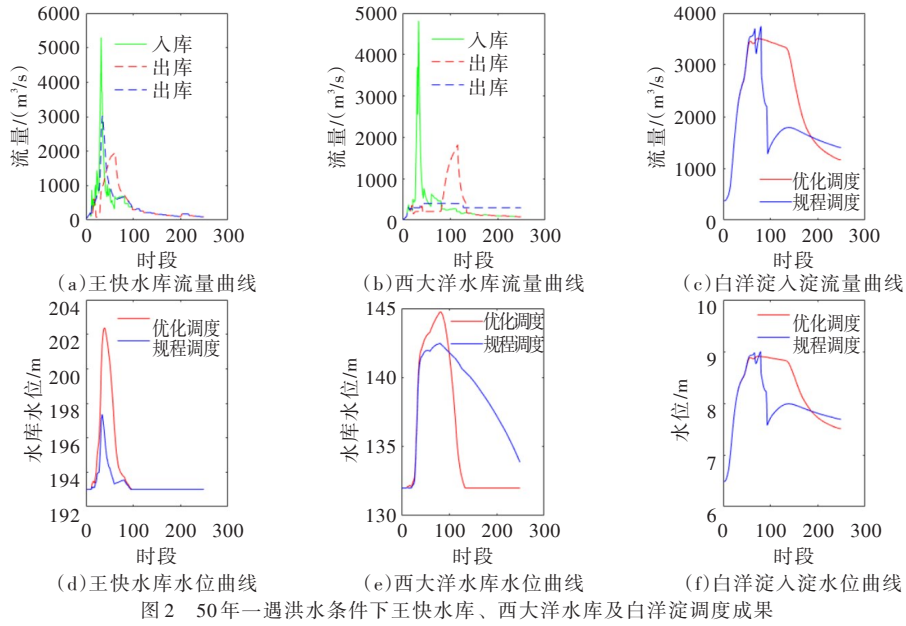


图2 50年一遇洪水条件下王快水库、西大洋水库及白洋淀调度成果

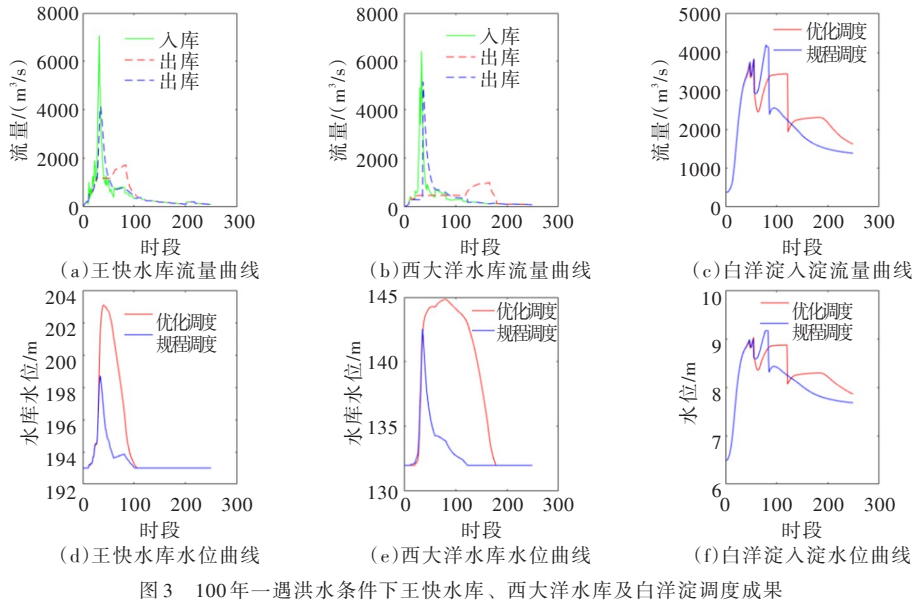


图3 100年一遇洪水条件下王快水库、西大洋水库及白洋淀调度成果

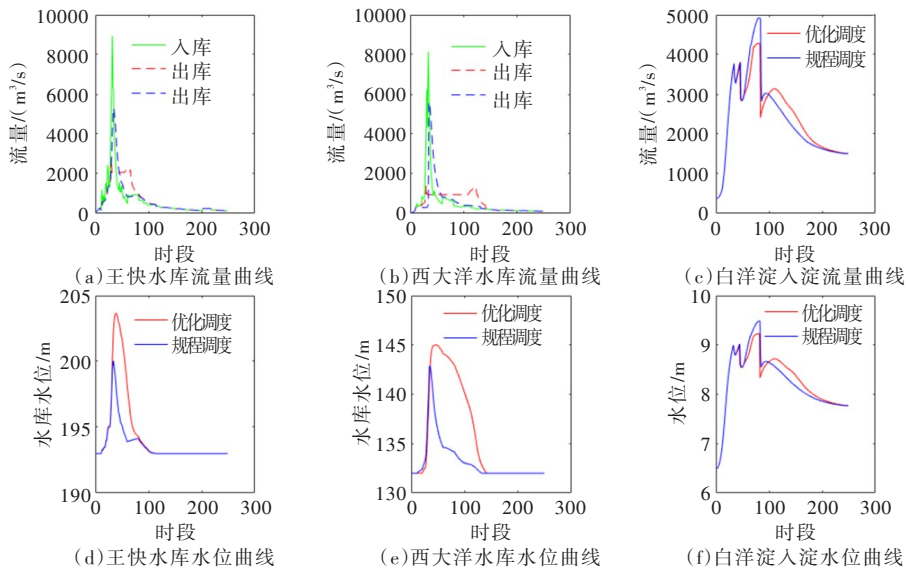


图4 200年一遇洪水条件下王快水库、西大洋水库及白洋淀调度成果

表1 王快与西大洋水库最大出库流量

(单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ )

洪水频率	王快水库		西大洋水库	
	设计规程调度	优化调度	设计规程调度	优化调度
638洪水	5644	3740	5315	2778
10年一遇	999	266	300	247
20年一遇	1733	544	300	734
30年一遇	2288	783	396	979
50年一遇	3021	1954	406	1821
100年一遇	4129	1739	5173	1017
200年一遇	5285	2754	5602	1396

表2 白洋淀十方院站最高水位对比

(单位: m)

洪水频率	设计规程调度	优化调度
638洪水	9.44	9.26
10年一遇	7.90	7.52
20年一遇	8.54	8.20
30年一遇	8.86	8.52
50年一遇	9.00	8.91
100年一遇	9.17	9.02
200年一遇	9.48	9.22

根据《大清河防御洪水方案》(国函[2007]33号)和国家防汛抗旱总指挥部批准的《大清河洪水调度方案》(国汛[2008]11号)规定水库按照设计规程方案进行调度运行,本文中优化调度方案中白洋淀运用规则同样采用了《大清河防御洪水方案》和《大清河洪水调度方案》中的运用方案。

由表1可以看出,通过大清河流域防洪工程体系联合优化调度,西大洋和王快两座水库相对于设计规程调度,优化过程中预留出一部分防洪库容,即使638典型洪水和200年一遇洪水,两个水库最高水位较设计洪水位要低3~4m。王快水库各频率洪水条件下的出库流量均大幅度减少,西大洋水库仅在设计频率20年、30年和50年一遇洪水条件下出库流量略有增加,其余设计频率作为输入条件,其出库流量均大幅度减少,通过联合调度,一方面减小了下游河道的防洪压力,也为下游白洋淀的水位降低创造了条件。同时针对100年一遇洪水,根据调度规程,开启了文安洼蓄滞洪区;而优化调度中不仅未开启蓄滞洪区,而且降低了白洋淀最高水位0.15m,联合效益显著。从表2中可以看出,白洋淀的最高水位也有了不同程度的降低,联合调度的成果是显著的。这是因为短暂借用西大洋和王快两座水库一部分防洪库容,从而避免6座水库的洪峰同时到达白洋淀,从而相比于规程调度,可有效降低白洋淀入淀洪峰,达到降低白洋淀水位的目的。

#### 4 结论

本文以大清河流域防洪问题为导向,以白洋淀最大水位最低为目标,不仅可以保证周围堤防的安全,而且缓解白洋淀下游防洪压力,在此基础上建立了大清河流域联合防洪调度模型,采用智能优化算法求解,实现了大清河流域防洪工程体系联合优化调度,使得在各种频率洪水条件下白洋淀对应的十方院站最高水位都有一定程度的降低,可保证在遭遇百年一遇洪水不开启文安洼蓄滞洪区,而且降低了白洋淀最高水位0.15m,联合效益显著。

通过联合调度,一方面减小了下游河道及堤防的防洪压力,另一方面为下游白洋淀的水位降低创造了条件;短暂借用西大洋和王快两座水库防洪库容,从而避免6座水库的洪峰同时到达白洋淀,从而相比于规程调度,可有效降低白洋淀入淀洪峰,达到降低白洋淀水位的目的。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 罗成鑫, 周建中, 袁柳. 流域水库群联合防洪优化调度通用模型研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 39-47.
- [ 2 ] 岳华, 马光文, 杨庚鑫. 梯级水库群超标洪水的协同应急调度研究[J]. 水利学报, 2012, 50(3): 356-363.
- [ 3 ] 贾本有, 钟平安, 陈娟, 等. 复杂防洪系统联合优化调度模型[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 560-571.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 吕娟, 凌永玉, 姚力玮. 新中国成立 70 年防洪抗旱减灾成效分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(4): 242-251.
- [ 6 ] 向立云, 张大伟, 何晓燕, 等. 防洪减灾研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 362-372.
- [ 7 ] 张海良. 基于水库防洪优化调度模型研究[J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47(2): 19-21.
- [ 8 ] 喀迪尔·麦麦提. 基于蝙蝠算法不同频率乌克塔斯水库防洪优化调度研究[J]. 陕西水利, 2019(8): 62-64.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 陈森林, 孙亚婷, 黄宇昊. 水库防洪等蓄量优化调度模型及应用[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 374-382.
- [ 11 ] 李致远. 梯级水库的联合防洪调度及防洪风险分析[J]. 吉林水利, 2015(7): 39-41.
- [ 12 ] 周新春, 许银山, 冯宝飞. 长江上游干流梯级水库群防洪库容互用性初探[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 421-428.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] ZHANG ZHONGBO, JIANG YUNZHONG, ZHANG SHUANGHU, et al. An improved adaptive particle swarm optimization algorithm for reservoir operation optimization[J]. Applied Soft Computing, 2014, 18: 167-177.
- [ 15 ] 张忠波, 何晓燕, 耿思敏, 等. 改进的粒子群算法在水库优化调度中应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(5): 338-345.

## Study on flood control projects joint flood control operation of the Daqing river basin

ZHANG Zhongbo<sup>1</sup>, ZHANG Shuanghu<sup>1</sup>, GENG Simin<sup>2</sup>, HE Xiaoyan<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, TIAN Yu<sup>1</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Development Research Center of the Ministry of Water Resource of P.R.China, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The Baiyangdian Lake is the most import project in the Daqing river basin. It becomes more import to research into the joint flood control operation of the flood control projects system based on fact that the construction of Xiong'an New Area requires a higher flood control standard in the Daqing river basin. The paper established the joint flood control operation model and solved the model, which took the minimum of the highest Baiyangdian Lake water level as the objective of joint flood control operation. We researched the joint flood control operation under different flood conditions on the premise of ensuring the reservoir project safety. It could ensure that Wenanwa flood storage and detention area would not be opened in the event of a 100-year flood by optimal operation. It could reduce the maximum water level of the Baiyangdian Lake to a certain extent by optimal operation, which decreased the flood control pressure of the Baiyangdian Lake and embankments effectively, and provided technical support for flood control safety of the Xiong'an New Area.

**Keywords:** Daqing river basin; flood control projects system; Baiyangdian Lake; joint flood control operation

(责任编辑: 王学风)