

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdcq.2019.0041

马立亚,沈晓钧,雷静,等. 汉江流域引调水工程及水库统一调度模型研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 116-122. MA L Y, SHEN X J, LEI J, et al. A integrated water regulation model for water transfer projects and reservoir management of Hanjiang River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 116-122. (in Chinese)

# 汉江流域引调水工程及水库统一调度模型研究

马立亚<sup>1</sup>, 沈晓钧<sup>2</sup>, 雷静<sup>1</sup>, 吴泽宇<sup>1</sup>, 李书飞<sup>1</sup>

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010; 2. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 西安 710100)

**摘要:** 针对汉江流域调度对象多、调度规则复杂的问题, 建立了汉江流域引调水工程及水库统一调度模型。模型将汉江流域概化为由干支流控制性水库、引调水工程、沿线用水地市、控制断面组成的水资源调度系统。模型由信息服务模块、汉江干支流控制性水库群调度模块、汉江干流分段水资源调度配置模块组成, 各模块间通过数据关联的形式进行耦合。模型采用模块化结构, 可扩展性强, 集成了最严格水资源管理制度中用水总量控制指标体系和水量分配方案等约束条件, 可分河段、分区域实现水资源调度配置目标。模型对人工经验计算方式进行了优化, 为规范化、智能化地开展汉江流域水资源调度管理提供技术支撑。

**关键词:** 水资源调度; 调度模型; 汉江流域; 南水北调中线工程; 水库

中图分类号: TV213 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A integrated water regulation model for water transfer projects and reservoir management of Hanjiang River basin

MA Liya<sup>1</sup>, SHEN Xiaojun<sup>2</sup>, LEI Jing<sup>1</sup>, WU Zeyu<sup>1</sup>, LI Shufei<sup>1</sup>

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China;

2. Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The Hanjiang River is the water source of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project and other important diversion projects. A integrated water regulation of the Hanjiang River basin is of great interests for the optimal allocation and regulation of water resources. This paper introduced a integrated water regulation model for water transfers projects and reservoir management to address this problem. The model divided the Hanjiang River basin into a water resources regulation system, consisting of reservoirs on main stream and branches, water transfers projects, cities and control sections. The model was composed of three modules: information service module, controlling reservoir of Hanjiang main stream and tributary operation module, and subsection water resources dispatching and allocation module. Each module was then coupled to form the model. The model was modularized and can be easily extended. It also integrated the total water consumption, control index, water resources management system, and water quantity allocation program, and realized subsection and sub region water resource allocation and regulation targets. The model, optimization of artificial experiences, provided technical support for water resources regulation and management of Hanjiang River basin.

**Key words:** water resources regulation; water regulation model; Hanjiang River basin; Middle Route of South-to-North Water Transfers Project; reservoir management

收稿日期: 2018-07-26 修回日期: 2019-01-23 网络出版时间: 2019-01-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190126.1458.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402202)

作者简介: 马立亚(1988—), 女(回族), 湖南湘西人, 工程师, 主要从事水资源调度研究。E-mail: maliya@cjwsjy.com.cn

汉江流域地处我国中部腹地,是长江中游最大支流,也是南水北调中线工程等重要引调水工程的水源地。汉江流域水资源开发利用与保护对保障流域内外国民经济发展用水安全至关重要。目前,南水北调中线一期工程已于2014年12月建成通水并发挥供水效益<sup>[1]</sup>,陕西省引汉济渭工程已开工建设,引江济汉工程已建成通水。汉江流域水量调度需统筹考虑引调水工程与流域控制性水库的统一调度,调度对象众多,调度规则复杂,协调难度较大<sup>[2]</sup>。

流域水资源统一调度需要开展流域尺度的水资源供需平衡分析,并统筹考虑流域内外用水和流域内控制性水库、引调水工程等众多因素和调度主体,需要从全局的角度考虑问题,已不再局限为单一水利工程或局部地区,调度决策影响范围呈现多区域、流域性特征。20世纪40年代以来,水资源系统调度技术得到了快速的发展,国内逐步开展了黄河数字流域模型的研究<sup>[3-5]</sup>、黑河水量调度方案编制<sup>[6]</sup>及水资源实时调度系统的开发<sup>[7]</sup>、塔里木河流域水量优化调度模型研究<sup>[8]</sup>等多项水资源调度工作,针对汉江流域已形成了梯级水库群优化调度模型<sup>[9-10]</sup>、丹江口水库调度规程<sup>[11-13]</sup>、南水北调中线一期工程水量调度方案<sup>[14-15]</sup>等成果。目前,我国以流域为单位的水资源统一管理和调度的格局已初步形成<sup>[16]</sup>,但仍存在一些不足,如长期水文预报的精度有限<sup>[17-18]</sup>、调度多目标寻优困难,特别是缺乏规范化、智能化的调度决策平台等,无法快速形成标准化的流域水资源统一调度方案,增加了调度实施的难度。

针对汉江流域水资源调度管理特点,本文拟建立汉江流域引调水工程及水库统一调度模型,并分析模型在汉江全流域及区域水资源调度配置工作中的应用效果。

## 1 调度研究对象

根据大系统分解协调原理<sup>[19-20]</sup>,将汉江流域水资源调度系统进行概化(图1)。调度研究对象分为4类:汉江沿线用水区域、干支流控制性水库、引调水工程、控制断面。

### 1.1 汉江沿线用水地市

汉江流域共涉及河南、湖北、重庆、四川、陕西、甘肃6个省(直辖市),其中重庆、四川、甘肃在汉江流域用水量很小。因此主要考虑陕西、湖北、河南三个省的用水,以地级行政区为调度配置基本单元。各省涉及的地级行政区如下。

陕西省:宝鸡市、汉中市、安康市、西安市、商洛市。

河南省:南阳市、邓州市、洛阳市、三门峡市、驻马店市。

湖北省:十堰市、襄阳市、荆门市、荆州市、潜江市、仙桃市、天门市、孝感市、武汉市。

### 1.2 干支流控制性水库

参与调度的工程包括汉江干支流调节能力较大或涉及重要引调水工程的8座水库。

干流4座:黄金峡、石泉、安康、丹江口。

支流4座:三河口、潘口、黄龙滩、鸭河口。

### 1.3 引调水工程

引调水工程包括南水北调中线一期工程、清泉沟、引汉济渭工程、引江济汉工程、陕西省引红济石和引乾济石工程。

### 1.4 控制断面

为对流域水量调度情况进行监控,在流域内选择10个重要控制断面纳入研究对象。

干流7个:汉中、石泉、安康、白河、黄家港、皇庄、仙桃。

支流3个:黄龙滩(堵河)、新店铺(白河)、郭滩(唐河)。

以上研究对象中,黄金峡、三河口水库及引汉济渭工程在建期间,在模型中保留工程计算模块,待工程建成后可设置调度参数开展计算。



图1 汉江流域水资源调度系统概化图

Fig.1 Sketch of water resources regulation system of Hanjiang River basin

## 2 模型理论体系

### 2.1 模型简介

汉江流域引调水工程及水库统一调度模型是一个水资源综合调度模拟模型。模型将汉江流域干支流控制性水库、控制断面、汉江沿线用水地市、重点引调水工程概化成一个完整的水资源调度系统,将流域内具有不同调度任务的水库、引调水工程等复杂的调度规则及河道内、外水量约束条件进行集成,可实现水库、引调水工程、汉江沿线各地市供水的统一调度。模型采用数学规划的思想,将水资源系统中各调度对象的调度规则、水力联系等采用约束方程的方式进行描述,进而开展流域自上游向下游的逐级模拟计算。

### 2.2 模型结构

汉江流域引调水工程及水库统一调度模型包括信息服务模块、汉江干支流控制性水库群调度模块、汉江干流分段水资源调度配置模块。3 个模块间通过数据关联的形式进行耦合。

(1)信息服务模块。信息服务模块涉及汉江流域地理信息服务及模型的输入输出数据管理。建立水量调度信息服务数据库,将汉江流域地理信息、水文数据(水库的来水过程、控制断面来水过程)、水库信息、控制断面信息、汉江沿线各地市用水信息、引调水工程信息等存入数据库中进行统一管理,方便计算模块的调用及结果整理。

(2)汉江干支流控制性水库群调度模块。模型的目标函数通常为水库弃水量最小、供水量最大等<sup>[21]</sup>。汉江干支流控制性水库群调度模块的目标函数为在满足防洪、生态、航运等约束条件下,通过水库水量调度,满足供水(含灌溉)、发电等兴利用水需求。

$$f_{\text{resobj}} = \max(f_w, f_E) \quad (1)$$

式中: $f_{\text{resobj}}$ 为控制性水库群调度模块的目标函数; $f_w$ 、 $f_E$ 等分别为水库的供水水量(万  $\text{m}^3$ )、发电量(万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ )等目标。

模块涉及的关系方程主要有水库水量平衡公式、出力公式、供水公式、水库下泄流量约束等。

水库水量平衡公式

$$S_{t+1}^i = S_t^i + W_{\text{in},t}^i - W_{\text{out},t}^i \quad (3)$$

式中: $S_t^i$ 、 $S_{t+1}^i$ 分别表示第  $i$  号水库在  $t$  时段的初末库容(万  $\text{m}^3$ ); $W_{\text{in},t}^i$ 、 $W_{\text{out},t}^i$ 分别表示该水库在  $t$  时段的入库和出库水量(万  $\text{m}^3$ )。

出力公式(针对有发电任务的水库)

$$N_t^i = K \times Q_E \times H \quad (4)$$

式中: $N_t^i$ 为第  $i$  号水库在  $t$  时段的出力值( $\text{kW}$ ); $K$ 为出力系数; $Q_E$ 为发电流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $H$ 为电站上下游水头差( $\text{m}$ )。

供水公式(针对有供水任务的水库)

$$W_{\text{供水},t}^i = \sum D_{\text{供水},t}^i \quad (5)$$

式中: $W_{\text{供水},t}^i$ 为第  $i$  号水库在  $t$  时段的供水量(万  $\text{m}^3$ ); $j$ 为第  $i$  号水库对应的供水对象编号; $D_{\text{供水},t}^i$ 为其在  $t$  时段的供水量(万  $\text{m}^3$ )。

下泄流量约束

$$Q_{\text{min},t}^i \leq Q_t^i \leq Q_{\text{max},t}^i \quad (6)$$

式中: $Q_t^i$ 为第  $i$  号水库在  $t$  时段的下泄流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $Q_{\text{max},t}^i$ 、 $Q_{\text{min},t}^i$ 分别表示水库在  $t$  时段的流量上、下限值( $\text{m}^3/\text{s}$ );水库下泄流量不能超过洪水期间过流能力、下游河道允许最大下泄流量,同时不得小于生态流量、航运流量等限制流量。

水位约束

$$Z_{\text{min},t}^i \leq Z_t^i \leq Z_{\text{max},t}^i \quad (7)$$

式中: $Z_t^i$ 为第  $i$  号水库在  $t$  时段的的水位值( $\text{m}$ ); $Z_{\text{max},t}^i$ 、 $Z_{\text{min},t}^i$ 分别表示该水库在  $t$  时段的的水位上、下限控制值。

(3)汉江干流分段水资源调度配置模块。根据汉江流域水资源特点和管理需要,以流域主要控制断面为基础,将汉江以河段的形式开展分区供用水平衡。模块核心为河段水量供需平衡,根据河段来水量、汉江沿线耗水等开展河道内、外水量调度计算。

目标函数为在满足控制断面最小下泄流量指标要求的条件下,通过流域供需平衡配置,满足汉江沿线各地市、引调水工程等用水对象的用水需求

$$f_{\text{rivobi}} = f_{\text{地市供水}} + f_{\text{引调水工程供水}} \quad (8)$$

式中: $f_{\text{rivobi}}$ 为汉江干流分段水资源调度配置模块的目标函数; $f_{\text{地市供水}}$ 、 $f_{\text{引调水工程供水}}$ 分别为各地市、引调水工程供水量(万  $\text{m}^3$ )。

模块涉及的关系方程主要包括河段供需平衡、最小下泄流量约束、汉江干流沿线各地市供需平衡公式、用水总量控制指标约束等。

河段供需平衡

$$W_{\text{上游},t}^i + W_{\text{区间},t}^i - W_{\text{耗水},t}^i - W_{\text{蓄水},t}^i - W_{\text{调水},t}^i = W_{\text{下泄},t}^i \quad (9)$$

$$W_{\text{耗水},t}^i = W_{\text{用水},t}^i - W_{\text{回归},t}^i \quad (10)$$

式中: $i$ 和  $t$ 分别为断面编号和当前时段编号。 $W_{\text{上游},t}^i$ 为上游断面下泄水量(万  $\text{m}^3$ ); $W_{\text{区间},t}^i$ 为区间

来水量(万  $m^3$ );  $W_{耗水,t}^i$  为区间各用水对象耗水量(万  $m^3$ );  $W_{蓄水,t}^i$  为区间水库蓄水量变化(万  $m^3$ );  $W_{调水,t}^i$  为区间内引调水工程调水量(万  $m^3$ );  $W_{下泄,t}^i$  为当前断面下泄水量(万  $m^3$ );  $W_{用水,t}^i$  为区间内各用水对象用水量(万  $m^3$ );  $W_{回归,t}^i$  为区间内各用水对象回归水量(万  $m^3$ )。

最小下泄流量约束

$$D_{下泄,t}^i \geq Q_{min,t}^i \quad (11)$$

式中:  $D_{下泄,t}^i$ ,  $Q_{min,t}^i$  分别为第  $i$  号断面在  $t$  时段的下泄流量( $m^3/s$ )、最小下泄流量( $m^3/s$ )。

沿线各地市供需平衡公式

$$D_{缺水,t}^i = D_{需水,t}^i - D_{供水,t}^i \quad (12)$$

式中:  $D_{缺水,t}^i$ ,  $D_{需水,t}^i$ ,  $D_{供水,t}^i$  分别表示第  $i$  号地市在  $t$  时段的缺水量(万  $m^3$ )、需水量(万  $m^3$ )、供水量(万  $m^3$ )。

用水总量控制指标约束

$$D_{供水}^i \leq D_{control} \quad (13)$$

式中:  $D_{供水}^i$  为第  $i$  号地区年度供水量(万  $m^3$ );  $D_{control}$  为该地区用水总量控制指标(万  $m^3$ )。

(4)模块耦合。模型的3个模块中,信息服务模块是其他2个计算模块的基础,为计算模块提供必要的输入数据,并对输出结果进行存储及处理。

考虑水库来水受河道外用水影响,同时水库调蓄会引起河段径流过程的变化,从而对河段水资源供需平衡产生影响。为综合考虑水库调蓄、河道外用水对调度的整体作用,将干支流控制性水库群调度模块与汉江干流分段水资源调度配置模块进行耦合,即在汉江干支流控制性水库群调度模块中,以汉江沿线地市用水量作为计算水库来水的边界条件,在汉江干流分段水资源调度配置模块中,以水库蓄水量的变化作为河段供需平衡计算的边界条件。在满足控制断面最小下泄流量的基础上,合理配置河道内用水和河道外用水,形成完整的汉江流域引调水工程及水库统一调度模型。模块耦合示意图见图2。

## 2.3 模型特点

(1)采用模块化结构,有利于模型功能扩展。模型各模块的功能独立,同时又相互耦合。模块内部由各类子模块构成。例如汉江流域控制性水库的调节能涉及日调节、年调节、多年调节,水库的主要任务涉及防洪、供水、发电、航运等,水库调度规则复杂。汉江干支流控制性水库群调度模块中针对不同的水库调度规则进行调度子模块的编制,很好地适应了每座水库的特点。在实际应用中,各模块可独立进行功能扩展,既保证了模型的整体性,又具有很强的扩展性。



图2 模块耦合

Fig. 2 Sketch of module coupling

(2)集成了最严格水资源管理制度中用水总量控制指标体系和水量分配方案等约束条件。将最严格水资源管理制度中用水总量控制指标体系和水量分配方案等作为约束条件集成到调度模型中,使调度方案结果有效的体现了水量调度管理需求。

用水总量控制指标方面,模型对流域及流域内各省级行政区的用水总量进行限制,使其不超过用水总量控制指标及流域水量分配方案中各省级行政区分配的水量。

控制断面指标方面,模型通过开展水利工程水量统一调度,对控制断面最小下泄流量、下泄水量进行调控,有效保障了水量分配方案中明确的控制断面调度指标的实现。

(3)分河段、分区域实现水资源调度配置目标。模型按照控制断面将汉江干流分为若干河段。各河段以控制断面下泄流量、下泄水量等要求为调度的边界条件,根据流域用水、水库及引调水工程调度计划和控制断面管理指标要求进行区域供用水平衡,在考虑水利工程调度的基础上,实现流域分河段、分区域水资源调度配置目标。

## 3 模型应用效果分析

汉江流域引调水工程及水库统一调度模型具有控制性水库群调节计算和分省级行政区、分河段水资源调度配置功能,可适应长系列或中、短期流域水量调度。模型可应用于汉江全流域及区域水资源调度配置,提高了水量调度计算的效率及科学性。

模型在每年的汉江年度水量调度计划的编制中发挥了重要的技术支撑作用。随着流域水资源管理工作的不断深入,自2014年以来,水利部每年组织长江水利委员会编制汉江年度水量调度计划,根据下一年度汉江来水预报,汉江沿线各省级行政区上

报的用水计划、控制性水库上报的调度计划等开展计算,确定下一年度汉江流域沿线供水计划、水库及引调水工程的水量调度计划、控制断面下泄流量过程等。汉江年度水量调度计划的编制需统筹流域内外用水和各大中型水利水电工程的调度,涉及大量基础数据的处理和计算、分析工作。采用人工经验编制的方式比较耗时费力。

为检验模型的可靠性和科学性,将人工经验编制的方式与采用模型计算两种方法进行对比。以《汉江 2015—2016 年度水量调度计划》<sup>[22]</sup>中汉江上游 4 座控制性水库调度计划计算为例,采用两种方法进行计算,其结果见表 1。通过对比,各水库调度过程有所差异。采用人工经验编制方法,石泉、安康、潘口水库在 3 月末水库水位均降至死水位附近,黄龙滩水库 4 月末水位降至死水位,这使得后续时段如果汉江来水偏枯,水库持续在低水位运行,不利于区域供水安全及电站经济运行,同时上游水库对丹江口水库补偿作用减弱,进一步给丹江口水库供水安全造成不利影响,而采用模型计算避免了这一

现象。另外,采用人工经验编制的方式,各月间水库水位变幅较大,例如黄龙滩水库从 3 月末到 4 月末,水库水位降低 10.2 m,4 月末到 5 月末,水库水位升高 15.7 m,而采用模型计算方式结果中水库各月间水位变幅较小。

针对汉江流域来水丰枯变化较大的情况,模型在输入条件中增加了水库水位控制,有效避免了枯水期末各水库运行水位同时下降至死水位附近的现象,防止流域供水能力被过度挖掘。模型采用逐旬计算方式,避免了水库水位在月内变幅过大的问题。模型在编制过程中对人工经验编制方法进行了优化,更符合流域水资源统一调度的实际需要,因而更为科学可行。

根据汉江年度水量调度计划的编制要求,模型对输入、输出数据格式进行标准化整理,使得调度计算生成的结果可直接服务于汉江年度水量调度计划编制工作。经过不断完善,模型可快速适应汉江年度水量调度的计算,极大提高了汉江流域水资源调度信息化水平。

表 1 水库调度计划水位采用人工经验编制结果与模型计算结果的对比

Tab. 1 The comparison of reservoir water levels between artificial experience and model simulation results 单位:m

水库	石泉		安康		潘口		黄龙滩	
正常蓄水位	410.0		330.0		355.0		247.0	
汛限水位	405.0		325.0		347.6		—	
死水位	400.0		305.0		330.0		226.0	
方法	人工经验编制	模型计算	人工经验编制	模型计算	人工经验编制	模型计算	人工经验编制	模型计算
11 月	406.06	408.47	325.61	328.83	351.39	351.39	247.00	247.00
12 月	399.95	405.24	321.80	329.31	347.22	349.51	247.00	246.54
1 月	400.70	403.93	316.13	328.86	341.79	348.26	247.00	246.74
2 月	398.91	401.25	309.07	324.15	334.87	346.66	247.00	246.85
3 月	400.33	401.08	305.00	320.01	332.08	342.05	236.20	246.75
4 月	407.07	402.25	307.68	320.82	337.84	346.88	226.00	245.06
5 月	410.00	408.18	318.98	319.07	345.87	345.94	241.17	245.10
6 月	410.00	408.53	330.00	310.18	347.60	344.56	234.56	241.50
7 月	405.00	405.00	325.00	318.81	347.60	344.50	247.00	241.80
8 月	405.00	405.00	325.00	320.93	353.57	348.47	247.00	243.28
9 月	405.00	405.00	325.00	325.00	355.00	352.22	247.00	245.10
10 月	410.00	410.00	330.00	327.67	355.00	355.00	247.00	245.83

#### 4 结 语

汉江流域引调水工程及水库统一调度模型将信息服务模块、汉江干支流控制性水库群调度模块、汉江干流分段水资源调度配置模块进行有机集成,模块间通过数据关联的形式进行耦合。模型具有控制性水库群调节计算、分省级行政区、分河段水资源调

度配置功能,在汉江流域年度水量调度计划的编制中得到了有效的应用。通过与人工经验编制的结果进行对比,证明了模型的科学性和有效性。模型的建立提高了流域水资源管理信息化水平,为流域水资源调度管理提供了重要的技术支撑。

为更好地落实最严格水资源管理制度,高效开展流域水资源统一调度管理工作,下一步重点研究

方向包括:(1)在汉江流域引调水工程及水库统一调度模型的基础上,开发基于 B/S 架构的汉江流域水资源调度管理系统<sup>[23]</sup>,将汉江水资源调度各项工作模块化、流程化。(2)进一步优化模型,开展水库群及引调水工程联合调度研究及水量应急调度研究,使其更好地满足流域综合调度的需要。

#### 参考文献(References):

- [1] 钮新强,文丹,吴德绪.南水北调中线工程技术研究[J].人民长江,2005,36(7):6-8.(NIU X Q,WEN D,WU D X. Technologic issues of South-to-North Water Transfer project[J]. Yangtze River,2005,36(7):6-8.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-4179.2005.07.003.
- [2] 马立亚,吴泽宇,刘国强,等.汉江梯级水库群供水优化调度模型研究[A].中国水利学会2013年学术年会论文集[C].广州,2013:338-342.(MA L Y,WU Z Y,LIU G Q,et al. Study on optimal water supply operation model for cascade reservoirs of Hanjiang River [C].2013CHES Annual Conference,2013:338-342.(in Chinese))
- [3] 王光谦,刘家宏,李铁建.黄河数字流域模型原理[J].应用基础与工程科学学报,2005,13(1):1-8.(WANG G Q,LIU J H,LI T J. Digital watershed model of Yellow River[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2005,13(1):1-8.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1005-0930.2005.01.001.
- [4] 刘家宏,王光谦,李铁建.黄河数字流域模型的建立和应用[J].水科学进展,2006,17(2):186-195.(LIU J H,WANG G Q,LI T J. Digital watershed model of Yellow River construction and application [J]. Advances in Water Science,2006,17(2):186-195.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1001-6791.2006.02.007.
- [5] 刘家宏.黄河数字流域模型[D].北京:清华大学,2005.(LIU J H. Digital watershed model of Yellow River[D]. Beijing:Tsinghua University,2005.(in Chinese))
- [6] 郝庆凡,楚永伟,陈吕平.黑河水量调度方案的编制[J].人民黄河,2001,23(12):37-38.(HAO Q F,CHU Y W,CHEN L P. To make schemes for regulation of water in Hei River[J]. Yellow River,2001,23(12):37-38.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2001.12.019.
- [7] 赵勇,裴源生,于福亮.黑河流域水资源实时调度系统[J].水利学报,2006,37(1):82-88.(ZHAO Y,PEI Y S,YU F L. Real-time dispatch system for Heihe River basin water resources[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(1):82-88.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2006.01.014.
- [8] 刘荣华,魏加华,陈志祥,等.塔里木河流域水量优化调度模型研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(1):26-30.(LIU R H,WEI J H,CHEN Z X,et al. Research on optimal model of Tarim River water regulation system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2009,7(1):26-30.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-1683.2009.01.007.
- [9] 马立亚,雷晓辉,蒋云钟,等.基于DPSA的梯级水库群优化调度[J].中国水利水电科学研究院学报,2012,10(2):140-145.(MA L Y,LEI X H,JIANG Y Z,et al. Optimal operation of cascade reservoirs based on DPSA [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2012,10(2):140-145.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-3031.2012.02.011.
- [10] 李献新,安波,于茜,等.湖北汉江梯级水库群联合优化调度研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2013,11(1):64-69.(LI X X,AN B,YU Q,et al. Research on joint optimal in Han River operation of cascade reservoirs of Hubei Province[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2013,11(1):64-69.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-3031.2013.01.011.
- [11] 《丹江口水利枢纽调度规程(试行)》(水建管[2016]337号)[Z].北京:水利部,2016.(Regulation Plan of Danjiangkou hydro project (Trial), Department of construction and management of the Ministry of Water Resources[2016]337)[Z].2016
- [12] 张利升,张睿,孟明星.丹江口水利枢纽供水调度方式[J].南水北调与水利科技,2017,15(3):25-29.(ZHANG L S,ZHANG R,MENG M X. The study on water-supply scheduling ways of Danjiangkou hydro project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(3):25-29.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2017.03.005.
- [13] 张利升,张睿,王学敏,等.丹江口水利枢纽多目标兴利调度决策模型[J].人民长江,2016,47(22):105-109.(ZHANG L S,ZHANG R,WANG X M,et al. Decision-making on multi-objective operation of Danjiangkou Hydro project [J]. Yangtze River,2016,47(22):105-109.(in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.22.023.
- [14] 水利部关于印发《南水北调中线一期工程水量调度方案(试行)》的通知(水资源[2014]337号)[Z].北京:水利部,2014.(Circular of the Ministry of Water Resources on Issuing "water regulation scheme for the first phase of the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion (Trial)", Water Resources [2014]337)[Z].2014.(in Chinese))
- [15] 马立亚,吴泽宇,雷静,等.南水北调中线一期工程水量调度方案研究[J].人民长江,2018,49(13):59-64.



- (MA L Y, WU Z Y, LEI J, et al. Study on water amount regulation scheme for Stage I works of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion[J]. Yangtze River, 2018, 49 (13): 59-64. (in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.13.011.
- [16] 邓坤, 张璇, 杨永生, 等. 流域水资源调度研究综述[J]. 水利经济, 2011(29): 6: 23-27. (Deng K, ZHANG X, YANG Y S, et al. A review of basin water resource scheduling[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011(29): 6: 23-27. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-9511.2011.06.006.
- [17] 祝诗学, 梁忠民, 戴昌军, 等. 丹江口水库流域月尺度降雨与径流预报研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 96-101, 24. (ZHU S X, LIANG Z M, DAI C J, et al. Study on monthly rainfall and runoff prediction in Danjiangkou basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 96-101, 24. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.01.016.
- [18] 杨文发. 汉江上游地区大尺度分布式水文模型与气象模型耦合应用试验[J]. 水利水电快报, 2008, 29(8): 1-5, 21. (YANG W F. Application of coupling LSHM with MM5 Meteorological model for flow Forecasting in upper Hanjiang River[J]. Express Water Resources & Hydro-power Information, 2008, 29(8): 1-5, 21. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1006-0081.2008.08.002.
- [19] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (FENG S Y. Water resources management[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [20] 杨侃, 刘云波. 基于多目标分析的库群系统分解协调宏观决策方法研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 232-236. (YANG K, LIU Y B. System decomposition-coordination macro-decision method for reservoirs based on multi-objective analysis[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(2): 232-236. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2001.02.017.
- [21] 彭慧, 李光吉, 李维硕, 等. 沭水东调工程跨流域水库群联合供水研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 25-29. (PENG H, LI G J, LI W S, et al. Research on Joint water supply of multi-reservoirs of water diversion project from Shuhe River basin to Futuanhe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(6): 25-29. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.06025.
- [22] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 汉江 2015~2016 年度水量调度计划[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2015. (Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research. Water scheduling plan of Hanjiang River in 2015-2016[R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, 2015. (in Chinese))
- [23] 雷晓辉, 蔡思宇, 王浩, 等. 河流水资源调度关键技术及通用软件平台探讨[J]. 人民长江, 2017, 48(17): 37-45. (LEI X H, CAI S Y, WANG H, et al. Discussion on core technique and general software platform of river water resources regulation in China[J]. Yangtze River, 2017, 48(17): 37-45. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.17.009.

(上接第 115 页)

- [31] 王建红, 余启明, 杨俊仓. 基于 ArcGIS 和 Visual MODFLOW 的黑河流域中游平原区地下水数值模拟与预测[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(1): 80-87. (WANG J H, YU Q M, YANG J C. Numerical simulation and forecast of groundwater in the middle plains of Heihe River based on ArcGIS and Visual MODFLOW[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(1): 80-87. (in Chinese)) DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2016.01.016.
- [32] 鲁东霞, 张哲, 丁飒, 等. 河南粮食核心区建设规划地下水环境影响评价[J]. 农业环境与发展, 2009, 26(4): 59-64. (LU D X, ZHANG Z, DING S, et al. Groundwater environment impact assessment of Henan grain core area construction planning[J]. Agro-Environment and Development, 2009, 26(4): 59-64. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-4944.2009.04.018.
- [33] 太红礼. 宁夏固原北川地下水资源开发利用探讨[J]. 水利规划与设计, 2013(1): 23-24. (TAI H L. Exploitation and utilization of Beichuang groundwater resources in Guyuan, Ningxia[J]. Water Resources Planning and Design, 2013(1): 23-24. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-2469.2013.01.009.
- [34] 赵雨婷. 黄河中下游典型灌区地下水位时空演变特征与驱动机制[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016. (ZHAO Y T. Temporal and spatial characteristics and driving mechanism of ground typical middle and lower reaches of the Yellow River irrigation district [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power. (in Chinese))