

基于生活、生产和生态环境用水的水资源配置模型

尹明万¹, 谢新民¹, 王浩¹, 张海亮², 贾守喜²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 河南省安阳市水利局, 河南 安阳 455000)

摘要: 从实际需要出发探讨并给出了水资源系统及水资源配置模型的基本概念和定义; 研究了水资源系统网络图的绘制方法; 给出了用该图概化和表示系统中的需水、水源、工程以及水的运动等复杂关系的方法; 从时间结构和空间结构两个方面介绍了全面考虑生活用水、生产用水和生态环境用水要求的、系统反映各种水源及工程供水特点的水资源配置模型的建模思路和技巧, 给出了模型的基本任务和主要约束方程. 该模型在河南省安阳市水资源可持续利用综合规划中进行了实际应用, 推荐的配置方案合理, 计算速度很快. 该模型可以应用于大型复杂水资源系统.

关键词: 水资源系统; 水资源配置模型; 可持续利用; 安阳市

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2004)02-0005-04

当前国际上水资源系统规划的发展趋势, 一是对水资源系统结构、供求关系的描述更深入和具体, 更多地采用水文长系列分析方法; 二是从区域社会、经济、环境及生态持续发展的动态角度研究水资源工程布局与供需平衡^[1]. 自20世纪80年代初以来, 我国开展了一系列大型水资源项目, 有力地推动了水资源系统分析理论方法和模型技术的发展和运用. 这些项目所建立的复杂水资源配置模型, 主要研究的是如何满足生活、生产需水要求, 没有同时考虑生活、生产和生态环境的需水要求^[2~6].

本文模型是在中国水利水电科学研究院研制的水资源配置模型(它反映的因素相对比较全面, 在我国应用最广泛)的基础上改进的, 全面考虑了生活、生产和生态环境的需水要求.

1 水资源配置模型的基本概念及水资源系统网络图

1.1 水资源系统及水资源配置模型的概念

1.1.1 水资源系统的定义

《中国资源百科全书》(2000年)对水资源系统的定义是: 在一定区域内由可为人类利用的各种形态的水所构成的统一体. 显然这一定义是局限于水的范畴定义的. 本文从实际需要出发, 给出水资源系统的如下定义: 在一定区域内由可为人类及生态环境利用的各种形态的水以及与水存在、运动、演变有关的物体和社会所构成的系统.

1.1.2 水资源配置模型的定义

本文对水资源配置模型的定义是: 针对以供水为主要目的的水资源系统, 以系统分析理论、运筹学方法、知识规则、逻辑推理等为技术基础, 对各种工程措施和非工程措施进行适当组合和合理的联合调度运用, 以追求系统整体的可持续利用功能最优为目标的计算机模型.

该定义有几个要点: 首先, 水资源配置模型是计算机模型而不是物理模型, 其主要用途是合理地安排和调度水资源开发利用的工程措施和非工程措施, 配置水资源, 使水资源系统的可持续利用功能最优. 第二, 分析的问题可以是规划阶段的问题, 其重点是进行多种水利工程措施和非工程措施组合方案的分析比较, 推荐出合理的水利工程布局; 也可以是运行管理阶段的问题, 其重点是在已有水资源系统条件下合理地调度各种水源和工程使其发挥最大效益. 第三, 对“水资源系统整体的可持续利用功能最优为目标”要广义地理解, 充分体现实际需要和现实可行性.

1.2 水资源系统概化及系统网络图

建立水资源配置模型需要先对实际水资源系统进行抽象和概化, 并绘制系统网络图. 水资源配置模型可概化由五部分构成: ①基本物理元素(集合); ②各物理元素量度数据(参数及变量); ③物理元素之间的相互关系(约束条件)和系统协调准则(调度规则和目标函数); ④解决问题的方法; ⑤各物理元

基金项目: 国家基础研究重大项目(973计划)基金资助项目(G1999043602); 河南省水资源综合规划试点项目(安阳市 99-816-01)

作者简介: 尹明万(1959—), 男, 四川达县人, 高级工程师, 主要从事水资源系统分析研究.

素在此基础上所处的状态(结果)。

水资源系统中各类物理元素(水库工程、拦河闸、引水工程或扬水站、水资源计算单元、河渠道交汇点等)概化为节点,各节点间通过线段(河道或渠道等)连接,形成水资源系统概化网络图。在平面上不方便表示地下水库,则假定每个计算单元都有一个地下水库,统一不在网络图中标出。如果某单元实际上没有地下水,则可令其地下水库的库容和水量为零。水资源配置系统方案的生成以及对每一方案的详细供需平衡分析及流域水循环分析等都以水资源系统网络图为基础。凡是图上标明的水利工程、分区、河流及控制点或断面的有关问题,模型就能够给出详细的分析结果;如果图上没有,一般来说模型就不能给出具体结果。

2 水资源配置模型

2.1 建模的基本思路

在水资源系统描述方面,该模型以系统网络图为基础,采用了多水源(地表水、地下水、外调水及污水处理回用水)、多工程(蓄水工程、引水工程、提水工程、污水处理工程以及闸堰湖泊洼淀等)、多传输系统(包括当地地表水传输系统、外调水传输系统、弃水污水传输系统和地下水的侧渗补给与排泄系统)的描述法,使系统中的各种水源、水量在各处的调蓄情况及来去关系都能够得到客观的、清晰的描述,为得到正确结果打基础。

从模型的空间结构方面看,要抓住两条主线索:一条是水资源循环运动的线索,即沿流域自上而下,整个研究区域由各个流域及其不同层次的子流域组成。各种水资源的调查评价也是按照流域分区进行的。另一条是社会、经济、生态环境的需水线索,人口、经济、需水、用水、耗水、水利工程等统计资料多是依照各级行政分区统计的。水资源配置模型需要按照流域分区和行政分区获取资料和出成果。按照这两条线索相结合的要求划分计算单元。

从模型的时间结构方面看,也是抓住两条主线索:一条是反映水文变化规律的时间线索,也就是历史水文资料系列,即从哪一年到哪一年以及年内的时间层次(如月、旬、日等,根据精度需要和资料获得的可能性确定);另一条是反映水资源利用规划与管理需要的时间线索,也就是规划水平年以及年内的时间层次。按照这两条线索相结合的要求确定计算时段(最短的时间层次)。

在运行方案上考虑了对各个工程组合方案,各水平年的需水量、来水量的预测,以及污水处理与回用能力、节水水平、地下水可开采量、工程运行规则、

各种参数等。

在结果分析上包括了各系统元素的水平衡分析、系统内各分区的供水能力及供水量分析、供水效益分析、水源利用情况、弃水情况、污水排放情况、工程分水情况、河流与渠道过流情况、河道水质状况、系统发电量等,并对各模拟计算方案进行综合分析比较,寻找出合理可行的规划方案。

在软件实现方面,采用 GAMS 语言编制分析计算核心模块,采用 Foxpro 语言编制用户界面以及实现数据库管理。

2.2 模型的基本任务

水资源配置模型是研究和解决水资源问题的一种重要模型。它的主要任务是:①系统配置方案的生成;②每一系统方案的优化调度及供需平衡分析;③每一方案的水平衡分析;④各个系统方案的综合比较,推荐最佳的配置方案;⑤诊断水资源系统的薄弱环节等等。

2.3 主要约束方程

下面给出水资源配置中,任意一年水资源供需平衡设计的主要约束方程。方程中关键符号的含义为: i 代表水库; j 代表计算单元及与单元对应的地下水库; k 代表渠道或河流节点; t 代表计算时段; l 代表渠道或河流; s 代表用水种类, $s = 1, 2, 3, 4, 5$ 依次为城市用水(包括生活用水和工业用水)、农业用水、河道外生态环境用水、河道内生态环境用水、发电用水; α 为降雨入渗补给系数; β 为灌溉入渗补给系数; γ 为地表供水河流渠道渗漏补给系数; φ 为潜水蒸发系数; $ls(), ld(), lo(), lg()$ 依次为地表水供水河流渠道集合、外调水供水河流渠道集合、弃水河流渠道集合、地下水联系集合,括号内有两个参数,分别为起点和终点; $u(), d()$ 分别表示上游对象集合和下游对象集合,括号内有 1 个参数,为对象,如水利工程、计算单元、节点等。式中没有被运算符符号隔开的连续几个字母表示同一个变量,变量名第 4 个字母 A, I, E 分别表示农业供水、工业(包括城镇生活)供水和生态供水; V 为水库蓄水库容; C 为有关系数。

a. 地表水库当地水平衡方程:

$$\begin{aligned}
XRSV_{i,t} = & XRSV_{i,t-1} + PRSF_{i,t} + \\
& \sum_{b(u(i),i)} (PCSC1_{ls(u(i),i)} \cdot XCSI_{ls(u(i),i),t} + \\
& PCSC2_{ls(u(i),i)} \cdot XCSA_{ls(u(i),i),t}) + \\
& \sum_{lo(u(i),i)} (XCSR_{lo(u(i),i),t-1} + \\
& PCSC3_{lo(u(i),i)} \cdot XCSO_{lo(u(i),i),t}) - \\
& \sum_{b(i,d(i))} (XCSI_{b(i,d(i)),t} + XCSA_{ls(i,d(i),t}) - \\
& \sum_{lo(i,d(i))} XCSO_{lo(i,d(i),t}) - PRSL_i \cdot \\
& \frac{1}{2}(XRSV_{i,t-1} + XRSV_{i,t}) \quad \forall t, i \quad (1)
\end{aligned}$$

b. 地表水库外调水平衡方程:

$$\begin{aligned}
 XRDV_{i,t} = & XRDV_{i,t-1} + PRDF_{i,t} + \\
 & \sum_{ld(u(i),i)} \left(PCSC1_{ld(u(i),i)} \cdot XCDI_{ld(u(i),i),t} + \right. \\
 & \left. PCSC2_{ld(u(i),i)} \cdot XCDA_{ld(u(i),i),t} \right) - \\
 & \sum_{ld(i,d(i))} (XCDI_{ld(i,d(i)),t} + XCDA_{ld(i,d(i)),t}) - \\
 & \sum_{b(i,d(i))} XCDO_{b(i,d(i)),t} - PRSL_i \cdot \\
 & \frac{1}{2} (XRSV_{i,t-1} + XRSV_{i,t}) \quad \forall t, i \quad (2)
 \end{aligned}$$

c. 水库分水量限制. 对于有些向多个计算单元供水的地表水库, 如果各地区的供水有约定, 调度就必须遵守.

$$\begin{aligned}
 XCSI_{l(i,d(i)),t} + XCSA_{l(i,d(i)),t} + XCDI_{l(i,d(i)),t} + XCDA_{l(i,d(i)),t} = \\
 PCSD_{l(i,d(i))} \cdot \left(\sum_{ls(i,d(i))} (XCSI_{ls(i,d(i)),t} + XCSA_{ls(i,d(i)),t}) + \right. \\
 \left. \sum_{ld(i,d(i))} (XCDI_{ld(i,d(i)),t} + XCDA_{ld(i,d(i)),t}) \right) \\
 \forall t, i, l(i, d(i)) \quad (3)
 \end{aligned}$$

d. 计算单元的城市供水平衡方程:

$$\begin{aligned}
 PZWI_{j,t} = XZSF1_{j,t} + \sum_{ls(u(j),j)} PCSC1_{ls(u(j),j)} \cdot XCSI_{ls(u(j),j),t} + \\
 \sum_{ld(u(j),j)} PCSC1_{ld(u(j),j)} \cdot XCDI_{ld(u(j),j),t} + \\
 XZGI_{j,t} + XZTI_{j,t} + XZMI_{j,t} \quad \forall t, j \quad (4)
 \end{aligned}$$

e. 计算单元的农村供水平衡方程:

$$\begin{aligned}
 PZWA_{j,t} = XZSF2_{j,t} + \\
 \sum_{b(u(j),j)} PCSC2_{b(u(j),j)} \cdot XCSA_{b(u(j),j),t} + \\
 \sum_{ld(u(j),j)} PCSC2_{ld(u(j),j)} \cdot XCDA_{ld(u(j),j),t} + \\
 \sum_{b(u(j),j)} XCTZ_{lo(u(j),j),u-1} + XCSR_{b(u(j),j),t-1} + \\
 PCSC3_{lo(u(j),j)} \cdot XCSO_{lo(u(j),j),t-1} + \\
 XZGA_{j,t} + XZTA_{j,t} + XZMA_{j,t} + XZSN_{j,t-1} - \\
 XZSN_{j,t} - \sum_{lo(u(j),j)} XCSO_{lo(u(j),j),t} \quad \forall t, j \quad (5)
 \end{aligned}$$

f. 计算单元的生态供水平衡方程. 生态需水分河道内需水与河道外需水, 要分别进行平衡. 单元河道外生态供水采用方程(6)计算. 原则上所有地表水、地下水、外调水、污水回用水及上游弃水、回归水等均可以参加河道外生态需水的平衡. 河道外生态需水与生活需水和生产需水要求不一样, 生活需水和生产需水要求每一个时段必须平衡, 而河道外生态需水弹性要大得多, 可以每个时段刚好平衡, 也可以不平衡, 只要每个时段的供需量在允许的上下限之间, 而全年或两三年的供水量与需水量平衡即可. 河道内需水的供需平衡约束方程主要有: 最小流量约束、年最小过水量约束、河道水质约束等. 本模型在安阳市的规划中, 对于该市河道内需水选择的是在重点保护河段上建立水量、水质约束方程. 方程式

比较多、比较复杂, 在此省略.

$$\begin{aligned}
 PZWE_{j,t} = XZSF3_{j,t} + \sum_{b(u(j),j)} PCSC3_{b(u(j),j)} \cdot XCSA_{b(u(j),j),t} + \\
 \sum_{ld(u(j),j)} PCSC3_{ld(u(j),j)} \cdot XCDA_{ld(u(j),j),t} + \\
 \sum_{lo(u(j),j)} (XCTLE_{lo(u(j),j),t-1} + XCSR_{b(u(j),j),t-1} + \\
 PCSC3_{b(u(j),j)} \cdot XCSOE_{lo(u(j),j),t} + XZGE_{j,t} + \\
 XZTE_{j,t} + XZME_{j,t} + XZSNE_{j,t-1}) \quad (6)
 \end{aligned}$$

g. 地下水库水量平衡方程:

$$\begin{aligned}
 XZGV_{j,t} = XZGV_{j,t-1} + PZGD_{j,t} + \\
 \alpha \cdot PZPW_{j,t} + \beta \cdot XZWA_{j,t} + \\
 \gamma \cdot \left(\sum_{b(u(j),j)} PCSC2_{b(u(j),j)} \cdot XCSA_{b(u(j),j),t-1} + \right. \\
 \left. \sum_{lo(u(j),j)} PCSC3_{lo(u(j),j)} \cdot XCSO_{lo(u(j),j),t-1} \right) + \\
 \sum_{lg(u(j),j)} XZGO_{lg(u(j),j),t-1} - (XZGJ_{j,t} + XZGA_{j,t}) - \\
 \sum_{lg(j,d(j))} XZGO_{lg(j,d(j)),t-1} - \varphi_j \cdot (XZGV_{j,t-1} + \\
 XZGV_{j,t}) \quad \forall t, j \quad (7)
 \end{aligned}$$

2.4 目标函数

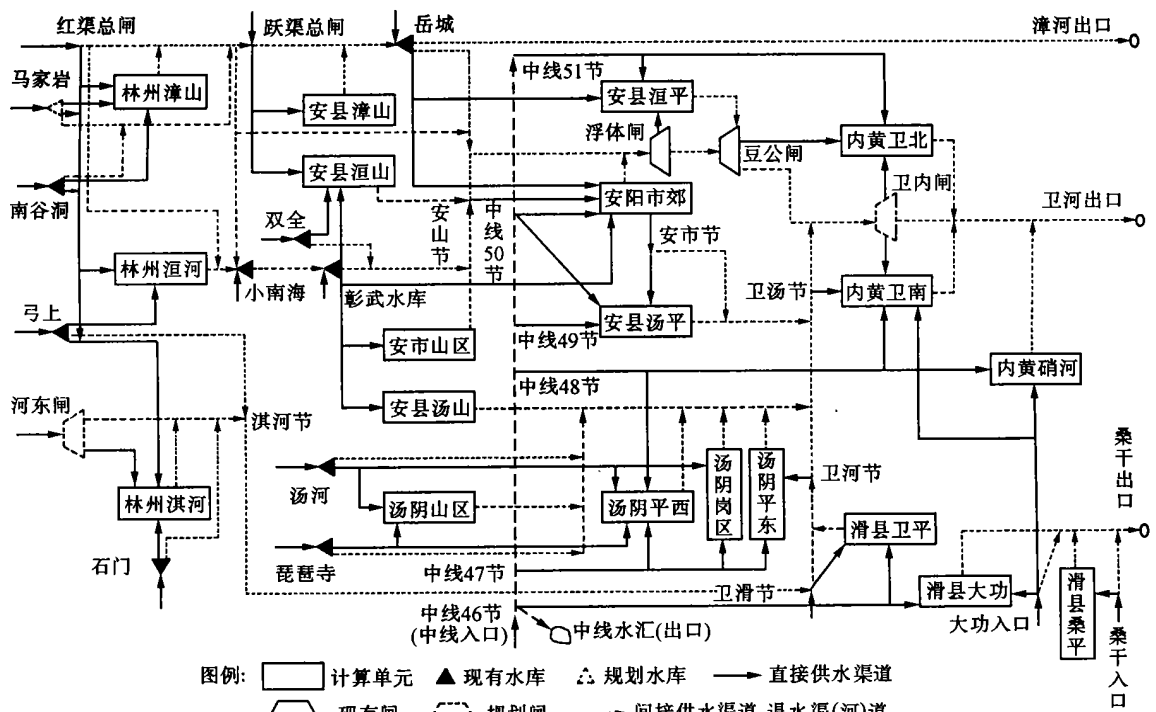
模型目标函数为

$$\max\{B\} = \max\left\{ \sum_{s=1}^5 W_s \cdot f_s \right\} \quad (8)$$

式中: W_s 为权重, f_s 为用水效益. 其他一些约束方程和效益计算公式, 譬如河流渠道节点的分水约束(包括引、提水)、计算单元河网调蓄约束、地下水补给、地下水开采限制、地表径流的利用、灌溉入渗水量、污水排放量、污水处理回用、节点地表水平衡、节点外调水平衡等等, 受篇幅限制, 在此不作论述.

3 模型在安阳市水资源规划中的应用

河南省安阳市水资源系统网络图见图1, 系统要素及配置模型规模见表1. 在安阳市水资源可持续利用综合规划中, 按照水资源三次平衡的思想应用本模型对13个系统方案(每方案又包括1998年、2010年、2015年和2030年四个水平年的子方案)进行了长系列模拟计算. 一次平衡分别考虑了允许地下水超采和不允许地下水超采两种情况. 一次平衡结果给出了不采取有效措施的水资源供需平衡动态趋势. 二次平衡考虑了三种情况: 一是保持现状水平年地下水超采程度, 各规划水平年都采取了城市污水处理及回用措施, 除此之外没有新建其它供水工程; 二是各水平年都不允许超采地下水, 都采取了城市污水处理及回用措施, 没有新建其它供水工程; 三是各水平年不允许超采地下水, 但都采取了城市污水处理及回用措施, 新建了当地供水工程. 二次平衡结果给出了安阳市只依靠当地水资源和现有外调水



量情况下的水资源供需动态平衡趋势及缺水变化趋势。三次平衡所拟订的方案都不允许超采地下水, 但都配置了跨流域调水工程。

表1 安阳市水资源系统要素及优化配置模拟模型规模

要素	数目	要素	数目
计算单元	20个	河流出境口	4处
汇总行政分区	6个	地下水库	20个
水源种类	4种	河网调蓄库	20个
需水种类	5种	重点保护河段控制点	2个
水库 ^①	9座	水平年	4
跨流域调水工程	5个	水文系列年	30
拦河闸	4座	每一水文年中的计算时段	12个
直接供水渠道	51条	河流或渠道交汇节点	16个
间接供水、退水渠(河道)	54条	非零元素	25000~30000个

注: ①其中已建成水库8座, 规划水库1座; 本次只把岳城水库向安阳市的供水纳入系统调度, 但是不调度岳城水库。

通过三次平衡计算和多方案分析与对比发现, 该市的最佳配置方案与南水北调中线方案2010年是否通水有密切关系。若2010年南水北调中线工程建成通水, 则最佳推荐方案当属F方案; 若2015年南水北调中线工程才能建成通水, 则最佳推荐方案为M方案。受篇幅限制, F和M两方案的节水及水源配置情况在此省略。与F方案比较, M方案在水资源工程布局上有些重复建设, 这是为了满足2015年以前的供水需要。南水北调中线工程的进度不是安阳市所能决定的, 因此, 我们推荐了F和M两个方案作为合理配置方案, 供安阳市领导根据今后的实际情况进行决策。以F方案2030水平年为例, 河道

外总供水量22.86亿 m^3 , 其中生活用水占16.90%, 工业用水占31.75%, 农业用水占46.33%, 河道外生态环境用水占5.02%; 不同水源的供水比例为当地地表水30.65%、地下水44.97%、回用水2.62%、外流域调水21.76%。河道内用水表现为年均总过水量和各月过水量过程。河道内用水实际上与河道外其它用水有较大程度的重复利用。

本文介绍的方法和模型在安阳市水资源综合规划中经受了应用检验, 分析计算结果合理可靠, 计算速度很快。该模型可以推广应用于大型复杂水资源系统。值得注意的是, 水资源配置问题是非常复杂的, 配置模型还需要不断在实际应用中改进和完善。

参考文献:

- [1] 方乐润. 水资源工程系统分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [2] 叶永毅, 黄守信, 秦大庸. 水资源大系统优化规划与优化调度经验汇编[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [3] Huffaker R. The role of prior appropriation in allocating water resources into the 21st century [J]. Water Resources Department, 2000, 16(2): 265~ 273.
- [4] 许新宜, 王浩, 甘泓, 等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [5] 尹明万, 甘泓, 汪党献, 等. 智能型水供需平衡模型及其应用[J]. 水利学报, 2000(10): 71~ 76.
- [6] Dai Tawei, Labadie J W. River basin network model for integrated water quantity/ quality management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001(5): 295~ 305.

(收稿日期: 2003-09-08 编辑: 熊水斌)

New perceptions about sustainable development of paddy irrigation in Asia/ XU Zhi-fang, et al (*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Wuhan Univ., Wuhan 430072, China*)

Abstract: A review is made of several international conferences on sustainable development of paddy irrigation in Asian countries, which have been held in recent years in Japan and Korea, from the angles of society and culture, hydrological circulation, and ecology and biology, with emphasis placed on the multi-functional effect of the paddy irrigation system. It is stressed that the system can generate great social and economic benefit in protection and improvement of ecologic environment. So, it is necessary to re-consider and re-evaluate the system and to reasonably allocate the investment. Finally, some suggestions are made for adjustment of the agricultural structure, improvement of rice quality, enhancement of the competitive capacity of rice in the international market, and protection of environment.

Key words: paddy irrigation system; multi-functional effect; Asian country

Water resources allocation model based on domestic, productive, and ecologic-environmental water consumption/ YIN Ming-wan, et al (*China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China*)

Abstract: For overall consideration of domestic, productive, and ecologic-environmental water demand and systematic reflection of the characteristics of various water sources and water supply to projects, a water resources allocation model is developed in this paper. The basic concept and definition of the water resources system and the water resources allocation model are presented from the view of practical water requirement. The methods of how to draw the network map for the water resources system and how to use it to generalize and express the complicated relationships between the volume of water demand, water sources, projects, and water movement in the system are studied. Then, the thought and techniques for the development of the model are introduced from the angles of time and spatial structures, and the basic tasks and main constraint equations of the model are presented. The application of the model to comprehensive planning for sustainable utilization of water resources in Anyang City of Henan Province shows that the calculated result is correct, the allocation schemes recommended are reasonable, and the calculating speed is fast. Therefore, the model can be

used for large complicated water resources systems.

Key words: water resources system; water resource allocation; sustainable utilization; Anyang City

Simulation of operation for Three-Gorges cascade reservoir and its realization: to develop an optimal model with a certain volume of outflow from the Gezhouba Reservoir/ LIAN Jia-yu, et al (*College of Hydropower and Information Engineering, HUST, Wuhan 430074, China*)

Abstract: Aiming at the short-term daily optimal operation of the Three-Gorges cascade power plant, an optimal operation system is developed for the Three-Gorges cascade reservoir. The dynamic programming method is adopted to compile programs for the optimal model to search for a maximal efficiency of power generation of the cascade power plant with a certain volume of outflow from the Gezhouba Reservoir. The system is simulated, and result is satisfactory.

Key words: short-term daily optimal operation; dynamic programming; simulation; Three-Gorges Reservoir; Gezhouba Reservoir

Urban water saving analysis for water supplied regions on the middle and east routes of South-to-North Water Transfer Project/ QIN Fei-xing, et al (*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Based on the principle of water saving first and water diversion later, an analysis is made of the current situation of domestic water consumption and water saving in the water supplied regions on the middle and east routes of the South-to-North Water Transfer Project. The achievements of water saving in these regions are summarized, and their potentials in water saving and the gap between the level of these regions and the world advanced level are pointed out. According to "2001's development planning for technological progress in urban water saving in China", the target of urban water saving from 2010 to 2030 for these regions and corresponding measures are put forward, and the volumes of water to be required and to be saved are also predicted. It is verified that water saving in these regions has generated great benefits, and the investment is far lower than that for the construction of water supply plants.

Key words: South-to-North Water Transfer; urban domestic water consumption; water saving

Hydrochemical characteristics in Shule River basin and environment protection/ ZHOU Chang-jin, et al