

京津唐地区水资源大系统供水规划 和调度优化的递阶模型*

刘健民 张世法 刘 恒

(水利部南京水文水资源研究所 南京 210024)

摘要 应用大系统递阶分析的原理和方法, 针对京津唐地区水资源大系统供水规划和调度问题, 建立了京津唐地区水资源大系统供水规划和调度优化三级递阶模型和三层递阶模拟模型, 提出模拟技术和优化方法相结合的求解方法, 并应用该模型对2000、2020水平年近40个组合方案进行运算, 对其中较好的20个方案运用所建立的京津唐水资源规划决策支持系统进行多目标综合评价和按优排序, 并提出了具体建议。

关键词 大系统递阶分析 水资源规划 供水工程优化调度

1 引 言

京津唐地区包括北京市、天津市及河北省的唐山市、秦皇岛市和廊坊地区。京津唐水资源系统的供水主要由流经该区的河川径流、地下水及少量已利用的污水和海水组成; 其用水主要是城市生活、工业和农业灌溉用水。该水资源系统的特点: (1)需水量大, 而水资源短缺。全区人均占有水资源量 486m^3 , 仅为全国人均水资源量的 $1/5$, 且随上游地区用水的增长, 入境水量渐减, 水资源供需矛盾进一步加剧。(2)水资源开发利用程度高。区内已修建了官厅、密云、潘家口等大型水库12座、中小型水库550多座、大型水闸和扬水站百余座和机电井约20万眼, 可供开发的新供水工程已经不多。(3)地下水超采严重。70年代以来, 对水资源的需求量剧增, 在地表入境水量渐减的同时又遇上连续枯水年, 只能大量开采地下水, 由于采大于补, 部分地区形成地下水位降落漏斗, 如不加控制, 将产生严重的环境生态问题。

随着城市建设和工农业生产的发展, 水资源紧缺已成为本区国民经济发展的制约因素。为此, 提出过许多解决本区水资源紧缺的措施。在开源方面, 有兴建新的供水工程, 如张坊水库及引水济京工程、大坝沟门水库及引滦入潮工程、桃林口水库及引青济秦二期工程、引黄济津工程及南水北调东线和中线工程等; 有兴建或扩大污水处理厂提高污水回用量, 有兴建海水淡化厂或海水利用工程等。在节流方面, 有提高工厂用水的重复利用率、建设节水型城市, 有采用喷、滴灌等灌溉新技术建设节水型农业等。这些工程与措施组成众多的方案,

本文于1991年11月25日收到, 1992年9月8日收到修改稿。

* 本文根据“七五”国家重点科技攻关项目第57-03-06专题“大系统水资源供水规划和调度优化研究”的部份成果撰写。

如何在满足本区不同阶段的需水要求、工程经济指标较好、政策与技术上可行等准则基础上, 对这些方案进行排序择优, 是目前亟待回答的问题。此外, 为了充分、合理地利用本区水资源, 应加强水资源管理, 对已建水库群和地下含水层进行优化调度, 以提高水资源利用率和城市生活、工业用水的供水保证率。

针对上述问题, 本文采用大系统递阶分析的方法建立了京津唐水资源大系统递阶模型, 并给出了相应的求解技术。

2 京津唐水资源大系统递阶模型的建立

京津唐水资源系统包括以北京、天津、唐山等市和地区 3.3 万余 km^2 平原区为供水对象的用水系统, 以及为该用水系统服务的官厅等 10 余座水库及相应的引水干渠和该平原区对应的地下含水层组成的供水系统, 整个系统的示意图如图 1。现状, 该系统可视为由北京、引滦京津和冀东三个联系较弱的子系统所组成。但将来在某些规划工程建成后, 它们将构成统一的大系统。对这样一个跨省、市和跨流域的大系统, 由于供水水源包括地表水、地下水、污水回用及海水等多种水源, 在比较规划方案时, 除考虑通常的供水量指标和保证率外, 还要考虑与地下水超采和污水回用有关的生态环境目标; 由于系统跨二市一省, 还要考虑各行政区间利益冲突与协调这一政策性目标。另外, 供水系统除以城市供水为主外, 还涉及灌溉、发电、防洪和改善水质等用途, 因此这是一个多目标、多用途的复杂水资源大系统。

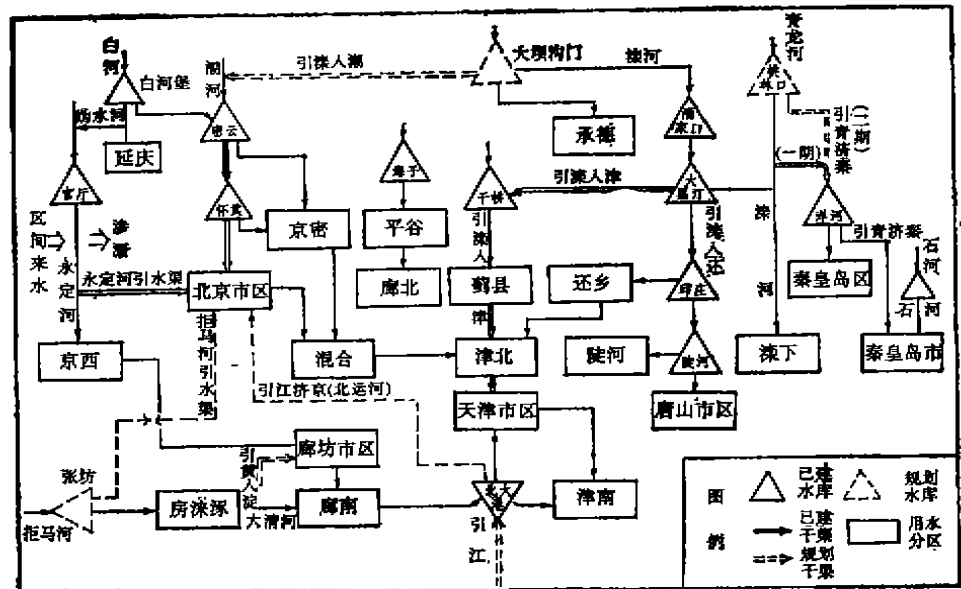


图 1 京津唐水资源系统示意图

Fig. 1. Sketch map of JJJT water resources system

对于这样复杂的系统, 试图用单一的数学模型来描述并用某一最优化技术求解, 是相当困难的。目前, 常用大系统递阶分析的理论和方法来解决这类问题。美国 Y. Haimes 对供水为主的水资源系统曾提出一个递阶模型^[1], 国内一些学者曾加以改进和引用^[2], 该模型

在对供、需水模型进行协调时,采用使净效益现值极大化为目标函数。鉴于我国经济体制及资料积累的具体情况,要计算不同用水户的供水效益是有困难的。更主要的是,经济效益只是要考虑的目标之一,对于多目标问题,Haimes模型的应用就受到限制。根据京津唐水资源系统的具体问题,提出图2所示的递阶模型。

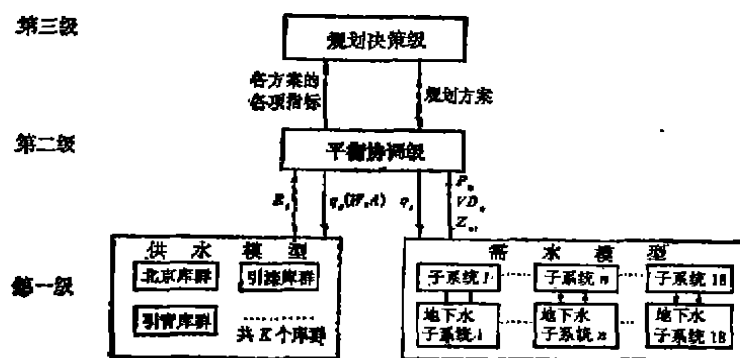


图2 京津唐水资源系统供水规划和调度优化递阶模型

Fig. 2. Hierarchical model of optimal planning and operation for water supply in JTT water resources system

首先,将整个水资源系统分解为需水子系统和供水子系统作为递阶模型的第一级。供水子系统的输出之一——供水量即为需水子系统的输入,而需水子系统向供水子系统提出需水要求,后者据此考虑向需水子系统供水。第二级平衡协调级依关联预估法原理先预估供水变量 q_i ,它是库群调度函数(图)、配水规则及需水过程的函数。供、需水子系统分别运行得到的有关信息反馈给协调级,后者再按要求的目标修改配水系数和用户供水权重等以调整 q_i ,如此反复迭代,直至协调级的目标被优化为止。因此,预估关联变量 q_i 是本模型的协调变量。第三级是规划决策级。现分述于下。

2.1 需水模型 由于系统较大,模型按地表水水系结合供水系统及行政区划等因素将全系统划分为18个子系统。各子系统包括各用户及其输水系统、中小型水库群、未经调节的当地可利用水资源、污水处理回用系统及上游子系统的排水和弃水等。此外,根据本区水资源紧缺及地下水普遍超采的现状,采取优先充分利用地表水的原则,如仍不能满足需水,再开采地下水补足。所以,将与各需水子系统对应的地下水子系统视为当地水资源而包括在需水模型中。需水模型的功能是根据预估的 q_i 结合各子系统其他可利用的地表水资源,在各子系统和各用户间进行优化分配,目的是充分利用地表水,尽量少用地下水。如此可得各子系统水资源供需平衡指标,包括各子系统城市生活、工业和农业等用户需水的满足程度(供水保证率 $P_n^a = (p_{n1}^a, p_{n2}^a, p_{n3}^a)$)和缺水率 $VD_n^a = (vd_{n1}^a, vd_{n2}^a, vd_{n3}^a)$ 地下水开采量 G_n^a 和地下水埋深 Z_n^a 等,将这些指标反馈到协调级。据此,可建立如下线性规划模型。

$$\text{目标函数} \quad \max \left\{ \sum_{n=1}^{18} \sum_{t=1}^T (w_n S_{nt}^a + w_i S_{nt}^i + w_a S_{nt}^a) \right\} \quad (1)$$

$$\text{约束条件} \quad S_{nt}^a + S_{nt}^i + S_{nt}^a = S_{nt} \quad \forall n, t \quad (2)$$

$$S_{nt} = \sum_{j=1}^M \alpha_{nj} \xi_{nj} q_{jt} \quad \forall n, t \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^{18} \alpha_{nj} = 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$S_{nt} + Q_{nt}^u + R_{nt} + W_{nt} + SE_{nt} - Q_{nt}^d + G_{nt} \leq DE_{nt} \quad \forall n, t \quad (5)$$

$$DE_{nt}^u + DE_{nt}^i + DE_{nt}^a = DE_{nt} \quad \forall n, t \quad (6)$$

$$\underline{DE}_{nt}^u \leq S_{nt}^u + OR_{nt}^u \leq DE_{nt}^u \quad \forall n, t \quad (7)$$

$$\underline{DE}_{nt}^i \leq S_{nt}^i + OR_{nt}^i \leq DE_{nt}^i \quad \forall n, t \quad (8)$$

$$\underline{DE}_{nt}^a \leq S_{nt}^a + OR_{nt}^a \leq DE_{nt}^a \quad \forall n, t \quad (9)$$

$$G_{nt} \leq GC_n \quad \forall n, t \quad (10)$$

$$Z_{nt} \leq Z_{n, \max} \quad \forall n, t \quad (11)$$

式中 S_{nt}^u 、 S_{nt}^i 、 S_{nt}^a 分别为 t 时段分配给第 n 子系统的城市生活、工业和农业的净供水量; w_u 、 w_i 、 w_a 分别为城市生活、工业、农业供水量的权重, 可根据各用户的相对重要性或各用户单位供水量的净效益而设定, 计算结果如不满足要求的供水保证率, 可加以调整; T 为运行期的总时段数, 采用 1956 年 7 月至 1988 年 6 月共 32a 的同步资料, 汛期 7 月、8 月以旬为单位时段, 其余以月为单位时段, 全年共 16 个时段, $T = 512$; S_{nt} 为 t 时段分配给第 n 子系统的净供水量; q_{jt} 为时段 t 水库 j 的供水量; α_{nj} 、 ξ_{nj} 分别为 j 库向第 n 区的供水分配系数及输水渠的有效利用系数; Q_{nt}^u 为时段 t 上游子系统流入子系统 n 的水量; Q_{nt}^d 为时段 t 第 n 子系统流入下游子系统的水量, 不包括未经处理的污水; R_{nt} 、 W_{nt} 、 SE_{nt} 、 G_{nt} 分别为 t 时段第 n 子系统的当地可利用地表水量、污水处理回用量、海水利用量和地下水开采量; DE_{nt} 、 DE_{nt}^u 、 DE_{nt}^i 、 DE_{nt}^a 分别为 t 时段第 n 子系统的总需水量及城市生活、工业、农业的需水量; \underline{DE}_{nt}^u 、 \underline{DE}_{nt}^i 、 \underline{DE}_{nt}^a 分别为 t 时段第 n 子系统城市生活、工业、农业应满足的需水量下限; OR_{nt}^u 、 OR_{nt}^i 、 OR_{nt}^a 分别为 t 时段第 n 子系统中除水库的净供水量外可用于城市生活、工业和农业的其他水资源总量; GC_n 为第 n 子系统开采地下水的能力; Z_{nt} 、 $Z_{n, \max}$ 分别为第 n 子系统时段 t 的地下水埋深及允许的地下水极限埋深。

2.2 供水模型 由地表水库群及其输水干渠组成。现状, 北京子系统有官厅等 4 库组成的库群及海子水库; 引滦京津系统有潘家口等 5 库组成的库群; 冀东子系统有洋河、石河水库组成的库群。规划方案中, 北京子系统增加张坊水库, 冀东子系统增加桃林口水库, 大坝沟门水库引滦入潮方案则将北京、引滦京津子系统联为一体进行调度; 对南水北调东线济京、津方案, 则要考虑上述库群与引江水量的联合补偿调度。当子系统库群的水库数不多于两个时 (北京子系统库群概化为两库), 采用随机动态规划模型, 可得优化调度图, 否则采用确定性动态规划模型。如对引滦京津 5 库系统采用了双状态动态规划模型, 结合多元回归或逐步回归法求得 5 库联合优化调度的调度函数。动态规划模型中, 阶段变量为时间变量 t , t 取离散值, 对于随机动态规划 $T = 16$, 确定性动态规划 $T = 512$; 状态变量为时段初水库蓄水量, 决策变量为 t 时段水库供水量 q_t 或时段末水库蓄水量 V_{t+1} , 效益函数为

$$f_t(q_t) = w_u q_{t,u} + w_i q_{t,i} + w_a q_{t,a} + w_o q_{t,o} \quad (12)$$

对于随机动态规划模型, 目标函数是使运行期的效益期望值极大化, 通过动态规划逆时序逆

推公式求得。对于确定性动态规划模型, 目标函数为全运行期效益函数之和极大化, 通过动态规划顺时序递推公式求得。约束条件有

$$V_{j,t,\min} \leq V_{jt} \leq V_{j,t,\max} \quad \forall j, t \quad (13)$$

$$V_{j,t+1} = V_{jt} + Q_{jt} + q_{jt}^u - q_{jt} - q_{jt}^d - Y_{jt} - E_{jt} \quad \forall j, t \quad (14)$$

$$q_{jt} = q_{jta} + q_{jti} + q_{jta} + q_{jte} \quad \forall j, t \quad (15)$$

$$\sum_{n=1}^{n_1} \underline{GDE}_{nt}^a \leq q_{jta} \leq \sum_{n=1}^{n_1} \overline{GDE}_{nt}^a \quad \forall j, t \quad (16)$$

$$\sum_{n=1}^{n_1} \underline{GDE}_{nt}^i \leq q_{jti} \leq \sum_{n=1}^{n_1} \overline{GDE}_{nt}^i \quad \forall j, t \quad (17)$$

$$\sum_{n=1}^{n_1} \underline{GDE}_{nt}^a \leq q_{jte} \leq \sum_{n=1}^{n_1} \overline{GDE}_{nt}^a \quad \forall j, t \quad (18)$$

$$q_{jt} + q_{jt}^d \leq qc_j \quad \forall j, t \quad (19)$$

式中 q_{ta} 、 q_{ti} 、 q_{te} 、 q_{td} 分别为 t 时段直接向用户供水的 M 个水库供给城市生活、工业、农业和发电专用(指供水不能结合生活、工农业需水的那部分发电用水)的水量, $q_{ta} = (q_{ta1}, \dots, q_{taM})$, 余类推; w_e 为发电专用水量的权重; V_{jt} 、 $V_{j,t,\min}$ 、 $V_{j,t,\max}$ 分别为 j 水库在 t 时段初的蓄水量、允许的最小与最大蓄水量; Q_{jt} 、 q_{jt}^u 、 q_{jt}^d 分别为 j 水库 t 时段的区间入库径流量、上水库放入 j 库的水量和放入下一级水库的 j 库调节水量; Y_{jt} 、 E_{jt} 分别为 j 水库 t 时段的弃水量与蒸发渗漏损失水量; q_{jta} 、 q_{jti} 、 q_{jte} 、 q_{jtd} 分别为水库 j 在 t 时段对生活、工业、农业与发电专用的供水量, 它们按用户权重大小的优先序分配, 即 q_{jt} 先满足生活需水, 余下再供给工业需水, 依次类推; n_1 为由水库 j 供水的子系统数; \underline{GDE}_{nt}^a 、 \underline{GDE}_{nt}^i 、 \underline{GDE}_{nt}^a 及 \underline{GDE}_{nt}^i 、 \underline{GDE}_{nt}^a 、 \underline{GDE}_{nt}^a 分别为 t 时段第 n 子系统的生活、工业、农业毛需水量的下限及毛需水量, 如 $\underline{GDE}_{nt}^a = \underline{DE}_{nt}^a / \xi_{n1}$, 余类推; qc_j 为与水库 j 相应的输水渠道过水能力; 其余符号同前。

供水模型根据协调级预估的库群供水过程 q_t , 建立水库群优化调度的动态规划模型, 求得库群联合运行的优化调度函数(图)。据此对库群的 32a 入库径流系列逐时段进行调度, 可得库群运行指标 R_t , 主要包括库群给各用户的供水过程、弃水量等, 反馈给协调级。

2.3 平衡协调级 按大系统递阶分析的关联预估原理^[3], 协调级根据全系统用户的需求要求, 预估它们的供水过程 q_t , 供、需水模型据此按前述方法进行优化, 然后将求得的指标反馈到协调级, 后者根据这些指标和本级的目标修正关联预估值。本级是多目标规划问题, 考虑的目标有: (1) 各用户的供水保证率要求达到规定值及各子系统间同一类用户的供水保证率比较均衡; (2) 各子系统间同一类用户的缺水率比较均衡; (3) 各子系统的地下水位相差不要太大, 避免某些子系统因地下水过份集中开采形成漏斗。因此, 修正关联预估值 q_t 时, 要调整权重向量 $W = (w_a, w_i, w_e)$ 及供水分配系数矩阵 A , A 是 $N \times M$ 维矩阵 (N 为子系统的个数, M 为水库的个数), 矩阵元素为 a_{nj} 。当某类用户的供水保证率普遍达不到规定值时, 可加大其权重, 而对各子系统间的供水保证率或缺水率不够均衡等情况, 可调整 a_{nj} 。调整后, 得到新的预估值 q_t , 重复上述步骤, 直至上述目标达到优化为止。模型的目标函数表达如下:

$$\text{Opt. } F = \{f_1(P_n), f_2(VD_n), f_3(Z_{nt})\} \quad (20)$$

约束条件包括供、需水模型中的所有约束。式中 P_n 、 VD_n 、 Z_{nt} 的意义见前, 一般要求

$p_1^0 = 99\%$ 、 $p_2^0 = 95\%$ 、 $p_3^0 = 50\%$, 缺水率用缺水量与需水量之比表示。为了衡量上述目标中“比较均衡”、“相差不要太大”的要求, 可定义一些指标, 然后用多目标优化技术中的理想点法求解上述问题。将求得的协调解及规划决策级所需的各项指标, 经过必要的处理后输入第三级。

2.4 规划决策级 如前所述, 解决本区的水资源短缺有许多方案。规划决策级的功能就是从决策者的高度, 提出各种方案交第一、二级运行计算, 然后对经计算反馈上来的各项指标进行综合评判, 选择最好的方案或给出方案排序。本级考虑的目标, 除第二级提到的3个目标向量外, 还考虑了各方案有关政治、经济和生态环境的近10个目标。为此, 这一级研制了京津唐水资源规划决策支持系统, 可对各方案进行多目标综合评判, 给出各方案的优劣排序以帮助决策者作决策。

该决策支持系统装入和开发了动态交互式决策分析支持系统 (Dynamic Interactive Decision Analysis Support System 简称 DIDASS) 和系统动力学 (SD) 模型, 可分别从多目标优化体系和战略动态平衡两个不同角度对备选方案进行评价。此外, 还装入和开发了事务处理专家系统 GURU, 它由智能化用户接口 (人机交互界面)、推理机和规则库 (专家知识库、数据库等) 组成。决策者通过用户接口向 GURU 提出问题和进行对话, 推理机则利用规则库存贮的有关知识进行推理, 然后向决策者报告结果 (方案评价结果或专家咨询意见)。有关本决策支持系统的细节已有专文^[6]介绍, 兹不赘述。

3 京津唐水资源大系统递阶模型的求解

上述递阶模型的求解, 理论上可采用大系统递阶分析的关联预估法迭代求解, 但计算工作量很大。因此, 采用模拟技术和数学规划结合的求解途径。构造一个三层递阶结构的整体模拟模型以求得前述递阶模型中第一、二级问题的近似解, 然后对决策支持系统最后选出的少数方案再进一步用动态规划推求库群优化调度函数 (图), 并将它输入参与整体模拟模型的运行和调试, 以求得拟优解。

京津唐水资源系统现状分为北京、引滦济津和冀东3个相对独立的子系统, 每个子系统再划分为若干用水子系统 (共18个), 构成三层模拟模型的第一、二层。当考虑规划的南水北调或大坝沟门水库等工程时, 上述3个子系统将联为一个整体, 构成三层模拟模型的第三层 (图3)。

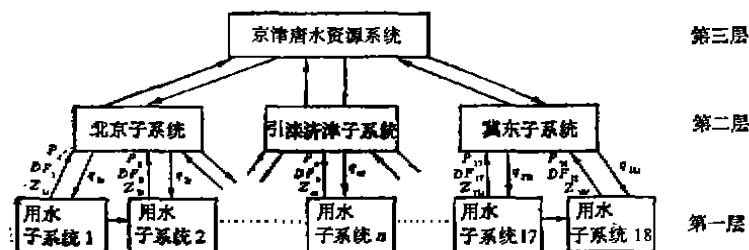


图3 京津唐水资源系统三层递阶模拟模型

Fig. 3. Three-level hierarchical simulation model of JJT water resources system

第一层的数学模型如式(1)~式(11)所示。在各用水子系统中,先利用当地可利用的地表水资源,它无法满足的需水部份先由库群供水,不足再开采地下水。库群供水按用户的重要性依序进行分配,重要性同等的用户,则先供给离水源地近的用户,由近及远,以减少输水损失,可近似地满足目标函数式(1)。这样在满足约束条件式(2)~式(11)逐时段配水后,可得到各用水子系统、各用户的 DF_n (或 VD_n)、 P_n 、 Z_n 等指标并反馈到上层。

第二层是各子系统的库群联合调度模型(协调器)。即根据第一层反馈上来的各指标,在满足供水模型约束条件式(13)~式(19)前提下,对原先拟定的库群调度函数(图)、规则及分水比例以人-机对话形式按式(20)的目标进行调整,得出新的 $q_{n,t}$,输入第一层,如此反复迭代,直至满足式(20)。由于采用模拟技术,按上述方法计算的结果,一般得不到式(20)的最佳均衡解,但经过次数较多的反复调整和计算,可得接近最佳均衡解的拟优解。

第三层模型的功能是根据第一、二层的计算结果对第二层3个子系统进行协调,其目标函数类似式(20),其模型构造与求解方法与第二层雷同。仅当有把这3个子系统联为一体的某些规划工程时,才存在第三层模型,否则只有第一、二两层。

4 结 语

京津唐水资源系统是一个复杂的水资源大系统。针对该系统的特点和研究任务,应用大系统递阶分析的方法,建立了京津唐水资源系统三级递阶模型,用模拟技术和优化方法相结合的途径求解。在京津唐地区现状、2000、2020水平年的供、需水条件下,对污水处理回用和海水利用的高、低方案与各拟建水资源工程的近40个组合方案进行计算,得出各用水子系统中各用户的供水指标、地下含水层及各水库的运行指标。此外,对各拟建水资源工程的投资、运行费用、效益等经济指标进行了计算分析。决策支持系统对模拟模型提出的较好的20组方案进行了优劣排序。

研究结果表明*,现状条件下,遇到连续枯水年,京津唐水资源系统将无法满足工业需水,主要是京、津及廊坊缺水。远景水平年,如不兴建新的水资源工程,本地区将严重缺水。除污水回用、海水利用外,必须同时兴建新的水资源工程。对各工程方案的分析比较表明,有南水北调的方案排序靠前,仅在本区内兴建新水资源工程的方案排序靠后。研究结果及在此基础上提出的该区近期和远景水资源规划安排意见具有较好的参考应用价值。

参 考 文 献

- 1 Haimen Y Y. Hierarchical Analyses of Water Resources Systems. New York, McGraw-Hill. 1977
(中国环境问题研究会, 中译本, 1981. 237~265)
- 2 都金康, 杨 戊. 城市水资源系统分解协调模型及其应用. 水利学报. 1990(3):33~40
- 3 李人厚, 邵福庆. 大系统的递阶与分散控制. 西安:西安交通大学出版社, 1986. 1~48
- 4 郭元裕, 白亮台, 雷声隆等. 湖北四湖地区除涝排水系统规划的大系统优化模型和求解方法. 水利学

* 具体计算分析成果限于篇幅从略。

- 报。1984(11): 1~14
- 5 白宪台, 郭元裕, 关庆滔等。平原湖区除涝系统优化调度的大系统模拟模型。水利学报。1987(5): 14~27
- 6 翁文斌, 蔡喜明。京津唐水资源系统规划决策支持系统的研究。水科学进展。1992, 3(3): 190~198

Hierarchical Model of Optimal Planning and Operation for Water Supply in JJT Area Water Resources Large-Scale System

Liu Jianmin, Zhang Shifa and Liu Heng

(Nanjing Institute of Hydrology and Water Resources)

Abstract: The principle and methods of hierarchical analysis for large-scale system are applied to solve the practical problems of optimal planning and operation for water supply in Beijing-Tianjin-Tangshan (JJT) area water resources system. A three-level hierarchical model for water resources planning and three-level hierarchical simulation model have been established. Simulation technique combined with optimization methods is presented. On the basis of simulation for 40 alternatives, among them 20 best alternatives are comprehensively assessed and are arranged in the order of priority by means of a developed JJT water resources decision support system and specific proposals are presented.

Key words: Hierarchical analysis of large scale-system; water resources planning; optimal operation of water supply projects.

欢迎对本刊论文进行讨论, 讨论稿请寄本刊编辑部。