

基于原水-净化水耦合配置的多目标递解控制模型

谢新民¹, 岳春芳², 阮本清¹, 陈晓宏³, 窦永强⁴

(1. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100044; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
3. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 4. 珠海市水务管理局, 广东 珠海 519000)

摘要:针对我国水资源开发利用和管理中出现的新情况与新问题, 根据国家新的治水方针和珠海市水务一体化管理的实际需要, 建立了珠海市水资源优化配置模型——基于原水-净化水耦合配置的多目标递解控制模型, 并提出了分解-协调耦合计算流程. 通过模型耦合迭代计算和综合对比分析, 给出珠海市原水-净化水耦合配置的推荐方案, 为珠海市未来 20 年的水资源优化配置和安全供给体系分期建设提供了科学的依据.

关键词:区域水资源规划; 原水-净化水耦合配置; 多目标控制; 水资源优化配置模型; 珠海市

中图分类号:TV212.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7647(2005)03-0011-04

Multipurpose decomposition control model based on primary water-purified water coupling allocation//XIE Xin-min¹, YUE Chun-fang², RUAN Ben-qing¹, CHEN Xiao-hong³, DOU Yong-qiang⁴ (1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumuqi 830052, China; 3. College of Geography Science and Planning, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China; 4. Water Resources Managing Bureau of Zhuhai City, Zhuhai 519000, China)

Abstract: In consideration of some new problems occurring in water resources development, utilization, and management in China, a water resources optimal allocation model—the multipurpose decomposition control model based on primary water-purified water coupling allocation, was developed for Zhuhai City according to the new strategy for water regulation in China and the practical demand of integrated water affair management in Zhuhai City, and the calculation process for decomposition-coordination coupling was also given. Through iterative calculation for the coupling model and comprehensive contrast analysis, an optimal scheme for primary water-purified water coupling allocation was recommended for Zhuhai City, providing a scientific basis for optimal allocation of water resources and stage construction of safe water resources supply system for the future 20 years of Zhuhai City.

Key words: planning for regional water resources; primary water-purified water coupling allocation; multipurpose control; water resources optimal allocation model; Zhuhai City

随着我国城镇化、工业化和产业化的迅速发展, 我国无论南方还是北方地区普遍存在着水资源短缺问题, 其中南方地区以工程型和水质型缺水为主, 而北方地区则以资源型和工程型缺水为主, 日益严重的水资源供需矛盾已对我国的可持续发展构成了严峻的挑战. 为了解决或缓解我国现代化建设中出现的水资源紧缺问题, 除加快城乡水务一体化管理体制建设以外, 迫切需要根据国家新时期的治水方针, 结合水资源开发利用面临的问题和水资源管理中出现的新情况, 在已有研究成果^[1~8]的基础上, 开展多部门协作、联合攻关和科技创新, 利用水资源可持续利用的规划理念、思想, 研制适应水资源水量与水质、原水与净化水统一配置的全新模型——基于原水-净化水耦合配置的多目标递解控制模型已显得

非常迫切和必要.

近十几年来珠海市社会经济发展取得了举世瞩目的成就. 伴随着珠海市和澳门特区的快速发展, 其供用水量呈现出持续增长的态势, 2000 年城市原水供水量和净化水供水量均比 1995 年递增了 18%. 由于城市水资源和供水设施建设缺乏全面考虑和统一科学规划, 造成有些供水设施建设严重超前, 如南岗泵站、西区水厂、唐家水厂等, 实际供水量一般不足设计规模的 40%, 唐家水厂甚至不足 20%, 而有些供水设施建设又显得严重滞后, 造成香洲、吉大、拱北等区的用水十分紧张, 香洲水厂和拱北水厂超负荷运行, 目前实际供水量分别超过设计规模的 60% 和 50%. 另外, 珠海市主要取水口大都分布在磨刀门、鸡啼门和虎跳门等水道沿线, 枯季受咸潮的影响

比较大,加上城市的供水调蓄能力又十分有限,从而使得珠海市(包括澳门)的安全供水能力十分脆弱,枯季的供水安全面临越来越严峻的挑战.因此,珠海市迫切需要着力研究和解决新时期水资源的开发、利用、配置、节约、保护与治理等问题,根据全市社会经济发展和水资源供求状况的变化,利用所建立的基于原水-净化水耦合配置的多目标递解控制模型,分析和制定支撑全市可持续发展的原水-净化水耦合配置方案和相应的供水水源工程、输水工程和净水厂等规划方案,以科学地指导全市水资源安全供给体系的建设.

1 水资源配置模型

1.1 系统网络图与模型结构

根据珠海市建设基于优化配置的水资源安全供给体系的需要,将水资源系统中各类物理元素(水库、泵站取水口、水厂、计算单元等)概化为结点,各结点间通过线段(渠道、输水管道等)连接,构成珠海市基于原水-净化水耦合配置的水资源系统网络图,见图1.

水资源配置模型由5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(目标函数);④解决问题的方法;⑤各物理元素在此基础上所处的状态(结果).模型设计主要包括对水资源空间关系、时间关系的描述和模型的目标函数与约束条件的建立.

1.2 目标函数

在水资源配置方案分析和计算时,常规方法是

在水库调度规则、分水比、水源工程运行方式、供水用水优先序等确定的条件下进行模拟计算.而优化方法则是根据系统的实际需要,设计一定的目标函数,使目标函数值达到最大或者最小,即系统达到最佳状态时得到水资源优化配置方案.

对于不同的实际需要,应该追求或选择不同的目标.水资源优化配置模型通常具有以下几类目标函数,并且用统一的数学结构表达出来,通过对选择项参数赋值,可以选择采用任一种目标函数(系统运行的评价标准).这些目标函数为:①净效益最大;②损失水量最小;③运行成本最低;④供水可靠性最大等.

基于上述考虑,目标函数用一个通用表达式表述:

$$\max z = f(W_G, W_T, W_{BG}, W_{SG}, W_{YG}, W_H) \quad (1)$$

式中: $W_G, W_{BG}, W_{SG}, W_{YG}, W_H, W_T$ 分别为水库、取水口(泵站)、水厂、引水工程、污水处理回用设施的供水量向量和调咸泵站提水量向量.

1.3 主要约束条件

a. 水库的水量平衡方程

$$V_{ji(t+1)} = V_{ji} + W_{D,ji} + W_{T,ji} - W_{G,ji} - W_{S,ji} \quad (2)$$

式中: $V_{ji}, W_{D,ji}, W_{T,ji}, W_{G,ji}, W_{S,ji}$ 分别为第 t 水平年第 j 水库在第 i 时段初的库容以及第 i 时段的天然入库径流量、调咸泵站入库提水量、供水量、损失水量; $j = 1, 2, \dots, m$ (m 为水库总数); $i = 1, 2, \dots, n$ (n 为计算时段总数); $t = 1, 2, \dots, v$ (v 为规划水平年总数).

b. 水库的供需水量平衡方程

$$W_{G,ji} = \sum_{k \in M_{ji}} W_{G,jik} \quad (3)$$

式中: M_{ji} 为第 t 水平年第 j 水库的供水单元集;

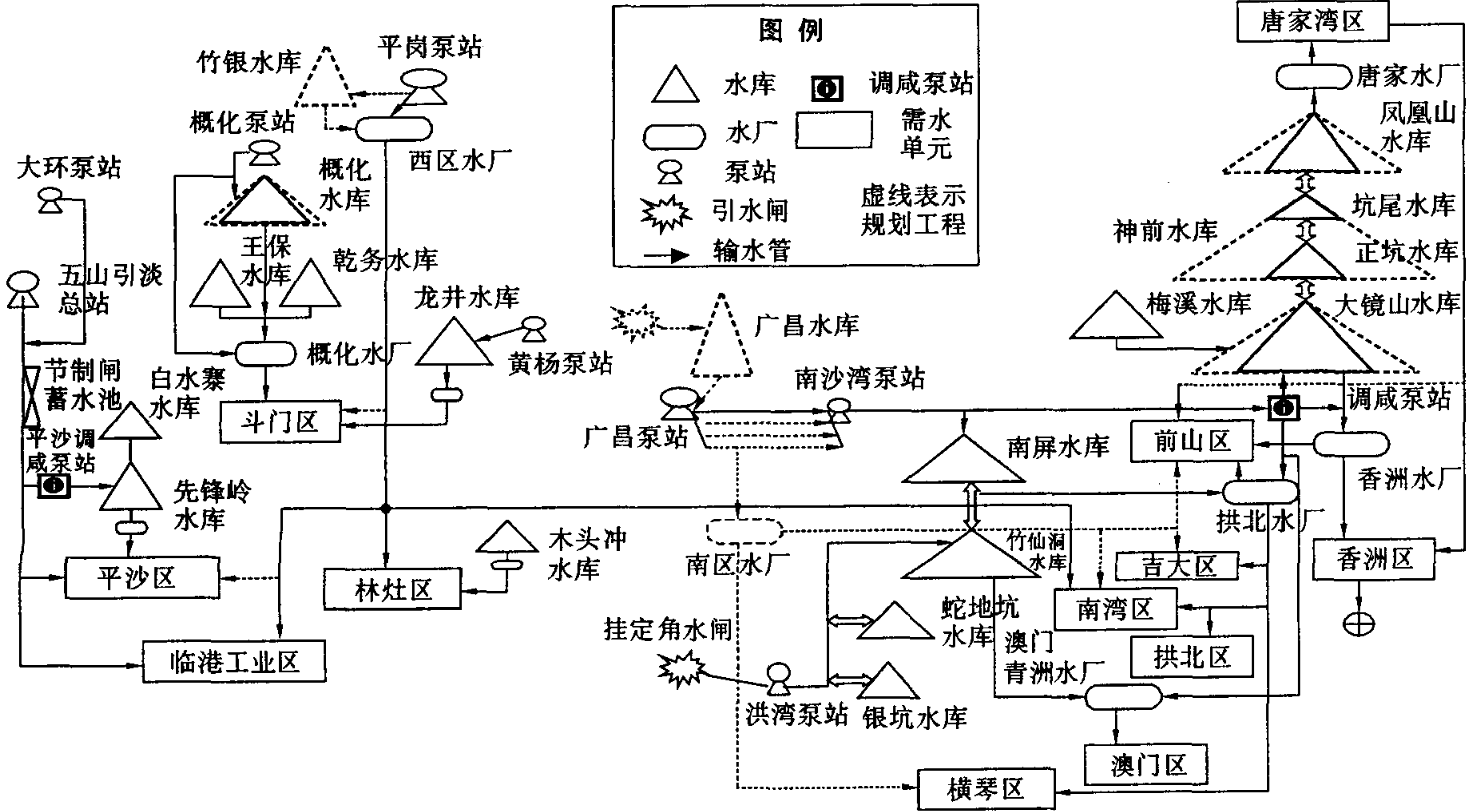


图1 珠海市不同水平年城市水资源配置(原水-净化水耦合配置)系统网络示意图

$W_{G,jikt}$ 为第 t 水平年第 j 水库在第 i 时段向第 k 供水单元的供水量。

c. 自来水厂的水量平衡方程

$$\sum_{j \in M_{D,kt}} W_{G,jikt} + \sum_{j \in M_{B,kt}} W_{BG,jikt} = W_{SG,kit} \quad (4)$$

其中 $W_{SG,kit} = \sum_{j \in M_{SG,kt}} W_{SG,kijt}$

式中: $W_{BG,jikt}$ 为第 t 水平年第 j 泵站第 i 时段向第 k 自来水厂的供水量; $M_{D,kt}$ 和 $M_{B,kt}$ 分别为第 t 水平年向第 k 自来水厂供水的水库集和泵站集; $M_{SG,kt}$ 和 $W_{SG,kit}$ 分别为第 t 水平年第 k 自来水厂的供水单元集和第 i 时段的供水量; $W_{SG,kijt}$ 为第 t 水平年第 k 自来水厂第 i 时段供给第 j 单元的供水量; $k = 1, 2, \dots, s$ (s 为自来水厂总数)。

d. 单元的供需水量平衡方程

$$\sum_{j \in M_{DZ,kt}} W_{SG,jikt} + \sum_{j \in M_{H,kt}} W_{H,jikt} + \sum_{j \in M_{YG,kt}} W_{YG,jikt} = W_{X,kit} \quad (5)$$

其中

$$W_{X,kit} = W_{XS,kit} + W_{XC,kit} + W_{XN,kit} + W_{XSH,kit}$$

式中: $M_{DZ,kt}$, $M_{H,kt}$ 和 $M_{YG,kt}$ 分别为第 t 水平年向第 k 单元供水的自来水厂集、污水处理回用设施集和引蓄水工程集; $W_{H,jikt}$ 为第 t 水平年第 j 污水处理回用设施第 i 时段向第 k 单元供水提供的污水处理回用量; $W_{XS,kit}$, $W_{XC,kit}$, $W_{XN,kit}$, $W_{XSH,kit}$ 分别为第 t 水平年第 k 单元第 i 时段的生活、工业、农业和生态环境需水量; $W_{YG,jikt}$ 为第 t 水平年第 j 引水工程在第 i 时段向第 k 单元的供水量; $k = 1, 2, \dots, d$ (d 为计算单元总数)。

e. 水库的供水能力限制

$$W_{G,jit} \leq W_{GM,jit} \quad (6)$$

式中: $W_{GM,jit}$ 为第 t 水平年第 j 水库在第 i 时段的最大供水量。

f. 自来水厂设计能力限制

$$W_{SG,kit} \leq W_{SM,kit} \quad (7)$$

式中: $W_{SM,kit}$ 为第 t 水平年第 k 水厂在第 i 时段的最大供水量; $k = 1, 2, \dots, s$ 。

g. 取水口(泵站)供水能力限制

$$W_{B,jit} \leq W_{BM,jit} \quad (8)$$

式中: $W_{B,jit}$ 为第 t 水平年第 j 泵站在第 i 时段的供水量; $W_{BM,jit}$ 为第 t 水平年第 j 泵站在第 i 时段的最大供水量。

h. 调咸泵站提水能力限制

$$W_{T,jit} \leq W_{TM,jit} \quad (9)$$

式中: $W_{TM,jit}$ 为第 t 水平年第 j 调咸泵站在第 i 时段的最大提水量。

i. 取水口(泵站)的水量平衡方程

$$W_{B,jit} = \sum_{k \in M_{BG,jt}} W_{BG,kijt} + W_{T,jit} \quad (10)$$

式中: $M_{BG,jt}$ 为第 t 水平年第 j 泵站的供水单元集。

j. 渠道或管道输水能力限制

$$W_{B,jit} \leq W_{SU,jit} \quad (11)$$

式中: $W_{SU,jit}$ 为第 t 水平年第 j 取水口(泵站)渠道或管道在第 i 时段的最大输水能力。

k. 水库蓄水库容限制

$$V_{L,jit} \leq V_{jit} \leq V_{M,jit} \quad (12)$$

式中: $V_{L,jit}$ 和 $V_{M,jit}$ 分别为第 t 水平年第 j 水库在第 $i-1$ 时段末的最大、最小允许蓄水库容。

l. 其他约束略。

2 计算流程设计

水资源配置方案中包括有若干个规划水平年, 对于每一个规划水平年都要采用不同保证率的资料逐时段进行水资源耦合配置迭代计算。为了便于从宏观上控制 and 对比各种配置方案的优劣, 笔者将水源和供水方式相同的计算单元归并为若干个水资源配置子系统。首先对各子系统所拟定的配置方案(简称子问题)进行逐时段供需平衡计算, 确定各子系统所拟定配置方案的计算结果, 然后在更高一级借助于协调器对各子问题进行协调和反馈迭代计算, 最后获得水资源配置方案的总体最优解或满意解。

根据分水协议或已有供水原则, 将共用供水工程 l (水库、泵站或水厂等) 的最大供水量 $W_{GMZ,jit}^{(k)}$ 初步分配给各子系统, 作为各子系统工程 l 的供水量约束, 参加各子系统的供需平衡计算, 各子系统再将其需要工程 l 的供水量 ($W_{GC,jit}^{(k)}$) 和余缺水量 ($W_{QS,jit}^{(k)}$) 反馈给上一级协调器; 上一级协调器再根据系统的总体目标和分水原则等, 将工程 l 可分配的供水量分配给各子系统, 作为各子系统工程 l 的最大供水量约束, 参加各子系统的供需平衡计算, 循环迭代, 直至达到满意为止。

协调器:

$$\left. \begin{aligned} W_{GMZ,jit}^{(k+1)} &= W_{GMZ,jit}^{(k)} + \zeta_{jit}^{(k)} \Delta W_{GMZ,jit}^{(k)} \\ l &\in M_{SK,j} \cup M_{BZ,j} \cup M_{ZL,j} \cup M_{YS,j} \cup M_{WH,j} \\ (j &= 1, 2, \dots, g; i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\Delta W_{GMZ,jit}^{(k)} = W_{GM,jit} - \sum_{l \in M_{ZX,jt}} W_{GC,jit}^{(k)} \quad (14)$$

$$W_{GM,li}^{(k)} = \sum_{j \in M_{ZX,li}} W_{GMZ,jit}^{(k)} \quad (15)$$

式中: $W_{GMZ,jit}^{(k)}$ 为第 t 水平年第 l 供水工程第 i 时段在第 k 次迭代分配给第 j 子系统的最大供水量;

$M_{ZX,jit}$ 为第 t 水平年第 l 供水工程第 i 时段的供水子系统集; $M_{SK,j}, M_{BZ,j}, M_{ZL,j}, M_{YS,j}, M_{WH,j}$ 分别为向第 j 子系统供水的供水工程集; $W_{GC,jit}^{(k)}$ 为第 t 水平年第 j 子系统在第 i 时段第 k 次迭代需要第 l 供水工程的实际供水量; $\zeta_{jit}^{(k)}$ 为第 t 水平年第 j 子系统在第 i 时段第 k 次迭代第 l 供水工程的供水量分配调整系数,根据各子系统水资源供需的余缺水量情况进行适时修正; $\Delta W_{GMZ,jit}^{(k)}$ 为第 t 水平年第 l 供水工程在第 i 时段第 k 次迭代向第 j 子系统的供水潜力; g 为水资源配置子系统总数。

第 j 个水资源配置子问题:

$$\max z_j = f_j(W_{G,j}, W_{T,j}, W_{BG,j}, W_{SG,j}, W_{YG,j}, W_{H,j}) \quad (16)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{c \in M_{WG,j}} W_{WG,jcit}^{(k)} \leq W_{GMZ,jit}^{(k)}$$

$$l \in M_{SK,j} \cup M_{BZ,j} \cup M_{ZL,j} \cup M_{YS,j} \cup M_{WH,j}$$

$$W_{WG,jcit}^{(k)} = (W_{G,j}, W_{BG,j}, W_{T,j}, W_{SG,j}, W_{YG,j}, W_{H,j})^T \quad (17)$$

式中: $W_{G,j}, W_{BG,j}, W_{SG,j}, W_{YG,j}, W_{H,j}, W_{T,j}$ 分别为第 j 子系统的水库、取水口(泵站)、水厂、引水工程、污水处理回用设施的供水量向量和调咸泵站提水量向量; $M_{WG,j}$ 为第 l 供水工程的第 j 子系统单元集; $W_{WG,jcit}^{(k)}$ 为第 t 水平年第 j 子系统第 c 单元第 i 时段第 k 次迭代的供水量向量。

3 配置方案计算与分析

利用所建立的基于原水-净化水耦合配置的多目标递解控制模型,分别针对系统供水保证程度最大、供水运行成本最低和供水规模效益最优为目标的3种配置模式,分析和计算不同水平年(2005年、2010年、2020年)磨刀门、鸡啼门和虎跳门水道上游不同来水条件下,珠海市不同保证率的汛期和枯季原水-净化水耦合配置方案。通过3种配置模式和750多种配置方案的耦合迭代计算与综合对比分析,确定出基于提高原水-净化水耦合配置系统规模效益的配置模式为推荐配置模式,并给出相应的原水-净化水耦合配置推荐方案。这种推荐的配置模式,要求充分发挥主力泵站和水厂(平岗泵站和西区水厂)的协调器作用,使珠海市水资源配置工程体系在尊重已有供水工程体系投资的前提下,更充分发挥平岗泵站和西区水厂的规模效益,且各功能区的水厂保持现有规模就能满足净化水需求,同时便于集中管理,较大地提高生产效率和降低管理成本,以及避免重复建设等。最后,根据珠海市原水-净化水耦合配置推荐方案,制定不同规划水平年需要扩建

或者新建水库、泵站、净水厂和管道的位置、走向和规模,原水-净化水耦合配置工程投资2020年累计为26.4亿元。这些成果,为珠海市根据基本建设程序分期实施和建设优化配置的水资源安全供给体系提供了科学的决策依据。

4 结 语

基于社会经济可持续发展和水资源可持续利用的观点,在新思路、新理论的指导下,首次建立了基于原水-净化水耦合配置的多目标递解控制模型。该模型是一个能充分反映水资源系统多水平年、多层次、多地区、多用户、多水源、多工程的特性,能够将多种水源耦合动态配置的模型系统。从该模型的实际应用看,它不仅能提供以年为时间尺度,以县、市、区及整个珠海市所辖区为空间尺度的水资源配置宏观成果,为全市构建水资源安全供给体系和制定宏观发展战略提供科学依据,而且能提供以月为时间尺度、以计算单元为空间尺度、以具体水利工程为分析对象的水资源配置微观成果,为各地区的水资源安全供给体系规划和管理、供水工程设计、水资源供给系统薄弱环节诊断等提供依据和丰富翔实的基础数据。总之,该模型是现有模型在新的历史条件下的新发展,更适合于我国目前城乡水务一体化管理,满足构建水资源安全供给体系的实际需要,因此不仅具有较高的理论和学术价值,而且具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 叶永毅,黄守信,方淑秀,等.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.
- [2] 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.
- [3] 谢新民,秦大庸,于福亮,等.宁夏水资源优化配置模型与方案分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2000,4(1):16—26;35.
- [4] 王浩,秦大庸,王建华.流域水资源规划的系统观与方法论[J].水利学报,2002(8):1—6.
- [5] 谢新民,赵文骏,裴源生,等.宁夏水资源优化配置与可持续利用战略研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
- [6] 王浩,陈敏建,秦大庸,等.西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
- [7] 冯耀龙,韩文秀,王宏江,等.面向可持续发展的区域水资源优化配置研究[J].系统工程理论与实践,2003(2):133—138.
- [8] 谢新民,张海庆,尹明万,等.水资源评价及可持续利用规划理论与方法[M].郑州:黄河水利出版社,2003.

(收稿日期:2004-09-02 编辑:骆超)