面向可持续发展的佛山市水资源优化配置

刘德地,陈晓宏,刘丙军

(中山大学水资源与环境研究中心,广东 广州　510275)

摘要:以水资源的可持续开发利用为目标,以二元动态水循环模式为基础,考虑工程供水能力、防洪、压咸、河道内生态需水等约束,采用大系统"分解协调"原理,运用逐步宽容约束法及递阶分析法,通过佛山市水库、河道及区间径流联合调度,建立了面向可持续发展的水资源优化配置模型。在 1956 ~ 2000 年月时段来水条件下,对 2030 规划水平年水资源进行优化调配,得出各用水户在长系列调算后多年平均配置结果。结果表明,佛山市总的水资源量丰富,可满足 2030 年的用水需求,但现状工程供水规模不足,不能较好地满足 2030 年需水要求,因此需要采取开源和节流措施来保障规划水平年的供水安全,从而保障佛山市的可持续发展。

关键词:南方湿润地区;水资源优化配置;可持续发展;逐步宽容约束;佛山市

中图分类号:TV213.4　　文献标识码:A　　文章编号:1004-6933(2008)06-0023-05

Optimal allocation of water resources in southern humid area for sustainable development: A case study in Foshan City of Guangdong Province

LIU De-di, CHEN Xiao-hong, LIU Bing-jun

(*Center for Water Resources and Environment Research*, *Sun Yat-sen University*, *Guangzhou* 510275, *China*)

Abstract: Using the sustainable utilization of water resources as the objective and the water supply capacities of waterworks as well as flood and salinity control and eco-environmental water demand of rivers as the constraints, an optimal model for allocating water resources in Foshan City was built on the basis of the integrated regulation of reservoirs and rivers, the dualistic dynamic model of the water cycle, the theory of decomposition and coordination of large-scale systems, the methods of hierarchical analysis, and step-by-step toleration obligation. The mean annual water amount available for each water user in 2030 was predicted by optimally allocating water resources using monthly water input data from 1956 to 2000. The results show that the total quantity of water resources is abundant in Foshan City and can meet water demand in 2030, but, as for sustainable development, some measures for increasing water supply and water conservation must be taken to ensure the security of the water supply in the future due to the limited amount of water provided by the present waterworks.

Key words: southern humid area; optimal allocation of water resources; sustainable development; step by step toleration obligation; Foshan City

我国南方湿润地区是指年降水量大于 800 mm 的地区,地理上主要分布在秦岭-淮河以南。目前我国水资源的优化配置研究和应用主要集中在缺水较为严重的北方干旱、半干旱地区,而针对南方湿润地区水资源优化配置的研究和应用较少,但由于近些年来气候变化和人类活动影响的加剧,在南方湿润地区的水资源开发利用中出现了季节性、水质性缺水等现象,对社会经济的可持续发展直接构成了威胁,因此有必要对其面向可持续发展水资源优化配置的方法和实践进行研究探索。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50579078)

作者简介:刘德地(1980—),男(土家族),湖南石门人,博士研究生,研究方向为水资源配置。E-mail:dediliu@163.com

1 概 述

佛山市地处广东省中南部珠江三角洲腹地，当地水资源量比较匮乏，人均当地水资源占有量仅为 535 m^3（潮汐顶托产生反向回流未予统计），且其时空分布不均匀，加之境内水体遭受不同程度的污染，当地水资源不能满足需水要求，区内用水的 85% 来源于北江和西江过境客水。佛山市过境客水资源尽管在总量上比较丰富，但其时空分布极不均匀，且与河道外需水过程不一致，致使在枯水年份的个别时段产生资源型缺水。同时，佛山市的水利工程基础设施老化，配套欠完整，部分区水资源的调控能力仍显不足，现状供水保证率不高，水资源短缺（特别是水质性缺水）已影响到国民经济的可持续发展。因此，根据水资源可持续利用的理念，在遵循社会、经济及环境供水有效性与安全性，用户间的分水公平性等原则的基础上，提出佛山市水资源配置的合理方案，对总体规划布局具有重要的现实意义。在水资源优化配置研究方面，国内外已提出了大量成果。国外方面，水资源优化配置研究起步较早，从 20 世纪 40 年代提出的水库优化调度[1]，一直到 20 世纪 90 年代考虑水量水质的地表地下水联合调用；国内在 20 世纪 60 年代从以发电为主的水库优化调度开始，到基于宏观经济的水资源规划决策，以及近些年来发展的多目标决策理论、大系统理论和可靠性分析（风险性分析）[2]等。此外，还发展和创新了一些数学规划的算法程序，如线性规划、动态规划、遗传算法、蚁群算法等。但是，系统分析应用于多目标、多属性、多层次、多阶段及多不确定性因素的系统等当属少见[3]。

本文以大系统“分解协调”理论作为技术支持，运用逐步宽容约束法及递阶分析法，以 2000 年为基准年，以 2030 为优化配置规划水平年，建立佛山市水资源优化调配的实用模型和方法，并对佛山市缺水时段和地区的供需平衡进行了分析。

2 面向可持续发展的水资源优化配置模型

2.1 总体思路

面向可持续发展的水资源优化配置是以可持续发展的思想为基本指导思想[4-5]，以现代水资源循环过程“天然–人工”二元动态认知模型为基础，即从过去水资源配置中一元自然驱动的静态水文模式“实测–还原–建模–调控”拓展为“实测–分离–耦合–建模–调控”的二元动态水循环模式[4,6]，运用系统分析理论和优化技术，将区域有限的水资源在各个计算单元、各个用水部门、各个行业、各个时段进行最优化分配，以获得社会、经济、水资源和生态环境相协调的最佳综合效益。

2.2 模型的目标

根据佛山市水系特征和水资源利用实际情况，按地表水水系兼顾地下水分布（并结合供水系统及行政区划等因素将水资源系统划分为 5 个子系统（见图 1），运用多目标分析模型 MOA（Multi-Objects Analysis）将生态、经济、水资源等多个规划目标综合在一起，进行整体优化分析，采用大系统“分解协调”理论作为技术支持，进行递阶分析，提出图 2 所示的递阶模型。

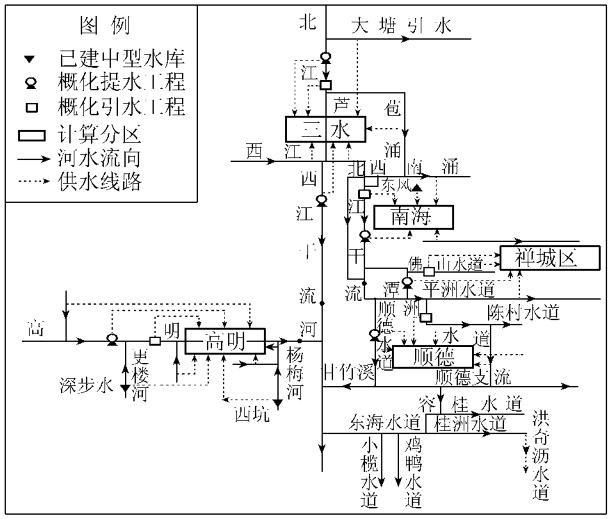

图 1 佛山市水资源配置网络结点概化图

首先，将佛山市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。

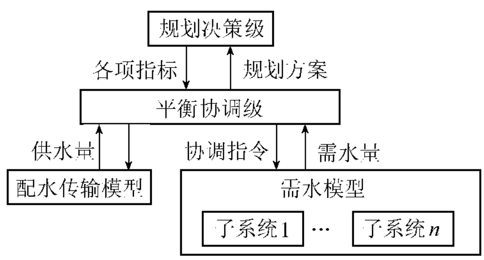

图 2 水资源合理调配系统递阶框架

第二级为平衡协调级，依关联预估法原理先预估供水变量 q_t，它是库群调度函数（表、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对配水系数和用户供水权重等加以调整，如此反复迭代，直至协调级的目标被优化为止。因此，预估关联变量是本模型的协调变量。

第三级是规划决策级，得到最终优化配水决策方案。

根据可持续发展原则[7-8]，佛山市水资源优化配置的目标函数表达为：

总目标 $F(X) = \text{opt}\{f_1(X), f_2(X), f_3(X)\} =$

$$\begin{cases} \max\left\{\sum_{n=1}^{P}\sum_{1}^{T} w_d S_{nt}^{d} + w_i S_{nt}^{i} + w_a S_{nt}^{a} + w_e S_{nt}^{e}\right\} & \text{（供水效益最大体现经济效益）} \\ \max - \left\{\sum_{n=1}^{P}\sum_{1}^{T} (D_{nt}^{d} - S_{nt}^{d}) + (D_{nt}^{i} - S_{nt}^{i}) + (D_{nt}^{a} - S_{nt}^{a}) + (D_{nt}^{e} - S_{nt}^{e})\right\} & \text{（缺水率最小且大致均衡）} \\ \max - \left\{\sum_{n=1}^{P}\sum_{1}^{T} 0.01(\rho_{nt}^{d} S_{nt}^{d} + \rho_{nt}^{i} S_{nt}^{i} + \rho_{nt}^{a} S_{nt}^{a} + \rho_{nt}^{e} S_{nt}^{e})\right\} & \text{（污水排放量最小体现环境效益）} \end{cases}$$

式中：X 为决策变量；S_{nt}^{d}、S_{nt}^{i}、S_{nt}^{a}、S_{nt}^{e} 分别为 t 时段第 n 子系统的城市生活、工业、农业和河道外生态的净供水量，万 m^3；w_d、w_i、w_a、w_e 分别为城市生活、工业、农业、河道外生态供水量的综合效益权重，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，计算结果如不满足所要求的供水保证率，可加以调整；D_{nt}^{d}，D_{nt}^{i}，D_{nt}^{a}，D_{nt}^{e} 分别为 t 时段第 n 子系统的城市生活、工业、农业、河道外生态的净需水量，万 m^3；ρ_{nt}^{d}，ρ_{nt}^{i}，ρ_{nt}^{a}，ρ_{nt}^{e} 分别为 t 时段第 n 子系统中城市生活、工业、农业、河道外生态单位废污水排放量中重要污染因子（本文选用的是 COD）的质量浓度，mg/L；T 为运行期的总时段数，采用同步资料，以月为单位时段。

分目标包括总需水目标、防洪目标（具体在配水传输模型反映）、生活用水目标、压咸及环境用水量目标、工业总产值及重点产业用水目标、农业产量目标、河道流量航运目标，共 7 个。

2.3 模型的约束

a. 工程供水能力约束：供水量不超过工程的最大供水规模。

b. 需水量约束：供水量不超过需水量。

c. 根据可持续发展原则的区域协调发展约束：

$$\mu = \sqrt{\mu_{B1}(\sigma_1) \cdot \mu_{B2}(\sigma_2)} \geqslant \mu^*$$

式中：μ、μ^* 分别为区域协调发展指数及其最低值；$\mu_{B1}(\sigma_1)$、$\mu_{B2}(\sigma_2)$ 分别为水资源利用与区域经济发展的协调度、经济发展与水环境质量改善的协调度）[1]。

d. 变量非负约束。

2.4 配水传输矩阵[3]

鉴于佛山市各区内水库、河系的具体情况（见图1）及用水户对水资源的要求，采用河库联合调度配水。水库供水量按照长系列入库流量过程通过调蓄计算确定，水量在河道传播过程中考虑区间径流和有水力联系的上计算单元弃水的加入以及调水工程的取出；以节点控制水量平衡；水库调蓄过程为水库时段水量平衡过程；主要约束包括水库调节周期控制、子系统结点水量平衡。

2.5 平衡协调级

按大系统递阶分析的关联预估原理，协调级根据全系统用户的需水要求，预估它们的供水过程，供、需水模型据此按前述模型进行优化，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，考虑的目标有各用户的供水保证率或缺水率要求达到规定值。因此，修正关联预估值时，要调整权重向量及供水分配系数矩阵。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。对各子系统间的供水保证率或缺水率不够均衡等情况，可调整后，得到新的预估值，重复以上步骤，直至上述目标达到优化为止。

2.6 规划决策级

规划决策级的功能是从决策者的高度，对各种方案反馈上来的各项指标进行综合评判，最终选出满意的方案作为水资源调配的运行方案。根据前述多目标分析原则，各目标间有一定的优先层次，决策模型按照优先层次进行求解，可获得一定意义上的优化解，也就是解决水资源短缺的有关方案。再把方案所对应的参考目标值提供给决策者参考，在决策阶段，决策者在比较满意的目标下给出使其目标值作出让步的宽容量，以换取使不满意目标得到改善，再把这些信息提供给分析者继续求解。这就是逐步宽容约束法求解多目标问题的思想。它是以‘决策过程导向’进行多目标优化问题研究，不断向决策者提供应用信息，引导决策分析不断深入，协助决策者获得一套正确的策略，即全局意义上的优化方案。

2.7 计算方法

2.7.1 参数率定

优化模型中权重系数 W 主要根据经济效益、社会效益以及用水户的重要性进行率定，在优化计算中需要进行适当调整，以达到优化的目的。

$$W_{ni} = q_{ni} f_{ni} W'_{ni}$$

式中：W_{ni} 为各用水子系统中第 i 类用水权重，i = 1，2，3，4，分别代表农业、生活、工业、河道外生态；W'_{ni} 为各用水子系统中第 i 类单位供水量的净效益；q_{ni} 为社会效益系数；f_{ni} 为用水户重要程度系数。在计

算中，如结果不满足决策者的要求，可调整 q_{ni}、f_{ni}再次进行优化计算，直到满意为止。

σ_1 看做是所有用水部门的供水量之和与需水量之和的比，即

$$\sigma_1 = \sum_{n=1}^{P}\sum_{1}^{T}(S_{nt}^{d} + S_{nt}^{i} + S_{nt}^{a} + S_{nt}^{e}) / \sum_{n=1}^{P}\sum_{1}^{T}(D_{nt}^{d} + D_{nt}^{i} + D_{nt}^{a} + D_{nt}^{e})$$

$$\mu_{B1}(\sigma_1) = \begin{cases} 1.0 & \sigma_1 \geqslant \sigma_1^* \\ \exp(-4(\sigma_1 - \sigma_1^*)^2) & \sigma_1 < \sigma_1^* \end{cases}$$

式中：B_1 为水资源利用与经济发展相协调的模糊子集，隶属函数 $\mu_{B1}(\sigma_1)$ 为资源与经济的“协调度”。B_2 为经济发展与环境改善相协调的模糊子集，隶属函数 $\mu_{B2}(\sigma_2)$ 为经济发展与环境改善之间的“协调度”。σ_2 看做是区域经济发展与环境改善程度的比值。

$$\sigma_2 = \sum_{n=1}^{P}\sum_{1}^{T} E/E_0 / \sum_{n=1}^{P}\sum_{1}^{T} f/f_0$$

$$\mu_{B2}(\sigma_2) = \exp(-4(\sigma_2 - \sigma_2^*)^2)$$

式中：E_0、E 分别为基准年、规划水平年的经济学指标(本文选人均 GDP)；f_0、f 分别为基准年、规划水平年的重要污染物排放量(选用 COD)[1,9]。

2.7.2 配水规则矩阵

配水规则矩阵设置的目的就是在缺水情况下，按照各目标的优先顺序配置目标的用水满足权重；同时，在某一轮配水结束时，根据该轮各目标实际配水对需水的满足程度，评判该轮配水方案的破坏等级，并确定是否需要修改权重、重新配水。在供水这一优先层中采用不同的配水规则矩阵，对流域的生态、航运用水都会产生不同的影响。在此，配水规则矩阵按供水破坏程度分为 4 个等级，矩阵的行向量代表各行业在不同破坏等级时的配水系数(见表 1)。另外，在特枯年月，在保证压咸流量的基础上，首先牺牲一部分河道内生态需水，来满足河道外的用水需求。

表 1 水资源配置配水规则矩阵

破坏等级	生活用水	工业用水	农业用水	河道外生态	说明
1	1	1	1	1	供水保证
2	1	0.9~0.95	0.8	0.75	轻破坏
3	0.95~0.98	0.85~0.9	0.5	0.45	中破坏
4	≤0.95	≤0.85	≤0.4	≤0.35	重破坏

2.7.3 河道内生态需水量

针对佛山市水资源的特点，维持河道内水资源的良性循环，保证河道内生态需水量，对保证佛山市供水安全起到至关重要作用。故本文在考虑航运、维持生态环境的基本径流、污染物稀释用水以及保证下游河道防潮压咸用水量等 4 项的基础上，得出西、北江主要河段控制断面三水、马口站生态需水量(见表 2)。

3 配置结果及其分析

为了解基准年的水利工程对未来需水供给情况，以现有水利工程的供水规模为佛山市水资源优化配置模型中的工程能力约束，并考虑现有的污水回用等非常规水在生态环境、农业生产用水中的利用，以 2030 规划水平年的需水量(基本方案)为需水约束，利用前述的大系统‘分解协调’技术，进行从 1956~2000 年的长系列调算，其主要结果如表 3 所示。

由表 3 可得如下结论：

a. 佛山市总的水资源量丰富，除高明部分地区不能从西、北江干流取水外，其他各区不存在资源型缺水。

b. 佛山市现有工程在 2030 的需水条件下，河道外生态、工业生产、农业生产无论是供水量保证率还是月时段保证率均较低，说明现有工程不能满足未来需水的要求，但由于资源型不缺水，所以解决缺水问题主要可以通过两个途径：开源和节流。针对佛山市本身的特点，在积极进行节水型社会建设的同时，可适当增加供水工程来满足需求。

c. 根据佛山市社会经济预测[10]，2030 年佛山市人均 GDP 将达 16.32 万元(约 1.97 万美元)，全市 COD 排放量(优化配置模型计算结果)为 111 724 t；2000 年佛山市人均 GDP 为 1.77 万元(约 0.21 万美元)，且全市 COD 排放量为 134 296 t，区域协调情况为 水资源利用与经济发展的协调度 $\mu_{B1}(\sigma_1) = 0.980$ 经济发展与环境保护的协调度 $\mu_{B2}(\sigma_2) = 0.972$ 整个区域的协调发展指数 $\mu = 0.976$。所以佛山市水资源利用与经济发展以及经济发展与环境保护之间的协调度均较高，但由于 2030 规划水平年 COD 排放量是建立在污染控制的基础上，因此要保持经济发展和环境保护之间的和谐发展，就要努力

表 2 佛山市主要河道内用水量[7] m^3/s

控制断面	维持河道基本功能用水					河口生态用水			航运用水	外包水量
	河道基流	冲沙	防凌	稀释净化	综合采用量	冲淤保港	防潮压碱	综合采用量		
三水站	281	0	0	84	281	0	368	368	241	368
马口站	1 630	0	0	489	1 630	0	2 132	2 132	1 500	2 132

表 3　佛山市 2030 年需水基本方案多年平均水资源优化配置结果

地名	需水量/万 m^3	资源型供水								
		供水量/万 m^3	月时段保证率/%				水量保证率/%			
			生活	工业生产	河道外生态环境	农业生产	生活	工业生产	河道外生态环境	农业生产
禅城区	49 393	49 393	100	100	100	100	100	100	100	100
南　海	177 826	177 826	100	100	100	100	100	100	100	100
顺　德	129 231	129 231	100	100	100	100	100	100	100	100
三　水	55 125	55 125	100	100	100	100	100	100	100	100
高　明	35 909	35 830	100	98.14	96.46	96.65	100	99.97	99.60	99.66

地名	需水量/万 m^3	工程型供水								
		供水量/万 m^3	月时段保证率/%				水量保证率/%			
			生活	工业生产	河道外生态环境	农业生产	生活	工业生产	河道外生态环境	农业生产
禅城区	49 393	41 597	100	0	0	0	100	80.54	36.95	80.00
南　海	177 826	158 259	93.48	29.05	5.59	12.10	99.35	91.67	44.70	79.77
顺　德	129 231	112 507	75.23	8.57	0	2.79	97.52	93.24	52.38	63.93
三　水	55 125	50 854	86.59	69.09	56.24	60.89	98.66	96.37	78.79	86.83
高　明	35 909	33 805	90.32	76.54	56.61	61.64	99.18	97.65	83.84	91.49

实现污染控制规划的目标。

4　结　论

南方湿润地区水资源相对丰富,但受现有水利工程规模、污水排放量大和来水时间不均性等限制,水资源配置上与北方有较大的不同,主要不同在于枯水季节在保证水质条件下,可适当牺牲部分河道内生态用水量;大部分地区水资源供需状况为资源型不缺水而工程型缺水,因此开源和节流之间的决策比北方缺水地区更为复杂。以广东佛山市为研究区域,建立了南方湿润地区面向可持续发展的水资源优化配置模型,采用了大系统'分解协调'理论作为技术支持,运用逐步宽容约束法和递阶分析法,对佛山市水资源进行长系列调算。结果表明:

a. 佛山市本地水资源较少,但过境水丰富,可满足佛山市未来社会经济发展的用水需求。

b. 佛山市现状工程在河道外生态、工业、农业上不能满足用水需求,应在适当扩建或新建一部分供水工程的同时,进行节水型社会建设,一方面可减少用水需求,另一方面有利于减轻河流污染,改善水环境。

c. 佛山市在实现污染控制规划的各种目标和水资源优化配置的条件下,水资源的开发利用、环境保护和经济发展可实现可持续发展。

参考文献:

[1] 张伟东. 面向可持续发展的区域水资源优化配置理论及应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2004.

[2] HAIMES Y Y, LI D. Hierarchical multiobjective analysis for large-scale systems: review and current status[J]. Automatica, 1988, 24(1): 53-69.

[3] 陈晓宏,陈永勤,赖国友. 东江流域水资源优化配置研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 366-372.

[4] 王浩,王建华,秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展,2004,15(1):123-128.

[5] 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.

[6] 严登华,王浩,王建华. 国际水文计划发展与中国水资源研究体系构建[J]. 地理学报,2004,59(2):249-259.

[7] 王顺久,侯玉,张欣莉,等. 中国水资源优化配置研究的进展与展望[J]. 水利发展研究,2002(9):9-11.

[8] 冯耀龙,练继建,韩文秀. 区域水资源系统可持续发展评价研究[J]. 水利水电技术,2001,32(12):9-11.

[9] 贺北方,周丽,马细霞. 基于遗传算法的区域水资源优化配置模型[J]. 水电能源科学,2002,20(3):10-12.

[10] 佛山市水利局,中山大学水资源与环境研究中心. 佛山市水资源综合规划[R]. 佛山:佛山水利局,2006.

(收稿日期:2007-05-29　编辑:徐娟)

(上接第 22 页)

市地下水超采区动态监测规划方案》,建设城市地下水监测预警系统,建立多目标的地下水动态监测网络,包括不同含水层的地下水位、开采量、水质等方面的监测。

参考文献:

[1] 河南省水利厅. 河南省水资源公报(2000)[R]. 郑州:河南省水利厅,2001.

[2] 许志荣. 河南地下水资源与可持续发展研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2004.

[3] 赵云章. 河南省地下水资源与环境研究[M]. 北京:中国大地出版社,2004.

[4] SL 286—2003,地下水超采区评价导则[S].

(收稿日期:2008-03-08　编辑:高渭文)