

基于多目标决策的水资源优化配置模型及应用

姜生斌¹, 王蕊¹, 王丽萍¹, 李传科²

(1. 华北电力大学水利水电工程系, 北京 102206; 2. 广西水利电力勘测设计研究院, 广西 南宁 530023)

摘要 基于可持续发展原理, 针对水资源持续利用的特点, 建立了水资源多目标优化配置模型。该模型体现了公平、优先、高效和综合效益最大化原则, 设置经济、社会和环境三方面的目标, 研究了反映这些目标的各个参数的确定思路, 并采用大系统分解协调理论和多目标决策原理对模型进行求解。经桂林市水资源优化配置多目标模型实证分析, 表明该模型有助于提高经济效益和社会效益, 注重生态环境的保护, 同时验证了该模型的有效性与实用性。

关键词 水资源优化配置; 多目标模型; 可持续发展

中图分类号: TV213 文献标识码: A 文章编号: 1006-764X(2007)S2-0023-04

水资源优化配置是依赖于水资源供给量与需求量之间在总量和时空配置方面的平衡, 使水资源在时间、空间及不同用户之间进行合理分配, 其目的是实现社会可持续发展。合理地配置水资源是社会经济、生态环境与水资源协调发展的关键问题。水资源优化配置是解决水资源紧缺、供需平衡和水生态环境保护的主要手段, 因此, 现代水资源配置与经济效益、社会效益和环境质量的提高与改善有着密切的关系^[1]。水资源优化配置问题是一个多目标决策问题。本文以系统分析理论和优化技术为指导, 结合多目标决策和动态规划理论, 研究水资源优化配置模型及应用, 并采用大系统分解协调理论和多目标决策原理对模型进行求解, 以弥补现有水资源配置理论应用上的不足。进行水资源优化配置的研究, 缓解水资源供需矛盾, 有利于促进水资源的合理利用, 有利于促进资源水利的实现, 有利于促进社会、经济、资源、环境的协调发展, 对我国的经济发展和环境质量的提高具有深远的意义。

1 水资源优化配置模型

1.1 模型的建立

基于多目标决策的水资源优化配置模型, 其目标函数代表区域可持续发展过程中各方面的主要发展指标, 用于衡量某个水资源优化配置方案的优劣^[2], 其决策变量由经济系统和水资源系统内的诸多约束条件组成: 为了确定最合理的各水源供水量, 应使供水量尽量达到配置目标, 即优化模型的目标

函数值最大或最小, 并且各水源的供水量必须符合一定的条件, 反映在优化模型的约束条件集合上。其一般数学表达式为

$$\max(\min) Z = \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_n(\bar{x})\} \quad (1)$$

$$V_{t+1} = V_t + (Q_{in_t} - Q_{out_t} - Q_{s_t})\Delta t \quad (\text{水库水量平衡约束}) \quad (2)$$
$$V_{imin} \leq V_t \leq V_{imax} \quad (\text{水库蓄水能力约束}) \quad (3)$$
$$Q_{xx_t} \geq q_{min} \quad (\text{水库下泄流量约束}) \quad (4)$$
$$\sum_{j=1}^J x_{ijt} \leq W_{it} \quad (\text{水源可供水量约束}) \quad (5)$$
$$\sum_{i=1}^I x_{ijt} \leq D_{jt} \quad (\text{用户需水能力约束}) \quad (6)$$
$$\sum_{j=1}^J x_{ijt} \leq Q_{it} \quad (\text{输水能力约束}) \quad (7)$$
$$P_{life} \geq 95\% \quad (\text{生活供水保证率约束}) \quad (8)$$
$$x_{ijt} \geq 0 \quad (\text{变量非负约束}) \quad (9)$$

式中: $f_n(\bar{x})$ 为目标函数; V_t, V_{t+1} 分别为水库 t 时段初和时段末的水库蓄水量; Q_{in_t} 为水库 t 时段平均入库水量; Q_{out_t} 为水库 t 时段平均出库水量; Q_{s_t} 为水库 t 时段损失水量; V_{imin} 及 V_{imax} 分别为水库允许的最小和最大库容; q_{min} 为水库下游要求的最小泄流量 (如航运、灌溉等用水); W_{it} 为 i 水源 t 时段可供水量; D_{jt} 为 j 用户 t 时段的需水量; Q_{it} 为 i 水源 t 时段的输水能力; P_{life} 为生活供水保证率。

1.2 模型目标的选取

根据水资源优化配置原则, 模型设置经济、社会

和环境三方面的目标。

1.2.1 经济目标

采用区域供水带来的直接经济效益作为经济目标。

$$E = \max \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \partial_j (b_{ij} - c_{ij}) x_{ijt} \right\} \quad (10)$$

式中： b_{ij} 为效益系数，表示 j 用户从 i 水源单位取水量所产生的效益，元/ m^3 ； c_{ij} 为费用系数，表示 j 用户从 i 水源单位取水量所需的费用，元/ m^3 ； x_{ijt} 为 t 时段 j 用户从 i 水源所取的水量， m^3 ； ∂_j 为 j 用户用水公平系数。

1.2.2 社会目标

由于社会效益难以度量，而区域缺水量的大小或缺水程度对社会的发展有所影响，因而采用区域总缺水量作为社会目标。

$$S = \min \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \beta_j \left(D_{jt} - \sum_{i=1}^I x_{ijt} \right) \right\} \quad (11)$$

式中： D_{jt} 为 j 用户 t 时段的需水量， m^3 ； β_j 为 j 用户缺水的权重系数。

1.2.3 环境目标

发展区域经济的同时，环境的保护与改善是不容忽视的。在环境指标中，生化需氧量 BOD 与生产和生活有关，普遍适用于描述城市污水排放量及河流的水质情况，因而采用 BOD 作为环境目标^[3]。

$$R = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J 0.01 d_{pj} \left(\sum_{i=1}^I x_{ijt} \right) \quad (12)$$

式中： d_{pj} 为 j 用户单位废水排放量中 BOD 的含量； p_j 为 j 用户的废水排放系数。

式(12)的物理意义在于：通过对 t 时段 j 用户的废水排放总量中含有的 BOD 总量，来考察对环境的污染程度，即在综合效益最大化的基础上，以水质污染相对最小为环境目标。

2 模型参数的确定

2.1 效益参数及费用系数的确定

a. 工业用水的效益系数采用工业总产值分摊方法，计算公式为

$$b = \beta \frac{1}{W}$$

式中： b 为工业用水效益系数； W 为工业万元产值取水量， m^3 /万元； β 为工业用水效益分摊系数。不同的取水水源，其分摊系数不同：①以自来水作为取水水源，工业供水效益分摊系数取 5%；②以自备井作为取水水源，工业供水效益分摊系数取 4%；③以水利工程作为取水水源，工业供水效益分摊系数取 8%。

b. 农业用水效益系数按灌溉后的农业增产效益乘以水利分摊系数确定。

c. 生活、环境及公共设施用效益由于与经济方面的因素和社会效益有关，因而其效益系数比较难确定。根据生活、环境用水优先满足的配置原则，在计算中赋以较大的权值，用以表示其效益系数。

d. 费用系数可参照相关标准确定。

2.3 系数 ∂_j 和 β_j 的确定

用户用水公平性用以驱动水量和水环境容量在流域与地区之间、近期与远期之间、用水目标之间、水量和水质目标之间、用水阶层之间的公平分配，这体现了可持续发展前提下水资源优化配置的原则之一。在用水目标上，优先保证生活用水和最小生态用水量，兼顾经济用水和一般生态用水，在保障供水的前提下兼顾综合利用；在用水阶层中，注重提高农村饮水保障程度，保护城市低收入人群的基本用水。用户

用水公平系数 ∂_j 计算公式为 $\partial_j = \frac{1 + n_{\max} - n_j}{\sum_{j=1}^J (1 + n_{\max} - n_j)}$ ，其

中 n_j 为 j 用户得到供水的次序， $n_{\max}$ 为用户得到供水的次序的最大值。此式的物理意义为：由于不同用户取水的优先级别不同，通过对用户得到供水的优先程度的考察，确定各用户得到供水的次序，从而确定用户用水公平系数。

用户缺水权重系数 β_j 也可采用类似方法确定。

2.4 目标权重系数的确定

利用基于二元对比的多目标系统目标权重确定的模糊分析理论与方法^[4-5]，来确定模糊二元对比权重。方法如下：首先，对目标集 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 进行二元对比，确定排序标度 e_{kl} ，从而确定目标集 P 重要性的排序；在确定了目标重要性排序以后，可根据语气算子与模糊标度值的对应关系对各目标进行二元对比重要性比较，同时在相邻两级语气算子中再插入模糊标度值，确定模糊标度值 β_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n$ ； $j = 1, 2, \dots, n$)，由文献[6]可知目标 i 的权重

$$\text{公式为 } w_i = 2 \sum_{j=1}^n \frac{\beta_{ij}}{n(n-1)} \text{ 其中 } i \neq j。$$

此外，当发生供水破坏时，为了尽量减少对水环境的影响，在降低供水决策时根据企业排污指标的差异采用不同的权重；在保证对某企业年产量的影响不超过一定比例的前提下，对污染物排放相对较多的企业，供水量的降低幅度也相应较大。

3 多目标优化配置模型的求解

由于所建的配置模型涉及多水源、多用户、多维决策变量，模型的规模较大，多关联、多约束，因此利用递阶分析法进行求解^[5-7]。将原来复杂的大系统优化问题分为若干个小的子系统优化问题，应用现有的一些优化方法直接求解，将已求解出的局部最优解通过其相互的联系聚合起来，根据大系统的总

目标 ,通过协调关系寻求整个大系统的最优^[5-6]。

3.1 第一级子系统优化

根据自然地理情况、社会经济情况和水资源情况 ,将用水系统分为 2 个子系统 ,建立二级递阶多目标优化模型。

各子系统在第二级给定的水量预分值得 $\sum_{k=1}^K WG_{kt}$
= Q_{out_t} 的前提下 ,分别进行各子系统优化。

第 k 个子系统的优化模型如下 :

目标函数 :

$$\max F_k(X_k) = \{E_k(X_k), S_k(X_k), R_k(X_k)\} \quad (13)$$
$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^{J(k)} x_{1kjt} \leq WG_{kt} \\ \sum_{j=1}^{J(k)} x_{kij t} \leq W_{kit} \quad (i = 2, 3, \dots, J(k)) \\ \sum_{i=1}^{I(k)} x_{kij t} \leq D_{kjt} \\ x_{kij t} \leq Q_{kit} \\ x_{kij t} \geq 0 \end{cases}$$

式中 : x_{1kjt} 为 k 子系统 j 用户 t 时段从某水库所取的水量 ; WG_{kt} 为 k 子系统 t 时段水量预分值得 ,其余同上。

根据该模型多目标优化的特点 ,本文采用非劣解生成技术中的权重法将多目标向量优化问题转化为单目标问题。首先将向量问题的各个目标函数赋以一定的权重 ,构成一个单目标的优化问题 ,然后用动态规划法求解^[6-9]。

用动态规划法可求得局部最优解和最优目标值 ,它们均是出库流量(Q_{out})的函数。虽然是可行解 ,但未必是整个系统的最佳均衡解。因此将第一级各子系统求得的最优解 $X_k(Q_{out})$ 反馈到第二级 ,进行第二级系统协调。

3.2 第二级系统协调

第二级系统协调的任务是解决出库流量在各子系统的最佳分配 ,即求解如下问题 :

目标函数

$$F(X) = \max \sum_{k=1}^K F_k(X_k) \quad (14)$$
$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{k=1}^K WG_{kt} = Q_{out_t} \\ 0 \leq WG_{kt} \leq WS_{kt} \\ Q_{xx_t} \geq q_{\min} \\ V_{t+1} = V_t + (Q_{in_t} - Q_{out_t} - Q_{s_t}) \Delta t \\ V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max} \end{cases}$$

式中 : WS_{kt} 为 k 子系统 t 时段的输水能力 ;其余同上。

判断第二级总体目标值是否达到最优 ,若未达

到最优 ,则不断调整出库流量预分方案 ,传递到第一级进行子系统优化 ,然后再将各子系统最优解 $X_k(Q_{out})$ 反馈到第二级。这样反复迭代、协调、寻优 ,直至达到总体目标值最优时为止。

4 应用实例

桂林市地处广西壮族自治区东北部 ,截至 2005 年实有耕地面积 7 804 hm^2 ,其中水田面积 5 249 hm^2 ,农田有效灌溉面积 6 099 hm^2 ,农作物总播种面积 1.96 万 hm^2 。桂林市现有 3 处集中饮用水水源地 ,均分布于漓江两侧 ,抽取漓江水作为供水水源。全市有自备水源 200 多处 ,其中以地表水为水源的为 17.5 万 m^3/d ,以地下水为水源的为 13 万 m^3/d 。该市现状供水能力约 5 500 万 m^3 ,目前尚无深层承压水开采利用。

桂林市大部分的农业灌溉、农村人畜饮水都包含在青狮潭灌区内 ,灌区总面积 984 km^2 ,现状有效灌溉面积为 2.49 万 hm^2 ,其中水田 1.99 万 hm^2 ,旱地 0.5 万 hm^2 ,灌区渠系水利用系数为 0.5 ,田间水利用系数为 0.9。青狮潭灌区内蓄水工程有效库容总共 4.03 亿 m^3 ,总库容 6.53 亿 m^3 ,现状青狮潭灌区年需供水量 3 890 万 m^3 ,日平均需水量 10.66 万 m^3 。

针对桂林市水资源系统的自然地理情况、社会经济情况和水资源情况 ,分为城市用水和灌区用水两个子系统 ,建立二级递阶多目标优化模型。各子

系统在第二级给定的水量预分值得 $\sum_{k=1}^K WG_{kt} = Q_{out_t}$ 的前提下 ,分别进行各子系统优化。

利用上述大系统分解协调方法对桂林市水资源优化配置模型进行求解 ,得出该市水资源优化配置结果(以 2010 年为规划水平年) ,见表 1、表 2。

表 1 桂林市需水量现状(2005 年)与 2010 年优化配置结果

用水户	2005 年		2010 年			
	需水量/ 万 m^3	所占 比重/%	需水量/万 m^3			$P = 50\%$ 所占的 比重/%
			$P = 50\%$	$P = 75\%$	$P = 95\%$	
农田灌溉	433 780	74.49	407 704	432 166	458 096	61.95
林 牧 渔	43 084	7.40	50 145	52 652	55 285	7.62
工 业	50 008	8.59	51 197	51 197	51 197	7.78
建筑及 服务业	10 516	1.81	25 796	25 796	25 796	3.92
居民生 活用水	25 300	4.34	48 960	48 960	48 960	7.44
生态环 境用水	19 662	3.38	74 164	88 997	106 780	11.27
总需水量	582 350	100	658 067	699 768	746 130	100

注 : P 为供水保证率。

由表 1 可知 :①在平水年 $P = 50\%$ 情况下 ,从现状水平年(2005 年)到 2010 年水平年 ,桂林市生活、

第三产业、林牧渔业及生态需水量均呈缓慢上升趋势 ;只有农业用水呈缓慢下降趋势 ,从现状年 433 780 万 m³下降到 2010 年的 407 704 万 m³ ,全市多年平均需水量总体呈上升趋势 ,从 582 350 万 m³ 上升到 658 067 万 m³ ,增加 13%。②从供水用户来看 ,生活用水所占比例有所增加 ,从 4.34% 增加到 7.44% ;生产用水所占比例有所下降 ;生态环境用水所占比例有所上升 ,从不足 4% 增加到 11.27% ;生产用水中 ,农田灌溉始终占绝大部分 ,但是随着经济发展结构的调整和节水措施不断加强 ,占总用水量的比例逐年下降 ,从 74.49% 下降到 61.95% ;而非农产业用水总量不断上升 ,占总用水量的比重也略有上升。

表 2 桂林市水资源优化配置各目标计算成果及其现状比较

年份	来水保证率	经济目标	社会目标	环境目标
		供水净效益/万元	缺水/万 m ³	BOD 排放质量浓度/(mg·L ⁻¹)
2010 年	P = 50%	125 375	0	1.53
	P = 75%	120 775	1 846	1.78
	P = 95%	100 808	12 975	2.93
2005 年		79 409	0	3.67

由表 2 可知 :①通过优化配置后 ,规划水平年 (2010 年)与现状年 (2005 年)相比 ,供水净效益明显增加 ,污染物 (BOD)排放量略有降低。当来水保证率由 P = 50% 至 P = 95% 变化时 ,缺水量增加 ,供水净效益随之减少 ,污染物 (BOD)排放浓度稍有增加。P = 75% 与 P = 50% 相比 ,缺水量增加 1 846 万 m³ ,供水净效益减少 4 600 万元 ,污染物排放质量浓度增加 0.25 mg/L ;P = 95% 与 P = 75% 相比 ,缺水量增加 11 129 万 m³ ,供水净效益减少 19 967 万元 ,污染物排放质量浓度增加 1.15 mg/L。由于枯水季河水流流量减少 ,其稀释自净能力降低 ,来水保证率从 P = 50% 到 P = 95% 变化时 ,污染物的排放量稍有增加。②来水保证率从 P = 75% 到 P = 50% ,单位缺水量产生的供水净效益损失 (ΔE)为 2.49 元/m³ ,从 P = 95% 到 P = 75% ,单位缺水量产生的供水净效益损失为 1.79 元/m³。在供水量不足的情况下 ,农业用水首先受到抑制 ,由于其供水净效益系数较小 ,对总供水净效益影响不大。③在来水保证率 P = 95% 的特枯年份 ,生活用水和环境用水均可满足 ,其余用户有不同程度的缺水 ,这体现了配置过程中对不同的用水对象采用不同的用水优先权的原则。在干旱年份 ,漓江补水也是主要缺水用户之一。

桂林市水资源优化配置模型以经济、社会和环境综合效益最大为目标 ,其优化成果是权衡经济、社会、环境多目标的协调解 (非劣解) ,体现了可持续发展思想和原则。

5 结 论

- a. 水资源优化配置是一个复杂的大系统多目标优化问题 ,其涉及经济、社会、环境、资源等诸多方面 ,而且其配置成果与需水量的预测、模型参数确定方法等有关 ,本文运用大系统分解协调理论建立了水资源二级递阶优化模型 ,符合水资源优化配置的基本思路 ,有效地求解了复杂系统的优化问题。
- b. 利用模糊二元对比权重法确定各目标权重 ,既可以将多目标转化为单目标优化问题 ,还可通过与决策者交互目标权重值灵活地控制计算过程。
- c. 从桂林市水资源优化配置实际项目应用情况看 ,规划水平年 (2010 年)3 个供水保证率条件下的水资源优化配置结果合理 ,其水质达到了地表水环境质量标准中 II 类水要求 ,注重了生态环境的保护 ,有助于协调资源、社会、经济和生态环境的动态关系 ,有利于提高水资源的利用效率 ,有助于提高经济效益和社会效益 ,体现了公平、优先、高效的原则 ,体现了可持续发展思想和综合效益最大化原则。

参考文献 :

[1] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论 [M]. 北京 : 科学出版社 2000.

[2] XEVI E ,KHAN S. A multi-objective optimization approach to water management [J]. Journal of Environmental Managemen , 2005 ,77(4) :269-277.

[3] KUMAR A ,MINOCHA K ,VIJAY K. Fuzzy optimization model for water quality management of ariver system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management ,1999 ,125(3) :179-180.

[4] 陈守煜. 多阶段多目标决策系统模糊优选理论及其应用 [J]. 水利学报 ,1990(1) :1-10.

[5] 姚汝祥 ,廖松. 水资源系统分析及应用 [M]. 北京 :清华大学出版社 ,1987.

[6] 卢冰. 桂林市水资源优化配置研究 [D]. 武汉 :武汉大学 ,2005.

[7] 冯尚友. 水资源系统工程 [M]. 武汉 :湖北科学技术出版社 ,1991.

[8] 冯尚友. 多目标决策理论、方法与应用 [M]. 武汉 :华中理工大学出版社 ,1990.

[9] 《运筹学》教材编写组. 运筹学 [M]. 北京 :清华大学出版社 2005.

(收稿日期 2007-03-09 编辑 :高建群)