

再生水与自来水资源的优化配置研究

马伟芳¹, 赵新华¹, 王洪云², 储诚山¹

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051)

摘 要: 为解决城市缺水问题建立了分质供水的综合优化配置数学模型, 并对天津市 2010 年再生水与自来水资源的优化配置进行了仿真计算。结果表明, 经优化配置后能保证各方面的协调发展, 实现了水资源的可持续利用, 获得了良好的整体效益。

关键词: 再生水; 自来水; 优化配置; 数学模型

中图分类号: X703.1; TU991.2 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2005)01-0041-04

Study on Optimizing Allocation of Reclaimed Water and Fresh Water Resources

MA Wei-fang¹, ZHAO Xin-hua¹, WANG Hong-yun², CHU Cheng-shan¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: In order to give a solution to urban water shortage, an integrated and optimizing allocation mathematic modes was established for water supply based on different quality, and emulation calculation was made on the optimizing allocation of reclaimed water and fresh water resources. The result shows that the optimizing allocation is able to coordinate the development in all fields, so as to realize the sustainable utilization of water resources and gain good integral benefits.

Key words: reclaimed water; fresh water; optimizing allocation; mathematic model

再生水及自来水资源的综合优化配置是指在一特定的区域内, 以有效、公平和可持续的原则对水资源在各用水对象之间进行科学的分配。与以往的水资源优化配置不同的是, 它不仅研究水资源对国民经济的保障作用, 还研究再生水回用的综合优化配置方案。

1 模型

以追求经济和社会效益最高、环境污染最小为目标, 以各种平衡关系为约束建立再生水与自来水的综合优化配置模型。

目标函数:

$$F = \max \{ \text{GNP} + \text{AG} + P + Q_{\text{WE}} \} + \min \{ \text{COD} \} = \\ \max \left\{ \sum_{i=1}^n C_i \times Q_{ii} + \sum_{j=1}^m A_j \times Q_{ji} + \sum_{i=1}^n C_i \times Q_{ii} \times \right. \\ \left. B_i + Q_{\text{WE}} \right\} + \min \left\{ \sum_{i=1}^n C_i \times Q_{ii} \times D_i \right\} \quad (1)$$

式中 GNP —— 国民生产总值

Q_{WE} —— 生态环境用水量, 为地表水资源量的 30% ~ 60%

AG —— 粮食产量

Q_{ii} —— t 时段 i 部门的耗水量

Q_{ji} —— t 时段 j 种粮食的耗水量

C_i —— i 部门单位耗水量的 GNP 产值

基金项目: 天津市重点科技攻关项目(023112611)

A_j —— j 种粮食单位耗水量的 AG 产值

B_i ——单位 GNP 产值的就业人数

D_i —— i 部门单位 GNP 的 COD 排放量

P ——城市就业人数

约束条件:

a. 水量平衡

$$\sum_{i,j} (Q_{it} + Q_{jt} + Q_{WE}) \leq \sum_{i,j} (Q_{kit} + Q_{kjt} + Q_{WE}) \leq \sum_k Q_{kt} \quad \forall i, j, t, k \quad (2)$$

式中 Q_{kit}, Q_{kjt} —— t 时段由 k 水厂供给 i, j 部门的水量

Q_{kt} —— t 时段 k 水厂的可供水资源量

b. 供水能力

$$\sum_k Q_{kt} \leq \sum_l C_{lt} \quad \forall l, k, t \quad (3)$$

式中 C_{lt} —— t 时段 l 水源的供水能力

c. 水质

$$\sum_i m_{kit} \leq m_{kt}, \sum_j m_{kjt} \leq m_{kt}, \quad \forall i, j, t \quad (4)$$

式中 m_{kit}, m_{kjt} —— t 时段用水部门 i, j 对 k 水厂的水质要求

m_{kt} —— t 时段 k 水厂的供水水质

d. 再生水量

$$\sum_m Q_{rmt} \leq r \sum_k Q_{kt}, \quad \forall m, k, t \quad (5)$$

式中 Q_{rmt} —— t 时段再生水厂 m 的产水量

r ——回收系数,一般取 0.6~0.8

e. 各行业发展的上下限

$$x_{it}^{\min} \leq x_{it} \leq x_{it}^{\max} \quad \forall i, t \quad (6)$$

式中 x_{it} —— t 时段 i 行业的规模(一般用其产值表示)

$x_{it}^{\max}, x_{it}^{\min}$ ——分别为发展规模的上下限

f. 经济部门产值与取水量的关系

$$x_{it} = \sum_i Q_{kit} \times C_{it} \quad \forall i, t \quad (7)$$

式中 C_{it} —— t 时段第 i 部门单位水量的产值

g. 产值与排污量的关系

$$\text{COD}_{it} = x_{it} \times D_{it} \quad \forall i, t \quad (8)$$

式中 D_{it} —— t 时段第 i 部门单位产值的 COD 排放量

h. 产值与就业人数

$$P_{it} = x_{it} \times \alpha_{it} \quad \forall i, t \quad (9)$$

式中 P_{it} —— t 时段第 i 部门的就业人数

α_{it} —— t 时段第 i 部门单位产值的就业人数

i. 粮食产量与用水量的关系

$$\text{AG}_{jt} = \sum_j Q_{kjt} \times \beta_{jt} \quad \forall j, t \quad (10)$$

式中 AG_{jt} —— t 时段第 j 种作物的产量

β_{jt} —— t 时段单位水量的第 j 种作物产量

j. 粮食产量

$$\text{AG}_{jt}^{\min} \leq \text{AG}_{jt} \leq \text{AG}_{jt}^{\max} \quad \forall j, t \quad (11)$$

式中 AG_{jt} —— t 时段 j 种粮食的产量

$\text{AG}_{jt}^{\max}, \text{AG}_{jt}^{\min}$ ——分别为产量的上下限

k. 国民生产总值

$$\text{GNP}_T = \sum_{t=1}^T \sum_i x_{it} \quad (12)$$

式中 T ——时段

l. 排污总量

$$\text{COD}_T = \sum_{i=1}^T \sum_i \text{COD}_{it} \quad (13)$$

m. 就业人数

$$P_T = \sum_{t=1}^T \sum_i P_{it} \quad (14)$$

n. 粮食总产量

$$\text{AG}_T = \sum_{i=1}^T \sum_j \text{AG}_{jt} \quad (15)$$

o. 区域生态环境用水量

$$\text{WE}_{it} = \text{WR}_{it} - \sum_j Q_{ijt} R_{it} \quad \forall i, t \quad (16)$$

$$\text{WE}_{it} \geq \text{WE}_{it}^{\min} \quad \forall i, t \quad (17)$$

式中 $\text{WE}_{it}, \text{WE}_{it}^{\min}$ —— t 时期第 i 水体的实际生态环境用水量及其需水量的最低限

WE_{it} —— t 时期 i 水体的天然水资源量

R_{it} —— t 时期回归到第 i 水体的总水量

p. 水环境容量

$$y_{kt} \leq E_{kt} \quad \forall k, t \quad (18)$$

$$y_{kt} = \sum_i r_{kit} \times x_{it} (1 - D_{kit}) \quad \forall k, t \quad (19)$$

式中 y_{kt}, E_{kt} —— t 时期第 k 种污染物的排放量及其水环境容量

r_{kit}, D_{kit} —— t 时期第 i 行业单位产值的第 k 种污染物质及其处理率

q. 地下水开采量

$$Q_{Gt} \leq Q_{Gt}^* \quad \forall t \quad (20)$$

式中 Q_{Gt} 、 Q_{Gt}^* —— t 时期地下水实际开采量与
允许开采量

r. 再生水和自来水用水比例

$$\sum_i Q_{ikt} \leq \beta_i \sum_i Q_{kit} \tag{21}$$

$$\sum_j Q_{kjt} \leq \sum_m Q_{rmt} \tag{22}$$

式中 β_i ——用户 i 的再生水用量占总用水量的比
例,一般取 0.3 ~ 0.4(农业用水除外)

s. 非负约束

$$Q_{kit} \geq 0, Q_{kjt} \geq 0 \tag{23}$$

2 模型的求解

采用逐步宽容约束法和目标权值系数法相结合的交互规划法求解所建立的多目标函数,求解流程如图 1 所示。

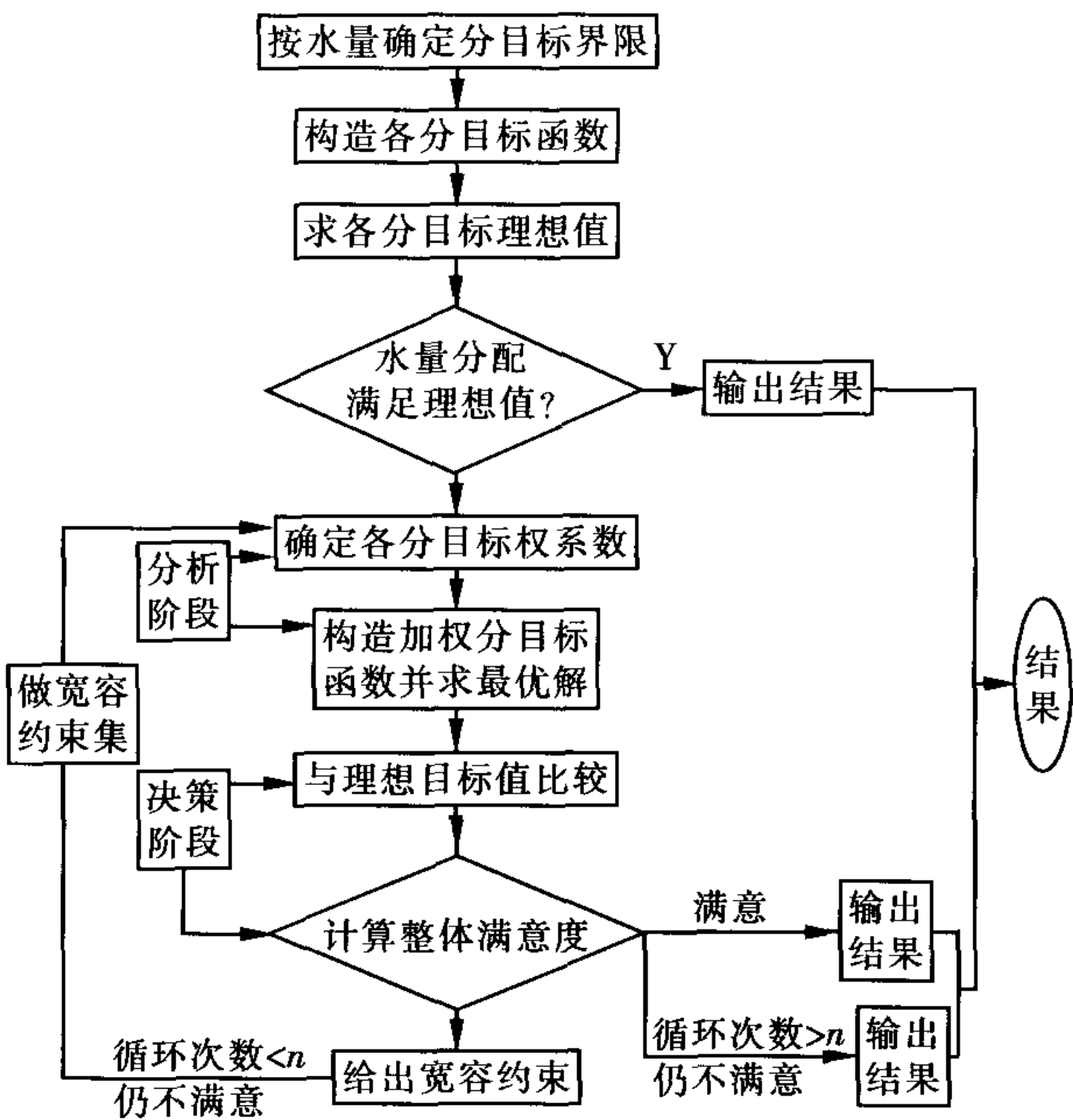


图 1 求解流程

Fig. 1 Block diagram of calculation

3 实例优化模拟仿真

以天津市为例,进行 2010 平水年的再生水与自来水综合优化配置的模拟仿真。

① 用水组成及供需平衡预测。2010 年的供、需水量如表 1 所示。

② 水资源总量。根据《天津市水资源利用规划》、《天津市再生水资源利用规划》和《天津市总体规划发展规

表 1 供、需水量预测

Tab. 1 Water amount of supply and demand forecast 10^8 m^3

分区		2010 年		
		50%	75%	95%
城镇	供水量	10.31	10.31	7.76
	需水量	24.92	23.92	23.92
	平衡结果	-14.61	-13.61	-16.16
农村	供水量	12.99	10.29	5.24
	需水量	26.51	28.87	28.87
	平衡结果	-13.52	-18.58	-23.63
总平衡结果		-28.13	-32.19	-39.79

注: 50%、75%、95% 为供水保证率。

表 2 可供利用的水资源量

Tab. 2 Available water resource amount in the year 2010

10^8 m^3

项目	平水年 ($p = 50\%$)	偏枯年 ($p = 75\%$)	枯水年 ($p = 95\%$)
再生水回用量	6.54	6.54	6.54
当地产水量	9.14	5.57	2.34
入境水量	9.40	5.28	0.97
外引水量	6.80	6.00	3.00
地下水资源量	8.32	8.32	8.32
引江中线	7.05	7.57	7.86
海水利用	2.00	2.00	2.00
合计	49.25	41.28	31.03

③ 发展目标。全市常住人口为 1 100 万人,其中城镇人口为 840 万人,农村人口为 260 万人;全市国民生产总值(GNP)达到 3 500 亿元(最低不少于 2 900 亿元),工业生产总值达到 12 000 亿元。

④ 就业人数。按劳动力资源计 2010 年就业人数的上、下限分别为 600 万人和 430 万人。

⑤ COD 排放量。期望排放量为 $12 \times 10^4 \text{ t}$,最大允许排放量为 $18 \times 10^4 \text{ t}$ 。

⑥ 粮食产量。以人均粮食的上下限定额计算,则粮食产量的上、下限分别为 $330 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $230 \times 10^4 \text{ t}$ 。

⑦ 生态需水量。上、下限分别为 $10.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $5.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

⑧ 用水定额及水质。用水定额按行业标准执行,水质则按要求分质供给,其中农业用水、工业冷却水和园林绿化在枯水年可考虑全部采用再生水(景观园林用水的上、下限分别为 $0.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$)。

根据模型求解流程采用 Fortran 编写模拟仿真

程序,得到了追求单目标最大值的整体效益结果(见表 3)和综合优化配置模拟仿真结果(见表 4)。

表 3 平水年的单目标最大和优化配置结果
Tab. 3 Allocation result in pursuing single maximal aim and optimal scheme

指标	Max GNP	Max AG	Max P	Max Q_{WE}	Min COD	优化 配置	分目标 理想值
整体效益	0.33	0.36	0.32	0.43	0.39	0.73	1.0

表 4 水资源优化配置结果

Tab. 4 Optimal allocation of water resource in the year 2010

指标	GNP /亿元	AG /10 ⁴ t	P /万人	Q_{WE} /10 ⁸ m ³	COD /t	D(整 体效益)
p = 50%	3 461 (0.935)	318.6 (0.78)	568.34 (0.82)	8.76 (0.62)	130 003 (0.83)	0.73
p = 75%	3 272 (0.620)	280.2 (0.502)	529.6 (0.586)	8.3 (0.53)	136 803 (0.72)	0.55
p = 95%	3 132.8 (0.388)	252 (0.22)	487.8 (0.34)	7.56 (0.39)	126 002 (0.90)	0.363

注: ()内为满意度系数。

由表 3 可知,水资源优化配置比追求单目标最大化的水资源配置能获得更大的整体效益。

平水年各行业配置的总水量:生活用水为 $8.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,农业为 $19.32 \times 10^8 \text{ m}^3$,工业为 $12.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,第三产业为 $1.01 \times 10^8 \text{ m}^3$,生态环境用水为 $8.28 \times 10^8 \text{ m}^3$;各行业配置的再生水总量:生活杂用为 $0.83 \times 10^8 \text{ m}^3$,农业为 $4.41 \times 10^8 \text{ m}^3$,工业冷却为

$0.65 \times 10^8 \text{ m}^3$,景观生态为 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

由表 4 可知,当缺水时一般会削减农业用水,这是由于农业部门的投入产出率较低,所以其满意度较低,与实际情况相符。

4 结论

再生水和自来水的综合优化配置不仅解决了各部门用水需求的矛盾,而且减少了污水排放量,缓解了城市水资源不足的矛盾。优化配置能保证各方面的均衡、协调发展,整体效益较好,满意度较高,有利于区域的可持续发展,是解决城市用水紧张局面的有效途径。

参考文献:

[1] 田一梅,赵新华,张雅君. 城市自来水与中水系统综合规划的优化研究[J]. 给水排水,2001,27(5):23-26.
[2] Terpstra P M J. Sustainable water usage systems: models for the sustainable utilization of domestic water in urban areas [J]. Water Science and Technology, 1999, 39(5):65-72.

电话:(022)27400830
E-mail:mpeggy@163.com
收稿日期:2004-07-02

· 工程信息 ·

深圳市国戍污水处理厂工程

该工程一期处理规模: $24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (二期处理规模: $24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),处理工艺:A/O,占地面积: 31.67 hm^2 ,投资额:2.4 亿元,运营方式:BOT。甲方:深圳市宝安区环境保护局,设计单位:中国市政工程西南设计研究院深圳分院,建设单位:深圳市宝安区环境保护局。目前该工程正在报批可研。

深圳市沙井污水处理厂工程

该工程一期处理规模: $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (二期处理规模: $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),处理工艺: A^2/O ,总投资额:2.25 亿元。甲方:深圳市宝安区环境保护局,设计单位:中国市政工程中南设计研究院深圳分院,建设单位:深圳市宝安区环境保护局。目前该工程正在编制可研报告。

(本刊编辑部 供稿)