

再生水与天然水资源模糊优化配置研究

马伟芳¹, 赵新华¹, 王洪云²

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

摘要: 再生水回用是解决中国缺水问题的有效措施, 而水资源的合理开发与优化配置是实现可持续发展的有效途径。基于水资源配置系统中各方目标冲突又模糊的特点, 建立了再生水与天然水资源配置的模糊优化模型, 该模型将系统中各方目标当作独立的个体, 以配水“满意度”作为目标函数, 在配水满足一定的水质、水量的要求下, 得到用水部门最小满意度水平最大化、整体满意度水平最大化、水环境可持续发展最优化三种水资源模糊优化配置方案以满足不同的需求目的, 为配水决策系统中各水用户的竞争与协调提供了参考, 并以天津市为例予以说明和验证。

关键词: 再生水资源; 天然水资源; 模糊优化配置; 可持续发展

Study on Fuzzy Optimal Allocation of Reclaimed Water and Natural Water Resource

MA Wei-fang^[1], ZHAO Xin-hua^[1], WANG Hong-yun^[2]

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

Abstract: Reclaimed water reusing is an effective measure to solve the water shortage problem in china. While reasonable exploitation and optimal allocation of water resource is the effective way to realize sustainable development. Based on the characteristics that the objectives in water resource allocation system are conflicting and vague, fuzzy optimization allocation model for reclaimed and natural water resource are developed. All departments in the system are treated as independent individuals with the satisfaction degree as their objective. Under the condition that water allocation satisfied the demand of definite water quality and quantity, three kinds of water resource fuzzy optimal allocation scheme of minimal satisfaction degree optimization、integral satisfaction degree optimization、water environment sustainable development optimization were obtained which can satisfy different requirement aim and provide reference for the competition and cooperation among water consumer in water allocation decision-making system. A case study of Tianjin demonstrates the realistic application of the models.

Keywords: reclaimed water resource; natural water resource; fuzzy optimization; sustainable development

目前中国水资源开发利用中的主要问题是水资源短缺、污染和浪费严重、再生利用率低以及与此相应的自然生态条件恶化。解决区域水资源危机, 再生水回用是切实可行的, 即开辟了新水源, 又减少了对环境的污染, 是解决水危机的一项重要举措。因此再生水和天然水资源的合理开发与优化配置是实现缺水地区可持续发展的首要前提, 必须在水资源自然配置格局的基础上, 兼顾长远利益和全局利益, 实现经济、生态环境和社会三大效益的协调统一。再生水和天然水资源的优化配置是基于水资源的供需矛盾进行的, 在供给方面, 通过协调各用水部门矛盾, 改变水资源天然配置格局以适应生产力布局, 在需求方面, 通过调整区域产业结构和用水

结构,建立节水型国民经济体系^[1]。因此再生水和天然水资源配置是多目标的且目标是模糊的优化问题,“满意度”是在各用水部门最低用水限度的基础上考虑各参与配水的用户自身多方面因素的一个综合指标,且是一个模糊的概念,因而更适于做该系统的目标函数。在此基础上,按照用水部门最小满意度水平最大化、整体满意度水平最大化、水环境和生态环境可持续发展最优化的准则,建立再生水和天然水资源模糊优化配置模型,通过模糊系统的优化决策,得到相应准则下的再生水与天然水资源的模糊优化配置方案,供决策部门根据不同时期、不同发展目的来选择水资源配置方式。

1 再生水与天然水资源的模糊优化配置模型

1.1 模糊优化的基本原理

$$\text{设论域 } U \text{ 上的模糊集 } A \text{ 为: } A = \{u, \mu_A(u) \mid u \in U, 0 \leq \mu_A(u) \leq 1\} \quad (1)$$

式中, u 为 U 上的元素, $\mu_A(u)$ 为模糊集 A 的隶属函数,表示元素 u 隶属于模糊集 A 的程度。

则论域 U 上的任意两个模糊集 A 、 B 的交为:

$$C = A \cap B = \{u, \mu_C(u) \mid u \in U, 0 \leq \mu_C(u) \leq 1\} \quad (2)$$

$$\mu_C(u) = \mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (3)$$

在多目标模糊决策中,模糊目标和模糊决策同等对待,则模糊集 $A_t, t \in T$ 代表的各模糊目标与模糊约束的模糊决策为:

$$D = \bigcap_{t \in T} A_t = \{x, \mu_D(x) \mid x \in X, 0 \leq \mu_D(x) = \bigwedge_{t \in T} \mu_{A_t} \leq 1\} \quad (4)$$

式中, x 为决策变量, X 为决策空间。

决策集 D 中,隶属函数最大值对应的决策为系统的最优决策 D^* ,对应于最优决策的决策变量 x^* 为系统的最优解,即系统的最优决策为:

$$D^* = [x^*, \mu_D(x^*)] \mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \{\mu_D(x)\} \quad (5)$$

则决策空间在一定的约束条件下的模糊优化模型为:

$$\begin{aligned} \text{ob.} \quad & \max f[\mu_D(x)] \\ & h_l(x) \leq 0 \quad \forall l \\ \text{s.t.} \quad & g_m(x) \geq 0 \quad \forall m \\ & 0 \leq \mu_D(x) \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

1.2 再生水与天然水资源的模糊优化配置模型

再生水与天然水资源的优化配置的目标是保证可持续发展、生态与生活用水和环境用水的前提下,获得环境、经济、社会协调发展的最佳用水综合效益。并按照“优水优用,劣水劣用”的原则,科学的安排城市各水源的供应次序和用户的用水次序。

按照中国的具体国情,考虑模糊目标 $G(GNP)$ 、 $G(AG)$ 、 $G(COD)$ 、 $G(WE)$ [3]。

GNP 为国民生产总值, $GNP = \sum_{i=1}^n GNP_i = \sum_{i=1}^n C_i \times Q_{it}$ (C_i — i 部门单位耗水量的 GNP 产值,

Q_{it} —为 t 时段 i 部门的耗水量) 能全面客观的衡量一个地区的经济发展状况, 还可以和其他

国家和地区进行横向比较; 其理想值和最低允许值分别为 GNP_{max} 、 GNP_{min}

($GNP_{max} > GNP_{min}$), 其模糊目标为 $G(GNP)$, $G(GNP)$ 的隶属函数 $\mu_G(GNP)$ 反映了为满

足国民生产总值的要求对水资源配置的满意程度, $\mu_G(GNP)$ 可设定为:

$$\mu_G(GNP) = \begin{cases} 1 & GNP \geq GNP_{max} \\ \frac{GNP - GNP_{min}}{GNP_{max} - GNP_{min}} & GNP_{min} \leq GNP \leq GNP_{max} \\ 0 & GNP \leq GNP_{min} \end{cases} \quad (7)$$

AG 为粮食产量, $AG = \sum_{j=1}^m AG_j = \sum_{j=1}^m A_j \times Q_{jt}$ (A_j —为 j 种粮食单位耗水量的 AG 产

量, Q_{jt} —为 t 时段 j 种粮食的耗水量) 它是一个社会和经济兼而有之的目标指标, 因为农业

是中国国民经济的基础部门, 又是用水大户, 同时一定程度上也关系到社会的安定状况; 其理

想值和保证国家发展的最低允许值分别为 AG_{max} 、 AG_{min} ($AG_{max} > AG_{min}$), 其模糊目标为

$G(AG)$, $G(AG)$ 的隶属函数 $\mu_G(AG)$ 反映了农业部门对水资源配置的满意程度, $\mu_G(AG)$

可设定为:

$$\mu_G(AG) = \begin{cases} 1 & AG \geq AG_{max} \\ \frac{AG - AG_{min}}{AG_{max} - AG_{min}} & AG_{min} \leq AG \leq AG_{max} \\ 0 & AG \leq AG_{min} \end{cases} \quad (8)$$

COD 为化学需氧量排放总量, $COD = \sum_{i=1}^n COD_i = \sum_{i=1}^n C_i \times Q_{it} \times D_i$ (D_i —为 i 部门单

位 GNP 的 COD 排放量产值) 是各种水质指标中能比较准确表示水体中污染物含量的指标,

测定时间短, 不受水质限制, 适用于描述区域社会经济活动对水环境的影响; 其理想值和保证

可持续发展的最大允许值分别为 COD_{\min} 、 COD_{\max} ($COD_{\max} > COD_{\min}$), 其模糊目标为 $G(COD)$, $G(COD)$ 的隶属函数 $\mu_G(COD)$ 反映了为保证可持续发展对各用水部门分配水量而引起的 COD 排放量多少的满意程度, $\mu_G(COD)$ 可设定为:

$$\mu_G(COD) = \begin{cases} 1 & COD \leq COD_{\min} \\ \frac{COD_{\max} - COD}{COD_{\max} - COD_{\min}} & COD_{\min} \leq COD \leq COD_{\max} \\ 0 & COD \geq COD_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

WE 为生态环境用水量, $WE = Q_{WE} = (30\% \sim 60\%) \times$ 地表水资源量(当地产水和入境水, 不含地下水), 可持续发展的关键因素在于环境的可持续发展, 而城市区域环境系统的完整性与可持续性的维持需要有一定的水资源作为支持, 所以区域水资源的开发利用不能超过一定的限度, 否则会引发一系列的生态环境问题; 其理想值和保证可持续发展的最低允许值分别为 $Q_{WE\max}$ 、 $Q_{WE\min}$ ($Q_{WE\max} > Q_{WE\min}$), 其模糊目标为 $G(Q_{WE})$, $G(Q_{WE})$ 的隶属函数 $\mu_G(Q_{WE})$ 反映了为保证可持续发展对水资源配置的满意程度, $\mu_G(Q_{WE})$ 可设定为:

$$\mu_G(Q_{WE}) = \begin{cases} 1 & Q_{WE} \geq Q_{WE\max} \\ \frac{Q_{WE} - Q_{WE\min}}{Q_{WE\max} - Q_{WE\min}} & Q_{WE\min} \leq Q_{WE} \leq Q_{WE\max} \\ 0 & Q_{WE} \leq Q_{WE\min} \end{cases} \quad (10)$$

1.2.1 最小满意度水平最大化模型 (MMM)

$$\begin{aligned} ob. \quad & \max \pi \\ s.t. \quad & \left\{ \begin{aligned} & \mu_G(GNP) \geq \pi \\ & \mu_G(AG) \geq \pi \\ & \mu_G(COD) \geq \pi \\ & \mu_G(WE) \geq \pi \\ & GNP_{\min} \leq GNP \leq GNP_{\max} \\ & AG_{\min} \leq AG \leq AG_{\max} \\ & COD_{\min} \leq COD \leq COD_{\max} \\ & WE_{\min} \leq WE \leq WE_{\max} \\ & 0 \leq \pi \leq 1 \\ & 0 \leq \sum_{i=1}^n Q_{it} + \sum_{j=1}^m Q_{jt} + Q_{WE} \leq Q \\ & 0 \leq \sum_{i=1}^n r_i Q_{it} + \sum_{j=1}^m r_j Q_{jt} + r Q_{WE} \leq Q_r \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (11)$$

模型中 π 为引入变量, 代替系统中各方满意度的下限; Q 为再生水和天然水资源总量,

Q_r 为再生水资源量； r_i, r_j, r 为各行业可利用的再生水量比例。该模型能确保系统中冲突的各水用户都有较高的满意水平。

1.2.2 水用户整体满意度水平极大化模型 (MAM)

$$\begin{aligned}
 ob. \quad & \max \{[\mu_G(GNP) + \mu_G(AG) + \mu_G(COD) + \mu_G(WE)]/4\} \\
 s.t. \quad & \begin{cases} GNP_{\min} \leq GNP \leq GNP_{\max} \\ AG_{\min} \leq AG \leq AG_{\max} \\ COD_{\min} \leq COD \leq COD_{\max} \\ WE_{\min} \leq WE \leq WE_{\max} \\ 0 \leq \sum_{i=1}^n Q_{it} + \sum_{j=1}^m Q_{jt} + Q_{WE} \leq Q \\ 0 \leq \sum_{i=1}^n r_i Q_{it} + \sum_{j=1}^m r_j Q_{jt} + r Q_{WE} \leq Q_r \end{cases} \quad (12)
 \end{aligned}$$

该模型以系统的整体满意度水平最大化为目标，能保证系统的平均满意水平较好。

1.2.3 生态环境和可持续发展最优化模型 (MWM)

$$\begin{aligned}
 ob. \quad & \max \pi \\
 s.t. \quad & \begin{cases} \mu_G(COD) \geq \pi \\ \mu_G(WE) \geq \pi \\ GNP_{\min} \leq GNP \leq GNP_{\max} \\ AG_{\min} \leq AG \leq AG_{\max} \\ COD_{\min} \leq COD \leq COD_{\max} \\ WE_{\min} \leq WE \leq WE_{\max} \\ 0 \leq \pi \leq 1 \\ 0 \leq \sum_{i=1}^n Q_{it} + \sum_{j=1}^m Q_{jt} + Q_{WE} \leq Q \\ 0 \leq \sum_{i=1}^n r_i Q_{it} + \sum_{j=1}^m r_j Q_{jt} + r Q_{WE} \leq Q_r \end{cases} \quad (13)
 \end{aligned}$$

该模型可以尽可能的减少向环境排放的污染物量、增大可持续发展的生态用水量^{[4][5]}。

2 天津市再生水与天然水资源模糊优化配置实例计算

2.1 天津市水资源及发展状况

以天津市为实例，进行 2010 水平年的再生水与天然水资源综合优化配置的模拟计算。

(1) 天津市 2010 水平年用水组成及供需平衡预测

表 1 中供水量为天津市的当地产水量、入境水量和地下水量。

表 1 天津市供水量、需水量预测表(单位: 亿 m³) 表 2 天津市水平年可利用的水资源量 (单位: 亿 m³)

再生水回用量	6.54
--------	------

当地产水量	8.70
入境水量	9.40
外引水量	7.00
地下水资源量	6.32
引江中线	8.05
海水利用	2.00
合计	48.51

城 镇	供水量	10.81
	需水量	24.92
	平衡结果	-14.61
农 村	供水量	13.61
	需水量	26.51
	平衡结果	-13.52
总平衡结果		-28.13

(2) 天津市水资源总量 (单位: 亿 m³)

根据《天津市水资源利用规划》、《天津市再生水资源利用规划》，预计天津市 2010 水平年可供利用的水资源量，见表 2

(3) 生活用水量

根据《天津市中长期发展规划》，2010 水平年生活用水量为 8.505 亿 m³ (保证率 98%)。

(4) 天津市 2010 水平年各行业用水效益、COD 污染物排放及发展上下限约束见表 3

2.2 天津市 2010 水平年再生水与天然水资源模糊优化配置结果

根据《天津市总体发展规划》确定 GNP、AG、COD、 Q_{WE} 的理想值和极限允许值分别为: 3403.23 亿元和 2917.05 亿元、311.15 万吨和 213.92 万吨、126000 吨和 180000 吨、10.86 亿 m³ 和 5.43m³; 将上述各值带入式(7)~(10)中，即可得各模糊目标的隶属函数。

表 3 天津市 2010 水平年各行业用水效益、COD 排放及发展上、下限情况表

项 目	单位耗水量的 GNP (元/m ³)	单位 GNP 的 COD 排放量(t/万元)	上下限约束 (亿元)	
第一产业	水稻	2.20	0	4.8~7.2
	小麦	3.52	0	12.8~14.08
	玉米	6.00	0	12~14.4
	杂粮	10.00	0	8.8~12
	蔬菜	21.60	0	86.4~108
	林业	32.20	0	0.9~1.2
	牧业	8.80	0	22~26
	渔业	10.88	0	14~18
第二产业	油煤	35.69	0.0110	110~136
	食品	80	0.0241	140~170
	纺织	131.23	0.0041	110~138
	造纸	26.85	0.1494	37~53
	电力	53.02	0.0016	30~42
	化工	73.42	0.0142	28~43
	材料	113.38	0.0033	110~152
	机械	312.5	0.0022	230~294
	电子	1063.83	0.0000	260~340
	采掘	35.16	0.0001	17~22
	建筑	657.89	0.0000	150~200
其他	185.21	0.0040	120~200	

第三产业	运输 (邮电)	3448.28	0	700~820
	商业	1190.47	0	450~520
	非物质	1219.51	0	360~410

其中，第一产业的产值上下限约束是由种植面积上下限约束转换而得的。

模糊目标 $G(GNP)$ 的隶属函数 $\mu_G(GNP)$ 为：

$$\mu_G(GNP) = \begin{cases} 1 & GNP \geq 291.705 \\ \frac{GNP - 291.705}{340.323 - 291.705} & 291.705 \leq GNP \leq 340.323 \\ 0 & GNP \leq 291.705 \end{cases}$$

其他模糊目标的隶属函数类似可得。

天津市 2010 水平年再生水和天然水资源的模糊优化配置结果(表 4)

其中，各行业配置的再生水量为：生活杂用水 0.83 亿 m^3 /年，农业 4.41 亿 m^3 /年，工业冷却 0.65 亿 m^3 /年，景观生态 0.65 亿 m^3 /年。

由表 3、表 4 可见，农业是中国的用水大户，当缺水时，一般会削减农业用水，是由于农业部门的投入产出率较低，所以其满意度较低，因此发展节水型的灌溉方式是非常必要的；MMM 以系统最小满意度水平为优化对象，能确保系统中各行业满意度水平比较均衡，

表 4 天津市 2010 水平年模糊优化配置结果

项 目	MMM 模型优化配置 结果(万 t)	MAM 模型的优化配 置结果(万 t)	MWM 模型的优化配 置结果(万 t)	
生活用水量	85050	85050	85050	
水稻	32727.27	21818.18	21818.18	
小麦	40000	40000	40000	
第 一 产 业	玉米	24000	24000	20384.00
	杂粮	12000	8800	8800.00
第 二 产 业	蔬菜	40000	40000	40000.00
	林业	372.67	279.50	372.67
	牧业	29545.45	25000	25000.00
	渔业	16544.12	12867.65	12867.65
合计	195189.5	172765.3	169242.5	
油煤	32360.81	30820.96	31211.00	
食品	17500.00	17500	17500.00	
纺织	8382.23	8382.23	8382.23	
造纸	19739.29	13780.26	13780.26	
第 三 产 业	电力	7921.54	5658.242	5658.24
	化工	3813.68	3813.675	3813.68
	材料	9701.89	9701.89	9701.89
	机械	7360.00	9408.00	7360.00
	电子	2444.00	3196.00	12867.65
	采掘	6257.11	4835.04	4835.04
建筑	3040.02	3040.02	2280.02	

其他	6479.13	10798.55	6479.13
合计	124999.7	120934.9	113445.5
运输	2030.00	2378.00	2030.00
第 (邮电)			
三 商业	3780.02	4368.02	3780.02
产 非物质	2952.01	3362.01	2952.01
业 合计	8762.02	10108.03	8762.02
系统目标	0.31	0.80	1.00
Q_{WE} (万吨)	71098.77	96241.78	108600
AG(万吨)	244.00	232.00	213.92
GNP(亿元)	3119.68	3531.29	3016.81
COD(万吨)	14.83	12.82	12.37

使各行业都获得比较均衡的发展；MAM 追求系统中整体满意度水平最大化，有利于优化产业结构，使单位 GNP 产值耗水量小、COD 产生量小的部门得到发展；MWM 以生态环境和可持续发展最优化为目标，对单位 GNP 产量产生的 COD 较多的产业不利，对水环境保护和可持续发展有利，有利于建立节水、环保型的国民经济。

3 结论

再生水和天然水资源的模糊优化配置，在保证用户基本水质、水量的前提下，充分考虑各方目标，并以各种不同的发展目的进行了水资源的优化配置，可供配水决策部门根据不同的追求目的和发展需要进行水资源配置，具有明显的经济效益、社会效益和环境效益。不仅可以协调了各部门用水需求的矛盾，而且可以减少污水的排放，缓解城市水资源不足的矛盾，为实现再生水回用和缓解城市水资源短缺起到推动作用。优化配置能保证各方面的均衡、协调发展，优化产业结构，整体效益较好，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的水资源分配途径。

参考文献：

- [1]方创琳，区域可持续发展与水资源优化配置研究，2002.16(4):341-347
- [2]罗承忠，模糊集引论 北京：北京师范大学出版社 1989
- [3] 冯耀龙，韩文秀，区域水—经济复合系统可持续发展的综合评价，系统工程，1999.6
- [4]Liu Y J , Hwang C L. Fuzzy multiple objective decision making .NewYork : Springer-verlag,1991
- [5]P.M.J. Terpstra, sustainable water usage systems: models for the sustainable utilization of domestic water in urban areas , water science and technology , 1999,39(5)
- [6] Vreke, J. , Optimal allocation of surface water in regional water management , Water Resources Management, v 8, n 2, 1994, p 137-153