

再生水与天然水资源农田灌溉的模糊优化配置

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. 天津市政设计院, 天津 300051)

摘要:运用模糊数学优化的原理, 综合考虑农业可持续发展的社会需要和经济效益, 建立了再生水与天然水资源农田灌溉的多目标模糊线性规划优化配置模型, 以合理分配各种水资源, 确定农业最优种植模式。该模型以作物的种植面积作为决策变量, 以再生水和天然水的水质、水量为约束条件, 以粮食作物、蔬菜和水果产量最大、农民经济收益最大为目标。并以天津市为例进行了再生水和天然水资源农田灌溉和种植模式的优化配置计算。结果表明, 优化配置能保证各种作物的水量分配比较合理, 作物产量能满足城市发展对其最低的需求, 且能获得较好的经济效益。

关键词:再生水资源; 天然水资源; 农田灌溉; 模糊优化配置

中图分类号:X11 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 – 2043(2004)04 – 0770 – 04

Fuzzy Optimal Allocation of Reclaimed and Natural Water Resources for Agricultural Irrigation

MA Wei-fang¹, ZHAO Xin-hua¹, WANG Hong-yun²

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

Abstract: Due to the shortage of water resources in China, it is a good idea to use reclaimed water for agricultural irrigation. Thus, a fuzzy linear programming optimal allocation model of reclaimed and natural water for multiple objectives is created based on characteristics of reclaimed water and principle of fuzzy optimization. The model can be used to allocate all kinds of water resources, to determine the optimal planting mode and to satisfy both the social requirement of agricultural sustainable development and economic benefit. In this model, the decision – making variable is planting acreage; the restriction condition is the quantity and quality of reclaimed and natural water; the objectives are to maximize the output of crop, vegetable, fruit and the farmer’s earning. By using the real data of Tianjin, a practicable optimal allocation of reclaimed water and natural water for agricultural irrigation is carried through. The result indicates that the model can allocate reclaimed and natural water for all agro – types reasonably, satisfy the requirement of urban development to all agro – types and acquire a well economic benefit (13 billion/year). The model can provide a scientific decision – making basis on water optimal allocation, which can release the water crisis of agricultural irrigation, decide the optimal planting mode and acreage, and realize a sustainable green agriculture gradually.

Keywords: reclaimed water resources; natural water resources; agricultural irrigation; fuzzy optimal allocation

我国水资源十分缺乏, 人均水资源占有量仅为世界人均占有量的 1/4, 加上时空分布不均, 水资源供需矛盾更加突出, 尤其是北方地区。农田灌溉是我国的用水大户, 其用水量占全国总用水量的 65%^[1]。一些缺水地区由于农田灌溉过量开采地下水造成地面沉降, 还有的地区采用污水灌溉而引发各种问题。随着再生水(再生水是污水经过一级、二级和深度处理后供作回用的水) 回用工程的启动, 为农业用水提供了一个稳定、可靠的补充灌溉水源, 可以大大缓解农业用水的供需矛盾^[2], 促进农业发展、改善农田生态环境。

但由于再生水的水质特性, 在农灌过程中对不同作物、作物不同部位的影响不同, 必须实现再生水资源和天然水资源在农田灌溉中的合理优化配置, 才能确保农业可持续发展的社会需要、经济效益和生态环境的需要, 实现资源节约和可持续发展的绿色农业^[3]。

因此在有限的农业用水情况下, 改革传统的灌溉水管理模式, 采用精确的灌溉方式, 才能改变传统的以追求粮食产量最大或追求农民收益最大的水资源利用方式, 而不至于导致某些作物种植的蜂拥而上, 并减少水资源短缺的压力^[4]。在再生水和天然水资源农田灌溉的优化配置中, 既要考虑社会对不同种类粮食的需求, 又要考虑水资源分配的长期性、稳定性和灵活性^[5]以及农民的经济效益, 因此是多目标的; 而

且这些目标和各种约束条件虽是线性的、但具有不确定性,因此本文研究了用多目标模糊线性规划模型对农田灌溉用水进行优化配置,为解决当前农田灌溉的用水危机、确定农作物最优的种植模式、种植面积及逐步实现可持续发展的绿色农业,提供了水资源合理配置的科学决策依据。

1 多目标模糊线性规划的基本原理

多目标模糊线性规划是基于线性规划的原理,在目标函数和约束条件都模糊的情况下,建立的一种模糊线性规划。

$$\text{目标函数}^{[6]}: \max \begin{cases} z_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \cdots + c_{1n}x_n \\ z_2 = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \cdots + c_{2n}x_n \\ \cdots \cdots \\ z_r = c_{r1}x_1 + c_{r2}x_2 + \cdots + c_{rn}x_n \end{cases} \quad \forall r, n \quad (1)$$

$$\text{约束条件}^{[6]}: \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\ \cdots \cdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \leq b_m \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \cdots x_n \geq 0, \end{cases} \quad \forall m, n \quad (2)$$

先将约束看作是严格的(即式(2)中的不等号为严格的),采用多目标普通线性规划的方法构造模糊目标集 $M = M_1 \cap M_2 \cap \cdots \cap M_r$, $M_i^{[7]}$ 的隶属函数为:

$$M_i(x) = g_i(\sum_{j=1}^n c_{ij}x_j) = \begin{cases} 0 & \sum_{j=1}^n c_{ij}x_j < z_i^* - d_i \\ 1 - \frac{1}{d}(z_i^* - \sum_{j=1}^n c_{ij}x_j) & z_i^* - d_i \leq \sum_{j=1}^n c_{ij}x_j < z_i^* \\ 1 & \sum_{j=1}^n c_{ij}x_j \geq z_i^* \end{cases} \quad (3)$$

式中: M 为在模糊条件(2)下的多目标线性规划的综合模糊目标,记 $D = \{x | Ax \leq b, x \geq 0\}$ 为满足模糊约束方程的可行解集。

模糊判决: $D_F = D \cap M$

最佳点: $x^*: D_F(x^*) = D(x^*) \wedge M(x^*) = \bigvee_{x \in X} (D(x) \wedge M(x)) = \bigvee_{x \in X} M(x)$

也就是说,由 M 诱导 $(x, (x))$ 的可能性测度 Π 。

D 对于 Π 的可能测度 $\Pi(D) = \bigvee_{x \in X} M(x)$,最佳点 $x^* \in D$ 且 $M(x^*) = \Pi(D)$ 。该问题可化为在满足 $x \in D$

的条件下,使 $M(x) = \bigwedge_{i=1}^r M_i(x)$ 达到最大值^[7]。

2 农田灌溉用水优化配置的模糊线性规划模型及求解

2.1 农田灌溉用水优化配置的模糊线性规划模型

虽然再生水的各项检测指标能符合农田灌溉的水质要求,国外也有成功应用的实例^[8],但考虑某些作物如蔬菜、瓜果等生吃的安全性,在分配再生水灌溉时要慎重考虑。因此,农田灌溉水资源的优化配置,既要考虑在有限水资源下各种农作物和蔬菜的产量最大、农民的经济收益最大,还要考虑再生水可以供给哪些作物、灌溉与非灌溉相比较增加的产量和收益。由于不同水文年作物的灌溉需水量差异较大,即使同一水文年类型下,不同作物的灌溉需水量也不相同,因此农田灌溉水资源的优化配置是一项十分复杂的系统工程。追求灌溉产量和效益的最大化,要综合考虑以上多方面的因素,做出合理的水资源配置方案。

以作物的种植面积为决策变量,以再生水和天然水资源量为约束条件,以粮食作物、蔬菜和水果产量最大、农民经济收益最大为目标,可建立农灌用水的模糊多目标线性规划模型:

目标函数:

$$\max \begin{cases} z_1 = \sum_{i=1}^n (c_{ij}x_{ij} + c_{ik}x_{ik}) \\ z_2 = \sum_{l=1}^m a_l x_l \\ z_3 = \sum_{\lambda=1}^h (e_{\lambda j}x_{\lambda j} + e_{\lambda k}x_{\lambda k}) \\ z_4 = \sum_{i=1}^n b_i (c_{ij}x_{ij} + c_{ik}x_{ik}) + \sum_{l=1}^m b_l a_l x_l + \sum_{\lambda=1}^h b_{\lambda} (e_{\lambda j}x_{\lambda j} + e_{\lambda k}x_{\lambda k}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: z_1 为粮食的总产量, z_2 为蔬菜的总产量, z_3 为水果的总产量, z_4 为经济效益; c_{ij} 为第 i 种粮食作物的灌溉单产量, c_{ik} 为第 i 种粮食作物的非灌溉单产量, x_{ij} 为第 i 种粮食作物的灌溉种植面积, x_{ik} 为第 i 种粮食作物的非灌溉种植面积; a_l 为第 l 种蔬菜的单产量, x_l 为第 l 种蔬菜的种植面积; $e_{\lambda j}$ 为第 λ 种水果的灌溉单产量, $e_{\lambda k}$ 为第 λ 种水果的非灌溉单产量, $x_{\lambda j}$ 为第 λ 种水果的灌溉种植面积, $x_{\lambda k}$ 为第 λ 种水果的非灌溉种植面积, b_i, b_l, b_{λ} 分别为第 i 种粮食作物、第 l 种蔬菜、第 λ 种水果的单价。

约束条件:

(1) 水量约束

灌溉用水总水量约束:

$$\sum_{i=1}^n Q_i x_{ij} + \sum_{l=1}^m Q_l x_l + \sum_{\lambda=1}^h Q_{\lambda} x_{\lambda j} \leq Q \quad (5)$$

灌溉用水再生水量约束:

$$\sum_{i=1}^n r_i Q_i x_{ij} + \sum_{l=1}^m r_l Q_l x_l + \sum_{\lambda=1}^h r_{\lambda} Q_{\lambda} x_{\lambda j} \leq Q_r \quad (6)$$

式中: Q_i 、 Q_l 、 Q_λ 分别为第 i 种粮食作物、第 l 种蔬菜、第 λ 种水果的单位种植面积的灌溉定额, Q 为农田灌溉可利用的总水量; r_i 、 r_l 、 r_λ 为第 i 种粮食作物、第 l 种蔬菜、第 λ 种水果的单位种植面积可利用再生水的比例系数, Q_r 为农田灌溉可利用的再生水量。由于蔬菜食用的特殊性, 不适宜采用再生水灌溉, 因此 r_l 取 0; $r_i \leq 0.8$, $r_\lambda \leq 0.4$ 。

(2) 种植面积约束
总种植面积约束:

$$\sum_{i=1}^n (x_{ij} + x_{ik}) + \sum_{l=1}^m x_l + \sum_{\lambda=1}^h (x_{\lambda j} + x_{\lambda k}) \leq X \quad (7)$$

各类作物种植面积约束:

$$\sum_{i=1}^n (x_{ij} + x_{ik}) \leq X_1, \sum_{l=1}^m x_l \leq X_2, \sum_{\lambda=1}^h (x_{\lambda j} + x_{\lambda k}) \leq X_3,$$
$$X_1 + X_2 + X_3 \leq X;$$

其中 X , X_1 , X_2 , X_3 为可能的总种植面积、粮食作物种植面积、蔬菜种植面积和果树种植面积。

(3) 社会对各类作物的需求约束

$$\sum_{i=1}^n (c_{ij}x_{ij} + c_{ik}x_{ik}) \geq z_i, \sum_{l=1}^m a_l x_l \geq z_l, \sum_{\lambda=1}^h (e_{\lambda j}x_{\lambda j} + e_{\lambda k}x_{\lambda k}) \geq z_\lambda \quad (8)$$

式中: z_i , z_l , z_λ 为社会对各类粮食作物、蔬菜和水果的最低需求量。

(4) 非负约束

$$x_{ij} \geq 0, x_{ik} \geq 0, x_l \geq 0, x_{\lambda j} \geq 0, x_{\lambda k} \geq 0 \quad (9)$$

2.2 模型求解

多目标模糊线性规划的求解, 先求各分目标的最优解, 然后根据模糊目标的伸缩度写出隶属函数集, 计算各模糊目标的最优解, 具体求解步骤见图 1 所示。

3 模型在再生水与天然水资源农田灌溉中的优化配置实例及求解

3.1 天津市的农田灌溉和水资源状况

根据《天津市农田灌溉总体规划》《天津市再生水农田灌溉总体规划》得如下数据:

(1) 天津市 2010 年农田灌溉供需平衡预测
表 1、2 中 50%、75%、95% 分别为水利部门在不同年份供应农田灌溉的供水保证率。由于不同年份的降雨量不同, 所以为保证农业的发展在不同的年份要求的供水保证率随枯水程度而增加, 但由于枯水年份水利部门可供应的水资源总量减少, 因而供应农业的水量也减少。

(2) 天津市 2010 年作物灌溉需水量及产量

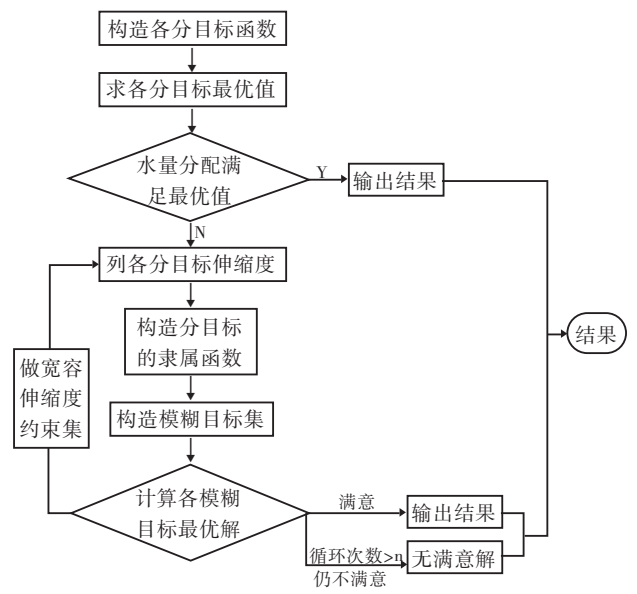


图 1 多目标模糊规划寻优流程图

Figure 1 Flow chart of multiple objectives fuzzy programming for optimal allocation

表 1 天津市 2010 年农田灌溉水资源供需平衡分析及预测
Table 1 Analysis and forecast for agricultural irrigation water balance in 2010 in Tianjin

项目	2010 年(亿 m ³)		
	平水年(50%)	偏枯年(75%)	枯水年(95%)
农田灌溉最大需水量	21.30	25.33	26.69
可供天然水资源量	10.06	8.36	3.71
可供再生水资源量	4.43	4.43	4.43
余缺	-6.81	-12.54	-18.55

表 2 中, 水稻、蔬菜为灌溉作物, 因为这 2 种作物的非灌溉产量很低; 小麦、玉米、杂粮的非灌溉产量在平水年、偏枯年、枯水年分别为灌溉产量的 50%、30%、20%^[9]; 小麦、玉米由于其生长季节要求可轮换种植, 以提高土地利用效率。

3.2 天津市再生水与天然水资源农田灌溉的模糊优化配置计算结果

根据模型求解流程图, 采用 Fortran 编写模拟程序, 得到天津市 2010 年再生水与天然水资源追求经济效益最大的农田灌溉配置结果和综合模糊优化配置计算结果, 见表 3、表 4。

由表 3 可以看出, 在水资源短缺的情况下, 为追求最大经济效益, 水资源分配很不平衡, 其中小麦的水量分配为 0, 蔬菜和果园的水量分配都达到了最大灌溉所需的水量。这是因为以追求经济效益为目标, 通常先满足灌溉经济收益较高的作物的用水, 如: 蔬菜、果园; 而削减灌溉经济效益比较小、非灌溉也有一

表 2 天津市 2010 年作物灌溉需水量及产量
Table 2 The irrigation water demand and crops yield in 2010 in Tianjin

项目	灌溉定额 /m ³ · hm ⁻²			产量 /kg · hm ⁻²	种植面积 /万 hm ²	单价 /元 · kg ⁻¹
	平水年 (p = 50%)	偏枯年 (p = 75%)	枯水年 (p = 95%)			
水稻	9 000	10 500	10 500	9 000	4. 00 ~ 5. 33	2. 0
小麦	3 000	3 600	3 825	6 000	20. 00 ~ 21. 33	1. 6
玉米	1 800	2 250	2 400	7 500	20. 00 ~ 21. 33	1. 2
杂粮	1 650	2 100	2 400	6 000	6. 66 ~ 8. 00	2. 0
蔬菜	8 250	9 000	9 450	67 500	4. 00 ~ 5. 33	2. 4
果林	2 025	2 400	2 700	18 750	2. 33 ~ 2. 66	2. 0

定产量的作物的灌溉用水量,如:小麦;这也是符合实际情况的。但是该种水资源配置方式很难满足区域可持续发展对农产品的需求。

由表 3、表 4 可见,水资源优化配置与单纯追求经济效益最大的水资源分配方式相比,优化配置能保证各种作物的水量分配比较均衡、作物产量能满足城市发展对其最低的需求,且能获得较好的经济效益。其中,蔬菜的再生水分配量为 0,与水长期接触的水稻

表 3 天津市 2010 (p = 50%) 平水年再生水和天然水资源追求最大经济效益计算配置结果
Table 3 The allocation of reclaimed and natural water for pursuing maximal economic benefit in 2010 in Tianjin

方案	水稻	小麦	玉米	杂粮	蔬菜	果园	总水量	最大产值/亿元
水量分配/亿 m ³	4. 26	0	3. 84	1. 32	4. 40	0. 675	14. 49	145

表 4 天津市 2010 年再生水资源和天然水资源农田灌溉模糊优化配置计算结果
Table 4 Fuzzy optimal allocation of reclaimed and natural water for agricultural irrigation in 2010 in Tianjin

指标	平水年 (p = 50%)				偏枯年 (p = 75%)				枯水年 (p = 95%)			
	总水量 /亿 m ³	再生水 /亿 m ³	产量 /万 t	产值 /亿元	总水量 /亿 m ³	再生水 /亿 m ³	产量 /万 t	产值 /亿元	总水量 /亿 m ³	再生水 /亿 m ³	产量 /万 t	产值 /亿元
水稻	3. 0	1. 2	30	6. 0	3. 15	1. 1	27	5. 4	0. 87	0. 43	6. 2	1. 2
小麦	3. 6	1. 5	100	16. 0	2. 88	1. 6	72	11. 5	2. 295	2. 1	54. 4	8. 7
玉米	2. 46	1. 0	131. 3	15. 8	1. 80	1. 1	90	10. 8	1. 6	1. 3	72	8. 6
杂粮	1. 32	0. 57	60	12	0. 75	0. 45	29. 4	5. 9	0. 72	0. 45	24	4. 8
蔬菜	3. 575	0	292. 5	70. 2	3. 73	0	280	67. 2	2. 205	0	157. 5	37. 8
果园	0. 54	0. 16	50	10	0. 48	0. 18	42. 5	8. 5	0. 45	0. 15	36. 5	7. 3
合计	14. 49	4. 43	130	12. 79	4. 43			109. 3	8. 14	4. 43		68. 5

的再生水分配量小于总量的 40%。水资源的优化配置能保证农业均衡发展和最优种植模式,确定各种作物的精确的灌溉水量和灌溉面积,有利于农业的协调发展和区域的可持续发展,是实现可持续发展的绿色农业的有效水资源分配方案。

4 结论

综上,以天津市为例,根据当地再生水和农作物特点,进行了再生水与天然水资源农田灌溉的模糊优化配置计算,其结果的应用不仅可为农业提供新的灌溉水源,而且克服了以往片面追求灌溉效益最大而忽略社会对不同种类作物需求的缺点,为解决当前农田灌溉的用水危机、确定农作物最优的种植模式、种植面积及逐步实现可持续发展的绿色农业,提供了水资源合理配置的科学决策依据。

参考文献:

[1] 黄仲杰. 我国城市供水现状、问题与对策[J]. 给水排水,1998,24 (2):18-20.

[2] He P J, Phan L, Gu G W and Hervout G. Reclaimed municipal wastewater - a potential water resource in China[J]. *Wat Sci Tech*, 2001, 43(10): 51-58.

[3] 石元春. 现代农业[J]. 中国农业科技导报,2002,4(6):7-10.

[4] 周启星. 从第二届水资源论坛看辽宁的水资源危机及对策[J]. 生态学杂志,2002,21(2):36-39.

[5] Cai Ximing, McKinney Daene C, Lasdon Leon S. A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(6): 211-214.

[6] 罗承忠. 模糊集引论(上册)[M]. 北京:北京师范大学出版社,1989.

[7] 彭祖赠. 模糊(Fuzzy)数学及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.

[8] Oron G, Armon R, Mandelbaum R, et al. Secondary wastewater disposal for crop irrigation with minimal risk[J]. *Wat Sci Tech*, 2001, 43(10): 139-146.

[9] 天津市水利科学研究院. 天津市基本实现农业现代化水力规划,2002.