

基于 pareto front 的多目标遗传算法 在灌区水资源配置中的应用

王 鹏

(四川大学水利水电学院, 成都 610065)

摘 要:为了解决灌区非充分灌溉时,灌区作物产量最高与供水部门收益最大之间的矛盾,建立了灌区一次灌水水资源配置的多目标优化数学模型。该模型目标函数之一为高度非线性的,为了克服传统方法在求解非线性多目标优化问题时容易陷入局部最优的缺点,引入了基于 Pareto front 的多目标遗传算法来解该模型。实例应用表明,基于 Pareto front 的多目标遗传算法可以快速求解灌区多目标优化问题,并为之提供非劣集,以便决策者参考。

关键词:遗传算法;多目标;水资源;优化配置

中图分类号:TV213.4 **文献标识码:**A

1 水资源配置的多目标优化数学模型

设某一灌区,根据地理特征和行政区域,被划分为 n 个区域,每个区域都种植有一种或多种作物。在某一时间,通过水文预报以及对土壤、作物生长阶段等其他因素的分析,发现在接下来的一定时段(第 m 时段)内需要对作物进行一次灌溉,而水源可供水量不能完全满足灌区作物需水要求。这就意味着该灌区至少有部分区域在该时段内必须采取非充分灌溉,但具体到那个区域的作物该采用非充分灌溉,也就是如何分配有限的水资源这个问题,则应该取决于灌溉的具体目标。灌区一次灌水水资源优化配置的目标应该是本次灌水的综合效益最佳。因此水资源的配置不仅要考虑到供水部门的经济效益最大,还要兼顾灌区作物增产值最高的需求。灌区水资源配置作为一个系统工程,其综合效益最大的目标可以由以下模型来进行模拟。

$$\begin{cases} \max[f_1(X), f_2(X)] \\ \text{s. t. } G(X) \leq 0 \\ X \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: X 为决策向量; $f_1(X)$, $f_2(X)$ 分别为供水收益和作物增产值; G 为约束条件集,表示水资源总量及单位面积供水量等约束方程。

1.1 目标函数

目标 1: 供水部门收益最高。

$$\max f_1(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} SF(i) \cdot S(j) \cdot X(j) \quad (2)$$

式中: $SF(i)$ 为供水部门将水送至第 i 斗渠斗口的单位水价;

$S(j)$ 为第 i 个区域第 j 种作物的种植面积; $X(j)$ 为第 i 个区域第 j 种作物的灌水定额; n 为灌区被划分的区域数; m_i 为第 i 个区域种植的作物种类数。

目标 2: 灌区作物增产值最大。

$$\max f_2(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} [\Delta Y(j) \cdot S(j) \cdot P(j) - SF'(j) \cdot S(j) \cdot X(j)] \quad (3)$$

式中: $P(j)$ 为第 j 种作物的预测市场价格; $SF'(j)$ 为单位水量输送到田间的费用; $S(j)$, $X(j)$, n , m 的意义同式(2); $\Delta Y(j)$ 为第 m 时段内作物在灌水情况下的灌溉增产量,其涵义如下所述。

式(3)中作物产量采用 Jensen 相乘模型推算^[2]:

$$Y_a = Y_m \prod_{i=1}^n \left[\frac{ET_i}{ET_{mi}} \right]^{\lambda_i} \quad (4)$$

式中: Y_a , Y_m 分别为某种作物实际产量与潜在产量; ET_i , ET_{mi} 分别为第 i 阶段作物实际与潜在的蒸发蒸腾量; λ_i 为第 i 阶段作物缺水对产量影响的敏感指数; n 为某作物全生育起划分的生育阶段数。

假设此阶段后续各阶段均为充分灌溉,那么第 m 时段内灌溉一定水量单位面积的灌溉增产量 ΔY 可由式(5)表示^[3]:

$$\Delta Y = Y_m \prod_{i=1}^{k-1} \left[\frac{ET_i}{ET_{mi}} \right]^{\lambda_i} \left\{ \left[\frac{ET'_k}{ET_{mk}} \right]^{\lambda_k} - \left[\frac{ET''_k}{ET_{mk}} \right]^{\lambda_k} \right\} \quad (5)$$

式中: λ_k 为第 m 时段内作物缺水对产量影响的敏感指数; ET_{mk} 为第 m 时段内作物潜在的蒸发蒸腾量; ET'_k 为第 m 时段内作物在灌水情况下的实际蒸发蒸腾量; ET''_k 为第 m 时段内作物在不灌水情况下的实际蒸发蒸腾量; ΔY 为第 m 时段内作物

在灌水情况下的灌溉增产量。

由于进行第 m 时段供水时, 以前各阶段的实际用水情况为已知, 所以 $Y_m \prod_{i=1}^{k-1} \left[\frac{ET_i}{ET_{mi}} \right]^{\lambda_i}$ 可以简化为一个常数 $f(E)$, 则式(5)可以改写如下:

$$\Delta Y = f(E) \left\{ \left[\frac{ET'_k}{ET_{mk}} \right]^{\lambda_k} - \left[\frac{ET''_k}{ET_{mk}} \right]^{\lambda_k} \right\} \quad (6)$$

在第 m 时段内, 各种具体作物第 i 天的实际蒸发蒸腾量可由式(7)表示:

$$ET_i = K_{si} ET_{mi} \quad (7)$$

式中: ET_i 、 K_{si} 、 ET_{mi} 分别为第 i 天的实际蒸发蒸腾量、土壤水分胁迫修正系数和作物潜在蒸发蒸腾量, mm。

在短时间内, 当天气情况变化不大时, 作物的潜在蒸腾蒸发量应该是相对稳定的, 特别是在连续干旱的情况下。因此, 对于式(6)的 ET_{mk} 和式(7)中的 ET_m , 可以用第 k 阶段内的平均潜在蒸发蒸腾量 (\overline{ET}_m) 来计算。故式(6)可以进一步改写如下:

$$\Delta Y = f(E) \left\{ \left[\frac{\sum_{i=1}^n k'_{si} \cdot \overline{ET}_m}{n \cdot \overline{ET}_m} \right]^{\lambda_k} - \left[\frac{\sum_{i=1}^n k''_{si} \cdot \overline{ET}_m}{n \cdot \overline{ET}_m} \right]^{\lambda_k} \right\}$$

即:

$$\Delta Y = f(E) \left\{ \left[\frac{\sum_{i=1}^n k'_{si}}{n} \right]^{\lambda_k} - \left[\frac{\sum_{i=1}^n k''_{si}}{n} \right]^{\lambda_k} \right\} \quad (8)$$

式中: k'_{si} 为第 m 时段内作物在灌水情况下第 i 天的土壤水分胁迫修正系数; k''_{si} 为第 m 时段内作物在不灌水情况下第 i 天的土壤水分胁迫修正系数; n 为第 m 时段内的总天数。

第 m 时段内, 逐日土壤水分胁迫修正系数可由以下模型计算^[4]:

$$K_{si} = \begin{cases} 1, & \theta_i \geq \theta_{c1} \\ \ln(1 + \theta_i) / \ln(101), & \theta_{c2} > \theta_i \geq \theta_{c1} \\ \alpha e^{(\theta_i - \theta_{c1}) / \theta_c}, & \theta_i < \theta_{c2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: θ_i 为第 i 天的实际平均土壤含水率, 对于稻田, 为占饱和含水率的百分数, 对于旱地, 为占田间持水率的百分数; θ_{c1} 为土壤水分绝对充分的临界土壤含水率, 稻田为饱和含水率的 80%, 旱地为田间持水率的 90%; θ_{c2} 为土壤水分胁迫临界土壤含水率, 稻田为饱和含水率的 80%, 旱地为田间持水率的 60%; α 为经验系数, 一般为 0.80~0.95。

逐日土壤含水率 θ_i 可以通过农田水量平衡原理按以下递推方程求得^[5]:

$$\theta_i = \begin{cases} \theta_{i-1} - 10(ET_{i-1} - R_{i-1} - M_{i-1} - UP_{i-1}) / \theta_f H, & \text{(旱作农田)} \\ \theta_{i-1} - 0.1(ET_{i-1} - R_{i-1} - M_{i-1} - UP_{i-1}) / H, & \text{(无水层时水稻田)} \\ \theta_{i-1} - 10(ET_{i-1} - R_{i-1} - M_{i-1} - W_{i-1}) / H, & \text{(有水时水稻田)} \end{cases} \quad (10)$$

式中: θ_{i-1} 为第 $i-1$ 日土壤含水率, 以占饱和含水率(水稻)或田间持水率(旱作物)百分数计; ET_{i-1} 为第 $i-1$ 日作物实际蒸发蒸腾量; R_{i-1} 为第 $i-1$ 日有效降雨量; M_{i-1} 为第 $i-1$ 日灌水量; UP_{i-1} 为第 $i-1$ 日地下水对作物根层的补给量; W_{i-1} 为第 $i-1$ 日稻田渗漏量; θ_f 为田间持水率, 以占土体的百分数计; H

为作物根系吸水层深度。

假设灌水定额在灌溉延续时间内均匀灌入田间, 则各日灌水量与灌溉定额和灌溉延续时间有如下关系:

$$M = \frac{1000 X}{666.7 t} \quad (11)$$

式中: M 为日灌水量; X 为灌水定额; t 为灌溉延续时间。

因此, 通过对第 m 时段内土壤水分的推求, 就建立起了灌区作物增产值关于灌水定额的函数, 从而得到了以灌水定额为决策变量的 2 个目标函数。

1.2 约束条件

(1) 水源可供水量约束:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_i} S(j) \cdot X(j) \leq W \quad (12)$$

式中: W 为该时段内能提供的总水量; 其他符号意义同上。

(2) 输水建筑物流量约束:

由于灌区在该时段内至少有部分采用非充分灌溉, 所以灌区输水建筑物的输水强度不会超过设计流量(即全灌区采用充分灌溉的情况)。因此, 输水建筑物流量方面不对决策变量构成约束。

(3) 土壤含水率限制:

对某一作物而言, 单位面积的需水量是有一定限度的, 过多的灌水不但对作物的生长没有好处, 反而会造成渍涝灾害。因此, 土壤含水率有一定的上限, 以免产生深层渗漏。

$$\theta \leq \theta_{\max} \quad (13)$$

式中: θ 、 θ_{\max} 分别为土壤含水率 and 对应土壤的饱和含水率(对于稻田)或田间持水率(对于旱地)。

(4) 非负约束:

$$X(j) \geq 0 \quad (14)$$

以上数学模型是一个多目标优化模型(2 个目标), 其中目标二是高度非线性的, 决策变量为第 i 个区域第 j 种作物的灌水定额。为了求解该优化模型, 引入了如下所述的基于 Pareto front 的多目标遗传算法。

2 基于 Pareto front 的多目标遗传算法

本文采用的基于 Pareto front 的多目标遗传算法可以为多目标优化问题提供 pareto 解集, 它是由标准的遗传算法(SGA)发展而来。现依据 SGA 算法, 结合上述灌区水资源多目标优化问题的特征, 阐述本文所用算法的主要特点, 最后给出实例验证基于 Pareto front 的多目标遗传算法求解多目标优化问题 pareto 集的有效性。

2.1 适应值函数的构造

相对单目标优化的求解, 用遗传算法求解多目标优化时, 一个特殊的问题是如何根据多个目标来确定个体的适应值。目前已经提出并测试的方法可分为以下几类: ① 向量评价方法; ② 权重和方法; ③ 基于 pareto 的方法; ④ 妥协方法; ⑤ 目标规划方法。本文采取的方法是 Goldberg 提出的 pareto 基于排序的适应值分配方法^[6]。排序的过程如下: 对当前种群中的非支配个体分配次序 1, 并将它们从竞争中移出; 然后从剩余的种群个体中选出非支配个体并对其分配次序 2; 持续该过程直到

所有的个体都分配到次序。在对每一个体都排序后,就可根据式(15)计算每一个体的适应值。

$$f(i) = [n - \text{sort}(i) + 1]^2 \quad (15)$$

式中: $f(i)$ 为第 i 个体的适应值; n 为种群个体排序后的最大序号; $\text{sort}(i)$ 为第 i 个体排序后的序号。

2.2 优解的保持机制

为了让适应值高的个体不在进化的过程中丧失,本文采用了精粹策略,就是让适应值高的个体不经遗传操作改变而直接传到下代,从而能加快算法的收敛速度。在问题的求解程序中,为了达到这一目标设计了一个精粹池来保留分布在解的不同区域的高适应值个体。

2.3 实例验证算法的有效性

为了验证基于 pareto front 的多目标遗传算法的有效性,现以如下多目标线性规划问题为例,比较问题的理论解和基于 pareto front 的多目标遗传算法所求得解。实例如下:

$$\begin{cases} \max Z_1 = 3.2 x_1 + 2 x_2 + 4.8 x_3 \\ \max Z_2 = 2.1 x_1 + 1.2 x_2 + 0.8 x_3 \\ \text{s. t. } 4.8 x_1 + 2.2 x_2 + 3.4 x_3 \leq 54 \\ \quad 6.2 x_1 + 3.4 x_2 + 1.4 x_3 \leq 42 \\ \quad 1.2 x_1 + 4.0 x_2 + x_3 \leq 18 \\ \quad x_i \geq 0, i = 1, 2, 3 \end{cases}$$

对于以上线性多目标优化问题,分别采用最小减优率法和基于 pareto front 的多目标遗传算法求解问题的非劣集,计算的结果如图 1 所示。由图 1 可见:基于 pareto front 的多目标遗传算法所求得解能很好的散布于多目标问题的理论非劣集上,并且它与理论解非常接近,因此认为基于 pareto front 的多目标遗传算法对于线性多目标问题的求解是有效的。另外,将遗传算法用于解线性问题和非线性问题,从理论上讲是没有区别的,所以基于 pareto front 的多目标遗传算法对于非线性多目标问题的求解同样有效。

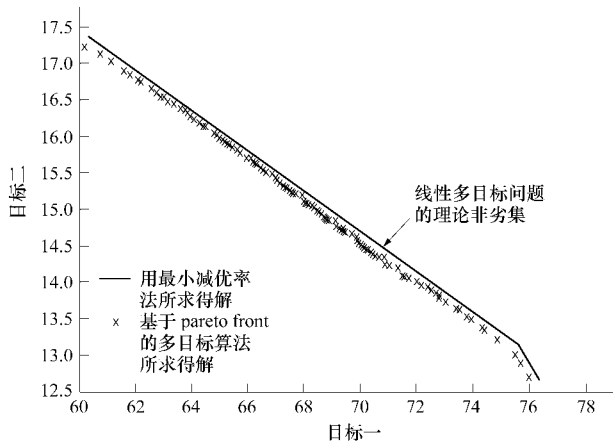


图 1 多目标问题的非劣集

3 算例

3.1 基本资料

某灌区采用实时灌溉,其水源由水库供给。由天气预报得知该灌区将遭受连续干旱。通过对土壤、作物生长阶段等其他

因素的分析发现在接下来 7 d 内需要对灌区内 4 个区域的作物进行一次灌溉。这 4 个区域分别由不同的斗渠控灌,种植的均是旱作物,它们的灌溉延续时间均为 7 d。根据水文预测在该时段内,在考虑了田间水利用率的情况下,渠首可供作物利用的总水量为 190 万 m^3 ,单位水量输送至田间的花费比斗口水价高 0.01 元/ m^3 。灌区内土壤的田间持水率为占土体体积的 20%,此时灌区的土壤含水率为田间持水率的 60%。另外,灌区地下水水位很低,故在该时段内不考虑地下水对作物根系的补给。其他资料如表 1。

表 1 灌区基本资料

项目	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
种植作物	作物一	作物三	作物三	作物二
面积/ hm^2	2 133.3	1 333.3	1 400.0	1 866.7
时段内平均潜在蒸腾蒸发量/ mm	6.0	7.5	7.5	4.5
计划湿润层厚度/ cm	40	50	50	30
充分灌溉下的产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	7 800	4 200	4 200	1 800
斗口水价/ $(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	0.08	0.09	0.07	0.1
作物价格/ $(\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.3	1.4	1.4	1.8
该时段作物水分敏感系数	0.3	0.6	0.6	0.4

3.2 模型求解中有关参数的选择

根据以上基本资料,建立本文第二部分所述的多目标非线性优化模型。该模型包含 4 个决策变量和 2 个目标,其中决策变量一、二、三、四分别为区域 1~4 的灌水定额;目标一为供水部门的收益,目标二为灌区作物增产值。采用 MATLAB 6.0 按照基于 Pareto front 的多目标遗传算法编程求解该模型。计算中参数选择如下:父代初始种群规模为 400;寻优次数为 200 次;交叉率为 0.9;变异率为 0.1。

3.3 计算结果

经过 200 次循环,种群达到稳定,精粹池中的个体形成了多目标问题的非劣集,绘制如图 2 所示。

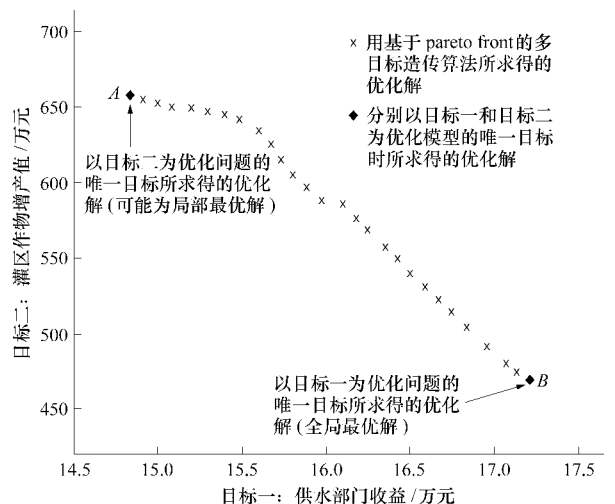


图 2 一次灌水水资源配置多目标优化问题的 pareto 前沿

从图 2 可以看到:精粹池中散布的个体形成了二目标非线性优化模型的 pareto 前沿面。当沿着前沿面由点 A 到点 B 移动

时,灌区水资源配置的目标一(供水部门收益)的值越来越大;反之,目标二(灌区作物增产值)的值越来越大。图2中部分解的值以及所对应的决策变量的大小见表2。

表2 多目标遗传算法寻优结果

优秀个体	决策变量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)				目标/万元	
	一	二	三	四	一	二
1	374.43	468.12	223.54	33.93	14.832	658.2
2	374.48	471.24	153.63	81.92	15.080	650.5
3	374.32	477.01	112.47	111.35	15.293	646.9
4	374.18	562.68	41.09	102.72	15.458	641.8
5	374.41	447.51	30.72	193.46	15.672	625.5
6	347.04	467.10	9.00	226.80	15.880	596.9
7	280.62	489.60	10.37	285.59	16.097	585.9
8	240.54	502.84	11.24	321.27	16.247	569.1
9	192.94	517.32	14.48	363.08	16.420	549.7
10	127.49	538.61	13.29	423.39	16.672	522.5
11	83.19	556.20	12.98	461.61	16.838	504.5
12	24.28	578.91	9.41	515.24	17.071	481.2
13	0	594.00	0	540.00	17.208	469.6

表2列出了非充分灌溉时灌区一次灌水水资源配置问题的部分非劣解,从而为决策者分配有限的水资源提供了科学依

(上接第28页)

4 结 语

从对农户的抽样调查结果看,影响农业节水合作组织发展的因素比较复杂,涉及节水设备技术创新、政策引导、人才等。为此,今后应进一步关注以下几方面问题,力争在农业节水组织创新方面有所突破。

(1)科研单位应加快对节水设备的研制工作,尽快研制出物美价廉的节水抗旱设备并投入市场,物美价廉的设备可以为企业提供一定的利益驱动,企业才更有可能牵头组建合作经济组织,为合作经济组织的建立减少经济上和技术上的障碍。

(2)政府部门应该给予正确积极的引导,大力宣传建立合作经济组织的益处,鼓励农民自己建立或是依托企业组成组织形式,并且加大节水灌溉示范力度,达到帮助农民节水增收的目的。

(3)相关部门应制定促进农村经济合作组织发展的政策和规范,并给予适当的政策倾斜,为经济组织的建立提供政策性保障,这样农民和企业才可能牵头进行组织制度的创新。

(4)针对领头人不好选的问题,首先得通过广泛的合作制度宣传,使广大农民逐渐了解合作经济组织,接受合作经济组织,再由农民民主评议选出组织的领导人,组成单纯的由农民组成的经济组织或是与企业联合的经济组织。

(5)与农业、水利相关的企业应该积极参与到节水合作经济组织的组建中,为组织提供经济、科技、信息以及设备上的支持。

据,以达到兼顾供水部门和灌区农业生产两方面的利益。

4 结 语

本文提出了非充分灌溉时灌区一次灌水水资源配置的多目标优化数学模型。模型以供水部门收益最大和灌区作物增产值最高为优化目标。为求解该模型引进了基于 pareto front 的多目标遗传算法,从而达到了问题的快速高效求解,并且克服了传统多目标优化问题求解方法易陷入局部最优的缺点。该方法可以用于多目标决策中类似问题的求解。通过实例分析,表明基于 Pareto front 的多目标遗传算法可以为灌区一次灌水多目标问题提供非劣集,因此它解决了非充分灌溉时如何兼顾供水部门和农业生产两方面利益的问题。

参考文献:

- [1] 叶秉如. 水资源系统优化规划和调度[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [2] 崔远来,李远华. 作物缺水条件下灌溉供水量最优分配[J]. 水利学报,1997,(3):37-42.
- [3] 汪志农,熊运章. 灌溉渠系配水优化模型的研究[J]. 西北农业大学学报,1993,(2):64-69.
- [4] 罗金耀. 节水灌溉理论与技术[M],武汉:武汉大学出版社,1999.
- [5] 茆智,李远华,李会昌. 逐日作物需水量预测数学模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1995,28(3):253-259.
- [6] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2004:92-95.

(6)从农民自身的角度来考虑,农民应努力提高自己的科学文化素质和组织化程度,积极主动与外界加强接触,学习各项知识和技能,这就需要有关部门加大教育和培训的投入力度。

参考文献:

- [1] “中国农村合作组织经济行为研究”课题组. 中国农村合作组织经济行为的制约因素分析[J]. 农业经济问题,1997,(8).
- [2] 中国社会科学院农村发展研究所《农村合作组织经济行为比较研究》课题组. 农村合作组织经济行为的比较研究[J]. 中国农村经济,1996,(12).
- [3] 潘劲. 中国农村专业合作组织发展研究[A]. 中国农村发展研究报告[C]. 北京:社会科学文献出版社,2002:215-228.
- [4] 黄祖辉,徐旭初,冯冠胜. 农民专业合作组织发展的影响因素分析——对浙江省农民专业合作经济组织发展现状的探讨[J]. 中国农村经济,2002,(3).
- [5] 郭红东,蒋文华. 影响农户参与专业合作经济组织行为的因素分析——基于对浙江省农户的实证研究[J]. 中国农村经济,2004,(5).
- [6] 孙亚范. 现阶段我国农民合作需求与意愿的实证研究[J]. 江苏社会科学,2003,(1).
- [7] Lin Zhen, Jayant K Routray. Groundwater Resource Use Practices and Implications for Sustainable Development in the North Shandong Province PR China[A]. Water Resources Development [C]. 2002.