

基于遗传算法与方案优选的多目标优化模型求解方法

单宝英 郭萍* 张帆 郭珊珊

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 为求解含复杂约束的多目标优化问题并获得符合实际决策需求的最优解,将多目标优化问题的求解分为2步:1)使用改进的遗传算法对带有较复杂约束的多目标规划模型进行求解,得到 Pareto 解集;2)基于熵权法构建方案优选评价体系,对 Pareto 解集进行优选,从而获得多目标优化问题的最佳方案。将本研究方法应用到灌区水资源优化配置问题中检验其可行性与实用性。结果表明:相较于评价函数法获得的结果,Pareto 解集可以直观展示不同目标之间相互制衡的关系;根据当地实际情况选取粮经产量比、用水结构信息熵、化肥使用量作为优选指标,优选后的配水方案水分生产力可以达到 1.46 kg/m^3 ,总产量达到 $8.667 \times 10^7 \text{ kg}$ 。与传统求解方法比较,本研究提出的求解方法全局寻优能力更强,可以获得更加合理的方案。基于遗传算法与方案优选的多目标优化问题求解方法在求解较为复杂的多目标优化问题时能够获得更为满意的方案,可以为其他多目标问题的求解提供一种新的思路。

关键词 多目标求解方法;遗传算法;方案优选;熵权法;水资源优化配置

中图分类号 S274.3

文章编号 1007-4333(2019)06-0157-09

文献标志码 A

A multi-objective optimization model solving method based on genetic algorithm and scheme evaluation

SHAN Baoying, GUO Ping*, ZHANG Fan, GUO Shanshan

(College of Water Resource & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to obtain the satisfactory solutions of multi-objective programming (MOP) problems, two steps are taken: 1) A improved multi-objective genetic algorithm is used to deal with more complex constraints of MOP, and thus the Pareto solution set can be obtained. 2) The entropy weight method is used to select a more suitable scheme based on evaluation index system. To prove its practicality and applicability, this method is applied to the water allocation model in Yingke Irrigation District. The results show that the Pareto solution set can fully reflect the relationship between different objectives. According to the practical situation, the ratio of grain to economic, the information entropy of water structure and the amount of fertilizer used are selected as the indicators to value the schemes from Pareto solution set. The water productivity obtained by this method reaches 1.46 kg/m^3 and the total yield reaches $86.67 \times 10^6 \text{ kg}$. Compared with the traditional solution method, the method proposed in this study has stronger optimization ability and can obtain a more reasonable solution. The multi-objective optimization problem solving method based on genetic algorithm and scheme optimization can obtain more satisfactory schemes to solve more complex MOP problems. This method can also provide a new idea to solve other MOP problems.

Keywords MOP solving method; genetic algorithm, schemes evaluation; entropy weight method, irrigation water allocation

收稿日期: 2018-08-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51439006)

第一作者: 单宝英, 硕士研究生, E-mail: 18301695791@163.com

通讯作者: 郭萍, 教授, 主要从事水资源及环境系统不确定性研究, E-mail: guop@cau.edu.cn

多目标优化是现代决策科学的重要组成部分^[1]。在多目标优化问题中,面临的多个优化目标往往是互相矛盾且不可公度的^[2],很少存在一个绝对最优解使得所有目标同时达到最优。当决策者对不同目标的偏好不同时,会得到不同的最优解,多目标优化问题中所有可能的最优解被称为 Pareto 解(非劣解)^[3]。求解多目标优化问题的最优解实质上就是求解 Pareto 解集。遗传算法的内在并行机制和全局寻优特性^[4]与多目标优化问题相契合,随着 VEGA^[5]、NSGA^[6]、NSGA-II^[7] 等方法相继提出,利用遗传算法求解 Pareto 解集迅速得到广泛应用^[8-9]。在使用遗传算法求解含约束现实优化问题时,约束条件如何处理是一项重要的问题^[3]。传统上,一般采用罚函数法处理约束^[10],但对于变量较多、约束复杂的实际优化问题,很难通过随机的方式在一个较大的包含可行域的 n 维空间中得到可行解或靠近可行域的解,很有可能迭代寻优过程中所有个体都不满足约束。

使用多目标遗传算法可以获得无穷多个非劣解,如何从中选择出最符合实际需求的方案需要一种系统客观的方法。常见的对 Pareto 解集进行优选的方法有基于效用函数的冲突解决理论^[11]、理想点法^[12]等。效用函数法仅适用于不同目标函数代表不同利益主体的多目标优化问题^[11];理想点法是指从非劣方案集中选择出各目标最接近理想最优值的方案,并不能充分利用 Pareto 解集中的信息。现有的优选方法均仅从优化目标的角度考虑,对于实际优化问题的决策环境考虑较少,因此可能难以在众多可行解中获得最符合决策要求的方案。

基于以上问题,本研究拟对多目标遗传算法进行改进以处理复杂约束并且基于熵权法建立方案优选体系,以期获得最符合决策需求的非劣优化方案;尝试将基于遗传算法与方案优选的多目标优化问题求解方法应用于求解一个复杂的多目标水资源优化配置模型,以检验所提方法的实用性和可行性。

1 多目标规划问题求解方法

1.1 多目标遗传算法

改进后的多目标遗传算法(multi-optimization genetic algorithm, MOGA)可以求解带有复杂约束的多目标优化问题,得到 Pareto 最优解。算法主要步骤如下:

1)产生初始种群。

在常见的遗传算法工具箱中,初始种群的产生都需要变量上下界约束,但很多现实世界的优化问题约束较为复杂,且缺少单独的变量上下界约束。相关研究^[13]中处理步骤为:

①给定可行域内某个内点,记为 P_0 ;

②根据实际问题确定充分大的实数 M ,随机选择某个 n 维随机数 d ;

③如果 $P_0 + Md$ 满足模型中所有的不等式约束,则将 $P = P_0 + Md$ 作为一初始染色体;否则用 $0 \sim M$ 之间的某个随机数替换 M ,重新检验 $P_0 + Md$ 是否在可行域内。

由于 P_0 是可行域的内点,所以在经过有限次处理后,必然可以找到满足所有约束的可行解,由此得到初始种群,记为 C_0 。

但是,利用以上方法得到的初始种群个体之间相似性较高,对于约束很复杂的求解问题,初始种群 C_0 聚集在 P_0 附近的很小范围内,初始种群的差异性很小、多样性差,不利于遗传算法的全局寻优过程。针对这一问题,采用如下步骤处理:

①将 C_0 作为初始种群带入遗传算法中,经过选择、交叉、变异算子,迭代优化后得到较优的配置方案,记录为 X_1 ;

②更换 P_0 ,重新得到初始种群,再次经过遗传算法优化得到较优方案,记录为 X_2 ,如此重复数次,得到多样性较好的可行解集 $\{X_1, X_2, \dots\}$;

③令变量上界 $x_{\max} = \max\{X_0, X_1, \dots\} + c_1$,变量下界 $x_{\min} = \min\{X_0, X_1, \dots\} - c_2$,根据实际求解问题决策变量的数量级选取合适的 c_1, c_2 。

在经过多次选择交叉变异后,可行解集 $\{X_0, X_1, \dots\}$ 中个体丰富性得到提高。再经过适当的上下界放大,既使得变量上下界 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 尽可能包含较优的可行解集,又能够较快速的随机产生多样性较好的初始种群。

得到变量上下界后,再按传统的方法进行二进制编码或实数编码产生初始个体,选取满足约束的个体组成初始种群。

2)选择、交叉、变异、迭代终止。

分别采用并列选择法^[14]、算数交叉法进行选择算子、交叉算子操作,采用李董辉等^[15]的方法进行变异操作。在选择、交叉、变异每步算子结束后验证个体是否在可行域内,保证整个寻优过程在可行域内进行。具体流程见图 1。

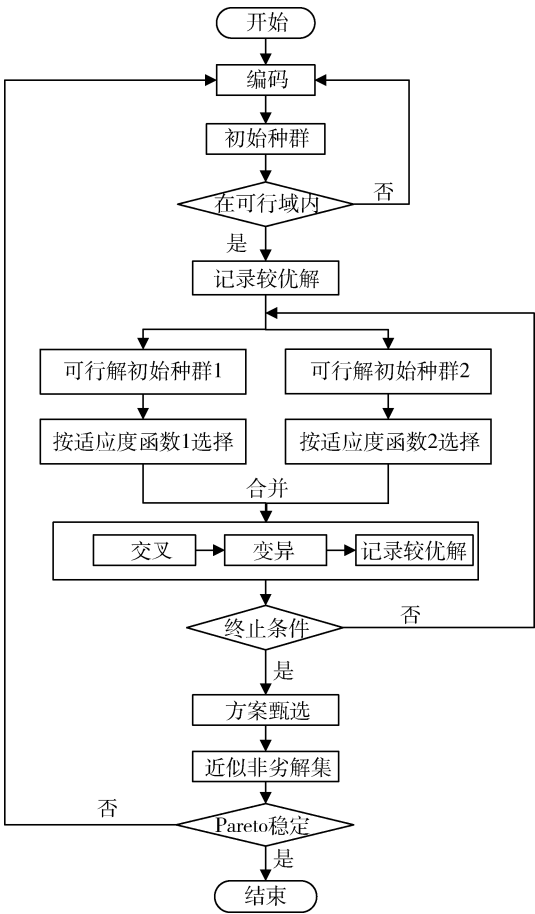


图 1 多目标遗传算法流程

Fig. 1 Flow chart of MOGA in this research

1.2 基于熵权法的方案优选方法

原则上，多目标优化问题的 Pareto 解集中有无数个非劣解。但在实际决策问题中，不是任意一个非劣解都能满足决策要求，通常多目标优化模型得到的最终结果既是问题的非劣解^[16]，同时又是某种意义上决策者满意的解。针对多组非劣解如何优选的问题，本研究构建了基于熵权法的综合评价体系，决策者可以根据实际解决问题选择评价指标，对 Pareto 解集进行优选。

1.2.1 熵权法

熵权法作为一种应用较广的客观赋权的方法，以根据各项指标值包含的信息量的多少来确定各指标权重。当指标的信息熵越小，表明其指标值的变异程度越大，提供的信息量越大，在综合评价中所起的作用越大，则该指标的权重也应越大；反之该指标权重则越小^[17]。熵权法可以反映出指标信息熵值的效用价值，避免人为因素的影响，具有单调性，缩

放无关性、鲁棒性较好等性质^[17]且计算简便。因此，选用熵权法对各指标进行赋权。

具体实现步骤如下^[17]：

1) 设有 m 个待评项目、 n 个评价指标，形成原始指标数据矩阵 $R=(r_{ij})_{m\times n}$ 。

2) 对于第 i 个评价项目，第 j 个指标，其信息熵 E_j 为：

$$E_j = - \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \tag{1}$$

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \tag{2}$$

记

$$e_j = \frac{E_j}{\ln(m)} \tag{3}$$

3) 第 j 个指标的客观权重是：

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n e_j} \tag{4}$$

1.2.2 优选步骤

对 Pareto 解集进行优选，具体优选步骤为：

- 1) 根据实际问题确定优选指标集。
- 2) 确定待优选方案集。
- 3) 计算各方案指标值。
- 4) 熵权法确定权重。
- 5) 指标值标准化处理。由于指标间量纲不同，在计算每个方案的综合评价结果之前，需要将各方案指标值进行标准化处理。 I_{ij} 为第 i 种方案在第 j 个指标评价下的指标值， d_{ij} 为第 i 种方案在第 j 个指标评价下的标准值。对于越小越优型指标：

$$d_{ij} = \frac{\max_i \{I_{ij}\} - I_{ij}}{\max_i \{I_{ij}\} - \min_i \{I_{ij}\}} \tag{5}$$

对于越大越优型指标：

$$d_{ij} = \frac{I_{ij} - \min_i \{I_{ij}\}}{\max_i \{I_{ij}\} - \min_i \{I_{ij}\}} \tag{6}$$

6) 进行综合评价。方案综合评价值越大越优，综合评价结果计算公式为：

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^3 \omega_j d_{ij} \tag{7}$$

2 实例应用

本研究以文献[18]中的分式二次规划模型作为算例，使用提出的多目标优化问题求解方法进行求

解。文献[18]针对盈科灌区水资源短缺情况,考虑灌区不同决策主体的利益诉求,以水分生产力最大和总产量最大为目标,建立地表水、地下水逐月联合配置模型(LFQBP)。

目标函数:

$$\max P_w = \frac{\sum_{i=1}^3 A_i \left[a_i \left(\sum_{t=1}^6 (S_{it} + G_{it}) \right)^2 + b_i \sum_{t=1}^6 (S_{it} + G_{it}) + \gamma_i \right]}{\sum_{i=1}^3 A_i \sum_{t=1}^6 (S_{it} + G_{it})}$$

(8)

$$\max Y = \sum_{i=1}^3 A_i \left[a_i \left(\sum_{t=1}^6 (S_{it} + G_{it}) \right)^2 + b_i \sum_{t=1}^6 (S_{it} + G_{it}) + \gamma_i \right]$$

(9)

式中: P_w 为作物水分生产力, kg/m^3 ; Y 为作物总产量, kg ; i 为作物种类, $i=1,2,3$ 分别表示大田玉米、制种玉米和小麦; t 为作物生育期内月份, $t=1,2,\dots,6$, 分别表示 4—9 月份; S_{it} 为第 i 种作物第 t 月份地表水灌溉水量, mm ; G_{it} 为第 i 种作物第 t 月份地下水灌溉水量, mm ; A_i 为第 i 种作物的种植面积, hm^2 ; a_i, b_i, γ_i 分别表示第 i 种作物水分生产函数二次项、一次项和常数项系数。

约束条件:

1) 地表水可利用水量约束为

$$\sum_{i=1}^3 A_i S_{it} \leq \beta_1 \beta_2 Q_t \quad \forall t$$

(10)

式中: Q_t 为第 t 月份的地表水可利用水量, 10^4 m^3 ; β_1, β_2 分别表示渠系水利用系数、田间水利用系数;

2) 作物最小需水量约束为

$$S_{it} + G_{it} + P_t \geq \text{ET}_{\min_{it}} \quad \forall i, t$$

(11)

式中: P_t 为 t 月份有效降雨量, mm ; $\text{ET}_{\min_{it}}$ 为第 i 种

作物在第 t 月份的最小需水量, mm ;

3) 地表水地下水转化约束为

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^6 G_{it} / \beta_2 \leq \theta_1 \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T S_{it} + \theta_2 \left(\beta_1 \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^6 S_{it} + \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^6 G_{it} \right) + \sum_{t=1}^6 (\theta_3 P_t + \mu \Delta h_t)$$

(12)

式中: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别表示渠系渗漏损失系数、田间水入渗系数、降雨入渗补给系数; Δh_t 为第 t 月份的地下水位差, mm ; μ 为地下水含水层给水度。

4) 非负约束为

$$\begin{cases} S_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \\ G_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \end{cases}$$

(13)

该模型在兼顾灌区管理部门与农民双方利益的基础上,能较好的解决干旱地区水资源供需不匹配时的地表水、地下水如何配置问题。但是模型本身较复杂,2 个目标皆为复杂的非线性,传统的求解方法很有可能无法求出全局最优解。并且黑河流域生态环境脆弱,在对水资源进行优化配置时,也需要考虑其他社会、生态等问题。使用本研究提出的基于遗传算法与方案优选的多目标优化问题求解方法对此模型进行求解,相关数据与原文献相同。

2.1 多目标遗传算法求解结果分析

使用遗传算法求解该多目标模型,计算参数为:初始种群大小 100,最大进化代数 100。目标寻优过程和 Pareto 前沿面分别见图 2 和图 3。由水分生产力和总产量目标寻优过程(图 2)可以看出,随着进化代数的增加,最优值不断增加,最后趋于平稳。以水分生产力目标为例,初始种群的最大值 $1.480 \text{ kg}/\text{m}^3$,优化后达到 $1.491 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。优化效果较为明显,显示出遗传算法在求解此类复杂的多目标问题时具有良好的特性。

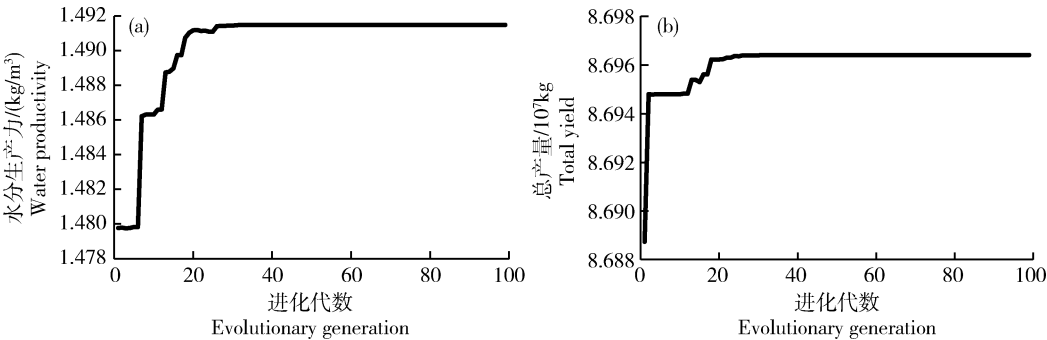


图 2 水分生产力(a)和产量(b)目标寻优过程

Fig. 2 The optimization process of water productivity (a) and total yield (b)

在 Pareto 前沿面(图 3)上,随着一个目标函数值的增大,另一个目标函数值减小,整个 Pareto 前沿面呈向上凸起,2 个目标处以相互博弈制衡的状态。这也与实际经验相符合,若只片面追求作物产量最优,会使得水资源利用效率下降。在水资源严重短缺的西北干旱地区,合理高效的利用农业水资源对社会、生态具有重要意义。若仅追求灌溉用水效率最大而减少农业灌溉水量,会使得作物产量下降,并进一步影响当地农民的收入。多目标模型能够在多个目标相互博弈的过程中,根据实际决策需

要找到所有目标均处于较高水平的平衡点。

文献[18]使用构造拉格朗日函数结合库恩-塔克条件(KKT 条件)的方法对模型进行求解,优化结果为:水分生产力 1.44 kg/m^3 ,总产量 $8.863\times 10^7\text{ kg}$ 。使用本研究求解方法得到多组配水方案的水分生产力和作物总产量 2 个优化目标同时优于文献[18]求解结果(图 3)。这表明对于相同模型和数据,遗传算法具有很强的全局寻优能力,改进后遗传算法能够较好的处理模型中复杂约束,在求解此类复杂非线性多目标规划问题时更具优越性。

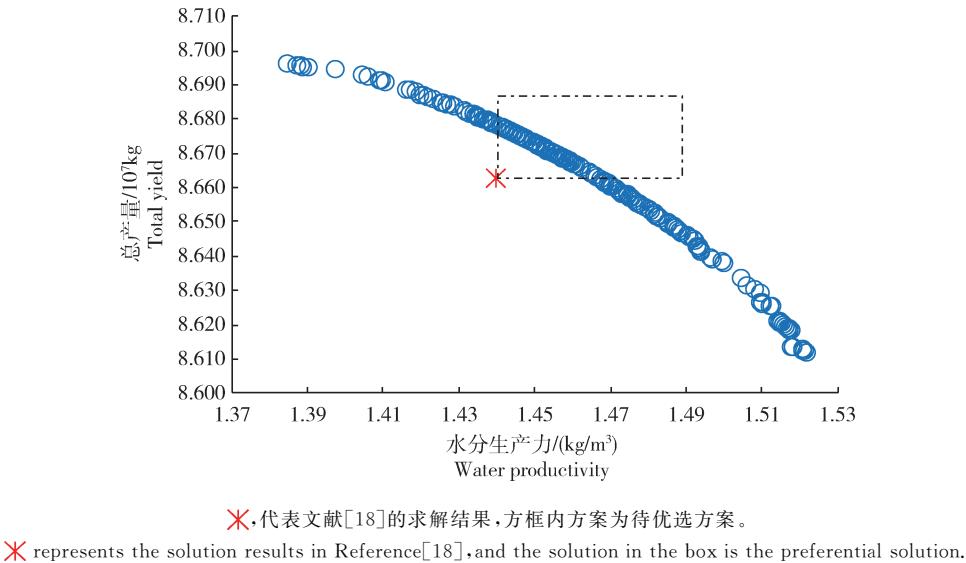


图 3 非劣解集中待优选方案集

Fig. 3 Preferential solution set of Pareto

传统求解 LFQBP 模型的方法,是将多目标规划转换成单目标规划进行求解。该方法只能获得 Pareto 前沿面上的 1 个点,即 1 组配置方案,而这组方案是否是最优方案,有没有兼顾优化目标以外的其他要素,都是不能选择和不可控的。非劣解集可以清晰、准确的显示 2 个目标之间的制衡关系,多组非劣的不同配置方案能够为决策制定者提供多种决策选择,可以根据当地实际情况和决策偏好,结合其他社会和生态指标,优选最终配水方案。

2.2 方案优选

由于求解得到的非劣解集众多,决策制定者可以根据决策期望选择一定范围内的配水方案进一步优选。本研究选取水分生产力 $>1.44\text{ kg/m}^3$ 且总产量 $>8.863\times 10^7\text{ kg}$ 的共 57 组非劣配水方案为待优选方案(图 3)。

为获得符合地区实际情况的优化方案,选取反

映粮食安全的粮经产量比、反映配水公平性的用水结构信息熵、反映对环境影响的化肥施用量 3 项指标作为评价指标,采用基于熵权法的方案优选体系进行优选。优选后的配水方案是在社会、生态等要素控制下的最优配水方案。

1)粮经产量比。在灌区水资源优化配置过程中,区域粮食安全是一项重要的约束或指标。选用粮食作物与经济作物的产量之比作为表征粮食安全的指标。粮经产量比越大,表明该地区粮食安全风险越小,计算公式为:

$$I_{il} = \frac{Y_{i,g}}{Y_{i,e}}$$

(14)

式中: I_{il} 为方案集中第 i 个方案的粮经产量比; $Y_{i,g}$ 、 $Y_{i,e}$ 为第 i 个评价方案中粮食作物、经济作物总产量,kg。

2)用水结构信息熵。信息熵是度量系统无序程度的有效工具,信息熵与水资源系统相结合,构造出

用水系统结构的信息熵,可以表征水资源系统的均衡性和稳定性^[19]。各个用水部门用水量为随机变量 X ,共 K 个部门,各用水部门用水比例(用水结构)表示随机变量对应的概率 P_k ,则用水结构信息熵 S 的表达式为:

$$P_k = X_k / \sum_{k=1}^K X_k$$

(15)

$$S = - \sum_{k=1}^K P_k \ln P_k$$

(16)

用水结构信息熵可以反映各类作物用水分配情况^[20],当区域典型作物用水结构信息熵较低时,表明区域对于单一作物的水量分配较大,过分依赖某一作物对整个区域来说蕴含着极高的风险^[20]。对水资源进行优化配置时,应该规避掉用水结构信息熵小的方案,降低水资源配置风险。

3)化肥施用量。化肥是农业面源污染最主要的来源之一,对生态环境有着重要的影响。甘肃省2016年玉米化肥施用量466 kg/hm²^[21],小麦化肥施用量351 kg/hm²,均远高于发达国家规定的

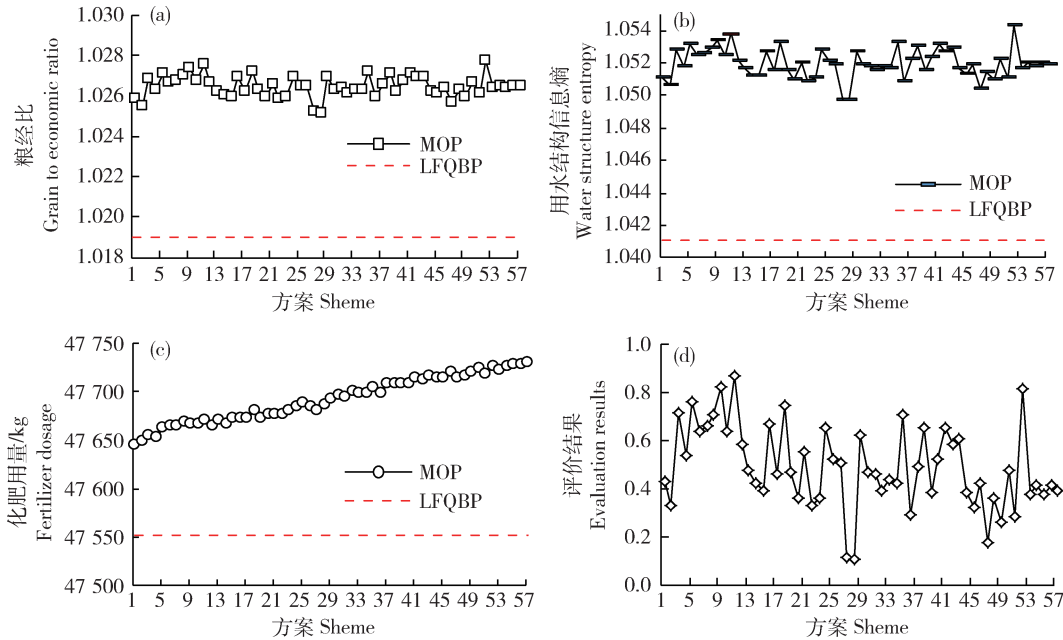
225 kg/hm²^[22]。在保证粮食产量稳定的前提下适量减少灌区化肥施用,对保证灌区生态环境友好、长期可持续发展具有重要意义。因此选用化肥施用量作为优选灌区水资源优化配置方案的指标之一。化肥施用量越大,对生态环境的影响越大,该指标越小越优,具体表示为:

$$I_{i3} = \sum_{k=1}^K Y_{ik} F_{ik}$$

(17)

式中: I_{i3} 为第 i 种配水方案的化肥施用量; Y_{ik} 为在第 i 种方案中第 k 种作物产量,kg; F_{ik} 为在第 i 种方案中第 k 种作物获得单位产量施用化肥用量,kg/kg。

使用熵权法确定各个指标权重,在方案集和指标集已经确定的前提下,粮经产量比、用水结构信息熵、化肥用量3项指标所占权重依次为0.21,0.60,0.19。方案指标值及综合评价结果见图4。方案11化肥施用量位于较低水平而粮经产量比和用水结构信息熵较大,在综合评价时最占优势,综合评价价值最大。因此,选取方案11作为该非线性多目标模型最终的配水方案。



MOP,本研究多目标优化问题求解方法;LFQBP,参考文献[18]的求解方法。图5和表1同。
MOP,the multi-objective optimization problem solving method of this study;LFQBP,the solution method of Reference[18]. Fig. 5 and Table 1 are the same as Fig. 4.

图4 57组待优选方案的指标值和综合评价结果

Fig. 4 Index value and comprehensive evaluation results of the preferential solution set

本研究与文献[18]求解得到的作物逐月配水结果见图5,全生育期配水结果见表1。由二次水分生产函数得,当作物产量达到最大时大田玉米、

制种玉米和小麦的配水量分别为820.32、730.44和582.70mm。LFQBP模型下大田玉米和制种玉米的配水量非常接近甚至超过二次水分生产函数

极值点处的配水量,但本研究给出的 MOP 求解方法相较于 LFQBP 倾向于减少大田玉米和制种玉米的配水量,适当增加小麦配水量。这是因为模型是以二次的水分生产函数来表征配水量与产量之间的关系,随着配水量不断增加至极值点,产量

增加趋势愈缓,但水分生产力却不断下降,水资源利用效率降低。将大田玉米、制种玉米与小麦的配水量保持在较高而不是最高水平,可以协调水资源高效利用与最大效益之间的矛盾,更符合当地实际情况。

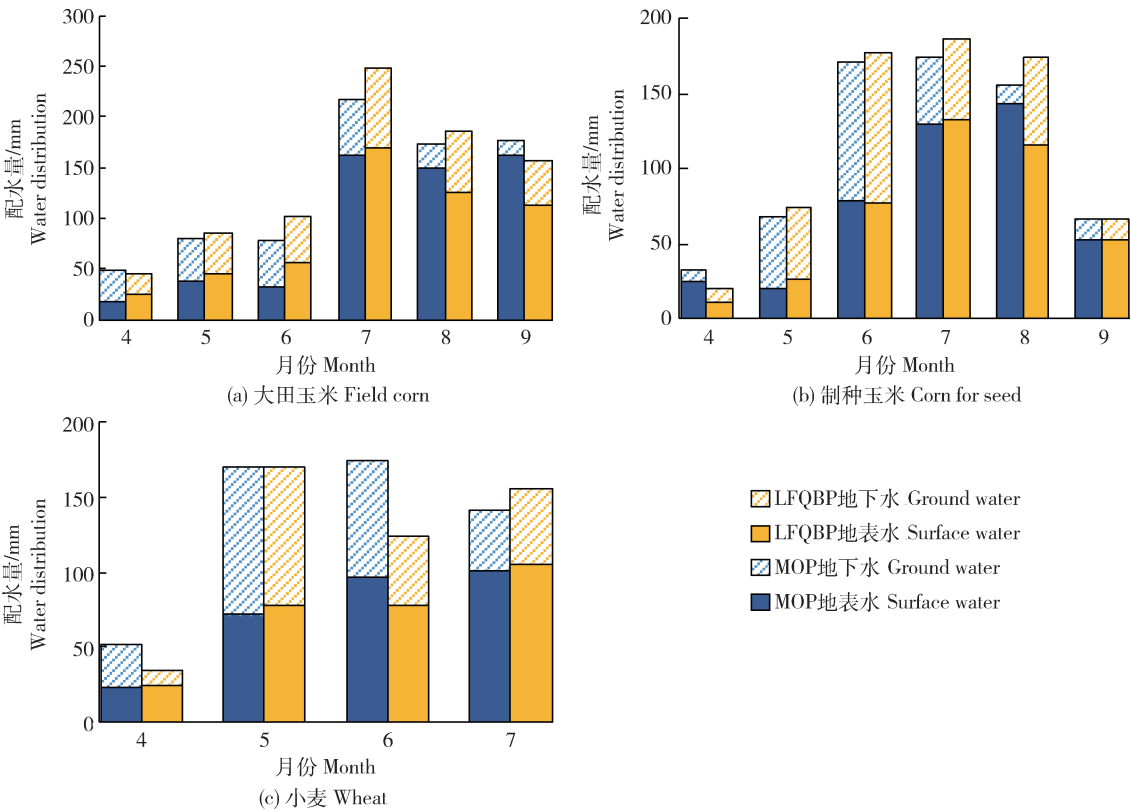


图 5 MOP 与 LFQBP 求解得到的作物逐月配水量
Fig. 5 Monthly water distribution under MOP and LFQBP

表 1 MOP 与 LFQBP 求解得到的作物全生育期配水量
Table 1 Water distribution during the whole growth period under MOP and LFQBP mm

求解方法 Method	配水类型 Type	大田玉米 Corn field	制种玉米 Corn for seed	小麦 Wheat
MOP	地表水 Surface water	556.42	453.30	292.86
	地下水 Ground water	211.68	217.75	245.34
	总配水 Total water	768.10	671.04	538.20
LFQBP	地表水 Surface water	531.01	418.42	286.63
	地下水 Ground water	289.47	283.93	198.57
	总配水 Total water	820.48	702.35	485.19

整体看,使用本研究多目标规划求解方法获得的最优配水方案相较于 LFQBP 模型,总配水量由

$6\,034.00\times10^4\text{ m}^3$ 减少到 $5\,936.53\times10^4\text{ m}^3$,水分生产力从 1.44 kg/m^3 增加到 1.46 kg/m^3 ,灌区主

要作物总产量从 8.663×10^7 kg 增加到 8.667×10^7 kg。通过将有限的可利用地表水和地下水资源在不同作物不同生育阶段进行更优配置,在保证当地粮食产量和水分生产力稳定的情况下,农业灌溉水资源量减少了 97.47×10^4 m³,特别的是在满足地表可供水量约束下,地下水总配水量减少了 315.14×10^4 m³。这对地处西北干旱地区的盈科灌区节约农业水资源、保护地下水生态环境具有重要意义。并且,以粮经产量比、用水结构信息熵和化肥施用量作为评价指标的方案优选体系,兼顾考虑了社会、生态等要素,在多组非劣配水方案的经济效益、水资源效益已达到一定目标或相差不大的情况下,综合考量其他社会、生态等要素,使决策制定者可以获得最满意的决策方案。最优的配水方案相较于其他非劣配水方案,可以减少化肥施用量、降低当地用水结构风险且保证当地粮食安全,有利于当地可持续性发展。综上,基于遗传算法与方案优选的多目标规划求解方法无论是求解的全局最优性、决策的丰富性,还是配水方案的实际可行性,皆明显优于传统方法。

从以上算例可以看出,本研究提出的多目标规划求解方法,既兼顾遗传算法全局寻优、通用性强的优点,又为 Pareto 解集优选提供一种客观的综合评价方法,可以得到更加合理和满足决策需要的决策方案。

3 结 论

本研究建立了一种基于遗传算法与方案优选多目标优化问题的求解方法来获得符合优化问题实际需求的优化方案,并给出了遗传算法求解复杂约束时的一种处理办法。同时,引入实际优化问题作为算例验证提出方法的实用性与可行性。结果表明,使用本研究提出的方法获得的优化方案相较于传统方法所得方案,可以在更高的水资源利用效率和水水分生产力水平下节约灌溉水资源。本研究所提出的解决多目标优化问题的求解算法、评价指标体系与方案评价方法,可以为其他多目标优化问题的求解提供参考和依据。

参考文献 References

[1] 胡毓达. 实用多目标最优化[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1990
Hu Y D. *Practical Multi-Objective Optimization*[M]. Shanghai,

Shanghai Science and Technology Press,1990 (in Chinese)
[2] 肖晓伟,肖迪,林锦国,肖玉峰. 多目标优化问题的研究概述[J]. 计算机应用研究,2011,28(3):805-808,827
Xiao X W, Xiao D, Lin J G, Xiao Y F. Overview on multi-objective optimization problem research[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28 (3): 805-808, 827 (in Chinese)
[3] 陈南祥,李跃鹏,徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 水利学报,2006,37(3):308-313
Chen N X, Li Y P, Xu C G. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(3): 308-313 (in Chinese)
[4] 赖红松,董品杰,祝国瑞. 求解多目标规划问题的 Pareto 多目标遗传算法[J]. 系统工程,2003,21(5):24-28
Lai H S, Dong P J, Zhu G R. A pareto multi-objective genetic algorithm for multi-objective programming problem[J]. *Systems Engineering*, 2003, 21(5): 24-28 (in Chinese)
[5] Schaffer, David J. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms[J]. *Proc. int. conf. on Genetic Algorithm & Their Applications*, 1984, 2(1):414-419
[6] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1994, 2(3): 221-248
[7] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197
[8] 付强,鲁雪萍,李天霄. 基于 NSGA- II 农业多水源复合系统多目标配置模型应用[J]. 东北农业大学学报,2017,48(3):63-71
Fu Q, Lu X P, Li T X. Application of multi objective optimal allocation model of agricultural multi source composite system based on NSGA- II [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(3): 63-71 (in Chinese)
[9] 史银军,栗晓玲. 干旱区内陆河流域水资源使用权多目标优化分配:以甘肃省石羊河流域为例[J]. 干旱地区农业研究,2010, 28(2):136-140,149
Shi Y J, Su X L. Water resources usufruct multiobjective optimal allocation in the inland river basin of arid areas: A case study of Shiyang River Basin[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 136-140, 149 (in Chinese)
[10] 郭珊珊,郭萍,李茱. 基于多目标遗传算法的渠系配水优化模型[J]. 中国农业大学学报,2017,22(7):71-77
Guo SS, Guo P, Li M. Multi-objective genetic algorithm optimization model for canal scheduling[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(7): 71-77 (in Chinese)
[11] 窦明,王艳艳,李桂秋. 基于纳污控制的沙颍河流域排污权交易多目标优化模型[J]. 水利学报,2017,48(8):892-902

- Dou M, Wang Y Y, Li G Q. Multi-objective optimization model of watershed emission rights trading based on pollution control [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(8): 892-902 (in Chinese)
- [12] 于芷婧, 尚松浩. 华北轮作农田灌溉制度多目标优化模型及应用[J]. 水利学报, 2016, 47(9): 1188-1196
- Yu Z J, Shang S H. Multi-objective optimization method for irrigation scheduling of crop rotation system and its application in North China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(9): 1188-1196 (in Chinese)
- [13] 姜传隆. 基于可持续发展的区域水资源合理配置的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007
- Jiang C L. A study on the rational allocation of regional water resources based on sustainable development [D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2007 (in Chinese)
- [14] 雷英杰. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014
- Lei Y. *MATLAB Genetic Algorithm Toolbox and Application* [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2014 (in Chinese)
- [15] 李董辉, 童小娇, 万中. 数值最优化算法与理论[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- Li D H, Tong X J, Wan Z. *Numerical Optimization Algorithm and Theory* [M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)
- [16] Ishibuchi H, Murata T. A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 1998, 28(3): 392-403
- [17] 孙利娟, 邢小军, 周德群. 熵值赋权法的改进[J]. 统计与决策, 2010(21): 153-154
- Sun L, Xing X, Zhou D. Improvement of entropy weighting method [J]. *Statistics and Decision*, 2010(21): 153-154 (in Chinese)
- [18] 李茏, 姜瑶, 郭萍, 李江. 考虑不同层次利益主体的灌溉水资源优化配置[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 199-207
- Li M, Jiang Y, Guo P, Li J. Irrigation water optimal allocation considering stakeholders of different levels [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5): 199-207 (in Chinese)
- [19] 刘燕, 胡安焱, 邓亚芝. 基于信息熵的用水系统结构演化研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 141-144
- Liu Y, Hu A Y, Deng Y Z. Study on the evolution of water resource structure based on information entropy [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2006, 34(6): 141-144 (in Chinese)
- [20] 崔昊杰. 民勤县农业水资源优化配置不确定性风险分析[D]. 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2018
- Cui H J. Risk analysis of optimal agricultural water resources allocation for Minqin under Uncertainties [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 全国供销合作总社, 中华人民共和国农业部, 中华全国供销合作总社. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016
- The national development and reform commission of the People's Republic of China, the national supply and marketing cooperative general agency, the ministry of agriculture of the People's Republic of China, and the national supply and marketing cooperative general agency. *Compilation of Data on Cost and Income of Agricultural Products Nationwide* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016 (in Chinese)
- [22] 张锋, 胡浩. 中国化肥投入的污染效应及其区域差异分析[J]. 湖南农业大学学报: 社会科学版, 2011, 12(6): 33-38
- Zhang F, Hu H. Pollution effect of fertilizer application and regional differences in China [J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Social Science*, 2011, 12(6): 33-38 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春