

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.032

基于复合多目标方法的灌区水资源优化配置

张帆¹ 任冲锋² 蔡宴朋^{3,4} 杨志峰^{3,4} 王烜¹

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 长安大学水利与环境学院, 西安 710064;

3. 广东工业大学环境生态工程研究院, 广州 510006; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458)

摘要: 针对传统灌区水资源多目标模型求解过程中难以兼顾多维配置要求的问题, 基于目标协调度、可持续发展指数、目标实现度 3 个指标提出了一种复合多目标方法。为验证该方法有效性, 以甘肃省黑河中游 17 个灌区间水资源优化配置为例, 以经济效益、社会效益、生态效益为目标函数构建多目标优化模型, 并分别使用传统方法与复合多目标方法进行求解。结果表明, 使用复合多目标方法所获得的优化配置方案可以将灌溉水利用系数提高 5.42% ~ 7.57%。结果验证了传统多目标模型在协调多个冲突目标方面较单目标模型有显著优势, 而复合多目标方法所获得的优化方案更能体现决策者对研究区域种植业发展与灌区水资源配置的多元要求。

关键词: 灌区水资源管理; 优化配置; 综合满意度; 黑河中游; 复合多目标方法

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)11-0297-08

OSID:



Optimally Allocating of Water Resources among Irrigation Districts Based on Composite Multiobjective Method

ZHANG Fan¹ REN Chongfeng² CAI Yanpeng^{3,4} YANG Zhifeng^{3,4} WANG Xuan¹

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710064, China

3. Institute of Environmental and Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: The optimal allocation of agricultural water resources is an effective way to improve the utilization efficiency of agricultural water resources. The formulation of agricultural water resources allocation scheme needs to consider multiple conflicting objectives, which can be solved by building a multiobjective optimal allocation model. When solving such multiobjective models, the multiobjective model is often transformed as a single objective model with the goal of maximizing target achievement. However, such method can hardly reflect other aspects that the decision-makers are concerned about, such as the synergy degree of different goals and the impact of the scheme on the sustainable development ability. Moreover, setting only one index as the objective function cannot fully reflect the comprehensive impact of multidimensional optimization needs on the optimization scheme. Therefore, a composite multiobjective method was proposed to optimally allocate agricultural water resources based on the three indicators, including coordination degree of multiple objectives, sustainable development index, and target realization degree. In order to verify the effectiveness of the method, composite multiobjective method was applied to a real-world case in the middle reaches of Heihe River in Gansu Province for optimally allocating agricultural water resources among 17 irrigation districts. A multiobjective optimization model with objective functions of economic, social and ecological benefits was developed, and different solving methods were employed to solve the model. The optimization results showed that the agricultural water resources utilization coefficient can be increased by 5.42% ~ 7.57% by using the composite multiobjective method. The results of single objective model were too extreme to be applied to

收稿日期: 2021-08-01 修回日期: 2021-08-30

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2020M680439)、国家自然科学基金项目(51879007、U20A20117)和广东省重点研发项目(2020B1111380003)

作者简介: 张帆(1993—),男,助理研究员,博士,主要从事农业水资源管理研究,E-mail: Zhangfcau@163.com

通信作者: 蔡宴朋(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事环境系统分析研究,E-mail: yanpeng.cai@gdut.edu.cn

practical water resources allocation comparing with results of multiobjective model. Compared with the multiobjective models which only used one index as the transformation objective function, the optimization scheme obtained by the composite multiobjective method can well reflect the multiple requirements of decision-makers for regional agricultural development and agricultural water resources allocation.

Key words: irrigation districts water resources management; optimally allocating; comprehensive satisfactory degree; middle reaches of Heihe River; composite multiobjective method

0 引言

我国人口总量增速虽然放缓,但仍保持平稳增长^[1],未来一段时间内仍需要更多的食物和淡水来支持不断增长的人口。然而,我国2019年的人均水资源量只有 $2\,077.70\text{ m}^3$,已经持续逼近国际公认的用水紧张线($1\,700\text{ m}^3$)^[2],有一半省份处于用水紧张线之下,人均水资源量仅为世界平均水平的 $1/4$,是全球人均水资源最贫乏的国家之一。2019年我国农业用水占总用水量的 61.2% ,但农田灌溉水利用系数仅为 0.559 ,与发达国家 $0.7\sim 0.8$ 的水平仍有较大差距。如何在减少灌溉水资源消耗的同时生产更多粮食,将是需要长期面对的问题。

国内外大量研究表明,进行灌区水资源优化配置是提高灌溉水资源利用效率的有效方法。灌区水资源优化配置是指在尽可能保证公平、高效、可持续基础上,充分考虑市场经济规律和资源配置准则,在特定区域范围内使用工程与非工程措施,将有限灌溉水资源科学合理分配到不同灌区,以实现水资源高效和可持续利用,最终保证区域社会经济、生态环境、资源等方面协调健康发展^[3-5]。灌区水资源优化配置需要同时考虑多个配置目标,是多目标优化问题。国内外很多学者围绕灌区水资源配置中的实际问题开发了一系列多目标模型对有限水资源进行优化配置^[6-10]。这些模型有效地提高了灌溉水资源利用效率,也表明多目标模型在处理多要素多尺度协同方面较单目标模型具有显著优势,使用多目标规划方法对有限水资源进行优化配置逐渐成为了灌区水资源高效利用的研究热点之一。

目前对于灌区水资源多目标优化的研究重点大多聚焦于不同目标函数构建及系统不确定性表征,对于多目标模型的求解通常直接使用遗传算法^[11]、模糊满意度方法^[12]、最小偏差法^[13-14]等一些成熟方法进行辅助求解,而这类方法的基本思想都是通过构建新的优化目标将多目标模型转换为单目标模型。这种求解方法已经被证明可以一定程度上协调多个冲突目标并获得优化配置方案,但其新构建的目标函数从本质来说都是为了表征各目标的实现程度。但在实际灌区水资源配置中,决策者不仅关心各目标实现程度,还会关注不同目标协同度以及

方案对于可持续发展能力影响等因素。即在优化模型的求解中仅使用单一指标对多目标模型进行单目标转换不能体现决策者对于其他维度的配置要求,也无法量化优化方案对多方面的综合影响。

为解决以上问题,本研究将耦合目标协调度、可持续发展指数、目标实现度3种用于评估多目标模型的常用指标,构建一种复合多目标方法求解灌区水资源多目标优化配置模型,以反映决策者对于多目标模型求解方案的多维度需求。为验证所提出方法有效性,将以甘肃省黑河中游地区17个灌区间水资源优化配置为例,以经济效益、社会效益、生态效益为目标函数构建多目标优化模型,并使用复合多目标方法与传统单一指标方法分别求解多目标模型。通过对比优化结果来进一步说明不同多目标方法对于灌区水资源优化配置方案的影响,以期灌区水资源高效利用与区域农业可持续发展提供决策工具。

1 灌区水资源复合多目标优化配置方法

多目标优化模型一般形式见文献^[15]。本文提出的求解方法主要分3步:①分别求解每一个优化目标在约束范围内可以达到的最优值与最劣值。②根据目标协调度、可持续发展指数、目标实现度构建新的多目标模型。③根据综合满意指数构建新的单目标模型进行求解。

1.1 不同指标下多目标转换为单目标

依据3种评价多目标模型的指标(目标协调度、可持续发展指数、目标实现度)来构建新的目标函数,首先对目标值进行标准化。在已有约束下分别求解各单目标模型,在决策空间内优化模型可获得的最大值与最小值分别为 $f_{n,\max}$ 、 $f_{n,\min}$ 。对于值越大越好型目标函数,其标准化函数 f'_n 为

$$f'_n = \frac{f_n - f_{n,\min}}{f_{n,\max} - f_{n,\min}} \quad (1)$$

对于目标值越小越好型目标,其标准化函数 f'_n 为

$$f'_n = 1 - \frac{f_n - f_{n,\min}}{f_{n,\max} - f_{n,\min}} \quad (2)$$

在获得标准化目标函数后,即可使用不同指标构建单目标模型。

(1) 目标协调度

目标协调度 (Synthetic degree) 是常用的评价多目标协调程度的指标,也是灌区水资源决策中处理多个冲突目标时关注的重要指标之一。目标协调度的几何意义是,将不同目标绘制在雷达图中,连接图中几个目标值点,围成的区域面积即为几个目标的协调程度,面积越大表示不同目标的协调程度越好。使用该方法可以将求解各目标的最优值转换为求解围成雷达图面积最大值的单目标问题^[16],转换后的目标函数为

$$\max F_{SD} = \frac{1}{2} \left[\sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} (\omega_{n_1} f'_{n_1}) (\omega_{n_2} f'_{n_2}) \right] \sin \frac{360^\circ}{N} \quad (3)$$

式中 F_{SD} ——多目标的目标协调度

N ——目标总数

$N_1、N_2$ ——不同目标函数数量

ω_n ——第 n 个目标在目标协调度准则下的重要性权重,可通过层次分析法获得

(2) 可持续发展指数

可持续发展指数 (Sustainability index) 通常用来评价不同灌区水资源优化配置方案的目标值对区域农业可持续发展能力的影响。其数学表现形式与求解多目标模型的功效系数法相同^[17],使用可持续发展指数转换多目标模型所得到的单目标模型目标函数为

$$\max F_{SI} = \left(\prod_{n=1}^N f'_n \right)^{\frac{1}{N}} \quad (4)$$

式中 F_{SI} ——多目标的可持续发展指数

(3) 目标实现度

目标实现度 (Target achievement degree) 是灌区水资源多目标优化模型求解当中最常用的转换指标。本文以优化目标值所达到总目标值的占比越大,表示实现度越大。现有目标转换为目标实现度的转换公式与标准化过程(式(1)、(2))相同,使用目标实现度转换多目标模型后得到的目标函数为

$$\max F_{TAI} = \sum_{n=1}^N \lambda_n f'_n \quad (5)$$

式中 F_{TAI} ——多目标的目标实现度

λ_n ——第 n 个目标在目标实现度准则下的重要性权重,可通过层次分析法获得

1.2 复合多目标方法

以上 3 种指标都从某一侧面反映了决策者对于决策目标要求,均可用于多目标转换中。但在实际的灌区水资源优化配置中,决策者通常希望获得的优化配置方案可以使以上 3 个指标均在较优范围内,但 3 个指标优化方向可能存在矛盾。为实现不

同指标综合优化,本文参照 ZIMMERMANN^[18] 提出的模糊满意度方法,为每个指标建立隶属度函数,将优化指标相对最优指标的隶属度定义为这项指标的满意度。将 3 个指标满意度最小值定义为综合满意度 (Comprehensive satisfaction degree),将求解 3 个指标最优的多目标模型转换为求解综合满意度最大的单目标优化模型。综合满意度的函数表达式为

$$C = \min(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m) \quad (6)$$

式中 C ——综合满意度

γ_m ——指标 m 的隶属度 (满意度)

对于越大越优型指标,其隶属度函数为

$$\gamma_m = \begin{cases} 0 & (F_m < F_{m,\min}) \\ 1 - \frac{F_{m,\max} - F_m}{F_{m,\max} - F_{m,\min}} & (F_{m,\min} \leq F_m < F_{m,\max}) \\ 1 & (F_{m,\max} \leq F_m) \end{cases} \quad (7)$$

对于越小越优型指标,其隶属度函数为

$$\gamma_m = \begin{cases} 1 & (F_m < F_{m,\min}) \\ 1 - \frac{F_m - F_{m,\min}}{F_{m,\max} - F_{m,\min}} & (F_{m,\min} \leq F_m < F_{m,\max}) \\ 0 & (F_{m,\max} \leq F_m) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $F_{m,\min}、F_{m,\max}$ ——指标 m 在约束范围内的最小值与最大值

F_m ——指标 m 的目标函数

基于以上方法,可以得到新构建单目标模型为:

目标函数 $F = \max C \quad (9)$

约束条件

$$\begin{cases} C \leq \gamma_m & (\forall m) \\ \sum_{i=1}^I a_i x_i + a_2 x_i + \dots + a_n x_i \leq b_j & (\forall j) \\ x_i \geq 0 & (\forall i) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $a_1、a_2、\dots、a_n$ ——第 1 个到第 n 个目标函数中的系数

b_j ——右手边约束

x_i ——决策变量

I ——灌区总数

至此,多目标模型转换为求解综合满意度的单目标模型,借助 LINGO 软件编程即可求解获得灌区水资源优化配置方案。

2 实例研究

2.1 黑河中游灌区水资源优化配置模型构建

黑河流域是我国西北典型的干旱内陆河区之一,全年干旱少雨,中游绿洲区农业发达,是我国重

要的粮食生产基地之一。黑河中游包括甘州区、临泽县、高台县3个行政区,其耕地面积占全流域的95%,消耗了黑河干流约70%的水量^[19]。由于中游地区人口增加,经济迅速发展,农业生产规模持续扩大,导致中游用水量急剧攀升,使得流入下游地区的水量逐渐减少。这直接导致下游绿洲沙漠化,引发了一系列生态问题,提高中游地区的灌区水资源利用效率迫在眉睫。本文参照黑河中游地区相关研究成果^[9,13-14,20],以2014年为典型年,以经济效益、社会效益、生态效益最优为目标,构建多目标优化模型优化黑河中游17个灌区间的灌溉水资源配置。其中,社会效益以各灌区单位面积配水量的基尼系数最小为目标。减少灌溉水资源的渗漏不仅可以增加灌溉水资源利用效率,还可以降低含污染物灌溉水污染地下水的风险,所以生态效益以灌溉渗漏损失最小为目标,渠道渗漏量估算方法参照文献[14]。此外,由于是对已知典型年的灌溉可用水量进行分配,因而典型年的灌溉可用水量将全部用于灌溉,可用水量约束为等式约束。

目标函数:

(1) 经济效益目标:经济效益最大,计算式为

$$\max f_1 = \sum_{i=1}^I [B_i(G_i + S_i) - T_c G_i - T_s S_i] \quad (11)$$

(2) 社会效益目标:基尼系数最小,计算式为

$$\min f_2 = \frac{1}{2I \sum_{i=1}^I Z_i} \sum_{i_1=1}^{I_1} \sum_{i_2=1}^{I_2} |Z_{i_1} - Z_{i_2}| \quad (12)$$

其中
$$Z_i = \frac{S_i + G_i + E_i}{A_i} \quad (13)$$

(3) 生态效益目标:渗漏损失最小,计算式为

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^I [L_i + (1 - \beta_i)(G_i + S_i - L_i)] \quad (14)$$

其中
$$L_i = u_1 S_i + u_2 H_i + u_3 R_i \quad (\forall i) \quad (15)$$

约束条件:

(1) 可用水量约束为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I S_i = Q \\ \sum_{i=1}^I G_i = J \end{cases} \quad (16)$$

(2) 灌溉需水量约束为

$$D_i \leq \beta_i (G_i + S_i + E_i - L_i) \quad (\forall i) \quad (17)$$

(3) 配水能力约束为

$$W_{i,\min} \leq G_i + S_i \leq A_{i,\max} \quad (\forall i) \quad (18)$$

(4) 非负约束为

$$\begin{cases} G_i \geq 0 \quad (\forall i) \\ S_i \geq 0 \quad (\forall i) \end{cases} \quad (19)$$

式中 S_i, G_i ——灌区*i*地表水与地下水配水量, m^3
 B_i ——灌区*i*的用水效益, $元/m^3$
 Z_i ——灌区*i*单位面积获得水量, m^3/hm^2
 T_s, T_c ——地表水与地下水用水成本, $元/m^3$
 E_i ——灌区*i*有效降雨量, m^3
 A_i ——灌区*i*的农作物种植面积, hm^2
 L_i ——灌区*i*渠系渗漏量, m^3
 β_i ——灌区*i*田间水利用系数
 u_1, u_2, u_3 ——渗漏量估算系数
 $W_{i,\min}, A_{i,\max}$ ——灌区*i*最小、最大允许配水量, m^3
 H_i, R_i ——灌区*i*有衬砌渠道长度与无衬砌渠道长度, km
 D_i ——灌区*i*最小需水量, m^3
 Q, J ——总可用地表水量与地下水水量, m^3

2.2 数据来源

模型计算所需各灌区的气象数据通过中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)下载气象站数据后插值提取获得。用水效益、种植面积、最小需水量、田间水利用系数主要从实地调研获得的《2014年张掖市灌区种植面积调查表》、《2014年农田水利年报》、《样点灌区2014年农田灌溉水有效利用系数测算》等资料与文献[21-25]中收集。黑河中游地表水、地下水用水成本分别为0.05、0.08 $元/m^3$,渗漏量估算系数参照文献[14]研究成果, u_1, u_2, u_3 分别为0.419、-1.587、0.927,黑河中游地区可用于灌溉的地表水、地下水水量分别为 1.166×10^9 、 $1.40 \times 10^8 m^3$ 。各灌区2014年用水效益、最小需水量、有效降雨量、田间水利用系数以及渠道衬砌信息等基础数据见表1。

3 结果与分析

3.1 多目标模型权重计算结果

将所需数据输入模型,依照本文提出的复合多目标方法在LINGO软件中编程求解。在目标协调度准则下的判断矩阵为

$$\begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 \\ f_1 & \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \\ f_2 & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ f_3 & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

目标协调度准则下 f_1, f_2, f_3 的目标权重分别为0.2、0.4和0.4,一致性比例(CR)为0。目标实现度准则下的判断矩阵为

$$\begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 \\ f_1 & \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \end{bmatrix} \\ f_2 & \begin{bmatrix} 1/3 & 1 & 1/2 \end{bmatrix} \\ f_3 & \begin{bmatrix} 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

表 1 2014 年各灌区基础数据

Tab. 1 Relevant basic data of irrigation districts in 2014

灌区	用水效益/ (元·m ⁻³)	最小需水量/ 万m ³	有效降水量/ 万m ³	种植面积/ hm ²	田间水利用 系数	渠道长度/km	
						有衬砌	无衬砌
大满	2.89	9 557.94	1 363.21	1.37 × 10 ⁴	0.84	272.60	76.40
盈科	2.66	10 950.85	1 622.04	1.63 × 10 ⁴	0.78	200.10	52.40
西浚	2.94	12 860.70	1 827.12	1.84 × 10 ⁴	0.84	294.30	45.10
上三	2.40	3 893.22	549.53	5.52 × 10 ³	0.78	201.70	32.90
安阳	1.42	1 106.28	187.82	1.89 × 10 ³	0.77	73.10	35.30
花寨	2.70	370.39	66.37	6.67 × 10 ²	0.82	34.70	0.80
平川	1.68	3 033.54	464.58	4.67 × 10 ³	0.84	43.80	46.90
板桥	1.54	1 995.43	292.02	2.93 × 10 ³	0.80	65.20	37.80
鸭暖	1.25	692.43	105.53	1.06 × 10 ³	0.84	20.00	35.40
廖泉	1.72	1 422.51	230.96	2.32 × 10 ³	0.80	26.60	11.30
沙河	1.87	1 536.34	232.95	2.34 × 10 ³	0.84	81.70	0
梨园河	2.00	9 462.19	1 439.53	1.45 × 10 ⁴	0.80	153.35	103.05
友联	1.53	9 687.76	1 448.16	1.45 × 10 ⁴	0.84	366.57	113.23
六坝	1.50	1 042.07	153.97	1.54 × 10 ³	0.84	35.30	8.80
罗城	1.56	2 480.36	374.32	3.76 × 10 ³	0.80	35.80	55.50
新坝	1.58	2 591.19	401.53	4.03 × 10 ³	0.80	88.80	0
红崖子	3.38	483.05	82.30	8.27 × 10 ²	0.76	26.00	0

目标协调度准则下 f_1 f_2 f_3 的目标权重分别为 0.54、0.16、0.30，一致性比例 (CR) 为 0.008。两种准则下判断矩阵的 CR 均小于 0.01，表明不同判断准则下的判断矩阵均通过一致性检验，权重计算有效。可以看出，当考虑灌区水资源优化配置中各目标的协调度时，社会效益和生态效益权重比经济效益更高，即决策者对于社会效益与生态效益目标的实现需求高于经济效益，表明区域农业生产多目标协调的要求要从只注重经济发展转变到更加重视生态与社会影响。而对于目标实现度，农业生产经济效益目标的实现最重要，其次是生态效益，最后是社会效益。

3.2 复合多目标方法求解结果

经编程计算，可以得到黑河中游 17 个灌区的地表水、地下水以及总配水量优化配置结果 (图 1)。

可以发现，优化配置方案的总配水量基本与各灌区的农作物种植规模相对应，作物种植面积超过 1.00×10^4 hm² 的友联、西浚、盈科、大满、梨园河灌区配水量均超过了 1.00×10^8 m³。并且，从空间上来看，靠近上游的红崖子、新坝、花寨、安阳灌区的配水量较小，这是由于上游地区降水量较大、作物蒸散发强度较低所导致的。区域管理者应当考虑进行种植结构调整，将高耗水的作物尽量种植到靠近上游的灌区，从而提高雨水资源利用率，节约灌溉水资源。此外，从地表水和地下水资源配置的结果来看，仅有上三、平川、廖泉、梨园河、罗城、新坝灌区需要用地下水补充灌溉，这是由于这些灌区的干支渠渗漏量相较于其他灌区较大。以梨园河灌区为例，优化方案中该灌区使用地下水灌溉占比接近 95.00%，其干支渠道长度达到 256.40 km，在所有灌区中排第 4 位，但其

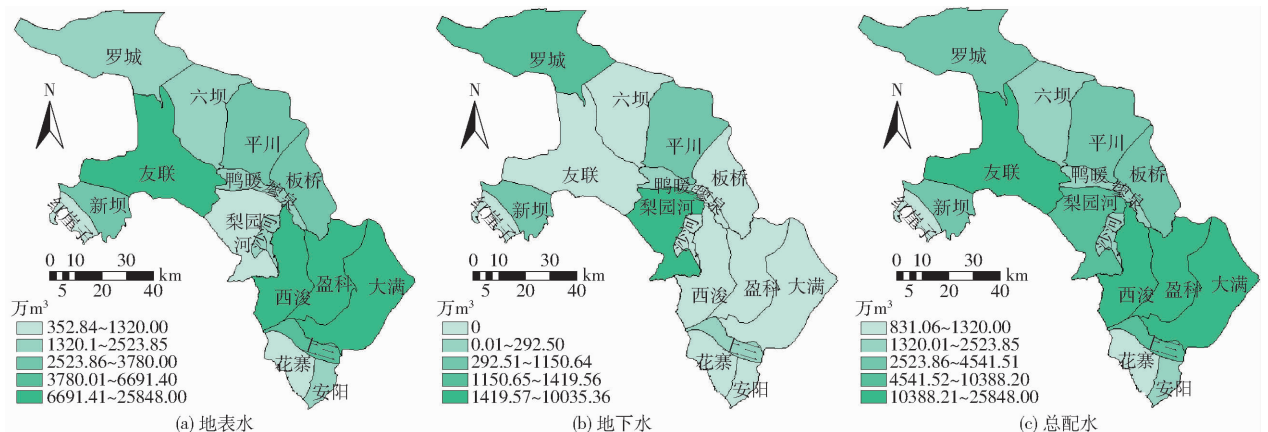


图 1 复合多目标方法的优化结果

Fig. 1 Optimization results based on composite multiobjective method

渠道衬砌率仅为 59.81%，排在所有灌区的倒数第 4 位，远低于平均的 74.62%。因此减少这类灌区的地表灌溉水量有利于减少渠道输水渗漏损失，可以达到节约灌溉水资源、提高区域灌区水资源利用效率的目的。优化后灌溉水利用系数达到了 0.527，较 2014 年的实际水平提高了 5.42%~7.57%。但若要进一步提高区域整体用水效率，区域管理者应当考虑增加田间工程投资，提高渠系渗漏量高地区渠道衬砌率。

3.3 不同灌区水资源优化配置模型对比

为检验本文所提出的灌区水资源多目标优化配置模型求解方法的有效性，同时求解了以经济效益、社会效益、生态效益最大为目标的 3 个单目

标模型以及以协调度、可持续发展指数、目标实现度最大为转换目标的 3 个多目标模型，各模型的约束条件与式(16)~(19)相同。分别求解后，可以得到不同目标优化模型配水方案的总配水量变化(图 2)。可以看出单目标模型的配水结果反映了灌区在这一指标下的配置优势。例如，大满、盈科、西浚、平川、板桥等大型灌区因为具有更高的用水效益，在仅考虑经济效益时其配水量将会被优先满足。此外，无论是以何转换方法求解的多目标模型结果，大多在各单目标模型的最大最小区间范围内，表明各多目标模型求解方法均可有效地协调多个冲突配置目标，获得较为满意的配置方案。

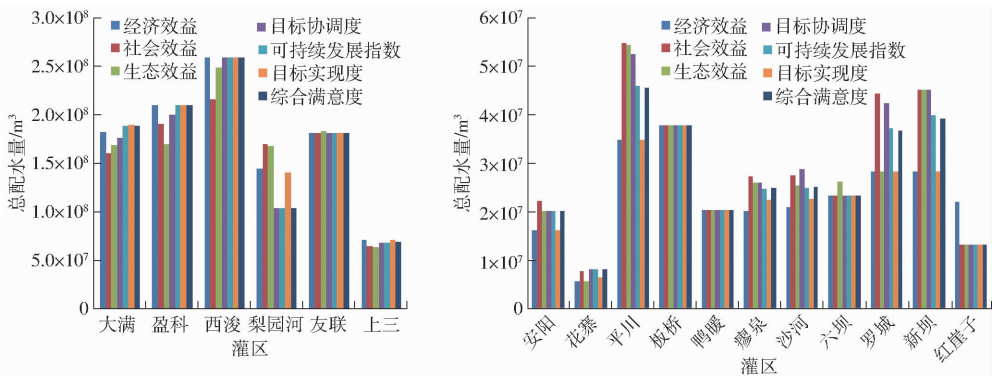


图 2 不同优化模型配水方案的总配水量

Fig. 2 Total water distribution dynamic of water distribution schemes from different optimization models

表 2 给出了不同优化模型所得到配水方案的不同指标，表中带 * 的值即为该模型目标函数最优值。对比各项优化指标可以发现，单目标模型在其关注的单一目标上表现最优，在其他指标，尤其是综合指标上表现较差。从表 2 可以看出，仅考虑经济效益的单目标模型配置结果的基尼系数最大，说明仅考虑经济效益时，不同灌区水资源配置的公平性将受到很大影响。考虑社会效益最大时(即基尼系数最小)，经济效益达到了所有模型最低值，即过度考虑配置公平性会使系统经济效益受到很大影响。研究区域的经济效益与配置公

平性目标冲突显著，使用单目标模型获得的结果对于区域水资源配置而言都过于极端，有必要使用多目标模型协调多个冲突目标。多目标模型虽不能达到所有目标的最优值，但其相较于单目标模型在协调度、可持续发展指数、目标实现度、综合满意度等综合指标上均有较大幅度提高，表明其方案可以实现多个冲突目标的协同调控。使用协调度、可持续发展指数、目标实现度转换多目标模型并进行求解后，虽然获得方案的各指标均优于单目标模型，但其综合满意度均有提升空间。仅使用一种指标进行多目标模型转换并不能兼顾到

表 2 不同目标优化模型配水指标比较

Tab. 2 Water distribution indexes comparison among different objective optimization models

优化模型类型	优化模型目标函数	经济效益/元	基尼系数	渠道渗漏量/ m^3	目标协调度	可持续发展指数	目标实现度	综合满意度
单目标模型	经济效益	2.967×10^9 *	0.187	6.182×10^8	0.218	0.714	0.859	0.583
	社会效益	2.855×10^9	0.062*	6.196×10^8	0.165	0.526	0.510	0.406
	生态效益	2.884×10^9	0.112	6.178×10^8 *	0.300	0.779	0.753	0.755
多目标模型	目标协调度	2.920×10^9	0.093	6.178×10^8	0.347*	0.872	0.854	0.900
	可持续发展指数	2.945×10^9	0.112	6.178×10^8	0.339	0.882*	0.903	0.970
	目标实现度	2.962×10^9	0.145	6.178×10^8	0.308	0.847	0.924*	0.875
	综合满意度	2.946×10^9	0.113	6.178×10^8	0.338	0.882	0.904	0.972*

决策者在不同准则下对于目标重要性的判断,从而不能反映出系统求解的多重需求。例如,当使用目标实现度或协调度作为转换多目标模型的目标函数时,其求解侧重显著不同。使用目标实现度作为目标函数时,多目标求解的重点是实现经济效益,而使用协调度作为目标函数时更关注社会与生态效益。使用本文提出的复合多目标方法求解得到的目标实现度虽然较使用目标实现度作为目标函数的求解方法减少了 2.12%,但其将协调度提升了 9.81%,可持续发展指数提升了 4.15%,表明复合多目标方法在处理多目标问题时可以纳入更多配置准则。相较仅使用一种指标作为转换目标函数的求解方法,复合多目标方法所获得的优化方案更能体现决策者对于研究区域农业发展与灌区水资源配置的多元要求。此外,根据本文综合满意度的定义,综合满意度的实质是各指标实现最优值程度的最小值。从表 2 中不难发现,综合满意度这一指标可以很好反映系统对于不同决策方案的满意程度,今后可以作为评价多目标模型多维表现的有效指标。

4 结论

(1) 使用复合多目标方法求解多目标优化模型所获得的优化方案可以将灌溉水利用系数提高 5.42% ~ 7.57%。区域管理者应当考虑将高耗水的作物尽量种植到靠近上游的灌区,从而达到提高雨水资源利用率、节约灌溉水资源的目的。此外,增加田间工程投资,提高渠系渗漏量高地区渠道衬砌率可以进一步提高区域整体用水效率。

(2) 比较单目标模型与多目标模型可以发现,单目标模型在其关注的单一目标上表现最优,在综合指标上表现较差。多目标模型虽不能实现每个配置目标的最优值,但其相较单目标模型在目标协调度、可持续发展指数、目标实现度、综合满意度等综合指标上均有较大幅度提高,表明其方案可以实现多个冲突目标的协同调控。

(3) 相较仅使用一种指标作为转换目标函数的传统多目标方法,复合多目标方法所获得的优化方案在协调性、可持续性、目标实现程度 3 个维度综合表现更优,体现出决策者对研究区域种植业发展与灌区水资源配置的多元要求。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 第七次全国人口普查公报[R]. 2021.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [3] 吴泽宁, 索丽生. 水资源优化配置研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 1-5.
WU Zening, SUO Lisheng. Advance about study of water resources optimal distribution[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 1-5. (in Chinese)
- [4] 岳琼, 郭萍, 王友芝, 等. 基于区间两阶段模糊可信性约束模型的灌区水资源配置[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 228-235.
YUE Qiong, GUO Ping, WANG Youzhi, et al. Optimal water allocation of irrigation district based on interval-parameter two-stage stochastic fuzzy credibility constrained programming [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 228-235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190426&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.026. (in Chinese)
- [5] 陈红光, 王琼雅, 李晓宁, 等. 基于区间两阶段鲁棒优化模型的灌区水资源优化配置[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 271-280.
CHEN Hongguang, WANG Qiongya, LI Xiaoning, et al. Optimal water resources planning based on interval parameter two stage robust stochastic programming model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 271-280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190329&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.029. (in Chinese)
- [6] 许耀文, 王一涵, 梁冬玲, 等. 基于农业可持续发展的锦西灌区灌溉水资源配置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 299-309.
XU Yaowen, WANG Yihan, LIANG Dongling, et al. Irrigation water resources allocation in Jinxi irrigation district based on agricultural sustainability[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 299-309. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201034&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.034. (in Chinese)
- [7] 张端梅, 梁秀娟, 李钦伟, 等. 灌区多目标种植结构优化模型研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(1): 91-93.
ZHANG Duanmei, LIANG Xiujuan, LI Qinwei, et al. Study on model with multi-objective optimization of planting structure in irrigation area[J]. Yellow River, 2013, 35(1): 91-93. (in Chinese)
- [8] ZHANG F, GUO S, ZHANG C, et al. An interval multiobjective approach considering irrigation canal system conditions for managing irrigation water[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211(11): 293-302.
- [9] LI M, FU Q, SINGH V P, et al. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic,

- environmental, and social considerations: a multi-objective non-linear optimization model under uncertainty[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 178: 102685.
- [10] 谭倩, 侯天宇, 张田媛, 等. 基于鲁棒规划方法的农业水资源多目标优化配置模型[J]. *水利学报*, 2020, 51(1): 56-68. TAN Qian, GOU Tianyu, ZHANG Tianyuan, et al. A multi-objective robust programming model for agricultural water management with uncertain weights[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(1): 56-68. (in Chinese)
- [11] 郭萍, 单宝英, 郭珊珊. 基于 Pareto 解集的多目标农业水土资源优化配置模型[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(10): 1008-1016. GUO Ping, SHAN Baoying, GUO Shanshan. A multi-objective model for irrigation water and planting structure optimization based on Pareto set[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(10): 1008-1016. (in Chinese)
- [12] TANG Y, ZHANG F, WANG S, et al. A distributed interval nonlinear multiobjective programming approach for optimal irrigation water management in an arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 220(21): 13-26.
- [13] 张妍, 郭萍, 张帆. 黑河中游农业水资源多目标优化配置[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(5): 185-192. ZHANG Yan, GUO Ping, ZHANG Fan. Study on multi-objective optimization allocation of agricultural water resources in the middle reaches of Heihe River[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(5): 185-192. (in Chinese)
- [14] 张帆, 蔡宴朋, 郭萍, 等. 灌区干支渠渗漏估算方法及其在水资源优化配置中的应用[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 140-147. ZHANG Fan, CAI Yanpeng, GUO Ping, et al. Method for estimating trunk and branch canal leakage in irrigation districts and its application in optimal allocation of water resources[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(4): 140-147. (in Chinese)
- [15] 韩宇平, 阮本清, 汪党献. 区域水资源短缺的多目标风险决策模型研究[J]. *水利学报*, 2008, 39(6): 667-673. HAN Yuping, RUAN Benqing, WANG Dangxian. Multi-objective risk decision-making model for regional water resources shortage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(6): 667-673. (in Chinese)
- [16] NIE Y, AVRAAMIDOU S, XIAO X, et al. A food-energy-water nexus approach for land use optimization[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 7-19.
- [17] 王冲, 邱志平. 区间多目标线性优化的功效系数求解方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(7): 907-911. WANG Chong, QIU Zhiping. Efficiency coefficient method to solve interval multi-objective linear optimization problems[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(7): 907-911. (in Chinese)
- [18] ZIMMERMANN H J. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions[J]. *Fuzzy Sets & Systems*, 1978, 1(1): 45-55.
- [19] 李茉. 基于不确定性分析的农业水土资源多尺度优化配置方法与模型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. LI Mo. Methods and models for agricultural water-land resources multi-scale optimal allocation based on uncertainty analysis [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [20] ZHANG F, GUO S, LIU X, et al. Towards sustainable water management in an arid agricultural region: a multi-level multi-objective stochastic approach[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 182: 102848.
- [21] ZHANG F, CAI Y P, TAN Q, et al. Spatial water footprint optimization of crop planting: a fuzzy multiobjective optimal approach based on MOD16 evapotranspiration products[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107096.
- [22] ZHANG F, CAI Y P, TAN Q, et al. An optimal modeling approach for reducing carbon footprint in agricultural water-energy-food nexus system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128325.
- [23] WANG Y, LI Z, GUO S, et al. A risk-based fuzzy boundary interval two-stage stochastic water resources management programming approach under uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582(11): 124553.
- [24] WANG Y, GUO S, YUE Q, et al. Distributed AquaCrop simulation-nonlinear multi-objective dependent-chance programming for irrigation water resources management under uncertainty[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 247: 106752.
- [25] HE L, BAO J, DACCACHE A, et al. Optimize the spatial distribution of crop water consumption based on a cellular automata model: a case study of the middle Heihe River basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137569.