doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.067

考虑配水公平性的渠系水资源优化配置研究

张成龙[1,2]　袁　源[1,2]　董　蛟[1,2]　郭珊珊[1,2]　霍再林[1,2]

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 灌区由多级输配水网络及空间异质性的农田构成,不同渠系控制范围内的农田用水存在博弈特性。构建融合渠道输水动态特性和多目标协同机制的渠系水资源优化配置模型,以解决灌区用水公平性、渠道输水损失与干渠引水稳定性间的多维度协同优化是灌区迫切需要解决的难题。本文以河套灌区典型两级渠系——永兰分干渠及其支渠为研究对象,以各支渠配水净流量、支渠配水开始和结束时间作为决策变量,构建了考虑渠道引水稳定性和渗漏损失及配水公平性的渠系水资源多目标优化配置模型。模型突破了现有渠系配水模型中配水开始时刻干渠处于"连续水力贯通状态"的假定,在约束中考虑了干渠水流输送时间条件,采用 NSGA-Ⅱ算法求解获得了渠系水资源优化方案。结果表明:该模型的引水时间方案在灌水轮期内完成各支渠配水时间仅需 23.15 d,相较于不考虑渠道水流时间约束的静态配水模型(32.86 d)减少 29.55%,大大缩短了灌溉时间并显著降低了输水渗漏损失。此外,相较于不考虑公平性目标的模型,该模型得到的配水公平性目标值仅为 0.002 27(<1%),有效平衡了不同渠道范围农田的用水效益。本研究建立了多目标协同的渠系水资源优化配置模型,优化结果揭示了干渠流量波动抑制、输水损失最小化与公平性最优等矛盾关系,可为灌区管理提供科学的渠系水资源分配方案。

关键词: 两级渠系; 多目标优化; NSGA-Ⅱ算法; 公平性; 灌溉单元

中图分类号: S274.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0687-09　　**OSID**:

Canal System Water Resource Optimization Considering Water Allocation Equity

ZHANG Chenglong[1,2]　YUAN Yuan[1,2]　DONG Jiao[1,2]　GUO Shanshan[1,2]　HUO Zailin[1,2]

(1. *College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Irrigation districts consist of multi-level water conveyance networks and spatially heterogeneous farmlands, where water usage among farmlands under different canal systems exhibits game-theoretic characteristics. The pressing challenge is to develop a canal water resources optimization model that integrates dynamic channel conveyance properties with multi-objective coordination mechanisms, enabling multidimensional trade-offs among water allocation equity, conveyance loss, and main canal diversion stability. Taking a typical two-level canal system (Yonglan Sub-main Canal and its branch canals) in the Hetao Irrigation District as the research object, using the net flow rate, start time, and end time of water distribution to branch canals as decision variables, a multi-objective optimization model for canal water allocation that incorporated diversion stability, seepage loss, and water distribution equity was developed. The model advanced beyond existing canal distribution models by eliminating the assumption that the main canal must be in a "hydraulically continuous state" at water distribution onset. It incorporated main canal water transit time constraints and employed the non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ (NSGA-Ⅱ) to derive optimized water allocation schemes. Results demonstrated that the model's diversion schedule completed branch canal water distribution within 23.15 days per irrigation rotation—a 29.55% reduction compared with that of static models ignoring water transit constraints (32.86 days). This significantly shortened irrigation duration and markedly decreased transit seepage losses. Furthermore, the model achieved a water distribution equity objective value of merely 0.002 27

收稿日期: 2025-05-08　修回日期: 2025-06-10

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项"揭榜挂帅"项目(2023JBGS0003-1)

作者简介: 张成龙(1992—),男,副教授,博士,主要从事农业水资源系统分析与决策研究,E-mail: zhangcl1992@cau.edu.cn

(<1%), substantially improving upon models neglecting equity goals, thereby effectively balancing water-use benefits across farmlands served by different canals. This research established a multi-objective cooperative optimization model for canal water resources. The optimized results elucidated the trade-offs among suppressing main canal flow fluctuations, minimizing conveyance losses, and maximizing equity, providing a scientifically grounded water allocation framework for irrigation district management.

Key words: two-level canal system; multi-objective optimization; non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ; equity; irrigation units

0 引言

作为全球重要的农业大国,中国农业用水管理关乎国家水资源安全格局,同时也面临着水资源总量刚性约束与用水效率结构性矛盾的双重挑战[1-2]。灌区作为保障国家粮食安全的核心载体,灌溉农田生产的粮食产量占全国总产量的75%,其水资源配置的科学性直接关系到农业稳产增收与生态可持续发展[3]。然而,由于灌区多级输配水渠系渗漏导致输水效率低下和缺乏精准化调度模型引发的用水管理粗放问题,当前我国农田灌溉水利用系数较发达国家仍有一定差距[4-5]。因此,在当前形势下,科学配置灌区水资源,推动灌区管理决策从经验驱动型向模型驱动型跃迁,是提高农业用水效率、减少输水损失和保障农业稳定用水的关键措施,有助于实现农业高效用水和水资源可持续利用,对支撑国家粮食安全战略具有重要作用。

现有渠系水资源优化配置研究虽已建立了多种以效益最大化和工程管理最优化为目标的模型体系[6],例如:将农业生产效益[7-8]、经济效益[9-10]、生态效益[11]、输水损失[12-16]以及上级渠道引水稳定性[17-20]为目标,但当前在综合考虑灌溉公平性方面的研究较少。在渠系水资源优化研究中,确保配水的公平性和均匀性是实现可持续水资源管理的关键,例如:在有多个支渠的情况下,水流从上游流向下游,上游支渠可能会优先获得水资源,这可能导致下游用户水量不足。渠道的控制面积越大,潜在的用水需求也越多,这可能导致水量的分配不均匀。因此,确保配水的公平性和均匀性是实现可持续水资源管理的关键,优化配水方案更具有实际意义。此外,在明渠系统中,水从干渠进水口流向支渠需要一定时间,若忽略渠道输水时间可能会导致输配水延迟[21],例如在大型灌溉区域,主干渠长度通常可达几十千米,水流输送通常需0.5 d以上。灌溉调度过程中,渠道水流时间是必须考虑的因素,否则可能导致配水时间不准确。VRIES 等[22]构建了考虑流动时间的配水模型,提供了更精确的配水时间表。NIXON 等[23]进一步提出了考虑动态水分配过程的灌溉调度方案,该方法比静态方法更能反映真实系统的运行。针对灌区渠系水资源多维度协同优化难题,如何解析干渠引水稳定性、输水损失最小与用水公平性提升的多目标权衡关系,并在考虑渠道输水时间动态约束下,构建渠系水资源多目标协同优化模型,是需要解决的科学问题。

综上所述,本研究以河套灌区典型两级渠系——永兰分干渠及其支渠为研究对象,以各支渠配水净流量、支渠配水开始和结束时间作为决策变量;结合灌区渠系配水的实际问题,突破现有渠系配水模型中配水开始时刻干渠处于“连续水力贯通状态”的假定,新增灌水开始时间约束;将干渠下属各条直口渠根据分水闸位置和对应关系将其划分多个灌溉单元,参考有关公平性指标[24-25],通过优化调整决策变量(即31条支渠的引水流量及其对应闸门的启闭时间),以确保永兰分干渠引水流量的稳定性、降低整个渠系输水过程中的水量损失,并提升各灌溉单元的配水公平性,最终构建考虑配水公平性的渠系水资源优化配置模型。模型采用 NSGA-Ⅱ算法求解,旨在为灌区提供更高效节水且更符合实际灌溉情况的渠系水资源分配方案。

1 渠系水资源优化配置模型

1.1 建模基础

在模型建立前,需先确定各干渠和支渠渠道流量,t 时刻支渠流量表达式为

$$q_i'(t)=\begin{cases}q_i & (t_i'\leqslant t\leqslant t_i'')\\ 0 & (t<t_i' \text{ 或 } t>t_i'')\end{cases} \tag{1}$$

式中 $q_i'(t)$——支渠 i 毛流量,m^3/s

q_i——支渠 i 配水净流量,m^3/s

t_i'、t_i''——支渠 i 分水闸开启和关闭时间,d

在本研究中,通过连续时间变量描述干渠引水流量动态变化过程,各支渠净流量 $q_i(t)$ 表达为以 t 为自变量,函数值为 q_i 的连续函数。因此,干渠的流量变化过程表示为各支渠毛流量变化过程函数的叠加,计算式为

$$Q_u'(t)=\sum_{i=1}^{n}q_i'(t) \tag{2}$$

式中 Q_u'——用连续时间变量描述的干渠净流量,m^3/s

n——渠道总数

1.2　优化目标

(1)提高引水稳定性可以满足管理者对系统稳定性和低耗的需求。干渠引水稳定性越好意味着配水渠道流量标准差越小,表达式为

$$\min f_1 = \sqrt{\frac{\int_{t=0}^{T} (Q'_u(t) - \overline{Q}'_u(t))^2 \mathrm{d}t}{T-1}} \tag{3}$$

式中　f_1——干渠引水过程中干渠流量对灌水时间标准差,m^3/s

T——灌水周期,d

$\overline{Q}'_u$——干渠输水流量平均值,m^3/s

(2)渠系渗漏损失最小,即干渠与各支渠总渗漏损失水量最小。渗漏损失参考有关经验公式[26],计算式为

$$\min f_2 = \sum (\Delta q_i + \Delta Q_i)(t''_i - t'_i) \tag{4}$$

其中

$$\Delta q_i = \beta A l_i q_i^{(1-m)}/100 \tag{5}$$

$$\Delta Q_i = \beta A L_i q_i'^{(1-m)}/100 \tag{6}$$

式中　f_2——干渠和支渠渗漏总损失水量,m^3

ΔQ_i——干渠对应于支渠 i 部分损失流量,m^3/s

Δq_i——支渠 i 部分损失流量,m^3/s

β——渠道采取防渗措施后渗漏水量折减系数

A——支渠 i 渠床土壤透水系数

l_i——支渠 i 长度,km

m——支渠 i 渠床土壤透水指数

L_i——干渠渠首至支渠 i 距离,km

(3)灌区不同灌溉单元配水公平性。考虑到渠系配水的实际过程,增加渠系不同用水单元配水公平性最优的优化目标。该目标直接衡量水资源在不同灌溉单元间的分配公平性,有助于避免某些区域因配水不足而影响农业生产,或因配水过多造成资源浪费。最小化公平性目标意味着模型在优化过程中关注配水公平性,从而为灌区管理者提供科学合理的配水方案。同时,公平的配水策略有助于减少因水资源分配不均引发的社会矛盾,促进灌区农业生产的可持续发展。构建该指标时,将渠系划分为多个灌溉单元,用实际配水量与需水量比值标准差反映不同灌溉单元实际配水量与需水量的偏离程度。标准差越小,说明各灌溉单元的实际配水量与需水量越接近,配水公平性越高;反之,标准差越大,则表明配水公平性越差。该目标表达式为

$$\min f_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m'} (\omega_d - \overline{\omega}_d)^2}{m'}} \tag{7}$$

其中

$$\omega_d = \frac{W'_d}{W_d} \tag{8}$$

式中　f_3——不同灌溉单元配水公平性

ω_d——不同灌溉单元实际配水量与需水量比值

m'——灌溉单元数量

W'_d——不同灌溉单元实际配水量,m^3

W_d——不同灌溉单元需水量,m^3

1.3　约束条件

(1)流量约束

各级渠道实际工作毛流量需控制在设计允许范围内,表达式为

$$\alpha_{di} q_{di} \leqslant q_i \leqslant \alpha_{ui} q_{di} \tag{9}$$

$$J_d Q_{du} \leqslant Q_i \leqslant J_u q_{du} \tag{10}$$

式中　q_{di}——第 i 条支渠设计流量,m^3/s

Q_{du}——干渠设计流量,m^3/s

J_d、α_{di}——干渠和第 i 条支渠的最小流量折减系数

J_u、α_{ui}——干渠和第 i 条支渠的加大流量系数

(2)配水时间约束

在保证关闸时间在开闸时间之后的前提下,同时满足干渠中水流在到达支渠的渠口处才开始引水。通常模型假设干渠在整个灌水轮期内都严格保持满负荷运行和连续水力贯通状态,即默认开始配水时整个渠道自渠首至渠尾处已经有水流,其水流输送示意图如图 1a 所示。但在实际配水过程中,只要水流已经输送某一下属支渠渠口,干渠即可对该支渠进行配水,从而对该条支渠控制范围的农田作物进行灌溉,并不是当干渠渠道充满水时,才可以开始配水,水流输送示意图如图 1b 所示。具体表达式为

$$t'''_i \leqslant t'_i \leqslant t \leqslant t''_i \leqslant T \tag{11}$$

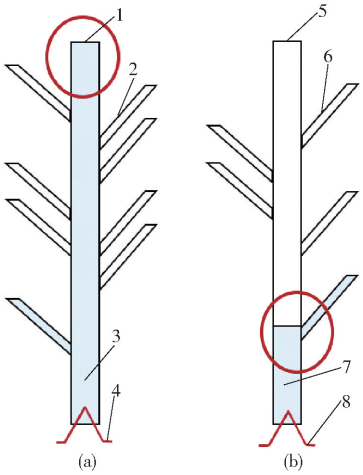


图 1　渠道水流输送示意图

Fig. 1　Schematic of canal water flow

1、5. 渠道尾端　2、6. 下属支渠　3、7. 干渠　4、8. 进水闸

式中 t_i'''——干渠水流输送至支渠 i 渠口时间,d

(3)灌溉水量约束

首先,需保证总配水量小于允许可供水量。其次,需保证各下级控制灌溉范围内的实际灌水量满足最小需水量。同时,为了提高模型优化效果,避免配水过多,使实际配水量不超过最小需水量的 1.2 倍。具体表达式为

$$\sum (q_i + \Delta q_i + \Delta Q_i)(t_i'' - t_i') \leqslant W \tag{12}$$

$$M_i S_i \leqslant q_i (t_i'' - t_i') \leqslant 1.2 M_i S_i \tag{13}$$

式中 W——允许可供水量,m^3

M_i——支渠控制区域下作物灌溉定额,m^3/hm^2

S_i——各支渠控制区域灌溉面积,hm^2

2 实例应用

研究区域位于内蒙古自治区河套灌区永济灌域下的永兰分干渠(图 2),其全长 23.968 km,由于土地整改与规划原因,实际参与引黄灌溉的支渠渠道仅有 31 条。因此,选取永兰分干渠及实际参与引黄灌溉的下属 31 条支渠为典型两级渠系研究对象,具体渠道分布如图 3 所示。根据进水闸与各分水闸位置进行灌溉单元划分,进水闸至第 1 分水闸(以下简称一闸,其他分水闸类似)为灌溉单元 1,一闸至二闸为灌溉单元 2,以此类推,五闸后为灌溉单元 6,共分为 6 个灌溉单元,这样划分可以将同一村社划分至同一配水单元,与实际情况相符,保证指标计算的合理性。在进行优化配水时,需保证 6 个灌溉单元有最佳的公平性。需要说明的是,灌溉单位划分时更多关注分水闸与各直口渠的对应关系,未考虑作物结构、土壤特征、地下水补给、田间灌溉方式的影响。

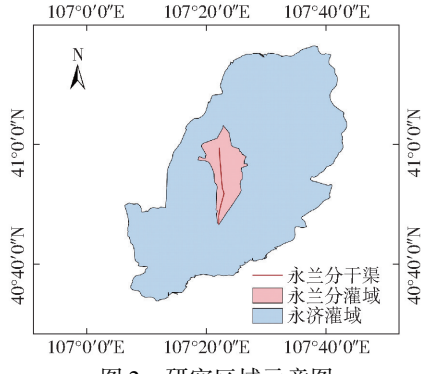


图 2 研究区域示意图

Fig. 2 Geographical location of study area

永兰分干渠及其下属 31 条渠道有关参数和具体灌溉单元划分如表 1 所示,节制闸位置及有关设计参数如表 2 所示。渠系具体单元划分如图 3 所示,其展示了 31 条渠道对应的渠灌或井渠双灌的控制范围。模型计算采用 2020 年永兰分干渠包干水量分配表中第一阶段的灌水数据,设定灌水轮期为 30 d,结合河套灌区的实际情况及永兰灌域当地的灌溉制度,综合灌水定额为 5.33 m^3/hm^2,预计来水量 $1.729\,8 \times 10^7$ m^3。渠道最小流量折减系数与加大流量系数、渠道采取防渗措施后渗漏水量折减系数、渠床土壤透水系数和渠床土壤透水指数均参考《农田水利学》[27]取值(表 3)。

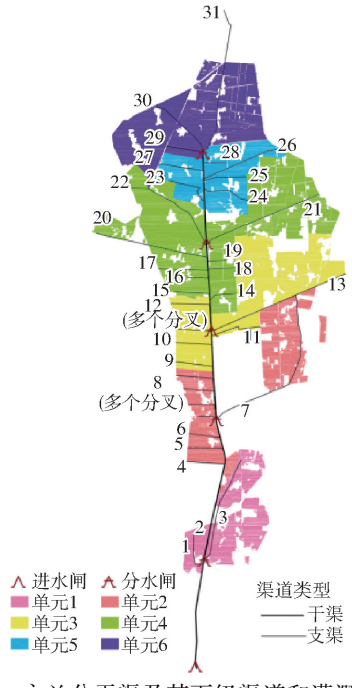


图 3 永兰分干渠及其下级渠道和灌溉单元

Fig. 3 Distribution of main canal and its subordinate canal and irrigation unit

3 结果与分析

3.1 模型运行效率及最终代 Pareto 前沿解集分析

本文模型采用 NSGA-Ⅱ算法进行求解。算法设置最大遗传代数为 1 000,种群大小为 200,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.05。为展示模型在求解时目标函数值收敛情况,将每一次迭代计算中的 3 个目标函数值 f_1、f_2 以及 f_3 取平均值。图 4 为模型的优化目标函数值随迭代次数增加的变化过程。由图 4 可知,在 1 000 次迭代后,模型可达到收敛状态。

通过 1 000 次迭代计算求解得到最终代 Pareto 前沿,将三维 Pareto 前沿投影到各个二维目标平面上进行两两目标权衡分析,量化目标间的冲突程度与折衷关系(图 5)。模型求解得到 Pareto 前沿 3 个目标函数范围 f_1 为 0.71 ~ 4.12 m^3/s,f_2 为 $2.420\,1 \times 10^6$ ~ $2.491\,2 \times 10^6$ m^3,f_3 为 0.000 16 ~ 0.019 92。同时,图 5 的投影也展示了目标间的 Pareto 边界和各二维目标函数间的权衡制约关系(f_1 - f_2、f_1 - f_3 和

表 1　永兰分干渠及其下级渠道参数和灌溉单元划分

Tab. 1　Parameters of main canal and its subordinate canals in Yonglan and irrigation unit classification

灌溉单元划分	渠道名称	渠道编号	设计流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	渠首至各渠口距离/km	渠道长度/km	控制面积/hm^2
	永兰分干渠	0	18.0		23.968	6 499.40
	忠义四社渠	1	1.2	4.828	1.742	113.53
单元 1	永清边渠	2	0.5	4.828	1.923	59.20
	一支渠	3	2.5	5.030	5.037	343.80
	永清新渠	4	1.5	9.725	1.731	158.73
	永清二社新渠	5	0.5	10.274	1.612	79.40
单元 2	永清二社渠	6	0.8	10.647	1.425	55.13
	水桐树渠	7	1.5	11.614	7.019	174.07
	三支渠	8	2.0	11.614	8.009	420.60
	雷家渠	9	0.8	13.982	1.705	59.13
	东方南渠	10	0.8	15.402	1.628	52.40
单元 3	旧四支渠	11	0.8	15.702	2.438	51.73
	东方渠	12	1.5	15.992	1.243	153.67
	四支渠	13	2.5	16.002	6.679	597.53
	翻身渠	14	0.8	17.116	1.330	155.07
	东方新渠	15	0.8	17.438	1.658	51.93
	东方小直口	16	0.8	18.280	1.074	60.67
	建设头道渠	17	0.8	18.498	2.258	73.93
单元 4	新板头渠	18	0.8	18.563	1.215	66.53
	板头渠	19	0.5	18.701	0.877	80.87
	中子渠	20	1.5	19.100	5.239	211.13
	五支渠	21	2.5	19.658	5.708	1 137.60
	西沟渠	22	2.5	19.658	4.683	350.53
	前进八社渠	23	0.8	21.753	2.211	78.47
	前进林场渠	24	0.8	22.242	2.187	154.93
单元 5	武铁模渠	25	1.2	22.638	1.978	162.67
	新南渠	26	0.8	22.730	3.620	347.87
	赵油房渠	27	0.8	23.103	2.066	155.13
	旧南渠	28	0.8	23.407	1.068	90.20
	郝家渠	29	0.8	23.955	1.687	60.00
单元 6	西叉子渠	30	2.0	23.968	3.228	342.87
	东叉子渠	31	2.5	23.968	6.865	600.07

$f_2 - f_3$投影平面)。一般来说,解集分布密度反映了目标冲突强度,解集分布密集区域表示强权衡而稀疏区域表示潜在协调关系。在$f_1 - f_2$投影面中,当f_1从 2.00 m^3/s 增至 4.88 m^3/s 时,f_2从 2.444 5 × 10^6 m^3降至 2.420 1 × 10^6 m^3,渗漏损失减少 1.0%,表明当f_1较大即干渠引水稳定性较差时,f_2较小即渠系渗漏损失较少,在稳定性较差的情况下,系统可能通过简化水流控制减少渗漏;当f_1从 1.00 m^3/s 降至 0.71 m^3/s,f_2从 2.563 2 × 10^6 m^3增至 2.640 5 × 10^6 m^3,渗漏增加 3.0%,表明当f_1较小即引水稳定性较好时,随着f_1降低即干渠流量稳定性提升,f_2明显增加即渠系渗漏加剧,表明提高稳定性需要更复杂的水流调控机制,导致渗漏损失上升。在$f_1 - f_3$投影面中,f_3波动较大,部分解显示随着f_1降低即引水稳定性提升,配水公平性得到改善,当f_1从 2.00 m^3/s 降至 0.71 m^3/s,f_3从 0.006 16 降至 0.000 60,公平性改善 90.3%;但是另一部分解显示配水公平性变差,当f_1从 1.40 m^3/s 降至 0.71 m^3/s,f_3从 0.027 31 增至 0.049 55,配水公平性变差 81.4%,表明低稳定性下公平性对调控策略敏感且不稳定。当f_1极优时,f_3趋于最优,但达到此状态会导致f_2大幅增加。在$f_2 - f_3$投影面中,当f_2从 2.45 × 10^6 m^3降至 2.420 1 × 10^6 m^3,f_3从 0.006 16 增至 0.049 55,表明当f_2减少时,f_3变差,严格的渗漏控制可能导致水流分配僵化,加剧不公平性;当f_2从 2.6 × 10^6 m^3增至 2.640 5 × 10^6 m^3,f_3从 0.005 09 降至 0.000 60,公平性改善 88.2%,表明f_2增多时,f_3改善,一定程度的渗漏可能通过缓冲水流波动,促进水资源的公平分配。

综合上述,Pareto 前沿解表明干渠引水稳定性的优化需以渠系渗漏损失增加和配水公平性变差为代价。渠系渗漏损失与配水公平性存在根本性冲突,需通过策略性妥协实现平衡。

表 2　节制闸位置及设计参数

Tab. 2　Position and design parameters of control gate

闸门名称	桩号	高程/m		渠宽/m		现状运行设计水位/m	现状运行设计流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)
		闸底	闸顶	开口宽	底宽		
进水闸	0 +000	1 038.327	1 041.851	20	12	2.2	19
一闸	5 +030	1 037.800	1 039.800	18	10	2.1	17
二闸	11 +614	1 037.138	1 039.139	15	9	2.0	15
三闸	16 +002	1 035.510	1 037.922	14	7	2.0	11
四闸	19 +658	1 034.873	1 037.750	12	6	1.9	9
五闸	23 +968	1 034.491	1 036.643	11	5	1.9	6

现有渠系水资源优化配置模型的优化目标侧重于水资源的利用效率,而对于配水公平性指标的考虑较少。例如,廖相成等[14]建立了以下级用水户缺水量和上级渠道输水水量损失最小为优化目标的渠系优化配水模型;卢潇悦等[17]以轮期内支、斗两级

表 3 渠系优化配水模型参数

Tab. 3 Parameters of optimal water distribution model of canal systems

参数	数值
下级渠道最小流量折减系数 α_d	0.6
下级渠道加大流量系数 α_u	1.2
上级渠道最小流量折减系数 J_d	0.6
上级渠道加大流量系数 J_u	1.2
防渗措施折减系数 β	0.5
渠床土壤透水系数 A	3.4
渠床土壤透水指数 m	0.5

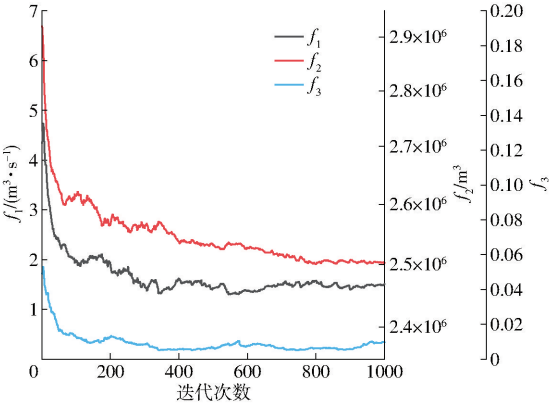


图 4 模型优化目标函数值变化曲线

Fig. 4 Curve of changes in model optimization objective function values

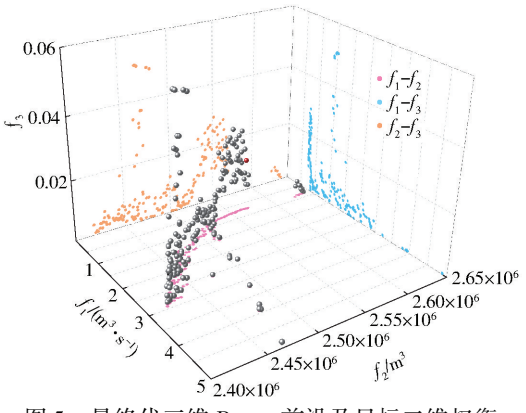


图 5 最终代三维 Pareto 前沿及目标二维权衡

Fig. 5 Three-dimensional Pareto front and two-dimensional trade-off between objective functions for final generation

渠道输水损失最小、轮灌组内配水时间差最小为目标,建立了 0-1 渠道流量规划模型;郭珊珊等[19]与李彤姝等[20]均建立了以渗漏损失和干渠运行稳定性最优的渠系优化配水模型。上述研究虽在一定程度上提升了渠系工程运行状况,减少了渠系渗漏损失,但这很可能是将配水公平性作为代价,可能导致水资源分配的不均衡,使得难以将配水方案投入实际应用。此外,引入公平性指标作为第 3 个优化目标后所得公利性指标从 0.010 20 改善至 0.002 27,这表明公平性指标的引入是有效的。本文在常见优化目标的基础上新增了配水公平性优化目标,增强了灌溉范围内各区域间水资源分配的合理性,对灌区渠系水资源的分配具有现实意义。

3.2 模型优化方案

本研究采用 NSGA-Ⅱ算法,在进行求解与迭代过程中选取拥挤距离作为优劣解的排序依据,由此计算得到最终代 Pareto 前沿,即非支配解集。为了使结果分析具有客观性,以考虑公平性优化目标与渠道水流时间约束作为改进后模型,未考虑上述因素的作为改进前模型,模型均选取目标函数值的折中解进行分析,对比具体的优化配水方案。

3.2.1 引水时间方案

模型求解得到 31 条支渠引水时间方案如图 6 所示。由于将永兰分干渠的水流时间考虑在内,此处设置灌水周期为 30 d,其中水流自渠首输送至渠尾处需要 20 d 左右,此外的 10 d 则用以保证渠尾处直口渠控制的田块能满足灌水需求。最终优化结果均可保证该渠系控制面积下的农田在 30 d 内完成灌溉。其中,新南渠(编号 26)配水时间较长,达 6.37 d。同时,东方新渠(编号 15)配水时间较短,仅为 0.84 d。同样,通过对引入新优化目标与时间约束条件的模型与未考虑上述因素的模型求解得到各个渠道的开关闸时间取标准差,可得:未加入新优化目标与闸门开启时间约束模型的开、关闸时间标准差分别为 3.42 d 与 3.56 d,改进后模型开、关闸时间标准差分别为 2.97 d 与 3.38 d。因此,求解得到的开闸与关闸时间更为均衡,从而使干渠流量处在一个更稳定的水平。

相比于模型中直接假定干渠自渠首至渠尾均有水时才开始配水,本研究结果大大缩短永兰灌域的单次配水时间。根据进水闸与各分水闸设计流量和渠道闸门设计参数,整个灌域充满水需 20 d,若要求水流输送至渠尾才对整个灌域进行配水,结果显示:从下属 31 条渠道的闸门最早开启至最晚关闭共需 12.86 d,即从黄河水输送至永兰进水闸至完成一次配水共需 32.86 d。通过进水闸及各分水闸的设计流量以及各个直口渠的位置,模型允许各支渠在其起点接收到水流时便立即启动配水过程,这样从下属 31 条渠道的闸门最早开启至最晚关闭共需 13.76 d,而水流输送至最早开启闸门渠道时间为 9.39 d,整个灌溉过程只需 23.15 d,该改进大大缩短了灌溉时间,降幅达 29.55%,不但可以减少水流输送过程中造成的渗漏损失,并且可以确保农田能在最需要的时候得到及时灌溉,极大地提升了水资源利用效率,提供更为合理的配水决策方案。

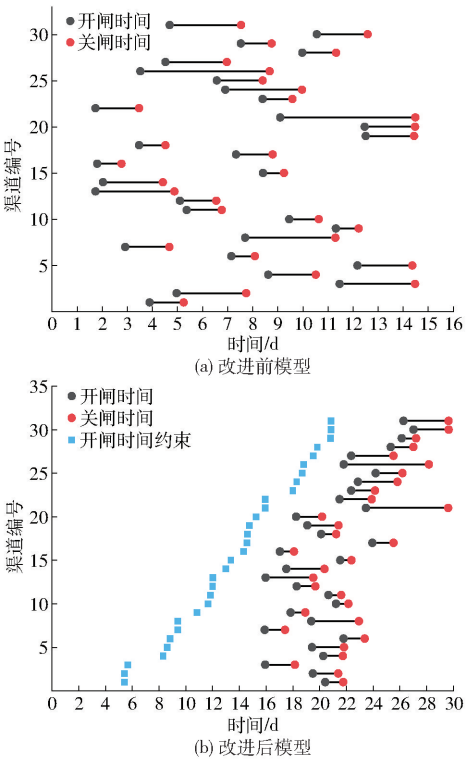


图 6　改进前后引水时间方案

Fig. 6　Water diversion time scheme before and after improvement

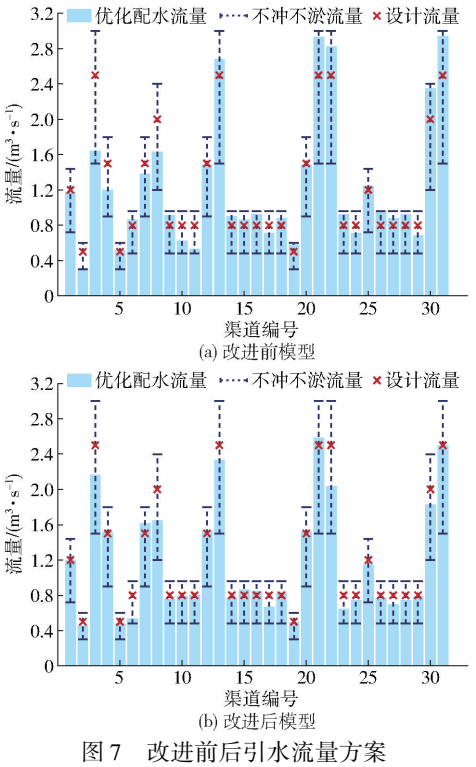


图 7　改进前后引水流量方案

Fig. 7　Diversion flow scheme before and after improvement

3.2.2　引水流量方案

模型各支渠引水流量方案如图 7 所示。最终优化结果可保证优化配水流量位于不冲不淤流量区间。其中，五支渠（编号 21）配水流量较大，在两种模型中分别达到 2.93、2.58 m^3/s。此处，同样采用渠道毛流量对于其设计流量的平均绝对百分误差衡量改进前后模型的配水流量与设计流量的贴近程度。分别计算 31 条渠道毛流量对于其设计流量的平均绝对百分误差后取均值，模型改进前后平均绝对百分误差分别为 14.04% 与 7.74%。在对模型进行适当调整后，发现优化后的渠道配水流量与最初的设计流量更为接近，较大程度改进了决策方案的配水流量与实际设计流量的贴近程度。主要是由于增加了配水公平性指标的限制，在模型进行运算时，会更容易筛选出流量适中的决策变量，这样在满足最低灌溉水量的条件下可以避免设计流量过大而造成的资源浪费，以及流量不合理导致的渠道淤积冲刷问题。因此，改进后模型得到的决策方案更容易被投入到实际应用中，从而提高渠系输配水系统的运行效率和可靠性。

3.2.3　实际优化配水结果

模型改进前后实际优化配水量结果如图 8 所示。该灌溉渠系最小需水总量为 $7.799\,3\times10^6$ m^3，其中改进前模型优化配水量为 $7.868\,4\times10^6$ m^3，改进后模型优化配水量为 $7.860\,8\times10^6$ m^3，故两类模型的优化配水结果均满足各支渠所控制面积的最小需水量，改进后模型得到的配水方案更加节水，可节约 76 000 m^3。主要是由于在同样满足最小需水量的前提条件下，增加了公平性指标的优化，该指标通过实际配水量与需水量比值标准差表示，因此模型在运算时，会尽可能使实际配水量与需水量贴近，从而减少配水过多造成的水资源浪费甚至影响作物正常生长等问题。

4　模型不确定性与敏感性分析

NSGA－Ⅱ以其高效的 Pareto 前沿搜索能力，成为主流求解工具，有关参数选择会对模型结果产生一定影响。因此，针对算法不同的交叉概率（Crossover probability，p_c）和变异概率（Mutation probability，p_m）情况，开展模型不确定性与敏感性分析。不同参数组合（$p_m=0.05$，$p_c=0.5\sim0.9$；$p_c=0.7$，$p_m=0.01\sim0.10$）的模型最终代 Pareto 前沿解集目标函数值均值如图 9 所示。针对不同交叉与变异概率下求解得到的 3 个目标函数值（f_1、f_2、f_3）取标准差，分析不同参数组合的模型求解鲁棒性。在不同交叉概率下，模型 f_1、f_2 与 f_3 标准差分别为 0.31 m^3/s、2.51×10^4 m^3 和 0.006 48；在不同变异概率下，模型 f_1、f_2 与 f_3 标准差分别为 0.21 m^3/s、4.33×10^4 m^3 和 0.006 03。结果表明，在不同的参数组合下，最终求解得到的目标函数值波动范围并不

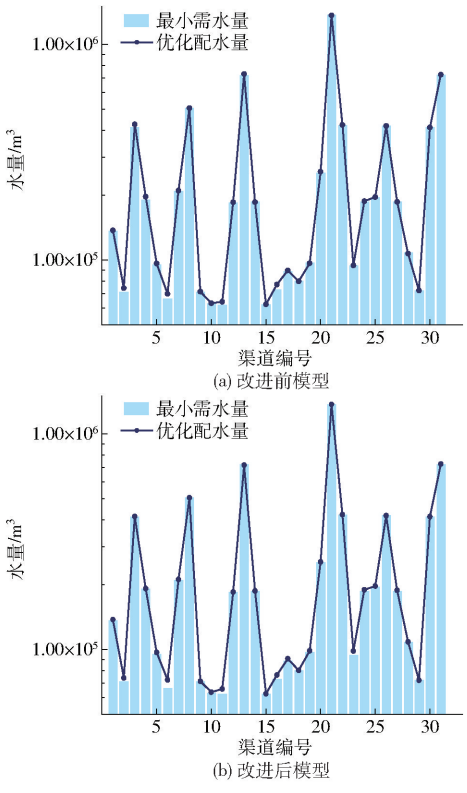


图 8 改进前后优化配水结果

Fig. 8 Optimized water distribution results before and after improvement

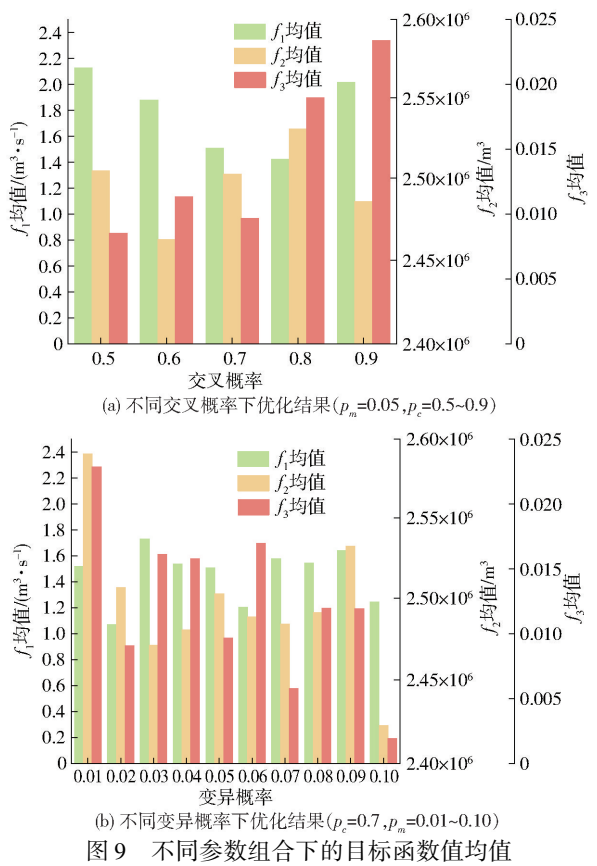


图 9 不同参数组合下的目标函数值均值

Fig. 9 Mean values of objective function under different parameter combinations

大,模型鲁棒性较好。

5 结束语

在考虑渠道连续时间动态过程的基础上,通过优化约束条件和目标函数,构建了以支渠配水净流量及闸门启闭时间为决策变量的多目标优化模型。该模型重点关注引水稳定性提升、渗漏损失最小化以及配水公平性优化 3 个核心目标,增强了模型的实用价值。突破了传统模型需待干渠完全充满才开始配水的限制,采用实时动态配水机制,对比原有模型,将单次配水周期从 32.86 d 缩短至 23.15 d,降幅达 29.55%,改进模型不仅有效减少了输水过程中的渗漏损失,还确保了农田灌溉的时效性。在优化目标方面,引入了配水公平性指标,研究结果表明,改进后模型将公平性目标值从 0.010 20 优化至 0.002 27,实现了水资源分配的公平性与效率性的统一,优化的模型为灌区水资源管理提供了更为科学的决策依据,对提升灌区整体管理水平具有重要的实践指导意义。

参 考 文 献

[1] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障[J]. 水利发展研究,2024,24(3):1-3.
LI Guoying. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(3): 1-3. (in Chinese)

[2] 左其亭,王子尧,马军霞. 我国现代治水研究热点与发展展望[J]. 水利发展研究, 2024, 24(6):13-19.
ZUO Qiting, WANG Ziyao, MA Junxia. Hot spots and development prospects of modern water governance research in China [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(6):13-19. (in Chinese)

[3] 邓铭江, 陶汪海, 王全九, 等. 西北现代生态灌区建设理论与技术保障体系构建[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 1-13.
DENG Mingjiang, TAO Wanghai, WANG Quanjiu, et al. Theory and technical guarantee system construction of modern ecological irrigation district in northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 1-13. (in Chinese)

[4] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.

[5] 雷雨, 王振华. 大型自压滴灌系统在现代农业节水灌溉上的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(18): 186-190.
LEI Yu, WANG Zhenhua. Application status, problems and prospects of large self-pressure drip irrigation system in modern agriculture water-saving irrigation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(18): 186-190. (in Chinese)

[6] 时荣超, 郭文忠. 农业灌溉水资源优化配置研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 1-13.

SHI Rongchao, GUO Wenzhong. Research progress on the optimal allocation of agricultural irrigation water resources[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(4): 1 - 13. (in Chinese)
[7] 张智韬, 刘俊民, 陈俊英, 等. 基于 RS、GIS 和蚁群算法的多目标渠系配水优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 72 - 78.
ZHANG Zhitao, LIU Junmin, CHEN Junying, et al. Water resources allocation of canal system based on multi-objective about RS, GIS and ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 72 - 78. (in Chinese)
[8] 单宝英, 郭萍, 张帆,等. 基于遗传算法与方案优选的多目标优化模型求解方法[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(6): 157 - 165.
SHAN Baoying, GUO Ping, ZAHNG Fan, et al. A multi-objective optimization model solving method based on genetic algorithm and scheme evaluation[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(6): 157 - 165. (in Chinese)
[9] 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)
[10] 贺建文, 何英 . 基于 NSGA - Ⅱ 遗传算法的丰收灌区优化配水研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(增刊2): 276 - 278, 286.
HE Jianwen, HE Ying. Research on optimal water allocation in harvest irrigation areas based on NSGA - Ⅱ genetic algorithm [J]. Yellow River, 2020, 42(Supp.2): 276 - 278, 286. (in Chinese)
[11] 乔厚清. 考虑生态约束的灌区水资源优化配置研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2021.
QIAO Houqing. Study on optimal allocation of water resources in irrigated area considering ecological constraints[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[12] LIAO Xiangcheng, MAHMOUD A, HU Tiesong, et al. A novel irrigation canal scheduling model adaptable to the spatial-temporal variability of water conveyance loss[J]. Agricultural Water Management, 2022, 274(12): 107961.
[13] 沈来银, 胡铁松, 周姗,等. 基于 SHAW 模型的河套灌区秋浇渠系优化配水模型研究[J]. 水利学报, 2020, 51(4): 458 - 467.
SHEN Laiyin, HU Tiesong, ZHOU Shan, et al. Study on optimal water distribution model of canal system for autumn irrigation in Hetao Irrigation Area based on SHAW model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(4): 458 - 467. (in Chinese)
[14] 廖相成,胡铁松. 基于输水损失动态变化特性的渠系优化配水模型研究[J]. 水利学报, 2021, 52(7): 850 - 861.
LIAO Xiangcheng, HU Tiesong. Study on optimal water distribution of canal system based on dynamic change characteristics of water conveyance losses[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(7): 850 - 861. (in Chinese)
[15] 韩宇,邵梦璇,李彤姝,等. 河套灌区渠系优化配水模型应用研究[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 999 - 1006.
HAN Yu, SHAO Mengxuan, LI Tongshu, et al. Study on optimal water distribution model of canal system in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(10): 999 - 1006. (in Chinese)
[16] 樊煜,杨明明,高占义,等. 基于供水量的两级渠系优化配水模型[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(8): 73 - 79.
FAN Yu, YANG Mingming, GAO Zhanyi, et al. A water supply-based optimization model for water distribution in two-level canal systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(8): 73 - 79. (in Chinese)
[17] 卢潇悦, 何英, 景少波. 基于智能算法的灌区渠系多目标优化配水模型研究及其系统开发[J]. 节水灌溉,2024(10): 49 - 54,59.
LU Xiaoyue, HE Ying, JING Shaobo. Research on multi-objective optimal water distribution model of irrigation canal system based on intelligent algorithm and its system development[J]. Water Saving Irrigation,2024(10):49 - 54,59. (in Chinese)
[18] ZHANG Fuqiang, HE Chao, FAN Yaqiong, et al. Canal delivery and irrigation scheduling optimization based on crop water demand[J]. Agricultural Water Management, 2022, 260(9):107245.
[19] 郭珊珊, 郭萍, 李茉. 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 Shanshan, GUO Ping, LI Mo. Multi-objective genetic algorithm optimization model for canal scheduling[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(7): 71 - 77. (in Chinese)
[20] 李彤姝, 黄睿, 孙志鹏,等. 基于多目标粒子群算法的渠系优化配水研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 95 - 100, 125.
LI Tongshu, HUANG Rui, SUN Zhipeng, et al. Optimizing water distribution in canal networks using multi-objective particle swarm optimization method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 95 - 100, 125. (in Chinese)
[21] VRIES D, ANWAR A. Irrigation scheduling with travel times[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(3): 220 - 227.
[22] VRIES D, ANWAR A. Irrigation scheduling. I: integer programming approach[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004,130(1): 9 - 16.
[23] NIXON J D, SIMPSON G. A genetic algorithm for optimizing off-farm irrigation scheduling[J]. Journal of Hydroinformatics, 2001, 3(1): 11 - 22.
[24] FAN Yu, CHEN Haorui, GAO Zhanyi, et al. A model coupling water resource allocation and canal optimization for water distribution[J]. Water Resources Management, 2023, 37(3): 1341 - 1365.
[25] 王芊予, 胡天林, 芮松楠, 等. 基于模拟优化模型的渠井结合灌区多目标水资源优化配置[J]. 节水灌溉, 2022(9): 30 - 38.
WANG Qianyu, HU Tianlin, RUI Songnan, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources in canal and well combined irrigation district based on simulation and optimization model[J]. Water Saving Irrigation, 2022(9): 30 - 38. (in Chinese)
[26] 考斯加可夫. 土壤改良原理[M]. 陈益秋, 译. 北京:中国工业出版社,1965.
[27] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.