doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.066

基于动态引水过程的渠系水资源优化配置研究

张成龙[1,2]　袁　源[1,2]　徐浩林[3]　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;
3. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430060)

摘要: 我国现代化灌区因渠系运行管理水平不足而受限,亟需优化水资源分配和管理以保障农业生产稳定发展。引水稳定性是渠系优化配置的重要前提,提高引水稳定性可最大程度减少闸门操作次数,有助于降低运行成本和维护难度,提升整个灌溉系统的运行效率和可靠性。本文以河套灌区典型二级渠系——大滩分干渠为研究对象,将下级渠道配水净流量、配水开始和结束时间作为决策变量,建立面向引水稳定性提升和渗漏损失降低的渠系水资源优化配置模型。同时,为改进传统模型中 0-1 整数规划对于上级渠道动态引水流量刻画不精确的问题,本文模型引入连续时间变量改进传统的离散时间变量,并采用 NSGA-Ⅱ算法进行模型求解。结果表明:改进前模型 2 个目标函数(上级渠道配水流量标准差和渠系输水总渗漏损失量)优化结果为 2.47 m^3/s 和 $1.684\ 2\times10^6$ m^3,改进后模型多目标函数优化结果为 1.86 m^3/s 和 $1.679\ 7\times10^6$ m^3,实现了上级渠道引水稳定性更好和渠系输水总渗漏损失量更小。因此,改进后模型提高了渠道流量动态过程描述精度,尤其是可捕捉渠道流量短时间内大幅变化情况及其相应峰值,从而提升了渠道引水稳定性,可为渠道配水方案的可靠性和安全性保障提供依据。综上,本研究优化结果可实现集中高效配水,降低渠系渗漏损失,帮助决策者制定更为合理的渠系配水方案。

关键词: 二级渠系; 水资源优化配置; 河套灌区; NSGA-Ⅱ算法; 连续时间变量; 多目标优化

中图分类号: S274.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0677-10　　**OSID**:

Canal System Water Resource Optimization Based on Dynamic Water Diversion Process

ZHANG Chenglong[1,2]　YUAN Yuan[1,2]　XU Haolin[3]　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*
3. *School of Water Resources and Hydropower Engineering*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430060, *China*)

Abstract: The advancement of modern irrigation districts in China is constrained by suboptimal canal system operation management, necessitating enhanced water resource allocation and management to ensure stable agricultural development. Diversion stability served as a critical prerequisite for canal system optimization. Its enhancement minimized gate operation frequency, thereby reducing operational costs and maintenance complexity while improving overall irrigation system efficiency and reliability. Focusing on a representative secondary canal system—the Datan Sub-main Canal in Hetao Irrigation District, an optimized water allocation model targeting diversion stability improvement and seepage loss reduction was established, with net flow rate, start time, and end time of subordinate canal distribution as decision variables. To address the imprecise characterization of dynamic diversion flows in upstream channels inherent in traditional 0-1 integer programming models, the proposed model replaced discrete time variables with continuous time variables, employing the non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ (NSGA-Ⅱ) for solution. Results demonstrated that the baseline model achieved optimized objective values of 2.47 m^3/s (standard deviation of upstream canal flow) and $1.684\ 2\times10^6$ m^3 (total system seepage loss). The enhanced model reduced these to 1.86 m^3/s and $1.679\ 7\times10^6$ m^3 respectively, signifying improved upstream diversion stability and decreased total canal seepage loss. Consequently,

收稿日期: 2024-08-01　修回日期: 2024-08-29
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52130902)
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

the refined model achieved higher accuracy in characterizing dynamic flow processes—particularly in capturing short-term flow fluctuations and corresponding peak values—thereby enhancing diversion stability. This provided a scientific basis for ensuring the reliability and safety of canal distribution schemes. In summary, the optimization outcomes enabled centralized and efficient water distribution, reduced canal seepage losses, and supported policymakers in formulating more rational canal water allocation strategies.

Key words: secondary canal system; water resource optimization; Hetao Irrigation District; NSGA - Ⅱ algorithm; continuous time variables; multi-objective optimization

0 引言

中国作为农业大国,据《中国水资源公报》,2023 年全国农业用水 $3.672\,4\times10^{11}$ m^3,占全社会总用水的 62.2%。但我国的灌溉水利用系数仅为 0.576,与发达国家 0.7 ~ 0.8 的水平存仍在一定差距[1]。这主要是由于灌区实际运行缺乏系统的调查和校核[2],灌溉用水的调配管理缺乏科学性[3]。在水资源短缺形势下,保障国家粮食安全和农业持续稳定发展,必须进行水资源节约和集约利用,健全灌区管理运维机制,推动农田灌溉方式高效化、用水计量精准化、灌区管理智能化,大幅提高农业用水效率和效益[4-5],有效提升水利治理管理现代化水平,推动水利高质量发展,为中国式现代化建设提供水安全保障[6]。

目前,国内外学者针对渠系优化配置开展了大量研究。根据优化目标不同主要分为两类[7]:①以某种效益最优为目标。灌区综合效益主要包括经济、社会和生态 3 个层面[8],例如,将农业生产效益[9-10]、经济效益[11-13]以及生态效益[14]作为优化目标。②以灌区工程运行管理指标最优为目标。例如,以输水损失最小[15-21]、上级渠道引水稳定性最优[22-27]以及公平性最大[28]为目标。为提高模型求解效率,我国学者广泛采用 0 - 1 整数规划模型进行大型灌区多目标水资源调度决策研究。例如,张国华等[29]构建了 0 - 1 整数规划模型,以供水渠道流量差异最小化和配水时间均衡化为目标;杨献献等[30]则将轮作模式与水土保持纳入渠系输配水方案设计,使用 0 - 1 整数模型构建了生态建设、水土资源可持续利用及农业生产效益最大化的多目标水资源优化配置模型;李茉等[31]面对上游来水规律的不确定性,基于 0 - 1 线性规划模型和遗传算法开发了智能化渠系输配水决策系统。然而,目前的研究更专注于特定目标的实现,未考虑实际的渠系动态连续流量过程,这会在一定程度上影响模型在实际运行中的准确性。

针对上述问题,本研究将围绕灌区综合协调发展目标下的渠系输配水优化问题,以河套灌区典型二级渠系——大滩分干渠为研究对象,建立以保证上级渠道水流平稳和下级渠道渗漏最小为目标的多目标多变量渠系优化配水模型,将各下级渠道的配水计划视为随时间连续变化的独立变量函数以提高整个渠系输配水优化方案的仿真度,为渠系工作制度提供更合理的配水方案。模型采用非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm - Ⅱ, NSGA - Ⅱ)进行求解,以深入揭示引水稳定性提升和渗漏损失降低的灌区渠系水资源优化调度机制。

1 渠系水资源优化配置模型

1.1 建模基础

在模型建立前,需先确定上下级渠道流量表达式,t 时刻下级渠道的流量表达式为

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

式中 $q_i'(t)$——支渠 i 毛流量,m^3/s

q_i——下级渠道 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

此时,上级渠道净流量 $Q_u(t)$ 随时间的变化过程表示为第 j 天的上级渠道净流量恒定值 $Q_u(j)$,当采用离散时间变量描述渠道流量变化过程时,表达式为

$$Q_u(j)=\sum_{i=1}^{n}q_i'(j) \tag{2}$$

其中

$$q_i'(j)=\begin{cases}q_i+\Delta q_i & (\text{floor}(t_i')\leqslant j\leqslant \text{floor}(t_i'')+1)\\ 0 & (j<\text{floor}(t_i') \text{ 或 } j>\text{floor}(t_i'')+1)\end{cases} \tag{3}$$

式中 $q_i'(j)$——下级渠道 i 毛流量,m^3/s

j——不同灌水时段

Δq_i——下级渠道 i 损失流量,m^3/s

floor——数值部分取整(向下取整)

$Q_u(j)$——用离散时间变量描述的上级渠道净流量,m^3/s

n——渠道总数

然而,上述方法会导致对于上级渠道引水流量的表达不准确。例如,当某下级渠道生成的开、关闸

时间为 5.5、6.5 d 时，该渠道在 5～6 d 及 6～7 d 两个时间段内都会被判定有水，导致上级渠道 5～7 d 时间段，都将此下级渠道的流量计入在内，这导致在上级渠道引水过程中存在潜在的流量峰值无法被精准捕捉描述的问题，进而影响上级渠道运行的稳定性。因此，引入连续时间变量描述上级渠道引水流量动态变化过程，并将各下级渠道净流量 $q_i(t)$ 表达为以 t 为自变量、函数值为 q_i 的连续函数。进一步地，将上级渠道的净流量变化过程表示为各下级渠道毛流量变化过程函数的叠加，计算式为

$$Q'_u(t) = \sum_{i=1}^{n} q'_i(t) \tag{4}$$

其中

$$q'_i(t) = \begin{cases} q_i & (t'_i \leqslant t \leqslant t''_i) \\ 0 & (t < t'_i \text{ 或 } t > t''_i) \end{cases} \tag{5}$$

式中　$Q'_u(t)$——用连续时间变量描述的上级渠道净流量，m^3/s

离散与连续时间对上级渠道引水流量过程的描述机制如图 1 所示。

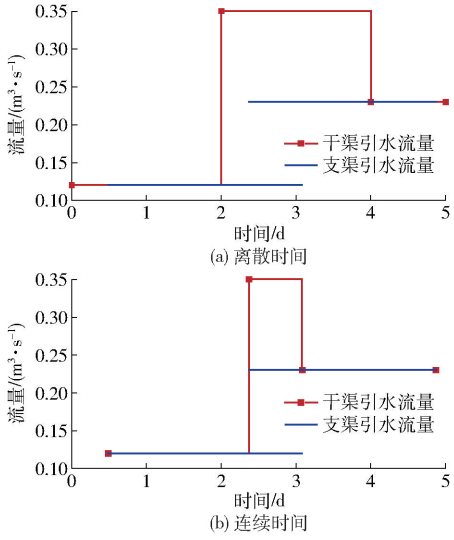


图 1　上级渠道引水流量过程描述

Fig. 1　Description of flow process of water diversion in upper canal

1.2　优化目标

(1)提高引水稳定性能满足管理者对系统稳定性和低耗的需求，符合管理目标。上级渠道引水稳定性最好，即配水渠道流量标准差最小，表达式为

$$\min f_1 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{T} (Q_{uj} - \overline{Q}_u)^2}{T-1}} \quad (\text{采用离散时间变量}) \tag{6}$$

$$\min f_1 = \sqrt{\frac{\int_{t=0}^{T} (Q'_u(t) - \overline{Q}'_u(t))^2 \mathrm{d}t}{T-1}} \quad (\text{采用连续时间变量}) \tag{7}$$

式中　f_1——上级渠道引水过程中上级渠道流量对灌水时间的标准差，m^3/s

T——灌水周期，d

Q_{uj}——渠道在第 j 个时间段内上级渠道输水流量，m^3/s

$\overline{Q}_u$——整个时段内上级渠道输水流量平均值，m^3/s

$Q'_u(t)$——t 时刻上级渠道输水流量，m^3/s

$\overline{Q}'_u(t)$——用连续时间变量描述的上级渠道输水流量平均值，m^3/s

(2)渠系渗漏损失最小，即上级渠道与各下级渠道总渗漏损失水量最小。渗漏损失参考有关经验公式[32]，计算式为

$$\min f_2 = \frac{\sum (\Delta q_i + \Delta Q_i)(t''_i - t'_i)}{10\,000} \tag{8}$$

其中

$$\Delta q_i = \beta A l_i q_i^{(1-m)}/100 \tag{9}$$

$$\Delta Q_i = \beta A L_i q_i'^{(1-m)}/100 \tag{10}$$

式中　f_2——上下级渠道渗漏总损失水量，m^3

ΔQ_i——上级渠道对应于下级渠道 i 部分的损失流量，m^3/s

β——渠道采取防渗措施后渗漏水量的折减系数

A——下级渠道 i 的渠床土壤透水系数

l_i——下级渠道 i 长度，km

m——下级渠道渠床土壤透水指数

L_i——上级渠道渠首至下级渠道 i 距离，km

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

$$\alpha_{di} q_{di} \leqslant q_i \leqslant \alpha_{ui} q_{di} \tag{11}$$

$$J_d Q_{du} \leqslant Q_i \leqslant J_u Q_{du} \tag{12}$$

式中　q_{di}——第 i 条下级渠道设计流量，m^3/s

Q_{du}——上级渠道设计流量，m^3/s

J_d、α_{di}——上级渠道和第 i 条下级渠道的最小流量折减系数

J_u、α_{ui}——上级渠道和第 i 条下级渠道的加大流量系数

(2)配水时间约束

下级渠道的渠首分水闸启闭时间需控制在允许灌水时间范围内，表达式为

$$0 \leqslant t'_i \leqslant t \leqslant t''_i \leqslant T \tag{13}$$

(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需

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,实际配水量不超过最小需水量的 1.2 倍,具体表达式为

$$\sum (q_i + \Delta q_i + \Delta Q_i)(t_i'' - t_i') \leqslant W \quad (14)$$

$$M_i S_i \leqslant q_i (t_i'' - t_i') \leqslant 1.2 M_i S_i \quad (15)$$

式中 W——允许可供水量,m^3

M_i——下级渠道 i 控制区域下作物灌溉定额,m^3/hm^2

S_i——各下级渠道控制区域灌溉面积,hm^2

1.4 模型求解

本优化模型采用 NSGA-Ⅱ算法进行求解。NSGA-Ⅱ是一种多目标优化算法,专门设计用于解决传统 NSGA 算法在计算复杂度、精英策略和多样性保持方面的不足。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。

2 实例应用

研究区域位于内蒙古自治区河套灌区乌兰布和灌域,如图 2 所示。大滩分干渠全长 19.418 km,衬砌长度 13.235 km,渠道衬砌形式为模袋混凝土,其中衬砌部分渠道糙率为 0.019(起止桩号 0+000 ~ 8+850)和 0.020(起止桩号 8+850 ~ 13+235),衬砌部分渠道坡降为 0.000 1(起止桩号 0+000 ~ 1+120)和 0.000 2(起止桩号 1+120 ~ 13+235)。大滩分干渠包含节制闸 7 座、进水闸 1 座、直口闸 43 座,但由于灌区土地整改与重新规划,实际参与配水的渠道仅有 41 条。因此,选取大滩分干渠及实际参与配水的下属 41 条下级渠道为典型两级渠系研究对象,渠道分布如图 3 所示,大滩分干渠及其下属 41 条渠道有关参数如表 1 所示。模型计算采用渡口所 2023 年配水计划中夏灌三轮的灌水数据,灌水轮期为 10 d,综合灌水定额为 5.33 m^3/hm^2,预计来水量 $9.310\,6 \times 10^6$ m^3。渠道最小流量折减系数、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、渠床土壤透水指数均参考《农田水利学》[33]取值(表 2)。

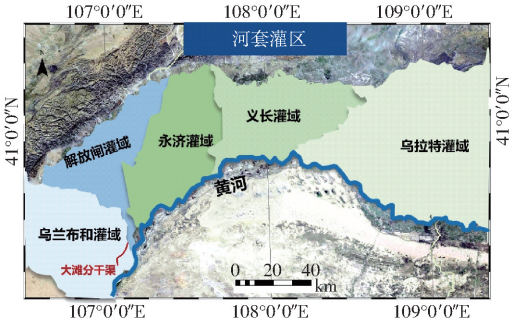


图 2 研究区域示意图

Fig. 2 Geographical location of study area

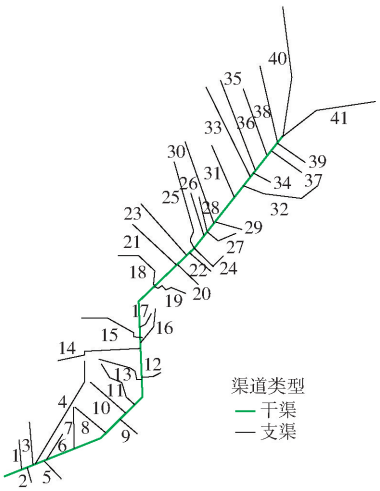


图 3 大滩分干渠及其下级渠道分布

Fig. 3 Distribution of main canal and its subordinate canal

3 结果与分析

3.1 模型运行效率与稳定性分析

本研究渠系水资源优化配置模型采用 NSGA-Ⅱ算法进行求解。为了对比在离散时间变量与连续时间变量下的模型在求解时目标函数值收敛情况,将两个模型每一次迭代计算中的两个目标函数值 f_1、f_2 取平均值,图 4 为两个模型目标函数值随着迭代次数增加的变化过程。由图 4 可知,在 1 000 次迭代后,两个模型均可达到收敛状态。随着迭代次数增加,相比于离散型模型,改进后连续型模型的优化目标值在优化过程中稳定性更强,也先于离散型模型达到稳定状态。由此可知连续型模型具有更好的运算效率和求解效果。

通过 1 000 次迭代计算求解得到的离散与连续型模型的最终代 Pareto 前沿如图 5 所示。从图 5 可以看出,离散型模型的最终代 Pareto 解集分布均匀性较差,这表明在求解过程中离散型模型更容易陷入局部最优解,致使其求解的运算效率不如连续型模型。计算两个模型 Pareto 前沿解集中目标函数的标准差,离散型模型目标函数值 f_1、f_2 标准差分别为 1.28 m^3/s 和 2.58×10^4 m^3,连续型模型 f_1、f_2 标准差分别为 0.65 m^3/s 和 2.33×10^4 m^3,由此可以看出连续型模型的鲁棒性更好。此外,对比两个模型目标函数的优化结果,连续型模型的目标函数 f_1(上级渠道引水流量稳定性),即流量对时间的标准差优化结果均小于 3.0 m^3/s,而离散型模型的该目标函数值还存在大于 3.0 m^3/s 的情况。同样地,连续型模型下目标函数 f_2(上下级渠道渗漏损失量),即上下级渠道总渗漏损失水量的优化结果均小于 1.74×10^6 m^3,而离散型模型该目标函数值还存在大于 1.74×10^6 m^3 的情况。总体而言,连续型模型的两个优化

表 1　大滩分干渠及其下级渠道参数

Tab. 1　Parameters of main canal and its subordinate canals in Datan

渠道名称	渠道编号	设计流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	渠道长度/km	控制面积/hm^2
大滩分干渠	0	16.00	19.418	4 564.80
小北盖渠	1	0.20	1.205	21.33
永进农渠	2	0.30	0.630	40.67
天兴泉西渠	3	0.40	1.750	68.20
公众渠	4	1.00	4.746	315.80
渠西毛渠	5	0.10	1.014	23.00
天兴泉毛渠	6	0.20	1.207	21.87
渠西社渠	7	0.60	1.685	103.00
渠东一农	8	0.40	1.616	32.47
渠东二农	9	0.40	0.936	45.87
南柳子渠	10	0.50	1.897	112.27
东柳子渠	11	0.50	2.257	51.73
侯家渠	12	0.10	0.819	21.73
东柳子新渠	13	0.40	2.097	37.27
新房子渠	14	0.50	3.548	105.27
北柳子渠	15	0.60	2.800	171.67
南七顶渠	16	0.60	1.605	114.33
北七顶渠	17	0.60	0.739	69.47
新建一渠	18	0.30	2.356	114.13
城西斗渠	19	0.70	1.445	139.07
城西大滩渠	20	0.40	1.175	30.20
新建二渠	21	0.40	2.456	103.13
城西队渠	22	0.50	1.140	72.13
新建三渠	23	0.30	2.798	33.73
前进斗渠	24	1.00	1.674	222.13
南尖子二队渠	25	0.40	3.708	65.93
南尖子一队渠	26	0.40	1.820	18.40
南尖子大滩渠	27	0.50	1.351	84.00
南尖子一队二渠	28	0.30	1.453	36.67
南瓦窑渠	29	0.70	1.140	127.93
新胜一渠	30	0.40	3.522	50.67
新胜二渠	31	0.30	2.298	94.07
北瓦窑渠	32	0.70	3.230	222.07
苏木井南渠	33	0.40	4.093	70.93
南湾子一渠	34	0.30	0.775	32.73
南湾子二渠	35	0.30	3.921	58.73
苏木井北渠	36	0.30	2.886	68.73
祥太东南渠	37	0.30	1.531	47.33
大滩南渠	38	0.60	3.220	51.13
祥太东北渠	39	0.40	1.387	51.53
大滩北渠	40	1.00	5.395	221.13
召滩支渠	41	3.00	4.147	1 192.33

目标值得到的上级渠道引水流量稳定性更好，总渗漏损失水量更少。

3.2　优化方案对比

采用的 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，随后再对

表 2　渠系优化配水模型参数

Tab. 2　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

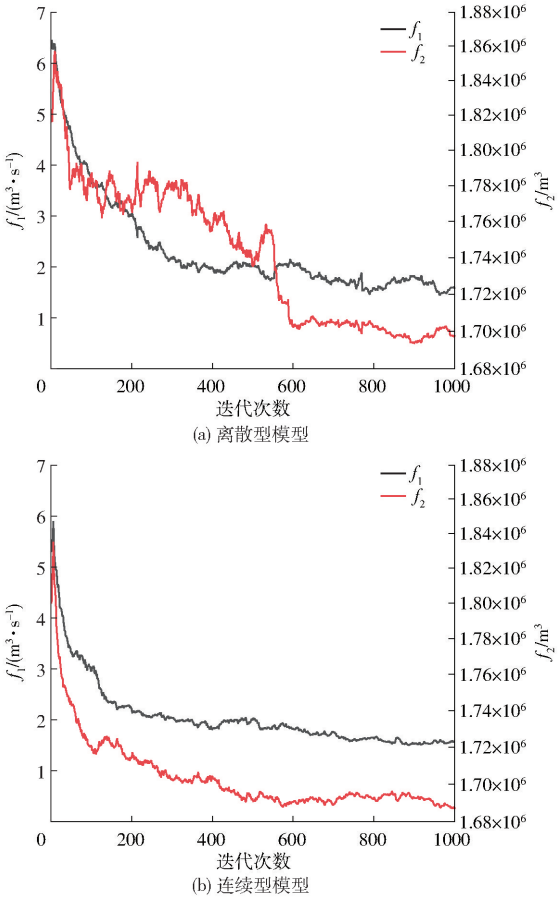


图 4　模型目标函数值随迭代次数变化曲线

Fig. 4　Change curves of objective function value of model with number of iterations

其进行新一轮的交叉、变异、重组，由此计算得到最终代 Pareto 前沿，即非支配解集。为使结果分析具有客观性，在两个模型中均选取目标函数值的折中解进行深入分析，选取离散型模型中 f_1、f_2 为 3.31 m^3/s、1.662 0 × 10^6 m^3 的解，连续型模型中 f_1、f_2 为 1.30 m^3/s、1.690 6 × 10^6 m^3 的解具体对比与分析引水时间、引水流量及实际配水量的优化方案。

3.2.1　引水时间方案

两个模型下每个下级渠道引水时间方案如图 6 所示，最终优化结果均保证了该渠系控制面积下的

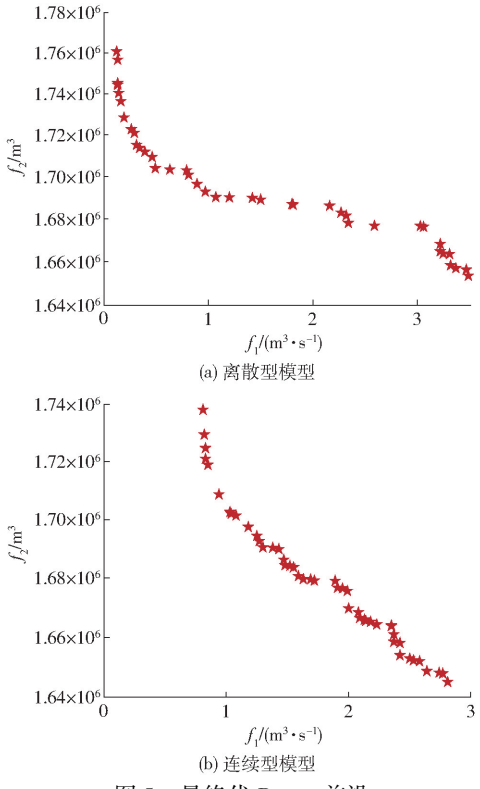


图 5 最终代 Pareto 前沿

Fig. 5 Final generation of Pareto front

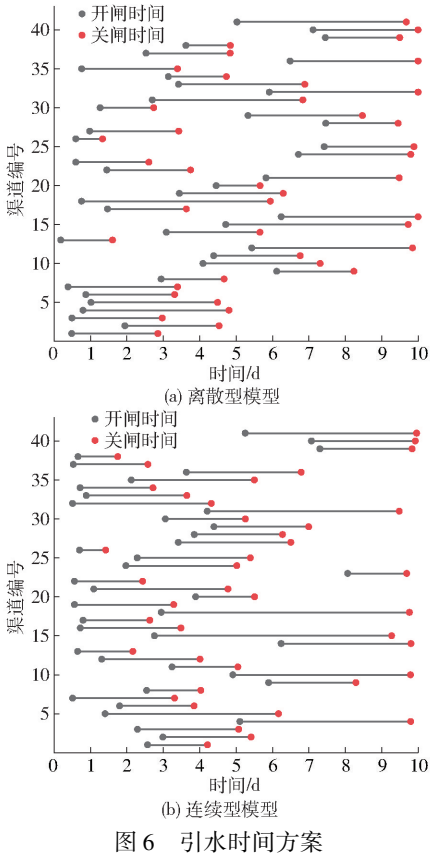


图 6 引水时间方案

Fig. 6 Optimal solutions of water diversion time

农田在一次灌水周期(10 d)内完成灌溉。其中,新建一渠(编号 18)渠道配水时间最长,改进前后模型分别达 5.19 d 与 6.82 d,主要是由于:①渠道设计流量较小。②渠道较长,渗漏损失水量相对较大。③渠道控制面积较大。因此,需要较长的引水时间才能使该渠道满足其控制范围内的最小需水量要求。同时,南尖子一队渠(编号 26)配水时间最短,改进前后模型仅为 0.74 d 与 0.72 d,主要是由于:①渠道设计流量较大。②渠道较短,渗漏损失水量相对较小。因此,在模型求解过程中,较短的配水时间即可满足该渠道的需水量要求,运算过程中配水时间较长的解也逐步被淘汰。

为比较两个模型下渠道引水时间,通过对离散、连续型模型求解得到的各个渠道开关闸时间取标准差,即离散型模型开、关闸时间标准差分别为 2.38、2.79 d,连续型模型开、关闸时间标准差分别为 2.08、2.68 d。由此可以看出在连续型模型下的开闸与关闸时间更为均衡,由该模型求解得到的各下级渠道配水时间重叠更多,也能更好地使上级渠道流量处在一个更稳定的水平。上述结果揭示了连续型模型在灌区渠系水资源优化调度过程中引水稳定性的提升机制,得到的渠道配水方案可实现集中高效配水,为渠道运行的可靠性和安全性保障提供依据。

3.2.2 引水流量方案

两个模型下各下级渠道引水流量方案如图 7 所示,最终优化结果均保证了优化配水流量位于不冲不淤流量区间。经对比观察,可以发现部分渠道的优化配水流量存在明显差别。其中,召滩支渠(编号 41)配水流量最大,两个模型分别达到

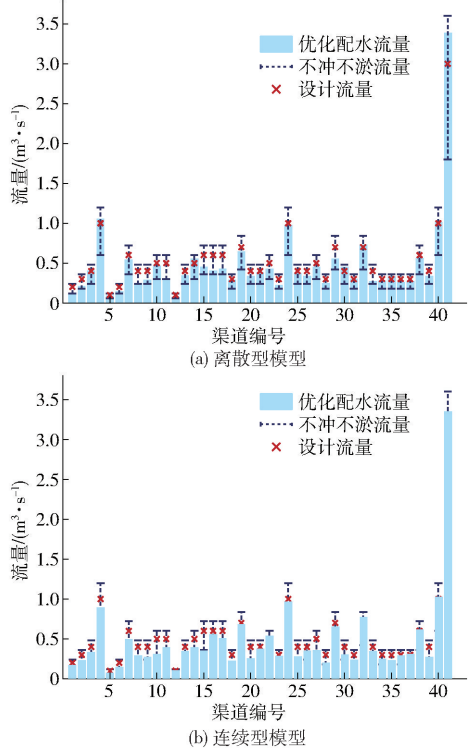


图 7 引水流量方案

Fig. 7 Optimal solutions of diversion flow

3.56、3.52 m^3/s。这主要是由于该条下级渠道灌溉控制面积较大，渠首分水闸设计引水流量较大。

此处，采用渠道毛流量对于其设计流量的平均绝对百分误差(MAPE)衡量两个模型下配水流量与设计流量的贴近程度。分别计算 41 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，改进前后模型的平均绝对百分误差分别为 13.91% 与 13.79%。总体而言，在连续型模型中，渠道的优化配水流量与设计流量更为贴近，这种引水流量方案也将更便于投入实际应用中。

3.2.3　实际优化配水结果

两个模型实际优化配水量与其最小需水量结果如图 8 所示。该灌溉渠系最小需水总量为 $5.477\,8\times10^6$ m^3，其中离散型模型优化配水量为 $5.572\,42\times10^6$ m^3，连续型模型优化配水量为 $5.536\,2\times10^6$ m^3，故两个模型优化配水结果均满足各条下级渠道所控制面积的最小需水量。因此，连续型模型得到的配水方案更加节水，可节约 3.6×10^4 m^3。

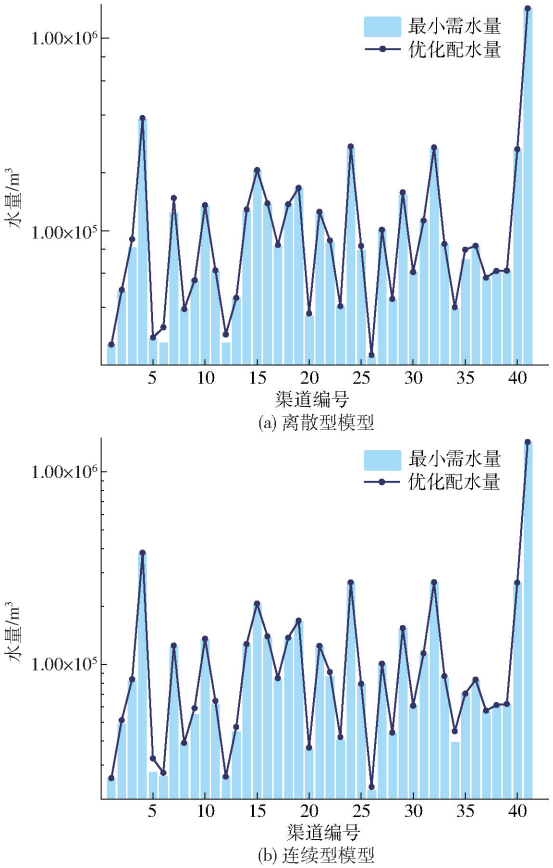


图 8　优化配水结果

Fig. 8　Optimization of water allocation results

3.3　不确定性分析

本优化模型采用 NSGA－Ⅱ算法进行求解，该算法性能受多种参数影响，包括种群大小、交叉概率和变异概率等。不同的参数设置可能导致不同的优化结果，从而带来优化方案的不确定性。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，通过分析 Pareto 前沿解集的鲁棒性、广度指标和均匀性指标比较不同参数设置下的优化效果。

对不同交叉与变异概率下求解得到的两个目标函数值(f_1、f_2)取标准差，分析不同参数组合下模型求解的鲁棒性。在不同交叉概率下，离散型模型 f_1、f_2 标准差分别为 0.46 m^3/s、9 000 m^3，连续型模型 f_1、f_2 标准差分别为 0.24 m^3/s、1.40×10^4 m^3；在不同变异概率下，离散型模型 f_1、f_2 标准差分别为 0.42 m^3/s、2.02×10^4 m^3，连续型模型 f_1、f_2 标准差分别为 0.22 m^3/s、1.28×10^4 m^3。因此，整体来看，连续型模型鲁棒性更好。

此外，在两个模型中，对最终代 Pareto 前沿解集的两个目标函数 f_1 及 f_2 取平均值，以对比分析最终代 Pareto 前沿分布的稳定性。计算最终代 Pareto 前沿解集的广度指标 Δ 和均匀性指标 U；Δ 值越小表示 Pareto 前沿分布越广，U 值越小则表示最终代 Pareto 前沿分布越均匀。

在两个模型中，不同交叉概率($p_m=0.05$)以及不同变异概率($p_c=0.7$)下的优化结果分别如图 9、10 所示。可以看出，不同的交叉概率与变异概率对于 f_1 的优化结果存在影响，而对于 f_2 的优化结果影响并不明显。当 $p_c=0.9$、$p_m=0.05$ 时，对 f_1 的优化结果最好，当 $p_c=0.9$、$p_m=0.07$ 时，对 f_1 的优化结果最好，但这两种情况下其最终代 Pareto 前沿的广度与均匀性并未达到最优。

综合两个模型在不同交叉概率与变异概率下的求解结果，当 $p_c=0.7$、$p_m=0.05$ 时，两个模型均取到较为理想的目标函数值，且最终代 Pareto 前沿的广度与均匀性均整体达到较优状态。因此，模型取交叉概率 0.7、变异概率 0.05 时进行求解具有较高可靠性。

3.4　Pareto 前沿最值点对比

在两个模型的最终代 Pareto 解集中取 f_1 与 f_2 分别取得最优解时的决策方案，离散型模型和连续型模型在不同目标下的优化配水方案对比结果如表 3 所示。

从表 3 可知，当 f_1 取得最优解时，离散型模型对目标函数 f_1 的优化结果略微优于连续型模型，但连续型模型对目标函数 f_2 的优化结果显著优于离散型模型，差值达 2.26×10^4 m^3。即虽然离散性模型在此方案得到的引水流量稳定性更好，但对比而言会有更大程度的水量浪费。除此之外，当 f_1 取得最优

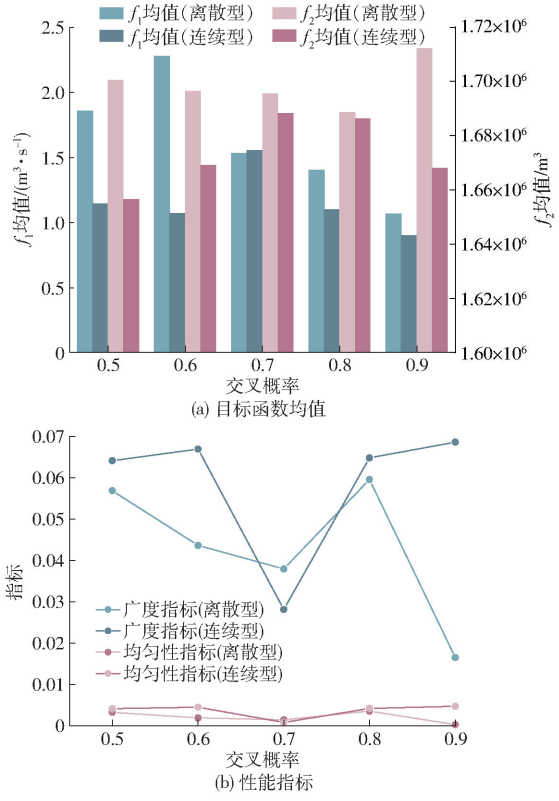


图 9 不同交叉概率下优化结果

Fig. 9 Optimization results under different crossover probabilities

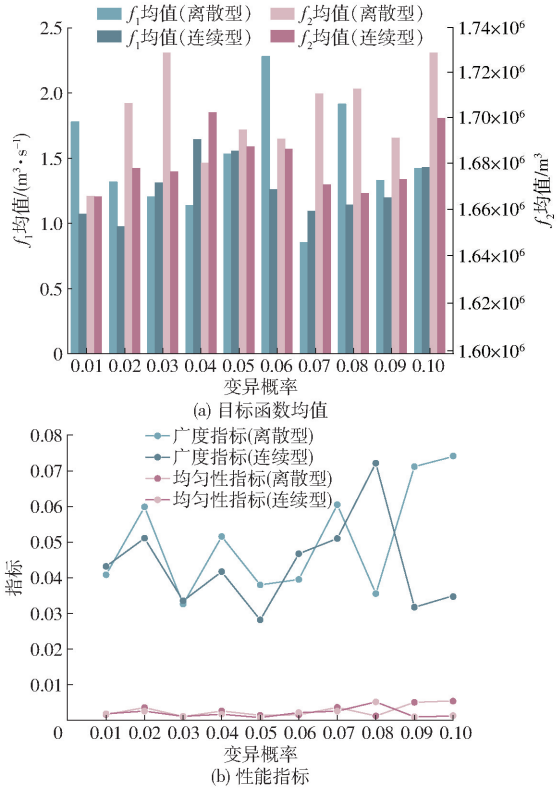


图 10 不同变异概率下优化结果

Fig. 10 Optimization results under different mutation probabilities

解时的配水集中程度、配水流量与设计流量贴近程度以及最终的优化配水量均是连续型模型结果更为优越。同样地,当 f_2 取得最优解时,目标函数值 f_1 与 f_2、配水集中程度、配水流量与设计流量贴近程度以及最终的优化配水量同样均是连续型模型结果更为优越。上述结果能清晰地反映在多目标优化求解时,Pareto 解集的权衡分析可全面认识不同目标下的优劣势,明确各目标间的矛盾和权衡,帮助选择能满足决策者偏好的 Pareto 最优解作为最终方案,最终有助于做出更加科学合理的多目标优化决策。

表 3 优化配水方案对比

Tab. 3 Comparison of optimized water allocation schemes

配水结果	f_1 最优		f_2 最优	
	离散型	连续型	离散型	连续型
目标函数 f_1/($m^3 \cdot s^{-1}$)	0.12	0.81	4.58	2.81
目标函数 f_2/m^3	$1.760\,8\times10^6$	$1.738\,2\times10^6$	$1.650\,8\times10^6$	$1.645\,3\times10^6$
开闸时间标准差/d	2.65	2.08	2.29	1.83
关闸时间标准差/d	2.82	2.68	2.69	2.35
配水流量绝对百分误差/%	17.37	14.16	14.65	13.03
优化配水量/m^3	$5.694\,1\times10^6$	$5.635\,1\times10^6$	$5.560\,4\times10^6$	$5.516\,7\times10^6$

3.5 模型最终代 Pareto 解集对比

在 NSGA-Ⅱ算法中,通常用拥挤度衡量解在目标空间中分布情况,在非支配等级相同的情况下,个体之间的选择基于拥挤度,即优先选择拥挤度大的个体,因为拥挤度大的个体所在区域较为稀疏,有助于保持解的多样性,防止算法过早收敛到局部最优。本文算法设置种群量为 200,分别在两个模型的最终代 Pareto 前沿中选取拥挤距离最大的 20 个解进行优化配置结果分析,尽可能保证选取的解较为均衡,使得分析更具可靠性。本部分对两个模型的 20 个解进行整体分析。

首先,对两个模型 20 个解的两个目标函数(f_1 和 f_2)取平均值。离散型模型求解得到的 f_1、f_2 均值分别为 2.47 m^3/s、$1.684\,2\times10^6$ m^3,连续型模型求解得到的 f_1、f_2 均值分别为 1.86 m^3/s、$1.679\,7\times10^6$ m^3。模型优化结果较为一致,但总体而言,连续型模型两目标函数值均优于离散模型。

其次,关于引水时间,计算 41 条渠道开关闸时间标准差并取平均值。在 20 个解中,离散型模型开关闸时间标准差均值分别为 2.44、2.68 d,连续型模型开关闸时间标准差均值分别为 1.99、2.56 d。因此,对于最终代 Pareto 解集而言,连续型模型配水时间整体比离散型模型更为集中。

再者,计算两个模型中 41 条下级渠道毛流量对

于其设计流量平均绝对百分误差(MAPE)，再对 20 个解的结果取平均。离散、连续型模型求解结果分别为 16.74% 与 14.26%。因此，在连续型模型中，渠道毛流量与设计流量更为贴近，此种配水流量方案也将更便于投入实际应用中。

最后，计算两个模型 20 个解的实际配水总量均值，得到离散型模型优化配水量均值为 $5.560\,5 \times 10^6$ m^3，连续型模型优化配水量为 $5.553\,6 \times 10^6$ m^3，即整体情况下连续型模型得到的配水量更小，此方案下浪费的水资源更少。

4　结论

(1)以河套灌区典型二级渠系——大滩分干渠为研究对象，针对现实场景下大滩分干渠的分布特征、运行要求以及作物需水量和输水量等因素，将下级渠道配水净流量、配水开始和结束时间作为决策变量，建立以上级渠道引水稳定性最好和下级渠道渗漏最小为目标的渠系水资源优化配置模型，并采用 NSGA－Ⅱ算法进行求解。模型结合经验公式，并基于现有研究成果进行构建，具有普遍适用性。同时，模型引入了连续时间变量，以更精确地描述上级渠道的引水流量过程，该方法可普遍适用于上级渠道的流量表达，以使得上级渠道流量变化过程更贴合实际，最终决策方案更为可靠。

(2)研究结果表明，离散型模型 2 个目标函数优化结果为 2.47 m^3/s 和 $1.684\,2 \times 10^6$ m^3，连续型模型多目标函数优化结果为 1.86 m^3/s 和 $1.679\,7 \times 10^6$ m^3。整体来看，改进后模型求解所得配水方案有更好的上级渠道引水稳定性和更少的渠系渗漏损失量，即采用连续时间变量的改进模型能更有效地实现集中高效配水，明显减少渠系渗漏损失，可为合理的配水方案提供决策依据。

参　考　文　献

[1] 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）

[2] 杨春蕾，蔡守华，王滇红. 灌区量水技术发展历程及研究进展[J]. 灌溉排水学报，2017，36(增刊 2)：34－38.
YANG Chunlei，CAI Shouhua，WANG Dianhong. Review on research of discharge measuring technique in irrigation district[J]. Journal of Irrigation Drainage，2017，36(Supp.2)：34－38.（in Chinese）

[3] 赵文举，马孝义，刘哲，等. 多级灌溉渠系配水优化编组模型与算法研究[J]. 农业工程学报，2008，24(2)：11－16.
ZHAO Wenju，MA Xiaoyi，LIU Zhe，et al. Optimal water allocation marshalling model of multilevel irrigation canal system and model solution[J]. Transactions of the CSAE，2008，24(2)：11－16.（in Chinese）

[4] 康绍忠. 中国农业节水十年：成就、挑战及对策[J]. 中国水利，2024(10)：1－9.
KANG Shaozhong. Ten years of agricultural water-saving in China：achievements，challenges and measures[J]. China Water Resources，2024(10)：1－9.（in Chinese）

[5] 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）

[6] 李肇桀，张旺，刘璐. 大力发展新质生产力助推水利高质量发展——关于水利行业发展新质生产力的认识和思考[J]. 水利发展研究，2024，24(6)：1－6.
LI Zhaojie，ZHANG Wang，LIU Lu. Boosting high-quality development of water conservancy by vigorously developing new quality productive forces—uderstanding and thoughts on developing new guilty productive forces in the water sector[J]. Water Resources Development Research，2024，24(6)：1－6.（in Chinese）

[7] 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）

[8] 刘恬恬，李子明，胡雅琪，等. 灌溉渠系优化配水模型与算法研究进展[J]. 节水灌溉，2022(11)：51－58.
LIU Tiantian，LI Ziming，HU Yaqi，et al. Review on optimal water allocation model and algorithm of irrigation canal system[J]. Water Saving Irrigation，2022(11)：51－58.（in Chinese）

[9] 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）

[10] 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）

[11] JIANG Yao，XU Xu，HUANG Quanzhong，et al. Optimizing regional irrigation water use by integrating a two-level optimization model and an agro-hydrological model[J]. Agricultural Water Management，2016，178：7688.

[12] 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 CSAE, 2021,37(4): 140 - 147. (in Chinese)
[13] 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)
[14] 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)
[15] 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.
[16] DELGODA D, MALANO H, SALEEM S, et al. A novel generic optimization method for irrigation scheduling under multiple objectives and multiple hierarchical layers in a canal network[J]. Advances in Water Resources, 2017, 105(8): 188 - 204.
[17] HONG S, MALATERRE P, BELAUD G, et al. Optimization of water distribution for open-canal irrigation networks[J]. Journal of Hydroinformatics, 2014, 16(2): 341 - 353.
[18] 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)
[19] 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)
[20] 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)
[21] 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)
[22] 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)
[23] 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.
[24] SURYAVANSHI A, REDDY J. Optimal operation schedule of irrigation distribution systems[J]. Agricultural Water Management, 1986, 11(1): 23 - 30.
[25] 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)
[26] 刘照, 程帅, 李华朋. 基于双层粒子群算法的下级渠道流量不等时渠系优化配水[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 88 - 93.
LIU Zhao, CHENG Shuai, LI Huapeng. Optimal water allocation in canal system under unequal discharges insubordinate canals based on bi-level PSO method[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 88 - 93. (in Chinese)
[27] 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)
[28] ANWAR A A, HAQ U Z. Arranged-demand irrigation scheduling with nonidentical discharges[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2016, 142(9): 04016033.
[29] 张国华,张展羽,邵光成,等. 基于粒子群优化算法的灌溉渠道配水优化模型研究[J]. 水利学报, 2006,37(8): 1004 - 1008, 1014.
ZHANG Guohua, ZHANG Zhanyu, SHAO Guangcheng, et al. Optimization model for discharge distribution of irrigation channels based on particle swarm optimizer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(8): 1004 - 1008, 1014. (in Chinese)
[30] 杨献献, 郭萍, 李茉. 面向生态的黑河中游模糊多目标水资源优化配置模型[J]. 节水灌溉, 2016(5): 65 - 70.
YANG Xianxian, GUO Ping, LI Mo. A fuzzy multi-objective optimal allocation model of water resource oriented ecology in the middle reaches of Heihe River[J]. Water Saving Irrigation, 2016(5): 65 - 70. (in Chinese)
[31] 李茉,姜瑶, 郭萍,等. 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 Mo, JIANG Yao, GUO Ping, et al. 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)
[32] 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.
[33] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.