

▪ 灌溉水源与输配水系统 ▪

文章编号: 1672-3317(2023)02-0130-06

基于NSGA-II算法的灌区配水渠道轮灌分组优化调控研究

樊煜^{1,2}, 高占义^{1,2}, 陈皓锐^{1,2*}, 王云辉³, 房本岩³, 徐宁³

(1.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2.国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048;

3.山东省滨州市引黄灌溉服务中心, 山东 滨州 256600)

摘要:【目的】基于NSGA-II算法对灌区配水渠道轮灌分组进行优化调控, 实现灌区高效配水。【方法】以下级渠道流量和轮灌分组数为决策变量, 以总配水时间短、同一轮灌组内最上游渠道与最下游渠道间距小、同一轮灌组内各渠道配水时间差最小为目标, 考虑轮期约束、出水口状态约束、渠道过流能力约束、水量平衡约束, 建立多目标配水优化模型, 利用NSGA-II算法对模型进行求解。【结果】对于簸箕李灌区的石皮东支渠, 模型将斗渠划分为9个轮灌组, 模型的配水流量和配水总时长均满足约束要求; 模型尽可能地将相邻的渠道划分到一个轮灌组并同时启闭, 方便管理人员操作闸门。【结论】本文建立的灌区配水模型能够实现流量大、短历时、配水工作量少, 可为灌区配水工作提供技术支持。

关键词: 多目标配水; 渠道配水; 轮灌; 优化模型

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022346

OSID:



樊煜, 高占义, 陈皓锐, 等. 基于NSGA-II算法的灌区配水渠道轮灌分组优化调控研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 130-135.

FAN Yu, GAO Zhanyi, CHEN Haorui, et al. Optimizing Water Distribution in Irrigation Canals Using the NSGA-II Algorithm[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 130-135.

0 引言

【研究意义】灌溉渠道水量优化分配是指在满足作物灌溉需求的前提下, 基于灌区各级渠道的现状输水能力, 通过各种技术手段, 对配水渠道的流量和配水时间进行优化, 以达到设定目标^[1]。在灌区输配水过程中, 科学合理的渠系配水可以提高供水服务水平、减少无效弃水、提高灌溉水利用率, 从而促进灌区水资源高效利用、有效缓解水资源供需矛盾、实现灌区农业生产优质高效发展, 为灌区生产带来良好的经济与生态环境效益^[2-5]。

【研究进展】在灌溉渠系配水过程中, 上级渠道往往不能满足所有下级渠道的灌溉, 灌区常常采用轮灌配水方式。Suryavanshi等^[6]提出了0-1线性规划模型, 假定上级配水渠道是由一组等流量的流管组成, 且下级渠道流量相等, 通过寻找下级渠道的最优组合方式来减少渠道工程投资, 获得灌溉配水的最优调度,

这种轮灌分组方式已得到了广泛应用。王智等^[7]提出了在一定轮灌期和来水流量限制条件下实现下级配水渠道最优组合及配水时间最优的配水模型; 李彬等^[8]将轮灌最优组合方案与计算机控制系统进行结合, 提高了灌区灌溉管理的自动化水平; 骆莉等^[9]以轮灌组数最少为目标, 建立了配水渠道轮灌组合优化模型, 并用遗传算法计算模型, 得到了最优灌溉组合; 刘照等^[10]基于RS、GIS技术, 选择总配水时间最短和轮灌组间引水持续时间差最小为目标, 运用粒子群算法和蚁群算法求解模型, 解决了渠系配水问题; Anwar等^[11]在单阶段模型中考虑了每个用水户的预定时间与实际配水时间的差值, 在二阶段模型中使第一阶段处于劣势的用户优先配水, 建立了轮灌配水模型, 可用于有时间需求的灌溉计划。以上研究均假设下级渠道的引水流量相同, 而灌区实际配水是一个复杂的变化过程, 下级渠道的配水流量通常不可能完全相同。周美林等^[12]以引水流量和引水时间差最小为目标, 建立了下级渠道流量不等条件下的配水模型, 确定了灌区最优轮灌组合; Tonny等^[13]通过简单多机调度和复杂多机调度, 分别确定了在各用水户流量相同和不相同2种情况下的配水时间表。总结以往研究结果可发现, 同一轮灌组内渠道的配水时间通常存在差异, 给

收稿日期: 2022-06-22

基金项目: “科技兴蒙”行动重点专项(2021EEDSCXSQZD010); 中国水利水电科学研究院技术创新团队项目(ID0145B022021)

作者简介: 樊煜(1993-), 男, 博士研究生, 主要从事灌区渠系配水及调控研究。E-mail: 673000238@qq.com

通信作者: 陈皓锐(1984-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事节水灌溉理论与技术要求。E-mail: chenhr@iwhr.com

灌区管理带来不便。吕宏兴等^[14]按照“定流量、变历时”的轮灌方式，建立了 0-1 线性整数规划模型，并将各轮灌组的引水时间均一化处理，使各轮灌组在同一时间结束灌溉；王庆杰等^[15]将“组间续灌、组内轮灌”的渠道配水方式转化为“组间轮灌、组内续灌”，在寻找最优配水方案的同时，对各轮灌组内渠道的配水时间进行均一化处理，使各轮灌组内渠道可以同时开启和关闭。

【切入点】已有的轮灌配水模型为灌区配水工作提供了一定的技术参考，但目前的轮灌模型通常将上下游距离较远的渠道分到同一组内，在配水时，灌区管理人员需要频繁往返于上下游之间启闭闸门，给管理工作带来较大不便。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究采取“组间轮灌、组内续灌”的灌溉方式，考虑工作人员的工作量，建立轮灌配水模型，并采用 NSGA-II 对模型进行求解，使模型更加符合实际的配水情况，为灌区管理工作提供便利。

1 模型构建与求解

1.1 灌区轮灌配水模型的构建

假设某上级渠道有 N 条下级渠道，轮灌组数的划分按照式 (1) 计算：

$$\text{ceil}[\frac{\sum_{j=1}^N 0.6q_{jd}}{Q_d}] \leq M \leq \text{floor}[\frac{\sum_{j=1}^N q_{jd}}{Q_d}], \quad (1)$$

式中： M 为轮灌组数； Q_d 为上级渠道的设计流量 (m^3/s)； $j=1, 2, \dots, N$ 为下级渠道的序号； q_{jd} 为各下级渠道的设计流量 (m^3/s)； ceil 为向上取整； floor 为向下取整。

1.1.1 决策变量

模型决策变量为轮灌编组和下级渠道的配水流量。决策变量 $X_{ij}=\{0,1\}$ 表示第 i 轮灌组第 j 出水口的开关状态， $X_{ij}=0$ 表示出水口关闭 ($i=1, 2, \dots, M$)， $X_{ij}=1$ 表示出水口开启；决策变量 q_j 表示下级渠道的配水流量 (m^3/s)。

1.1.2 目标函数

模型的目标为配水时间短和灌区管理方便。配水时间短的函数建立见式 (2)；为了使管理人员操作方便，建立同一分组内各渠道配水时间差最小的函数，见式 (3)；为了缩短管理人员的工作距离，同一分组内，尽可能地使互相靠近的渠道在一个分组内，即同一组内最上游渠道和最下游渠道的距离最小，见式 (4)。

$$\min T = \sum_{i=1}^M \max X_{ij} t_j, \quad (2)$$

$$\min \Delta T = \max (t_a - t_b), \quad (3)$$

$$\min S = S_M, \quad (4)$$

$$t_j = \frac{w_j}{q_j}, \quad (5)$$

式中： t_j 为第 j 条下级渠道中每条渠道的配水时间 (h)； w_j 为每条下级渠道的需水量 (m^3)； t_a 、 t_b 为同一轮灌组内任意 2 条下级渠道的配水时间 (h)； ΔT 为同一轮灌组内任意 2 条下级渠道的配水时间差 (h)； S_M 为第 M 个轮灌组内最上游渠道与最下游渠道之间的距离 (km)。

1.1.3 约束条件

渠道一次性引水约束：任意 1 条下级渠道在轮期 T 内只能开启 1 次，即：

$$\sum_{i=1}^M X_{ij} = 1. \quad (6)$$

下级渠道流量约束：任意 1 条下级渠道的配水流量应在其设计流量的 0.6~1.0 倍以内，即：

$$0.6q_{jd} \leq q_j \leq q_{jd}. \quad (7)$$

水量平衡约束：任意时刻，同时配水的下级渠道流量之和应等于上级渠道流量，即：

$$Q_t = \sum_{j=1}^T q_j, \quad (8)$$

式中： Q_t 为上级渠道 t 时刻的流量。

上级渠道流量约束：任意时刻，上级渠道流量应在其设计流量的 0.6~1.0 倍之间，即：

$$0.6Q_d \leq Q_t \leq Q_d. \quad (9)$$

时间约束：每个灌溉组的配水时间不超过配水渠道最大允许输水时间，即：

$$\sum_{i=1}^M \max X_{ij} t_j \leq T. \quad (10)$$

1.2 模型求解算法

本研究建立的模型为非线性约束条件下含有整数规划的模型，并存在多个约束条件和目标函数，模型求解困难。遗传算法能够解决多约束多目标条件下的大搜索空间优化问题，相比其他智能算法更具有优越性^[16-17]。本文采用精英策略的非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 求解模型。NSGA-II 由 Deb 等^[18]提出，是传统遗传算法的改进，降低了计算复杂度，避免了较优解的丢失。本研究的编码方式采用二进制编码，交叉算子为两点交叉，变异算子为均匀变异算子，编程工具为 python，算法流程如图 1 所示^[19]。NSGA-II 算法的步骤为：随机产生初始种群 P_0 ；然后根据目标函数值进行非劣排序，再通过选择和遗传操作(交叉、变异)可得新种群 Q_t ，精英保留策略有 $R_t = R_t \cup Q_t$ ，经过对 R_t 进行非劣排序得到种群 P_{t+1} ；然后迭代运行，当达到最大进化代数时停止运行，最终得到一系列非劣解集。

2 模型应用

2.1 应用区域概况

簸箕李灌区位于山东省滨州市最西部，涉及惠

民县、阳信县、无棣县，地理坐标为东经117°14'37"—117°58'44"、北纬37°07'41"—38°14'57"，控制土地面积为22.4万hm²，设计灌溉面积为6万hm²。灌区多年平均气温为12~14℃，多年平均降水量为570.6mm，多年平均蒸发量为1195.1mm。本文选取簸箕李灌区的石皮东支渠及其斗渠为研究对象(图2)，石皮东支渠位于惠民县，灌溉面积为1853hm²，其控制范围大部分在惠民县，少部分在阳信县。灌区主要种植作物为冬小麦、玉米和棉花，3种作物的灌溉制度见表1。本文以小麦返青期的优化配水为研究目标。小麦返青期灌水定额为540m³/hm²，轮灌期为10d，渠道相关参数见表2。

2.2 模型参数

模型决策变量的数量为60个。遗传算法种群规模为150，交叉概率为0.8，变异概率为0.05，最大遗传代数为500。

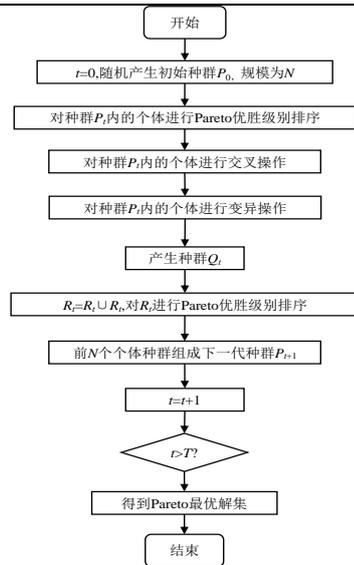


图1 NSGA-II算法流程

Fig.1 Flow chart of NSGA-II algorithm

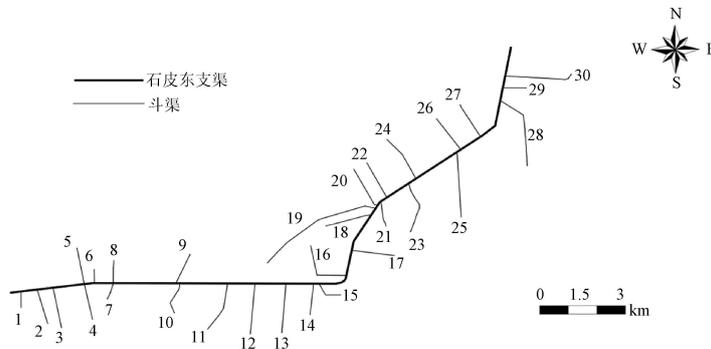


图2 渠系位置及分布

Fig.2 Location and distribution of canal system

表1 不同作物灌溉制度

Table 1 Table of irrigation systems for different crops

作物	复种指数/%	灌水次数	生育阶段	灌水定额/(m ³ hm ⁻²)	灌水时间		灌水天数/d
					开始	结束	
小麦	50	5	播种	540	0923	1002	10
			冬灌	540	1121	1130	10
			返青	540	0311	0320	10
			拔节	540	0413	0422	10
			灌浆	540	0507	0516	10
玉米	50	2	播种	600	0621	0628	8
			抽穗	600	0801	0810	10
棉花	20	2	播种	600	0407	0413	7
			现蕾	600	0520	0527	8

2.3 结果与分析

表3为模型的轮灌组划分情况和每条斗渠的配水时间。模型将30条斗渠划分为9个组，9个轮灌组之间依次进行灌溉，每个分组内的斗渠同时进行灌溉。灌溉开始时，第一分组内的1、2、3、4、6斗同时开启，当第一分组内的斗渠全部灌溉结束时，第二分组的5、10、12斗开始灌溉，以此类推，直至第九组灌溉结束。每个分组的配水时长为该分组内斗渠配水时间的最

大值，9个组的配水时长分别为15.64、22.9、15.83、16.99、21.51、38.21、20.37、21.06、28.49 h，总配水时长为9个组的配水时长之和，为201.54 h，与配水轮期240 h相比，本文提出的配水模型缩短了总配水时间。在轮灌组内，各斗渠之间的配水时间也较为接近，斗渠之间配水时间的最大差值为第一轮灌组内1斗渠和3斗渠的配水时间差值，为15 min。

表2 石皮东支渠及斗渠参数

渠道	设计流量/ (m ³ s ⁻¹)	渠道长度/m	渠道间距/m	作物种植面积/hm ²	净灌水量/m ³	毛灌水量/m ³
石皮东支渠	2	17 590	—	1 852.84	1 000 532	1 429 331
1 斗	0.4	521	411	17.95	9 692	13 846
2 斗	0.5	1 150	405	29.84	16 114	23 020
3 斗	0.7	1 340	793	36.49	19 704	28 149
4 斗	0.4	1 180	0	22.5	12 147	17 353
5 斗	1	1 210	251	78.65	42 471	60 673
6 斗	0.7	435	470	36.3	19 603	28 004
7 斗	0.5	535	0	28.58	15 434	22 049
8 斗	0.6	725	1 568	33.23	17 945	25 636
9 斗	0.7	998	84	45.27	24 447	34 924
10 斗	0.5	1 050	1 191	53.02	28 631	40 901
11 斗	0.9	1 630	684	39.3	21 221	30 316
12 斗	1	1 680	772	68.39	36 928	52 754
13 斗	1	1 610	683	63.91	34 511	49 301
14 斗	0.8	1 000	149	54.32	29 333	41 904
15 斗	0.7	754	865	39.65	21 410	30 586
16 斗	1	1 700	833	99.37	53 657	76 653
17 斗	0.7	1 060	1 269	58.97	31 844	45 491
18 斗	0.7	1 180	235	42.11	22 741	32 487
19 斗	1.3	3 430	111	146.23	78 964	112 806
20 斗	0.8	1 340	156	60.53	32 686	46 694
21 斗	1	821	204	69.24	37 387	53 410
22 斗	0.7	1 230	698	58.96	31 836	45 480
23 斗	1.2	1 670	239	131.81	71 175	101 679
24 斗	0.5	1 470	1 335	76.12	41 102	58 717
25 斗	1.1	2 120	145	69.55	37 554	53 649
26 斗	0.7	1 200	644	56.1	30 294	43 277
27 斗	0.8	1 180	1 322	67.6	36 504	52 149
28 斗	1.5	2 400	422	122.87	66 347	94 781
29 斗	0.7	668	388	74.45	40 203	57 433
30 斗	1	1 750	—	71.57	38 648	55 211

表3 斗渠分组与配水时间

轮灌组	最优轮灌组合					轮灌组配水时间/h
1	1 斗	2 斗	3 斗	4 斗	6 斗	15.64
配水时间/h	15.39	15.60	15.64	15.54	15.56	15.64
2	5 斗	10 斗	12 斗			22.90
配水时间/h	22.77	22.73	22.90			22.90
3	7 斗	8 斗	9 斗	11 斗		15.83
配水时间/h	15.70	15.83	15.64	15.60		15.83
4	13 斗	14 斗	15 斗			16.99
配水时间/h	16.91	16.87	16.99			16.99
5	16 斗	17 斗	18 斗			21.51
配水时间/h	21.51	21.41	21.49			21.51
6	19 斗	23 斗	24 斗			38.21
配水时间/h	38.21	38.17	37.93			38.21
7	20 斗	21 斗	22 斗			20.37
配水时间/h	20.27	20.33	20.37			20.37
8	25 斗	26 斗	30 斗			21.60
配水时间/h	21.60	21.47	21.60			21.60
9	27 斗	28 斗	29 斗			28.49
配水时间/h	28.40	28.31	28.49			28.49
总配水时间/h						201.54

图 3 为斗渠配水流量与设计流量的对比，所有斗渠配水流量均在设计流量的 0.60~1 倍之间，满足斗渠过流能力要求。

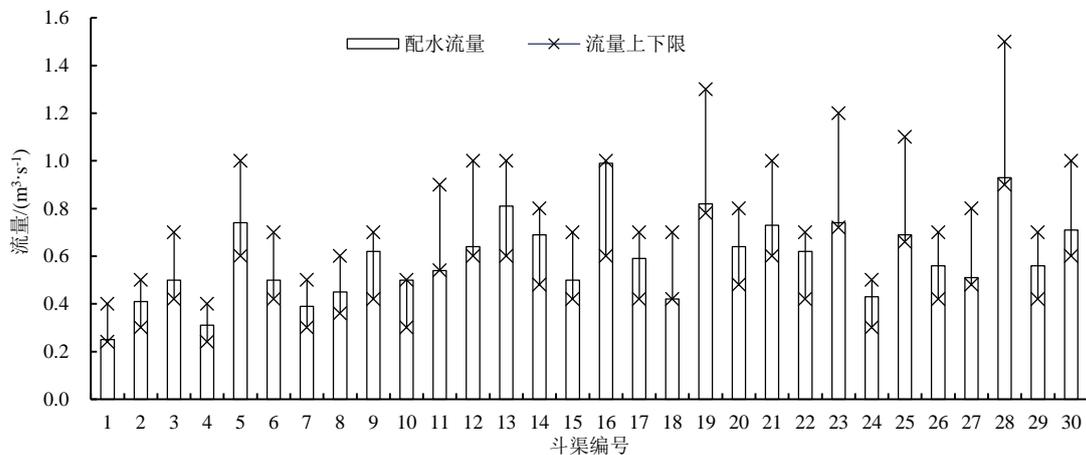


图3 斗渠配水流量与设计流量之间的对比

Fig.3 Comparison between water distribution flow rate and design flow rate of lateral canal

图 4 反映了斗渠启闭顺序和相邻启闭斗渠的间距。模型考虑了同一轮灌内最上游斗渠与最下游斗渠间距最小、同一轮灌组内斗渠灌溉时间差距最小 2 个目标。模型最后的分组结果显示，同一组内的斗渠基本上是相邻斗渠，且同一轮灌组内的斗渠灌溉时间最大差值在 15 min 内，可近似认为同一轮灌组之间的斗渠是可以统一关闭的，所以开启和关闭斗渠的顺序是相同的，斗渠启闭顺序为

1→2→3→4→6→5→10→12→7→8→9→11→13→14→15→16→17→18→19→23→24→20→21→22→25→26→30→27→28→29。在斗渠启闭过程中，尽可能按照渠道上游到下游的顺序来启闭，以此来减少工作人员的工作距离，管理员的工作总距离为相邻启闭的斗渠间距之和，即 30.35 km；管理员逆向工作的距离为从下游到上游的总距离，即 7.21 km，模型实现了最大程度降低管理员的工作距离。

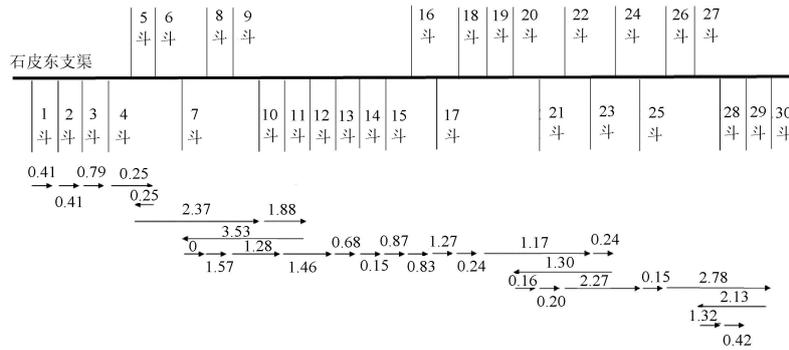


图4 模型斗渠启闭顺序和相邻启闭斗渠的间距 (km)

Fig.4 Opening and closing sequence of lateral canals and spacing of adjacent opening and closing lateral canals (km)

3 讨论

本文在建立模型时，流量下限设置为设计流量的 0.6 倍，模型最后的配水结果也显示所有斗渠的流量均满足此要求，实现了大流量配水。图 5 为石皮东支渠配水流量与设计流量的对比，支渠配水流量在 1.88~2 m³/s 之间，是设计流量的 0.94~1 倍，支渠同样也实现了大流量运行，充分发挥了渠道工程能力。

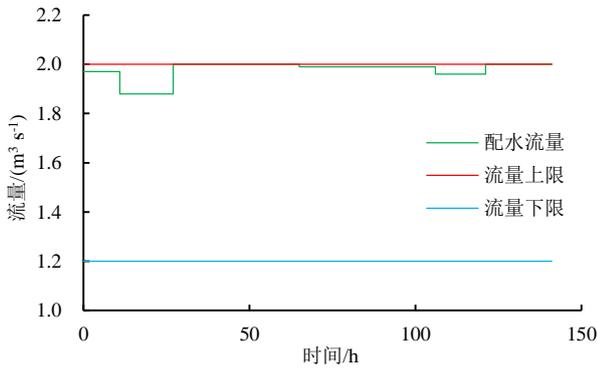


图5 支渠配水流量与设计流量之间的对比

Fig.5 Comparison between water distribution flow rate and design flow rate of branch canal

以往配水模型的配水方式大多是“组间轮灌，组内续灌”，按照这种方式进行灌溉时，灌区管理人员需要频繁往返于上、下游渠道之间启闭闸门，给管理带来巨大不便。本文将配水方式调整为“组间续灌，组内轮灌”，在这种灌溉方式下，建立了 2 个目标函数。第一个目标是同一组内渠道配水时间差最小，实现同一组内的渠道同时开启或关闭，方便灌区管理人员管理，这在具有远程控制系统的灌区更为实用；第二个目标是同一分组内的渠道应尽可能地相互靠近，该目标是为了使灌区管理人员在启闭同一组之间的闸门时，能够减少其工作距离，不需要频繁往返于上下游渠道之间。结果表明，每个分组内的渠道基本相互临近，上下游相距较远的渠道不会被分到一个组内；每个分组内，斗渠配水时间差值最大为 15 min，可近似认为灌溉在同一时间结束，可同时关闭闸门。本文

没有考虑多级渠道，存在一定局限性，未来仍需进一步完善。

4 结论

以各斗渠流量和轮灌分组情况为决策变量，以配水时间最短、同一轮灌内最上游渠道与最下游渠道间距最小、同一分组内的渠道灌溉时间差最小为目标，建立配水模型。所建立的配水模型在斗渠配水流量和支渠配水流量方面均满足过流能力要求，并实现了大流量配水；模型将渠道分为 9 组，总配水时长为 201.54 h，满足轮期要求，缩短了灌溉时间；根据本文模型进行渠道配水时，灌区管理人员不需频繁往返于上下游之间，同一分组内的渠道可同时启闭，大大降低了管理人员的工作量。

参考文献:

- [1] 张智韬, 李援农, 陈俊英, 等. 基于 3S 技术和蚁群算法的灌区渠系优化配水[J]. 西北农林科技大学学报, 2010, 38(7): 221-226. ZHANG Zhitao, LI Yuannong, CHEN Junying, et al. Optimization of water allocation management for irrigation canals based on 3S technology and colony algorithm[J]. Journal of Northwest A&F University, 2010, 38(7): 221-226.
- [2] 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.
- [3] 徐淑琴, 高凯茹, 乐静, 等. 基于 NSGA-II 灌区两级渠道输配水优化调度[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(3): 71-78. XU Shuqin, GAO Kairu, YUE Jing, et al. Based on the NSGA-II irrigation channels of two-stage water delivery and distribution optimization scheduling[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2020, 51(3): 71-78.
- [4] 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.
- [5] 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(2): 276-278, 286.

- [6] SURYAVANSHI A R, REDDY J M. Optimal operation schedule of irrigation distribution systems[J]. *Agricultural Water Management*, 1986, 11: 23-30.
- [7] 王智, 朱凤书. 灌溉渠系流量最优调配的 0-1 规划模型[J]. *灌溉排水*, 1992, 11(3): 8-13.
WANG Zhi, ZHU Fengshu. 0-1 Programming model for optimal flow regulation in irrigation canal systems[J]. *Irrigation and Drainage*, 1992, 11(3): 8-13.
- [8] 李彬, 曾庆祝. 灌区计算机监控系统与灌溉优化调度模型集成应用研究[J]. *排灌机械*, 2005, 23(4): 25-28.
LI Bin, ZENG Qingzhu. Study on integration between computer monitoring system and optimization model in irrigation channel distribution[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2005, 23(4): 25-28.
- [9] 骆莉, 袁宏源. 配水渠道轮灌组合优化模型及其遗传算法[J]. *中国农村水利水电*, 2000, 10: 11-13.
- [10] 刘照, 华庆伟, 张成才, 等. 基于 RS、GIS 及智能算法的渠系优化配水[J]. *西北农林科技大学学报*, 2017, 45(4): 213-222, 229.
LIU Zhao, HUA Qingwei, ZHANG Chengcai, et al. Optimal irrigation water distribution based on RS, GIS and intelligent algorithms[J]. *Journal of Northwest A & F University*, 2017, 45(4): 213-222, 229.
- [11] ANWAR A A, CLARKE, D. Irrigation scheduling using mixed-integer linear programming[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2001, 127: 63-69.
- [12] 周美林, 吕宏兴, 韩文霆. 渠系配水优化模型和多目标遗传算法研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(9): 5-7.
ZHOU Meilin, LYU Hongxing, HAN Wenting. Optimal water scheduling model and multi-objective genetic algorithm[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(9): 5-7.
- [13] TONNY TV, ANWAR A. Irrigation scheduling using complex machine scheduling[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2014, 4(14 065): 1-8.
- [14] 吕宏兴, 熊运章, 汪志农. 灌溉渠道支斗渠轮灌配水与引水时间优化模型[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(6): 43-46.
LYU Hongxing, XIONG Yunzhang, WANG Zhinong. Optimal model of rotation irrigation distribution channel and branch canal and delivery time[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(6): 43-46.
- [15] 王庆杰, 岳春芳, 李艺珍, 等. 基于改进粒子群算法的两级渠道水资源优化配置[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(4): 26-33.
WANG Qingjie, YUE Chunfang, LI Yizhen, et al. Optimal allocation of water resources with two-level channel based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(4): 26-33.
- [16] 赵恩龙. 基于多目标遗传算法的灌区水资源优化调度研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2013.
ZHAO Enlong. Study of optimal water resources allocation of irrigation district based on multi-objective genetic algorithm evolution[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2013.
- [17] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(2): 11-16.
- [18] KALYANMOY Deb, AMRIT Pratap, SAMEER Agarwal, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [19] 王瑞峰, 陶荣杰. 基于 NSGA2 算法的 ZPW2000A 轨道电路维修策略优化研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(9): 2 394-2 400.
WANG Ruifeng, TAO Rongjie. Research on optimization of ZPW2000A track circuit maintenance strategy based on NSGA2 algorithm[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(9): 2 394-2 400.

Optimizing Water Distribution in Irrigation Canals Using the NSGA-II Algorithm

FAN Yu^{1,2}, GAO Zhanyi^{1,2}, CHEN Haorui^{1,2*}, WANG Yunhui³, FANG Benyan³, XU Ning³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China; 3. Yellow River Irrigation Service Center, Binzhou Municipality, Binzhou 256600, China)

Abstract: 【Objective】 Optimization of water distribution in irrigation districts is a way to improve water use efficiency and water resource management. This paper proposes a method to optimize water distribution in irrigation canals. 【Method】 The flow rate in the canals at the lower end and the number of rotational groups are taken as the decision variables. The objectives of the optimization are to minimize the total water distribution duration, the distance between the upstream and downstream canals in the same group, and the difference in water distribution duration in each canal in the same rotational group. The optimization considers the constraints of time, outlet state, canal overflow capacity, and water balance. The model is applied to the Shipi East branch canal in Bojili irrigation regions, and the optimization is solved using the NSGA-II algorithm by dividing the lower-end canals into nine rotation irrigation groups. 【Result】 Dividing the adjacent canals into one round grouting group as possible as it could, and opening and closing them simultaneously to facilitate the management, the water distribution flow rate and total water distribution time calculated by the model meet the operational requirements. 【Conclusion】 The optimization model proposed in this paper can distribute water between canals to achieve high flow rate, short duration and less workload. It can be used to help improve water management in irrigation districts.

Key words: multi-objective water distribution; canals water distribution; rotational irrigation; optimization model

责任编辑: 韩 洋