#### ■ 灌溉水源与输配水系统 ■

文章编号: 1672 - 3317 (2023) 09 - 0129 - 09

## 基于熵权-TOPSIS 法的渠系配水模型求解算法综合评价

卢德友<sup>1</sup>,田桂林<sup>2,3\*</sup>,杨 泊<sup>2</sup>,秦京涛<sup>2</sup>

(1.河南水利与环境职业学院,郑州 450011; 2.中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业农村部 节水灌溉工程重点实验室,河南 新乡 453002; 3.中国农业科学院 研究生院,北京 100081)

摘 要:【目的】探究粒子群算法和天牛群算法在求解灌区渠系配水模型时的性能差异及优化后配水方案的共有特性。 【方法】以大功灌区总干、分干两级渠系为研究对象,依据灌区不同的用水情形将其划分为18个配水对象,以灌溉 用水总量、渠系渗漏水量及总干渠流量波动大小为优化目标,以下级渠道输水流量和输水启、闭时间点为决策变量, 构建多目标两级渠系配水模型,分别使用粒子群算法和天牛群算法对模型进行求解,基于求解结果结合熵权-TOPSIS 法对2种算法的性能进行综合评价。【结果】熵权-TOPSIS 法的评价结果表明,粒子群算法的整体性能优于天牛群算 法,但后者的计算速度高于前者。此外,同一用水情形下2种算法求解的配水方案相近,且优化后的下级渠道配水 流量与配水时长存在共性规律。【结论】"左右须"寻优机制的引入使天牛群算法的计算速度相比粒子群算法最高可 提升56%,但由于"左右须间距"初始参数的设置问题,随着计算维度的增加,粒子群算法的整体性能优于天牛群 算法。研究结果可为灌区渠系配水管理提供科学依据。

 关键词:灌区;渠系配水;天牛群算法;粒子群算法; 熵权-TOPSIS 评价模型

 中图分类号: \$274.3
 文献标志码: A

 doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023367
 OSID: 歐



卢德友, 田桂林, 杨泊, 等. 基于熵权-TOPSIS 法的渠系配水模型求解算法综合评价[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 129-137.

LU Deyou, TIAN Guilin, YANG Bo, et al. Comprehensive Evaluation of Two Canal Systems Water Distribution Model Solution Algorithms Based on Entropy Weight-TOPSIS Approach[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 129-137.

## 0 引 言

【研究意义】科学的灌区水资源管理方案和渠系 工作制度能够提高灌溉水利用效率,稳定粮食产能。 灌区内同级渠道的控制灌溉面积和输水能力的差异 会导致渠道间的灌水时长差异较大,设置不合理的渠 道流量和配水时长是实际灌溉过程中产生灌溉水无 效损失的主要原因之一。科学的渠系工作制度是保障 灌溉水高效配置的基础<sup>[1]</sup>。

【研究进展】随着研究的深入和渠系配水模型复 杂程度的增加,高效的求解算法是寻求合理配水方案 的必要条件。部分学者在开展灌区渠系配水模型研究 的同时也对相关算法的寻优能力进行了比较。一般从 求解结果、求解速度及算法对不同问题的求解能力3 个方面来评价多目标算法的整体性能<sup>[2]</sup>。褚宏业等<sup>[3]</sup> 分别使用遗传算法和粒子群算法求解多目标渠系模 型,得出粒子群算法的运算速度更快、配水结果更科 学。李彤姝等<sup>[4]</sup>结合优化目标的计算结果和具体的配 水方案,对比分析得出了粒子群算法相比向量评估遗 传算法和回溯法具有更好的优化性能。韩宇等[5]通过 比较回溯搜索算法、多目标粒子群算法及向量评估遗 传算法,分别求解渠系配水模型时的计算速度和结 果稳定性,指出回溯搜索算法的优势更为明显。Sun 等<sup>[6]</sup>分别使用灰色关联分析法和 TOPSIS 法评价了遗 传回溯搜索算法、向量评估遗传算法在求解渠系配水 模型方面的性能表现,但评价指标仅基于计算结果, 并未考虑求解速度和算法的自身特点。目前,越来越 多的学者开始关注从不同角度出发,对多种算法进行 全方位的对比分析<sup>[7-8]</sup>,从而发掘不同算法的优缺点。 粒子群算法在灌区渠系配水研究中的应用趋于成熟, 且整体表现良好。以天牛觅食为原型的天牛须搜索算 法提出时间较晚,目前已应用于电力调度、路径规划 及图形处理等方面<sup>[9]</sup>。天牛群算法是天牛须搜索算法 的变体,其与粒子群算法均属于群体智能算法,对解 决灌区复杂的渠系配水优化问题中具有一定潜力[10]。 目前,对上述2种算法求解渠系配水模型时的性能表 现仍缺乏详细的对比和综合评价。TOPSIS 法常用于 评价多处理、多指标问题。目前,基于熵权的 TOPSIS

收稿日期: 2023-08-14 修回日期: 2023-09-04 网络出版日期: 2023-09-15 基金项目: 2023 年度河南省高等学校重点科研项目(23B570003); 中国 农业科学院科技创新工程项目(ASTIP)

作者简介: 卢德友(1967-), 男。副教授, 硕士, 研究方向为水利工程 BIM 与节水灌溉工程技术。E-mail: ldyueou@126.com

通信作者:田桂林(1997-),男。博士研究生,研究方向为灌区渠系优化 配水理论与应用。E-mail: ykerlove@163.com

<sup>©《</sup>灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

评价法的评价结果准确、客观,因此常被应用于多处 理试验结果评价<sup>[11-12]</sup>、产品优劣判别<sup>[13-14]</sup>、水资源承 载力评价<sup>[15]</sup>及灌区节水能力评价与筛选<sup>[16-17]</sup>等领域。 此外,TOPSIS 法也被应用于筛选多目标配水模型的 最优结果。赵钦等<sup>[18]</sup>使用 NSGA-III算法求解了区域 水资源优化配置模型,并采用 TOPSIS 法对多目标帕 累托可行解进行综合评价,筛选出了最佳的折中配置 方案。【切入点】传统的渠系配水算法比较大多集中 于直观且单一的计算结果对比,缺乏客观的综合性能 评价。目前,基于熵权-TOPSIS 法对渠系配水模型求 解算法进行综合评价的研究仍较为缺乏。

【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究以大功灌 区总干-分干两级渠系为研究对象,依据灌区实际灌 溉过程中的不同用水情形将其分为 18 个配水对象, 分别使用天牛群算法和粒子群算法对配水方案进行 求解,结合熵权-TOPSIS 法对 2 种算法的计算速度与 求解结果进行综合评价,研究结果可为灌区渠系配水 研究的开展和算法优选提供参考。

## 1 材料与方法

#### 1.1 多目标两级渠系优化配水模型

灌区渠系配水方案的优劣与各级渠道的流量、水 流波动及配水时长相关。为寻求科学的配水计划,减 少渠系渗漏水的无效损失、提高灌溉水输送效率、保 证渠道水流的平稳运行,以灌溉用水总量、渠系渗漏 水量、总干渠流量波动最小为优化目标,以下级渠道 配水净流量和输水启、闭时间点为决策变量,建立多 目标两级渠系优化配水模型。

1) 优化目标一的表达式为:

$$\min W_l = \sum_{i=1}^{n} \frac{\beta A L \Delta T_i}{100 Q_{Ni}^{m-1}} + \sum_{j=1}^{J} \frac{\beta A l_j (t_j^{\text{off}} - t_j^{\text{on}})}{100 q_{Nj}^{m-1}}, \qquad (1)$$

式中:  $W_i$ 为某次灌水周期内两级渠系输水所产生的渗漏总水量(m<sup>3</sup>); *i*为上级渠道流量产生变化时的某一阶段, *i*  $\in$  *Z*,取值范围为 1~*n*;  $\beta$ 、*A* 及 *m* 分别为全断面衬砌渠道渗水损失修正系数、土壤透水性系数、土壤透水性指数; *L* 为上级渠道的输水长度(km);  $\Delta T_i$ 为第 *i* 阶段上级渠道的输水时间(s);  $Q_{Ni}$ 为第 *i* 阶段上级渠道的输水时间(s); *g*,为第 *i* 阶段上级渠道的输水时间(s); *g*,为第 *i* 阶段 上级渠道的输水净流量(m<sup>3</sup>/s); *j*为下级渠道编号,*j*  $\in$  *Z*,取值范围为 1~*J*;  $l_j$ 为第 *j* 条下级渠道的长度(km);  $t_j^{\text{on}}$ 、 $t_j^{\text{off}}$ 分别为第 *j* 条下级渠道的输水净流量输水的时间点(s);  $q_{Nj}$ 为第 *j* 条下级渠道的输水净流量(m<sup>3</sup>/s)。

2) 优化目标二的表达式为:

$$\min W = W_l + \sum_{j=1}^J q_{N_j} \left( t_j^{\text{off}} - t_j^{\text{on}} \right), \qquad (2)$$

式中:W为全灌区(含渠系渗漏水损失量)所需的灌 130

溉总水量(m<sup>3</sup>)。本研究假设两级渠系在输送灌溉水
 的过程中不存在其他水量损失。

3) 优化目标三的表达式为:

$$\min Var = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^{n} \left( \mathcal{Q}_{Gi} \cdot \mathcal{Q}_{ave} \right)^2 , \qquad (3)$$

式中: Var 为 n 个阶段上级渠道流量随时间的波动变 化; Q<sub>Gi</sub> 为第 i 个阶段上级渠道的运行毛流量(m<sup>3</sup>/s); Q<sub>ave</sub> 为 n 个阶段上级渠道毛流量的平均流量(m<sup>3</sup>/s)。 4) 基础表达式为:

 $q_{Gj} = q_{Nj} + \frac{\beta A l_j}{100 q_{Nj}^{m-1}}$  , (4)

$$Q_{Ni} = \sum_{j=1}^{J} q_{Gj} i f(T_i)$$
, (5)

$$Q_{Gi} = Q_{Ni} + \frac{\beta AL}{100Q_{Ni}^{m-1}} , \qquad (6)$$

$$\Delta T_{i=t_{k+1}^{\rm on}-t_{k}^{\rm on}}$$
 , (7)

$$T = \sum_{i=1}^{n} \Delta T_i , \qquad (8)$$

$$if(T_i) = \begin{cases} 1 , t_j^{\text{on}} \leqslant \sum_{i=1}^r \Delta T_i \leqslant t_j^{\text{off}} \\ 0, & \text{other} \end{cases}$$
, (9)

式中: $q_{Gj}$ 为第 *j* 条下级渠道的输水毛流量(m<sup>3</sup>/s);  $t_k^{on}$ 表示将第 *i* 阶段所有灌水的下级渠道的闸门开启 时间按照由小到大排序后得到的第 *k* 个开启时间(s),  $k \in \mathbb{Z}$ , 1 $\leq k < j$ ; *T* 为整个灌溉周期(s); *r* 为上级渠道 流量变化的某个时段,  $r \in \mathbb{Z}$ , 0 $\leq r \leq n_o$ 

5) 流量约束条件为:

$$\alpha_{11}Q_{\rm D} \leqslant Q_{Gi} \leqslant \alpha_{12}Q_{\rm D} , \qquad (10)$$

$$\alpha_{21}q_{Dj} \leqslant q_{Gi} \leqslant \alpha_{22}q_{Dj} , \qquad (11)$$

式中: $a_{11}$ 为上级渠道最小流量百分数(%); $a_{12}$ 为上 级渠道加大流量百分数(%); $a_{21}$ 为下级渠道最小流 量百分数(%); $a_{22}$ 为下级渠道加大流量百分数(%);  $Q_{\rm D}$ 为上级渠道的设计流量( ${\rm m}^3/{\rm s}$ ); $q_{Dj}$ 为下级渠道j的 设计流量( ${\rm m}^3/{\rm s}$ )。

6) 水量约束条件为:

$$W \leqslant W_{\max}$$
 , (12)

$$MS_j \leq q_{Nj}(t_j^{\text{off}} - t_j^{\text{on}})$$
 , (13)

式中: $W_{\text{max}}$ 为渠首最大供水量 ( $\mathbf{m}^3$ ); $S_j$ 为下级渠道 j的控制灌溉面积 ( $\mathbf{m}^2$ );M为灌水定额 ( $\mathbf{m}^3/\text{hm}^2$ )。

7) 时间约束条件为:

$$0 \leq t_j^{\text{on}} < t_j^{\text{off}} \leq T$$
, (14)

$$0 \leq \Delta T_i \leq T \quad . \tag{15}$$

模型中计算渠系输水渗漏水量、流量以及所采用 的渠道流量加大、最小系数参照《灌溉排水工程学》<sup>[19]</sup>。 1.2 粒子群算法(PSO)与天牛群算法(BSO)的主要 差异

天牛群算法是以天牛须搜索算法<sup>[20]</sup>为基础,借鉴

粒子群算法的寻优机制和整体框架所改进的一种群体智能算法<sup>[21]</sup>,解决了天牛须搜索算法在求解高维复杂问题时的局限性,补充了粒子群算法中单体粒子的寻优机制。2种算法在求解N维模型时的群体位置更新式方面存在差异。与传统粒子群算法不同,天牛群优化算法在群体位置更新式中引入了单体天牛"左右须"搜寻机制,在天牛群体位置趋向全域极值移动的同时,通过表征个体与极值间的关系反映其对下次群体位置更新的影响,其余计算式与求解流程相同。

#### 1.3 熵权-TOPSIS 评价模型

**TOPSIS** 评价法是一种逼近理想解的排序法,又称为优劣解距离法<sup>[22]</sup>。原理是通过计算不同处理下的各项指标值与理想解之间的距离,以此为基础进行打分、排序、综合评价。传统的**TOPSIS** 法对不同指标进行主观权重赋值,评价结果的科学性不足,而熵权法通过计算各项指标自身的信息熵来设定权重,有效避免了上述问题。本研究使用熵权法确定不同指标间的信息熵和权重,并结合**TOPSIS** 法评价不同算法的求解结果,筛选出整体性能最优的智能算法。

主要分析步骤如下:①分析整理待评价的样本数 据,构建判断矩阵;②应用极差变化法对判断矩阵进 行规范化处理;③求解指标变异度、信息熵,确定各 项指标的权重;④构建加权后的决策矩阵,并计算正、 负理想解;⑤基于欧氏距离计算各处理与正、负理想 解之间的距离;⑥计算不同处理的得分并进行排序, 筛选出最优结果。

## 1.4 研究区概况与参数设置

以河南省新乡市大功灌区为研究区域,以灌区内 的总干渠、分干渠两级渠系为研究对象。灌区内年平 均降水量为565.7 mm,降水年际变化较大,7—9月 降水量占全年总降水量的60%,灌溉水源主要为黄河 水,灌区年平均引水量为3143.18万m<sup>3</sup>。大功灌区 现状渠系水利用系数为0.560,灌溉水利用系数为 0.495,农业用水效率偏低。以灌区渠系设计报告和 2020 年某次小麦的灌溉数据(灌水定额为 1 200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)为基准,提取并简化全灌区总干渠、分干渠 两级渠系,整理编号后的结果如表 1 所示。依据灌区 实际的用水场景将其划分为 18 个配水对象,分别为:场景 1 (渠道 12-14)、场景 2 (渠道 1-4)、场景 3 (渠 道 5-8)、场景 4 (渠道 5-9)、场景 5 (渠道 10-14)、场景 6 (渠道 9-14)、场景 7 (渠道 5-11)、场景 8 (渠 道 12-21)、场景 9 (渠道 1-8)、场景 10 (渠道 1-9)、场景 11 (渠道 5-14)、场景 12 (渠道 12-21)、场景 13 (渠道 1-11)、场景 14 (渠道 10-21)、场景 15 (渠 道 9-21)、场景 16 (渠道 1-14)、场景 17 (渠道 5-21)、场景 18 (渠道 1-21)。配水模型及求解算法的相关参 数详见表 2。

表1 渠系基础参数汇总

Га	bl	e l		Design	paramete	ers of	canal	system	
----	----	-----	--	--------	----------	--------	-------	--------	--

渠道	泊至力物	汇法米利	设计流量/	灌溉	渠系
编号	朱余石林	朱坦尖望	$(m^3 s^{-1})$	面积/hm <sup>2</sup>	长度/km
0	总干渠	总干渠	20-70	96 733	160.54
1	东干渠	分干渠	9.20	7 000	16.70
2	西一干渠	分干渠	8.40	6 400	23.38
3	新一干渠	分干渠	11.24	8 533	14.00
4	新二干渠	分干渠	3.30	2 533	2.50
5	长垣一干渠	分干渠	8.38	7 133	12.75
6	长垣二干渠	分干渠	2.60	2 000	32.94
7	长垣三干渠	分干渠	5.37	4 067	27.97
8	瓦岗干渠	分干渠	10.53	7 733	24.80
9	柳青干渠	分干渠	9.30	6 867	42.50
10	柳里干渠	分干渠	5.05	3 733	19.37
11	泥马庙干渠	分干渠	2.76	2 067	12.00
12	五干排干渠	分干渠	6.14	4 533	25.69
13	城关干渠	分干渠	18.78	13 867	22.23
14	堤南分干渠	分干渠	1.67	1 200	8.63
15	内黄一干渠	分干渠	1.30	933	6.42
16	内黄二干渠	分干渠	3.10	2 267	11.30
17	内黄三干渠	分干渠	2.40	6 933	9.20
18	内黄四干渠	分干渠	9.40	1 800	6.42
19	内黄五干渠	分干渠	3.40	2 533	10.17
20	内黄六干渠	分干渠	3.10	2 267	8.50
21	内黄七干渠	分干渠	3.20	2 333	13.27

表 2 配水模型与算法参数汇总

Table 2	The valu	e of j	parameters	in	optimization	model	and	algorithm
---------	----------	--------	------------	----	--------------	-------	-----	-----------

参数	取值	参数	取值
干渠渠道最小流量百分数 α11	0.40	定义域内初始解个数	5 000
干渠渠道加大流量百分数 α12	1.25	权重 λ, ω	0.80
支渠渠道最小流量百分数 α <sub>21</sub>	0.60	个体学习因子 c1 与群体学习因子 c2	0.90
支渠渠道加大流量百分数 a22	1.30	最大迭代次数	300
土壤透水性系数A	1.90	初始左右须间距值 $d^0$ 与初始步长值 $\sigma^0$	1.20
土壤透水性指数 m	0.40	最大惯性权重 $\omega_{\max}$	0.90
全断面衬砌渠道渗水损失修正系数β	0.10	最小惯性权重 $\omega_{\min}$	0.40

## 2 结果与分析

## 2.1 基于熵权-TOPSIS 法的 2 种算法评价结果 基于天牛群算法和粒子群算法分别求解 18 种用

水场景下的多目标两级渠系优化配水模型的计算结 果如表3所示。为客观评价2种算法求解结果的优劣, 以迭代次数、算法复杂度(算法计算流程的繁琐程度)、 计算渗漏水量、计算总水量、计算干渠流量波动及计 算配水时长 6 项参数为指标,以 2 种算法计算结果的 平均值为基准数据,构建 TOPSIS 评价模型。其中, 计算渗漏水量、总水量、干渠流量波动及配水时长可 反映算法的寻优能力,计算结果越小表明算法的寻优 能力越强。迭代次数和算法复杂度可体现算法的寻优 效率,迭代次数越少、复杂度越低表明算法的寻优效 率越高。

表 3 2 种算法求解配水模型的优化目标结果

Table 3	Summary of the results of the c	ptimization objectives	of the water distribution	model solved by the two algorithms.
14010 0	building of the results of the c	pullinguation objectives	of the water around another	model solved by me the agommins

配水对象	处理	迭代次数	复杂度	渗漏水量/万 m <sup>3</sup>	总水量/万 m <sup>3</sup>	干渠流量波动	配水总时长/d	下级渠道数量
	PSO	295	1	144.09	2 499.72	16.94	8.04	
1	BSO	180	3	144.01	2 496.04	16.90	8.32	3
	基准数据	237.5	2	144.05	2 497.88	16.92	8.18	
	PSO	150	1	60.88	3 006.96	85.29	8.73	
2	BSO	120	3	61.78	2 997.84	77.53	9.10	4
	基准数据	135	2	61.33	3 002.40	81.41	8.91	
	PSO	295	1	108.07	2 624.89	60.33	9.67	
3	BSO	150	3	107.51	2 619.51	61.75	9.63	4
	基准数据	222.5	2	107.79	2 622.20	61.04	9.65	
	PSO	295	1	157.76	3 529.44	90.03	9.87	
4	BSO	290	3	157.20	3 498.83	103.09	10.16	5
	基准数据	292.5	2	157.48	3 514.13	96.56	10.01	
	PSO	295	1	181.47	3 255.06	36.53	8.89	
5	BSO	130	3	180.06	3 228.07	33.76	8.83	5
	基准数据	212.5	2	180.77	3 241.57	35.14	8.86	
	PSO	150	1	225.11	4 097.59	80.83	8.71	
6	BSO	170	3	225.13	4 100.33	79.14	8.76	6
	基准数据	160	2	225.12	4 098.96	79.98	8.73	
	PSO	295	1	199.33	4 312.43	120.23	11.15	
7	BSO	180	3	203.55	4 493.71	139.25	10.76	7
	基准数据	237.5	2	201.44	4 403.07	129.74	10.95	
	PSO	295	1	187.23	2 492.48	72.88	8.90	
8	BSO	295	3	187.26	2 487.97	76.42	8.91	7
0	基准数据	295	2	187.25	2 490.22	74.65	8.90	
	PSO	265	1	174.96	5 623.37	277.94	9.49	
9	BSO	185	3	176.45	5 651.33	288.75	9.77	8
	基准数据	225	2	175.71	5 637.35	283.34	9.63	
	PSO	270	1	239.94	6 524.49	295.60	11.85	
10	BSO	220	3	247.76	6 549.28	317.70	14.01	9
	基准数据	245	2	243.85	6 536.88	306.65	12.93	
	PSO	290	1	343.64	6 756.28	255.49	10.38	
11	BSO	180	3	347.28	6 930.08	354.35	10.45	10
	基准数据	235	2	345.46	6 843.18	304.92	10.42	10
	PSO	280	1	343 55	4 993 30	92.21	12.01	
12	BSO	150	3	348 38	5 161 63	115 69	11.72	10
	基准数据	215	2	345.97	5 077.47	103.95	11.86	
	PSO	295	1	284.17	7 270 28	344.98	12.17	
13	BSO	160	3	284 19	7 308 81	370.13	12.32	11
	基准数据	227.5	2	284.18	7 289.55	357.56	12.24	
	PSO	295	1	371 71	5 790 17	185 30	11 57	
14	BSO	250	3	361.93	5 839 74	214 94	10.48	12
	基准数据	272.5	2	366.82	5 814.96	200.12	11.02	
	PSO	200	1	463.81	6 659 47	190.44	15.17	
15	BSO	100	3	493 79	7 658 84	246.65	13.65	13
15	基准数据	150	2	478.80	7 159 15	218.54	14.41	15
	PSO	295	1	559.13	10 014 09	90.75	26.60	
16	RSO	215	3	603.04	11 287 36	136.27	25.36	14
10	基准粉据	215	2	581.08	10 650 72	113 51	25.98	17
	PSO	280		692.18	9 424 33	75.20	23.53	
17	BSO	240	3	759 74	10 681 10	113 70	24.47	17
1/	基准粉挥	240	2	725.96	10 052 71	94.49	24.75	17
	空中 秋油 PSO	200	1	814 22	12 525 47	272.74	24.01	
18	RSO BSO	293 160	1	044.32 872 17	12 333.47	213.74	20.70	21
10	D3U 其准粉起	227 5	5 7	012.41	13 090.28	205 79	27.24	∠1
	至但奴惦	221.3	2	030.40	12 013.8/	293.18	27.01	





Fig.1 Difference in the number of iterations of the two algorithms with different dimensional models

#### 2.3 不同用水场景下 2 种算法的计算结果评价

使用熵权法计算指标权重,并结合 TOPSIS 法确 定 2 种算法的得分与排序情况。通过评价不同用水场 景下的计算结果,判别 2 种算法的性能表现。2 种算 法在 18 种配水场景下的评价得分差如图 2 所示。当 下级渠道数量未超过 5 条时,天牛群算法的整体表现 优于粒子群算法,但随着下级渠道数量的增加,后者 的性能表现明显优于前者。





Fig.2 Difference in the comprehensive evaluation scores of the two algorithms under different water distribution scenario 2.4 不同用水场景下 2 种算法的综合性能评价 由图 3 可知, 2 种算法的计算结果基本一致,下

由表 4 可知, 粒子群算法的整体性能优于天牛群 算法。结合 2 种算法的计算流程可知, 天牛群算法在 群体位置更新公式中引入了"左右须"寻优机制, 这 一机制使得整体的寻优效率相比粒子群算法有所提 升, 不同维度下配水模型的迭代次数均明显少于粒子 群算法。然而, 通过直观对比表 3 中 3 项模型优化目 标的计算结果可知, 粒子群算法的计算结果更为接近 最优解, 基于熵权-TOPSIS 法的综合评价结果也证明 了这一结论。原因可能是天牛群算法寻优机制中的 "左右须间距"参数的初始值设定不合理, 导致天牛 群算法寻优时的步长过大, 从而导致错过或忽略了较 优解。在后续研究中, 可通过调节初始参数的设定或 引入衰减因子等措施解决这一问题。

#### 2.5 多目标两级渠系配水模型求解结果分析

2.5.1 不同用水场景下的 2 种算法计算结果的差异

分别计算 2 种算法在不同用水场景下的渠道流 量、配水时长以及启、闭配水时间点的求解值之差。 由图 3 可知, 2 种算法的计算结果基本一致,下级渠 道流量和配水时长差异较小。在部分场景下,由于求 解模型时不同渠道间灌溉顺序的差异会导致在下级 渠道配水流量与配水时长差值较小的同时,启、闭时 间点的差异较大。随着下级渠道数量和计算维度的增 加,2 种算法的计算结果差异性也会随之增加。

表 4 不同用水场景下 2 种算法的综合评价结果

```
Table 4 Comprehensive evaluation analysis of the two
```

algorithms	under different	water distribution	scenario

U					
处理	正理想解距离(D <sup>+</sup> )	负理想解距离(D)	综合得分指数	排序	
MOPSO	0.65	0.76	0.54	1	
MOBSO	0.76	0.65	0.46	3	
基准值	0.50	0.50	0.50	2	
					-

此外,下级渠道设计流量会对2种算法求解结果的差异产生影响。以2种算法计算结果的差值超过了 渠道设计流量和理论配水时长的10%为较大差异值 渠道,其中小流量渠道(设计流量较小,渠道编号为 4,6,11,14~17,19~21)占所有较大差异值渠道数 量的63%,这是由于设计流量较小时所需要的计算精



注  $\Delta Q$  表示 2 种算法分别计算得出的各渠道流量之差 (m<sup>3</sup>/s);  $\Delta T$  表示 2 种算法分别计算得出的各渠道配水时长之差 (d);  $t_1$  表示 2 种算法分别计算得出的各渠道开闸时间点之差 (d);  $t_2$  表示 2 种算法分别计算得出的各渠道关闸时间点之差 (d); 以上差值均为绝对值,且图中"对象"后的数字为下级渠道的数量。



Fig.3 Summary of the differences in the solution results of different water distribution scenario of two algorithms

2.5.2 计算结果中配水流量和理论时间的共性规律

以下级渠道的设计流量和理论配水时间为参考, 对 2 种算法、18 个配水场景计算结果的共性特征进 行分析,如图 4 所示。优化配水方案中的下级渠道流 量不受求解算法类别、下级渠道数量的影响,优化后 的下级渠道运行流量的范围稳定在各下级渠道设计 流量与 1.3 倍的设计流量之间,概率峰度为 1.2 倍的 下级渠道设计流量。同理,优化后的下级渠道配水时 长范围介于各下级渠道理论配水时长与0.8倍的理论 配水时长之间,概率峰度为0.8倍的理论配水时长。 使用不同算法求解基于多个对象的多目标两级渠系 配水模型的计算结果具有共性结论,即下级渠道流量 与配水时长存在一个较优解范围。







## 3 结 论

 "左右须"寻优机制的引入使天牛群算法的 计算速度较粒子群算法最高可提升 56%,但由于"左 右须间距"等初始参数的设置问题,随着计算维度的 增加,粒子群算法的整体性能优于天牛群算法。

 2)求解出的不同用水场景下的配水方案存在共 性规律,即优化后的下级渠道流量和配水时间的范围 分别为:[设计流量,1.3 倍的设计流量]、[0.8 倍的理 论配水时间,理论配水时间]。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

#### 参考文献:

 李睿环, 郭萍, 张冬梅. 基于不确定性的渠系水资源优化配置[J]. 人民黄河, 2015, 37(11): 139-141, 148.
 LI Ruihuan, GUO Ping, ZHANG Dongmei. Optimal water allocation of canal systems under uncertainty[J]. Yellow River, 2015, 37(11): 139-141, 148.

[2] 王丽萍, 任宇, 邱启仓, 等. 多目标进化算法性能评价指标研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(8): 1 590-1 619.

WANG Liping, REN Yu, QIU Qicang, et al. Survey on performance indicators for multi-objective evolutionary algorithms[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(8): 1 590-1 619.

- [3] 褚宏业,王莹,文俊,等.遗传算法和粒子群算法求解渠系多目标优 化模型[J]. 中国农村水利水电,2015(4):9-11,17.
   CHU Hongye, WANG Ying, WEN Jun, et al. Genetic algorithm and PSO algorithm for solving canal system multiobjective optimization model canal[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(4): 9-11, 17.
- [4] 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.
- [5] 韩宇, 孙志鹏, 黄睿, 等. 基于回溯搜索算法的灌区优化配水模型[J].
   工程科学与技术, 2020, 52(1): 29-37.
   HAN Yu, SUN Zhipeng, HUANG Rui, et al. Optimized water

distribution model of irrigation district based on the backtracking search algorithm[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1): 29-37.

- [6] SUN Z P, CHEN J, HAN Y, et al. An Optimized water distribution model of irrigation district based on the genetic backtracking search algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 145 692-145 704.
- [7] 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.
- [8] 韩宇, 邵梦璇, 李彤妹, 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): 999-1 006.
  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): 999-1 006.
- [9] 廖列法,杨红.天牛须搜索算法研究综述[J].计算机工程与应用, 2021,57(12):54-64.

LIAO Liefa, YANG Hong. Review of beetle antennae search[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(12): 54-64.

[10] 田桂林, 苏枫, 邹红, 等. 基于天牛群优化算法的灌区渠系配水研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 96-103.

TIAN Guilin, SU Feng, ZOU Hong, et al. Calculating water distribution in irrigation channel networks using the beetle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 96-103.

[11] 赵思腾,师尚礼,李小龙,等.基于熵权-TOPSIS 模型筛选陇中旱 作区适宜玉米轮作的土壤可持续系统[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 997-1 005.

ZHAO Siteng, SHI Shangli, LI Xiaolong, et al. Application of TOPSIS based on entropy weight to screen soil sustainable systems suitable for corn rotation in the arid region of central Gansu[J]. Acta Agrestia Sinica,

#### 2019, 27(4): 997-1 005.

44(8): 17-21, 33.

- [12] 虞娜, 吴昌娟, 张玉玲, 等. 基于熵权的 TOPSIS 模型在保护地番茄 水肥评价中的应用[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(4): 456-460. YU Na, WU Changjuan, ZHANG Yuling, et al. Application of TOPSIS model method based on entropy weight to evaluate coupling effect of irrigation and fertilization of greenhouse tomato[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(4): 456-460.
- [13] 张芮,李红霞,高彦婷,等. 基于熵权-TOPSIS 模型的黄土高原半干旱 区玉米覆膜类型综合评价[J]. 甘肃农业大学学报, 1-14[2023-08-10]. ZHANG Rui, LI Hongxia, GAO Yanting, et al. Comprehensive evaluation of film mulching types of maize in semi-arid area of loess plateau based on entropy weight - TOPSIS model[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 1-14[2023-08-10].
- [14] 岳焕芳, 郭芳, 王铁臣, 等. 基于熵权的 TOPSIS 模型在黄瓜适宜抗 蒸腾产品评价中的应用[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(2): 49-54.
   YUE Huanfang, GUO Fang, WANG Tiechen, et al. Application of TOPSIS model based on entropy weight to evaluate coupling effect of suitable anti-transpiration products on cucumber[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2022, 35(2): 49-54.
- [15] 王艳, 雷淑珍. 黄河流域资源环境承载力评价研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(8): 17-21, 33.
   WANG Yan, LEI Shuzhen. Evaluation of resources and environment carrying capacity of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2022,
- [16] 雪宝,汤骅,程泉,等. 基于熵权 TOPSIS 法的灌溉用水效率评价[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 82-89, 107.
   XUE Bao, TANG Hua, CHENG Quan, et al. Evaluating irrigation water efficiency using entropy weight-TOPSIS method: A case study[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(5): 82-89, 107.
- [17] 张立志,王昕,谢文鹏,等.基于组合权重-TOPSIS 法的灌区节水评价[J]. 灌溉排水学报,2022,41(S2):65-70.
   ZHANG Lizhi, WANG Xin, XIE Wenpeng, et al. Evaluation of water saving in irrigation district based on combination weight-TOPSIS method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(S2): 65-70.

[18] 赵钦, 白清俊, 聂坤堃, 等. 基于 NSGA-III算法与 TOPSIS 决策下的区域水资源多目标优化配置[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(12):1 233-1 240.

ZHAO Qin, BAI Qingjun, NIE Kunkun, et al. Multi-objective optimization allocation of regional water resources based on NSCA-III algorithm and TOPSIS decision[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(12): 1 233-1 240.

- [19] 史海滨,田军仓,刘庆华,等. 灌溉排水工程学[M]. 北京:中国水 利水电出版社, 2006.
- [20] JIANG X Y, LI S. BAS: Beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. International Journal of Robotics and Control, 2018, 1(1): 1-5.
- [21] WANG T T, YANG L, LIU Q A. Beetle swarm optimization algorithm: Theory and application[J]. Filomat, 2020, 34(15): 5 121-5 137.
- [22] SHIH H S, SHYUR H J, LEE E. An extension of TOPSIS for group decision making[J]. Mathematical and Computer Modeling, 2007, 45(7/8): 801-813.

## Comprehensive Evaluation of Two Canal Systems Water Distribution Model Solution Algorithms Based on Entropy Weight-TOPSIS Approach

LU Deyou<sup>1</sup>, TIAN Guilin<sup>2,3\*</sup>, YANG Bo<sup>2</sup>, QIN Jingtao<sup>2</sup>

(1. Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou 450011, China;

2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/

Key Laboratory of Water saving Irrigation Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] To investigate the performance difference between the Particle Swarm algorithm and the Beetle Swarm Optimization algorithm in solving the water distribution model of a two-level canal system in irrigation districts, as well as the common characteristics of the optimized water distribution schemes. [Method] This study takes the two-level canal system of Dagong Irrigation District as the research object, and divides it into eighteen water distribution scenarios according to different water use situations in the irrigation district. The total amount of irrigation water, the amount of water leakage and the fluctuation of the flow rate of the main canal are used as the optimization objectives. The decision-making variables are the flow rate of the sub-main canals and the opening and closing time points of the water transmission. Construct a multi-objective two-level canal distribution model, solve it using the Particle Swarm Optimization algorithm and the Beetle Swarm Optimization algorithm respectively, and comprehensively evaluate the performance of the two algorithms based on the solution results combined with entropy weight-TOPSIS method. [Result] The evaluation results of entropy weight-TOPSIS method show that the performance of the Particle Swarm Optimization algorithm is better than the Beetle Swarm Optimization algorithm, but the computational speed of the latter is significantly faster than that of the former. In addition, the water distribution schemes solved by the two algorithms under the same water use situation are close to each other, and there is a common law between the optimized water distribution flow and duration of the sub-main canal. [Conclusion] The results of the study can provide suggestions for the management of water distribution in two canal systems in irrigation districts and provide a basis for selection algorithms.

**Key words:** irrigation district; canal system water distribution; the particle swarm optimization algorithm; the beetle swarm optimization algorithm; entropy weight-TOPSIS evaluation model

责任编辑:韩洋

# 关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动,每年评选优秀论文 10 篇,每篇奖励 800 元, 并颁发获奖证书,届时将在期刊网站首页展示,同时微信公众号推送。欢迎广大 读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部