

# 基于改进粒子群算法的两级渠道 水资源优化配置

王庆杰<sup>1</sup>,岳春芳<sup>1</sup>,李艺珍<sup>1</sup>,刘小飞<sup>2</sup>

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆乌鲁木齐830052;2.中国电建集团贵阳勘测设计研究院,贵州贵阳550081)

**摘要:**现有的渠系优化配水模型在减少配水损失方面效果显著,但配水过程中仍存在输水不稳定、弃水量大等不足。在配水过程中将“组间续灌、组内轮灌”的渠道配水方式变更为“组间轮灌、组内续灌”,以配水过程中渗漏损失最小为目标建立渠系配水模型,应用改进的粒子群算法求解,在寻找最优配水方案的同时均一化处理各配水方案中轮灌组内渠道的配水时间。选取张掖市西浚灌区为研究对象,研究结果表明:在保证渠道过水能力和需水要求的前提下,优化结果与该时段灌区的实际配水计划相比,配水时间减少了13.4 d,渠系水利用系数由0.65提高到了0.828,配水周期内上级渠道配水稳定,各轮灌组内渠道同时开启和关闭,减少了渠道弃水。该模型能够实现集中、高效配水,可为灌区管理部门制定配水计划提供决策。

**关键词:**水资源优化配置;渠系配水;配水编组;粒子群算法;模拟退火算法;遗传算法

**中图分类号:**S274.3 **文献标志码:**A

## Optimal allocation of water resources with two-level channel based on improved particle swarm optimization algorithm

WANG Qing-jie<sup>1</sup>, YUE Chun-fang<sup>1</sup>, LI Yi-zhen<sup>1</sup>, LIU Xiao-fei<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Guiyang Survey and Design Institute, China Electric Power Construction Group, Guiyang, Guizhou 550081)

**Abstract:** The existing water distribution model of the channel system is very effective in reducing the loss of water distribution, but there are still some shortages in the process of water distribution, such as the instability of water transportation and the large amount of abandoned water. In this paper, the water distribution mode of “inter-group continued irrigation and intra-group rotation irrigation” in water distribution process was changed into “inter-group rotation irrigation and intra-group continued irrigation”. The minimum leakage loss in water allocation process was taken as the goal to establish the water allocation model for channel system, and an improved particle swarm optimization algorithm was applied to solve it to find the optimal water distribution scheme and homogenization of the water allocation time of the rotation irrigation channel in each irrigation scheme. The Zhangye West dredge irrigation area was selected as the research object, and the results showed that on the premise of ensuring the need of actual operation, Compared with the actual water distribution plan at the same period, the cycle reduced 13.4 days and the canal water use efficiency improved from 0.651 to 0.828. During the water distribution week, the allocated discharge in superior canal was equalization. In each irrigation group, the channels worked at the same time, which reduced the abandoned water in the channels. In conclusion, this model can realize centralized and efficient water distribution, and the decision-making can be provided for the irrigation management department to make optimal water distribution plan.

**Keywords:** optimal allocation of water resources; water distribution in channel system; water distribution grouping; particle swarm optimization algorithm; simulated annealing algorithm; genetic algorithm

农业高效节水是干旱地区经济社会可持续发展的命脉,灌区水管理过程中田间节水灌溉技术如膜下滴灌技术、低压管道灌技术、喷灌技术等节水技术较为成熟,而渠系输水这一环节的管理相对薄弱,配水过程中输水渗漏损失和无效弃水量较多,渠系优化配水技术的研究对提高灌区管理水平和实现农业高效节水有重要意义。

前人对渠系优化配水技术做了大量研究,马孝义等<sup>[1]</sup>、赵文举等<sup>[2]</sup>以输水渗漏损失最小为优化目标,确定各下级渠道的配水开始时间、配水流量;吕宏兴等<sup>[3]</sup>以输水时间最短为目标,优化确定轮灌组内下级渠道的数目,并均一化处理轮灌组间的输水时间。宋松柏等<sup>[4]</sup>以轮灌组引水持续时间差异最小为目标优化渠道的配水流量;张国华等<sup>[5]</sup>、刘照等<sup>[6]</sup>以轮灌组引水持续时间差异最小和配水时间最短为目标建立多目标渠系配水模型,实现配水过程中上级渠道水流平稳、闸门调节次数少的目的。

已有的模型能够较好地解决配水过程中的水量渗漏损失问题,但在配水过程中无效弃水和输水流量稳定控制方面,这些研究通常以各轮灌组引水持续时间差最小或配水期内上级渠道配水流量的方差最小为优化目标,其结果对减少闸门调节次数和无效弃水有一定的效果,但仍存在进一步的改进空间。在模型求解方面,许多学者研究了基于遗传算法<sup>[7-9]</sup>、自由搜索算法<sup>[10]</sup>、粒子群算法<sup>[6,11]</sup>等两级渠道(指渠系中干一支渠、支一斗渠或斗一农渠两级输水渠道)优化配水模型的求解方法,其中遗传算法具有较强的全局搜索能力,但大多依靠经验确定参数,粒子群算法具备需要确定的参数少、简单容易实现的优点,但容易求出局部最优解,搜索精度低。

针对上述问题,本文采用“组间轮灌、组内续灌”的配水方式建立渠系水资源配置模型,引入遗传算法中的交叉、变异和模拟退火思想改进的粒子群算法求解模型,旨在提高渠系配水过程中上级渠道配水流量的稳定性,提高渠系优化配水工作的效率和精度。

## 1 渠道优化配水模型的建立

### 1.1 建模思想

灌溉渠系优化配水是指在渠道过水能力一定的条件下,为满足作物的某次用水需求,采取一定的方法和技术,对配水渠道所辖的下级渠道进行编组排序,使配水过程中各引水口的引水和停水衔接与进水闸门的调控时间相匹配,在满足各用水单元

需求的同时,将水量损失降到最低<sup>[12]</sup>。本文从轮灌编组的角度出发,考虑下级渠道引水流量大小及配水时间变化,按“轮灌组间实行轮灌、轮灌组内续灌”的思路将下级渠道划分到轮灌组中,下级渠道上各出水口按“定流量、变历时”从上级渠道引水。考虑模型的通用性,以上、下两级渠道输水渗漏损失最小为目标,建立模型。图1为两级渠道的简化图。

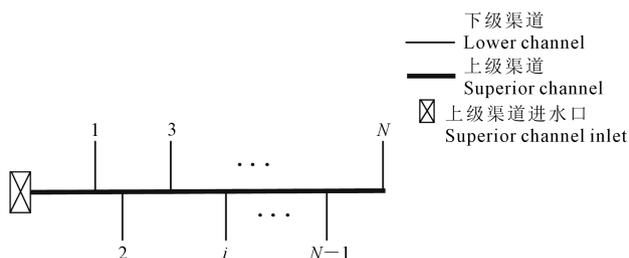


图1 两级渠道简化示意图

Fig.1 A simplified schematic of a two level channel

图2为下级渠道的配水过程图,图中每一个轮灌组内下级渠道的配水时间相同,各轮灌组之间按顺序依次配水,各时刻下级渠道的配水总量等于上级渠道的来水流量。

### 1.2 模型参数的确定

1.2.1 轮灌分组数计算 设上级渠道入水口流量为 $Q_s$ ,其上共有 $N$ 个下级渠道,各下级渠道的引水设计流量为 $q_j$ ,则轮灌组为:

$$\text{floor}[N/(Q_s/\bar{q})] \leq M \leq \text{ceil}[N/(Q_s/\bar{q})] \quad (1)$$

式中, $M$ 为轮灌组数; $\bar{q}$ 为下级渠道设计流量的平均值;floor为向下取整函数;ceil为向上取整函数。

### 1.2.2 各轮灌组内渠道的输水时间、输水流量调整

以支一斗两级渠道配水为例,灌溉时支渠输水量由各斗渠需水量和支渠输水损失两部分组成,从两方面考虑轮灌组 $i$ 的配水时间,即:配水过程中无水量损失时,支渠完成配水任务所必须消耗的时间 $t_i$ ,以及输送渗漏损失水量而增加的输水时间 $t_i'$ 。在第 $i$ 轮灌组中所有斗渠完成配水任务后,第 $i+1$ 轮灌组开始配水,在各斗渠的引水持续时间不同的情况下,要保证 $i$ 轮灌组间所有配水渠道同时结束输水任务,采取如下措施:

设第 $i$ ( $i=1,2,\dots,M$ )轮灌组有 $Y$ ( $Y>2$ )条斗渠,各斗渠需水量为 $W_j$ ( $j=1,2,\dots,N$ ),支渠闸门进水口流量 $Q_s$ ,支渠输水长度为 $L$ ,不考虑支渠的输水损失情况下第 $i$ 轮灌组的引水时间 $t_i$ 为:

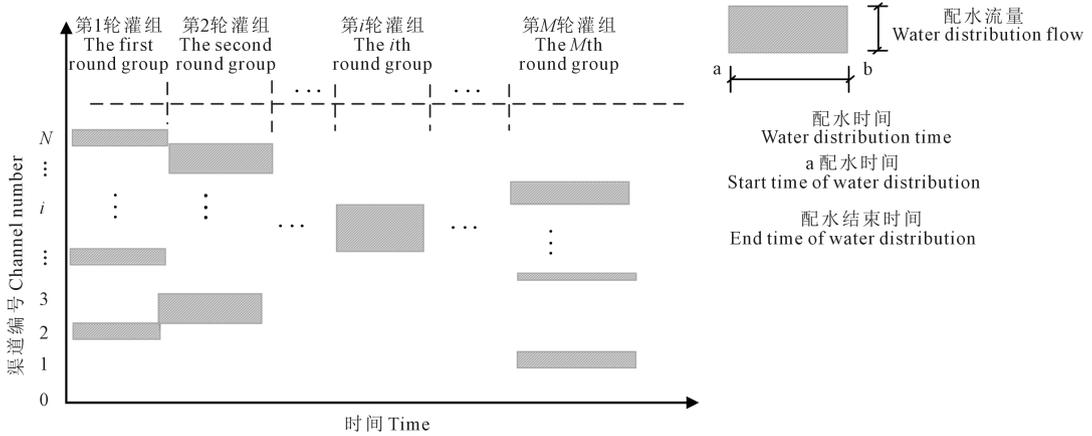


图 2 下级渠道配水过程

Fig.2 Water distribution process in the lower channel

$$t_i = \frac{\sum_{j=1}^Y W_j}{Q_s} \quad (2)$$

根据输水渗漏损失经验公式<sup>[13]</sup>, 输送渗漏损失水量而增加的输水时间  $t_i^s$  确定方式见式(3), 其中  $A, m$  分别为渠床透水系数和透水指数,  $\beta$  为渠道采取防渗措施后渗漏水量的折减系数:

$$t_i^s = \frac{\beta A L Q_s^{1-m} t_i 100^{-1}}{Q_s} \quad (3)$$

$i$  轮灌组内所有斗渠同时关闭, 意味着轮灌组内所有斗渠输水时间相同且等于支渠实际输水时间  $t_i^*$ ,  $t_i^*$  及  $i$  轮灌组内斗渠  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 的实际配水流量  $q_j^*$  计算见式(4)、(5)

$$t_i^* = t_i + t_i^s \quad (4)$$

$$q_j^* = \frac{w_j}{t_i^*} \quad (5)$$

### 1.3 目标函数

设  $L_j$  为斗渠的输水长度, 变量  $x_{ij}$  为斗渠  $j$  划分的轮灌组情况, 当  $x_{ij} = 1$ , 表示斗渠  $j$  被编入轮灌组  $i$  中, 否则  $x_{ij} = 0$ ; 以斗渠和支渠渗漏损失  $Z$  最小为目标建立目标函数, 其表达式为:

$$Z = \text{Min} \sum_{i=1}^M (\beta A L Q_s^{1-m} t_i^* / 100 + \sum_{j=1}^N \beta A L_j (q_j^*)^{1-m} t_i^* / 100 x_{ij}) \quad (6)$$

### 1.4 约束条件

1) 轮期约束: 所有轮灌组的引水时间之和不大于轮灌周期  $T$ 。

$$\sum_{i=1}^M t_i^* \leq T \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

2) 水量约束: 渠道配水流量与引水时间的乘积应等于该渠道的配水量。

$$W_j = q_j^* t_i^* \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

3) 水量平衡约束: 轮灌组内所有斗渠的流量之和不大支渠的实际配水流量。

$$\sum_{j=1}^N q_j^* x_{ij} \leq Q_s \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

4) 斗渠过水能力约束: 任一个斗渠的配水流量应在其设计流量的 0.6 ~ 1.2 倍之间。

$$0.6q_j \leq q_j^* \leq 1.2q_j \quad (10)$$

5) 出水口状态约束: 一个斗渠只能划分到一个轮灌组中。

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

6) 0-1 约束: 即  $x_{ij} = 0, 1$ 。

## 2 基于改进粒子群算法的模型求解

求解上述模型时存在几十个决策变量, 约束条件也达数百个以上, 优化算法寻优过程中存在众多不满足可行解的大搜索空间, 因此算法的选择、约束条件的处理方式、编码设计等对引导算法向极小的渠系流量约束可行域收敛, 从而找到最优的配水方案起关键作用。

粒子群算法 (Particle swarm optimization algorithm, PSO) 是 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种群智能的随机搜索算法。它的思想是所有粒子通过向个体最优粒子信息学习和全局最优粒子信息学习, 以实现整体向最优位置收敛的目的<sup>[14]</sup>。PSO 算法具有收敛速度快、确定参数少、容易实现的优点, 但其容易陷入局部最优解, 为此通过定义运算符在 PSO 算法框架中融入模拟退火思想<sup>[15-16]</sup>和遗传算法中交叉变异算子两方面来改进粒子群算法。改进后的算法由提高、选择交叉、变异三部分组成<sup>[17]</sup>:

## 2.1 提高算子

在粒子每一次迭代中以一定的概率接受适应度较差的粒子作为全局最优粒子,并通过公式(14)、(15)实现粒子群的提高。

2.1.1 更新全局最优粒子 设 $N$ 维空间中,有 $M$ 个粒子组成粒子群,其中第 $i$ 个粒子 $pop_i$ 在 $N$ 维度空间中的位置 $pop_i = (pop_{i1}, pop_{i2}, \dots, pop_{iN})$ ,速度 $V_i$ 为每次迭代中粒子移动的距离, $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$ ,每个粒子的位置就是一个潜在解,用适应度函数衡量粒子的优劣,迭代 $t$ 次后 $i$ 粒子迄今为止搜索到的最优位置(个体最优)为 $gbest_i$ ,整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置(全局最优)为 $zbest$ , $zbest$ 的适应度为 $F(zbest)$ , $T$ 为温度值,采用 Boltzmann 方程<sup>[18]</sup>计算各 $gbest_i$ 的适配值 $TF(gbest_i)$ ,用轮盘赌策略从所有 $gbest_i$ 中更新全局最优粒子 $zbest$ ,公式如下:

$$TF(gbest_i) = \frac{\exp(-(F(gbest_i) - F(zbest))/T)}{\sum_{i=1}^M \exp(-(F(gbest_i) - F(zbest))/T)} \quad (12)$$

$$zbest = \begin{cases} gbest_i & \text{rand}() \leq TF(gbest_i) \\ zbest, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

2.1.2 粒子的速度和位置更新 全局最优粒子更新完成后,采用以下公式实现群体中所有粒子的速度、位置更新。

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (gbest_i - pop_i(t)) + c_2 r_2 (zbest - pop_i(t)) \quad (14)$$

$$pop_i(t+1) = pop_i + v_i(t+1) \quad (15)$$

式中, $\omega$ 为压缩因子; $c_1, c_2$ 为学习因子; $r_1, r_2$ 为(0, 1)的随机数; $v_i \in [-v_{imax}, v_{imax}]$ , $v_{imax}$ 为常数。

## 2.2 算数交叉、变异算子

2.2.1 算数交叉算子 采用洗牌交叉方式,依据交叉概率 $Pc$ 对任意两个粒子进行两两杂交,然后用产生的子代粒子代替父代粒子,形成一个新的粒子群。假定 $pop_i, pop_j$ 是在第 $t$ 代粒子群中随机确定两个交叉粒子, $r$ 为 $N$ 个0~1之间的随机数组成的向量,则交叉处理后的粒子 $pop_i^*, pop_j^*$ 按下式计算:

$$\begin{cases} pop_i^* = rpop_j + (1-r)pop_i \\ pop_j^* = rpop_i + (1-r)pop_j \end{cases} \quad (16)$$

2.2.2 变异算子 在算数交叉运算的基础上,随机选取一个粒子 $pop_i$ ,根据变异概率 $Pm$ 改变一个或几个 $j$ 维方向上的分量 $pop_{ij}, j \in (1, N)$ 。设 $pop_i$ 是第 $t$ 代粒子群中随机确定的变异粒子, $(A, B)$ 为 $pop_{ij}$ 的取值范围, $r$ 为(0,1)之间的随机数, $C$ 为最大迭代次数,第 $t+1$ 代粒子的 $pop_{ij}^*$ 按下式计算:

$$\begin{cases} pop_{ij}^* = pop_{ij} + (B - pop_{ij}) \times (1 - r^{(1-1/C)^2}) & r \geq 0.5 \\ pop_{ij}^* = pop_{ij} - (pop_{ij} - A) \times (1 - r^{(1-1/C)^2}) & r < 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

改进粒子群算法的计算流程图如图3所示。

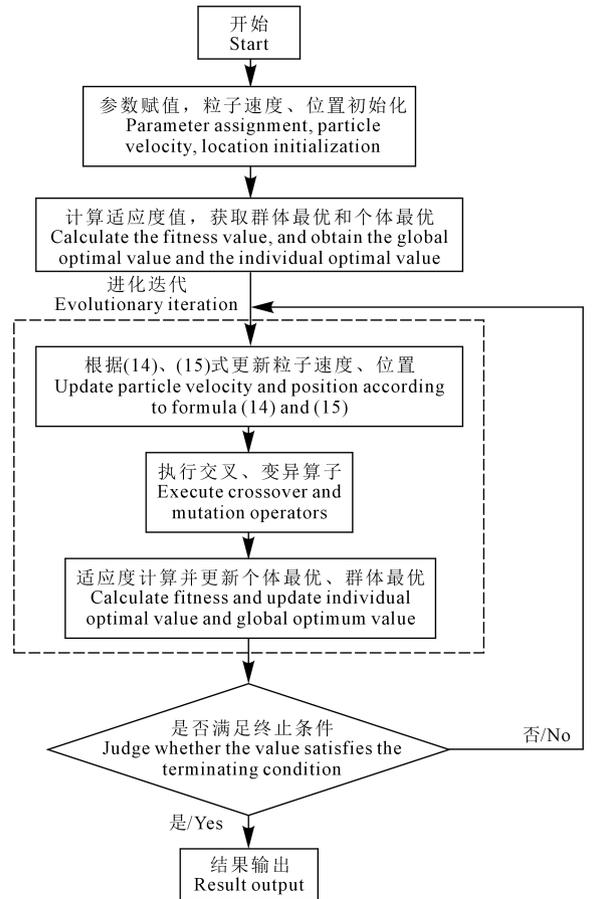


图3 改进粒子群算法的计算流程

Fig.3 The flow chart of improved particle swarm optimization algorithm

## 2.3 编码设计

2.3.1 粒子编码方法 采用基于粒子位置取整操作(Particle position rounding, PPR)的粒子编码方法<sup>[19]</sup>,定义一个二维粒子如下:

二维粒子中的第一维表示斗渠编号,第二维表示粒子的位置,粒子的长度为所有斗渠的数量。对于粒子种群中第 $i$ 个二维粒子 $pop_i$ 表示为 $\begin{bmatrix} j \\ pop_{ij} \end{bmatrix}$ , $j = 1, 2, \dots, N$ , $pop_{ij} \in [1, M+1)$ 是一个随机实数, $M$ 为轮灌组数。二维粒子 $pop_i$ 如表1所示。

表1 粒子编码

Table 1 Particle coding

斗渠 Branch channel	1	2	3	...	$N$
粒子位置( $pop_i$ ) Particle position	$pop_{i1}$	$pop_{i2}$	$pop_{i3}$	...	$pop_{iN}$

2.3.2 粒子解码 对二维粒子  $pop_i$  进行解码<sup>[19]</sup>, 先对粒子位置  $pop_{ij}$  进行取整操作, 用  $pop_{ij}^*$  表示取整后的粒子位置; 决策变量  $x_{ij}$  为一个  $M \times N$  的 0-1 矩阵, 矩阵中每一列均为一个单位向量,  $pop_{ij}^*$  的值表示矩阵第  $j$  列中非零元素的位置, 设  $i = 1 \sim M, j = 1 \sim N, pop_{ij}^* = k(j)$ , 若  $k(j) = i$ , 则  $x_{ij} = 1$ , 否则  $x_{ij} = 0$ 。

#### 2.4 约束条件的处理与适应度函数构造

用目标函数  $Z$  表示适应度函数  $F$ , 除轮期约束和斗渠配水流量约束两个约束条件外, 其余的约束条件在粒子编码和适应度函数计算过程中已经满足要求, 采用罚函数法处理不满足要求的约束条件, 计算更新个体适应度值为:

对轮期约束, 有

$$F^* = F + \alpha_1 \max\left\{0, \sum_{i=1}^M t_i^* - T\right\} \quad (18)$$

对斗渠配水流量约束, 有

$$F^* = F - \alpha_2 \times \min(0, A) - \alpha_3 \times \min(0, B)$$

$$\begin{cases} A = \text{sum}(q_j^* - 0.6q_j), & \text{如果 } q_j^* - 0.6q_j < 0 \\ B = \text{sum}(1.2q_j - q_j^*), & \text{如果 } 1.2q_j - q_j^* < 0 \\ A = 0, B = 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $F^*$  表示考虑罚函数后的新适应度,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 > 0$  为罚函数的作用强度系数。

## 3 应用实例

### 3.1 研究区概况

引用文献[20]数据, 黑河中游张掖市西浚灌区西洞干渠由西洞干渠、毛家湾支渠及 9 个直属斗渠组成, 该干渠设计流量为  $2.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 长度为 10.23 km, 斗渠及下属支渠的设计流量在  $0.5 \sim 1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  之间, 参考《农田水利学》<sup>[21]</sup> 渠床土壤透水系数 ( $A$ )、透水指数 ( $m$ ), 防渗措施折减系数 ( $\beta$ ) 取值为  $A = 3.4, m = 0.5, \beta = 0.5$ 。

采用甘州区 2007 年配水计划中夏灌三轮的灌水数据, 轮期为 25 d, 综合灌水定额为  $1\ 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 预计来水量 280.5 万  $\text{m}^3$ , 根据渠道的控制面积以及综合灌水定额确定渠道的需水量, 渠道的设计参数及灌溉用水要求见表 2。

### 3.2 模型求解

文献[20]的配水结果中干渠的最大配水流量  $1.78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  为干渠入水口流量, 由公式(1)  $M = 5$ , 优化问题为转化为(20), 约束条件转化为公式(21):

表 2 西洞干渠下属渠道设计参数及灌溉用水要求

Table 2 Channel design parameters and irrigation water requirements of the channel subordinate to the Xidong trunk channel

渠道编号 Channel number	渠道名称 Channel name	设计流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ Design discharge	长度/km Length	控制面积/ $\text{hm}^2$ Designed irrigation area	需水量/ $\text{m}^3$ Water requirements
1	直属一斗 The first lateral channel	0.6	1.8	46	55200
2	直属二斗 The second lateral channel	1	4.2	146	175200
3	直属三斗 The third lateral channel	1	5.8	248	297600
4	直属四斗 The fourth lateral channel	0.6	1.25	65	78000
5	直属五斗 The fifth lateral channel	0.6	1.2	76	91200
6	直属六斗 The sixth lateral channel	0.5	0.88	55	66000
7	直属七斗 The seventh lateral channel	0.5	1.03	41	49200
8	直属八斗 The eighth lateral channel	0.6	1.4	117	140400
9	直属九斗 The ninth lateral channel	0.8	1.9	230	276000
10	西洞支渠 The Xidong branch channel	1.5	6.17	233	279600
11	毛家湾支渠 The Maojiawan branch channel	0.8	1.8	53	63600

$$\begin{aligned}
 F &= \text{Min} \sum_{i=1}^5 (23.202 \times t_i^* \\
 &+ \sum_{j=1}^{11} 1.7x_{ij}L_j (q_j^*)^{\frac{1}{2}}t_i^*)/100 \\
 t_i^* &= (\sum_{j=1}^{11} x_{ij}W_j)/1.78 + (13.035 \sum_{j=1}^{11} x_{ij}W_j)/178 \\
 q_j^* &= \frac{w_j}{t_i^*} \quad (20)
 \end{aligned}$$

约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^5 t_i^* \leq 600 \\ 0.6q_j \leq q_j^* \leq 1.2q_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, 11 \quad (21)$$

用 Matlab 软件编制相应的求解程序,经模型调试,相关参数见表 3。

### 3.3 结果与分析

运用编写的程序求解模型,总配水时间 277.3 h,上级渠道渗漏损失为  $2.316 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,下级渠道渗漏损失总量为  $0.947 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,渠道渗漏损失总量为  $3.263 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,优化结果见表 4、表 5,各渠道的优化配水流量与流量约束的关系见图 4,优化计算过程见图 5。

表 4、表 5 和图 4 表明,当上级渠道来水为  $1.78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  时,西洞干渠下属的 11 条渠道划分为 5 个轮灌组,整个配水期内上级渠道进水口流量保持

表 3 改进粒子群算法的计算参数

Table 3 The calculated parameters of improved particle swarm optimization algorithm

参数 Parameters	取值 Value	参数 Parameters	取值 Value
周期约束惩罚函数参数 Cycle constraint penalty function parameters $\alpha_1$	600	粒子群算法学习因子 Learning factor $c_1$	1.2
最小流量约束惩罚函数参数 Minimum flow constraint penalty function parameters $\alpha_2$	$1.5 \times 10^5$	粒子群算法学习因子 Learning factor $c_2$	0.8
加大流量约束惩罚函数参数 Constraint penalty function parameters for increasing traffic $\alpha_3$	$1.5 \times 10^5$	种群规模 Particle scale size $pop$	25
退火常数 Annealing constant $lamda$	0.8	最大迭代次数 The maximum iteration times $maxgen$	10000
遗传交叉概率 Genetic crossover probability $pc$	0.06	粒子速度范围 Particle velocity range	-0.8~0.8
遗传变异概率 Genetic variation probability $pm$	0.04	决策变量取值范围 The range of decision variables	1~5.99

表 4 最优决策变量值及流量统计

Table 4 Optimal decision variable values and flow statistics

项目 Items	渠道编号 Channel number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
最优粒子位置 Optimal particle position	3	4	1	2	2	4	3	2	1	5	3
优化配水流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ Optimal allocation discharge	0.517	1.144	0.817	0.397	0.464	0.431	0.461	0.714	0.756	1.575	0.596

表 5 最优轮灌组合

Table 5 The optimal rotation irrigation combination

轮灌组编号 Number of rotation irrigation group	轮灌组合 The combination of rotation irrigation group	引水时间 Duration time/h	配水量 Amount of water distribution/ $\text{m}^3$	干渠流量 Flow of main channel / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1	直属三斗、直属九斗 The third, the ninth lateral channel	101.18	573600	1.78
2	直属四斗、直属五斗、直属八斗 The fourth, fifth, eighth lateral channel	54.61	309600	1.78
3	直属一斗、直属七斗、毛家湾支渠 The first, seventh lateral channel, the Maojiawan branch channel	29.63	168000	1.78
4	直属二斗、直属六斗 The second, sixth lateral channel	42.55	241200	1.78
5	西洞支渠 The Xidong branch channel	49.32	279600	1.78

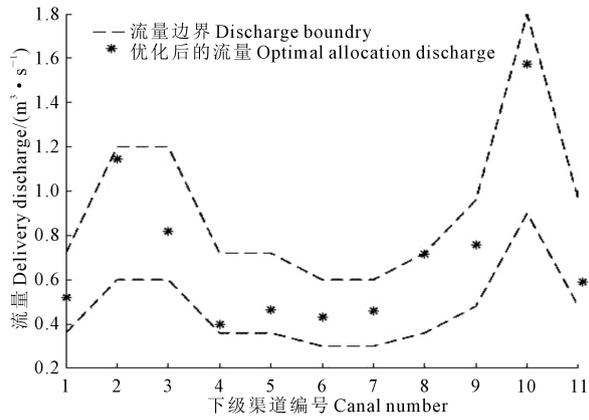


图 4 下级渠道的配水流量

Fig.4 Water delivery discharge of distributary channels

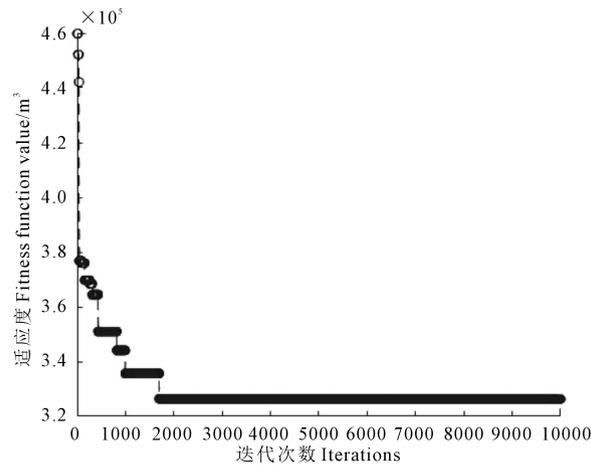


图 5 GA-SA-PSO 算法寻优过程

Fig.5 Processing of GA-SA-PSO computation

$1.78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 不变,轮灌组内渠道的引水时间相等,各下级渠道的配水流量满足输水要求,配水过程平顺均匀,有效减少了闸门调节次数和无效弃水,优化结果与该时段灌区的实际配水计划相比,配水时间减少了 13.4 d,渠系水利用系数由 0.651 提高到 0.828。图 5 表明在求解最优配水方案过程中,改进后的算法共跳出局部最优解 10 次,计算性能较好。

对西洞干渠下属渠道分别设置不同的来水、需水情景,经模型运算各情景下的配置结果见表 6。其中,情景一、二、三、六分别表示现状年干渠流量为  $2.5$ 、 $1.78$ 、 $1.414$ 、 $1.23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  时的水资源配置情况,情景四、五表示需水量分别为现状年需水量的 0.7 倍、1.3 倍,干渠流量为  $1.414 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  时的水资源配置情况。

文献[20]的配水结果中总配水时间为 360 h,田间配水总量  $1.723 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,输水渗漏损失总量为  $7.176 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,上级渠道最大流量为  $1.78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,最小流量为  $1.23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,渠系水利用系数为 0.706。与文献[20]的配水结果相比,当干渠入水口流量为  $1.78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  时,总配水时间减少 82.7 h,渠系水利用系数提高了 0.122,当干渠入水口流量为  $1.23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  时,总配水时间增加 50.7 h,渠系水利用系数提高了 0.098,田间配水总量减少了  $1.51 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

情景一、二、三、六的配水结果表明,当配水总量固定时,渠道的配水时间、渗漏损失、渠系水利用系数随干渠配水流量的增加而较少;情景三、四、五表明,当来水情况固定时,渠道的配水时间、渗漏损

表 6 不同情景下的渠系水资源配置

Table 6 Distributions of water resources in the channel system under different scenarios

情景设置 Scenario setting	干渠流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ Flow of main channel	需水量/ $\text{m}^3$ Water requirements	轮灌组数 Number of wheel irrigation groups	配水时间/h Water distribution time	总输水损失/ $10^5 \text{ m}^3$ Total loss of water	渠系水利用系数 Coefficient of water use for channel system
情景一 Scenario one	2.5	1572000	4	193.3	2.788	0.849
情景二 Scenario two	1.78	1572000	5	277.3	3.263	0.828
情景三 Scenario three	1.414	1572000	6	354.9	3.582	0.814
情景四 Scenario four	1.414	1100400	6	247.8	2.504	0.814
情景五 Scenario five	1.414	2043600	6	460.2	4.658	0.814
情景六 Scenario six	1.23	1572000	7	410.7	3.826	0.804

失随配水总量的增加而增大,渠系水利用系数保持不变,这与灌区的实际情况相吻合。表6的配水结果表明,文中的配水模型适用于不同的来水、需水情况下的水资源配置。

## 4 讨论与结论

渠系优化配水是水资源优化配置领域一个重要的研究方向,利用现代优化技术确定配水计划,可以大幅度缩减人工制定配水计划所规定的轮灌周期,降低配水过程中的水量损失。

本文采用“组间轮灌、组内续灌”的配水方式建立模型,以渠道输水渗漏损失最小为目标,通过调整各轮灌组内渠道的输水时间、输水流量实现配水周期内上级渠道输水流量稳定的目的。在模型求解方法上,采用模拟退火算法和遗传算法融合改进的粒子群算法进行求解,并从编码设计、适应度函数构造、约束条件处理方面,建立基于改进后的粒子群算法的模型求解方法。通过模型验证,该模型在不同的来水、需水情况下均能找到满足条件的配水方案,优化结果与该时段灌区的实际配水计划相比,配水时间减少了13.4 d,渠系水利用系数由0.651提高到了0.828,改进后粒子群算法全局搜索能量强,求解效率高。

案例分析表明,文中采用的“组间轮灌、组内续灌”的配水方式与“组间续灌、组内轮灌”的配水方式相比较,配水过程中上级渠道进水闸门仅调节一次,下级渠道集中调节,渠道配水流量稳定,可实现集中高效配水管理,在最大程度减少了渠道弃水。

模型验证结果表明该配水方法具有一定的现实意义,但渠系水资源优化配置涉及各子灌区水量最优分配和配水渠道轮灌组合的最优安排两方面,该模型没有考虑各子灌区水量的最优分配问题,此外,该模型仅对支、斗两级渠道进行优化,建立的模型存在一定的局限性,所以该模型和其它耦合的耦合上以及多级渠系优化配水上都有待进一步完善。

### 参考文献:

[1] 马孝义,刘哲,甘学涛.下级渠道流量不等时渠系优化配水模

型与算法研究[J].灌溉排水学报,2006,25(05):17-20.

- [2] 赵文举,马孝义,张兴建,等.基于模拟退火遗传算法的渠系配水优化编组模型研究[J].水力发电学报,2009,28(05):210-214.
- [3] 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(06):43-46.
- [4] 宋松柏,吕宏兴.灌溉渠道轮灌配水优化模型与遗传算法求解[J].农业工程学报,2004,20(02):40-44.
- [5] 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(08):1004-1008.
- [6] 刘照,程帅,李华朋,等.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(03):88-93.
- [7] 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,(04):9-11.
- [8] 赵文举,马孝义,刘哲,等.基于自适应遗传算法的渠系优化配水模型研究[J].系统仿真学报,2007,19(22):5137-5140.
- [9] 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,(09):5-7.
- [10] 张国华,谢崇宝,皮晓宇,等.基于自由搜索算法的灌渠配水优化模型[J].农业工程学报,2012,28(10):86-90.
- [11] 高伟增,赵明富,汪志农,等.渠道轮灌配水优化模型与复合智能算法求解[J].干旱地区农业研究,2011,29(06):38-42.
- [12] Anwar, Arif A., and Derek Clarke. Irrigation scheduling using mixed-integer linear programming [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2001, 127(02):63-69.
- [13] 史海滨,田军仓,刘庆华.灌溉排水工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [14] 羌晓清,景博,邓森,等.基于模拟退火粒子群算法的不可靠测试点优化[J].计算机应用,2015,35(04):1071-1074+1083.
- [15] 陈侠,胡永新,徐光延.面向多无人机任务分配的二维编码粒子群算法[J].系统仿真学报,2013,25(12):3045-3049.
- [16] 龚纯,王正林.精通MATLAB最优化计算[M].北京:电子工业出版社,2012.
- [17] 彭晓波,桂卫华,黄志武,等.GAPSO:一种高效的遗传粒子混合算法及其应用[J].系统仿真学报,2008,20(18):5025-5027.
- [18] 艾解清,高济.基于 Boltzmann 学习策略的粒子群算法[J].南京理工大学学报,2012,36(03):402-407.
- [19] 刘志雄.求解调度问题的粒子群算法编码方法研究[J].武汉科技大学学报,2010,33(01):99-104.
- [20] 郭珊珊,郭萍,李荣.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(07):71-77.
- [21] 郭元裕.农田水利学[M].北京:中国水利水电出版社,2009.