

基于多目标遗传算法的渠系配水优化模型

郭珊珊 郭萍* 李茉

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 针对渠系配水传统人工调度难以统筹优化的问题,为使优化模型更加贴近实际,体现渠系配水优化的时空特点,充分考虑配水持续时间的不确定性,建立以下级渠道配水净流量、配水开始时间和结束时间作为决策变量,以保证上级渠道水流平稳和下级渠道渗漏最小为模型目标的多目标多变量渠系优化配水模型,采用向量评估遗传算法进行求解,将第一目标即上级渠道水流平稳作为优先满足目标,第二目标为次要满足目标。结果表明:在保障实际运行对于渠道流量要求和水量要求的前提下,优化结果与该时段甘州区配水计划相比,配水时间由轮期的25 d缩短为15 d,干渠平均配水流量由 $1.298 \text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $1.414 \text{ m}^3/\text{s}$,渠系水利用系数由0.651提高到0.706,田间配水量提高了14.25%。本研究模型能够实现集中、高效配水,且具有普遍适用性,可为渠系优化配水决策提供理论和技术支持。

关键词 渠系配水;多变量;优化模型;多目标遗传算法

中图分类号 S274.3

文章编号 1007-4333(2017)07-0071-07

文献标志码 A

Multi-objective genetic algorithm optimization model for canal scheduling

GUO Shanshan, GUO Ping*, LI Mo

(College of Water Resource & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Aiming at the complication of optimizing water delivery scheduling, and to reflect its spatial and temporal characteristics, a multi-variable and multi-objective optimization model for canal scheduling is proposed, which considers the time uncertainty. Decision variables are flow rates, start time and end time of the distributary canals. The objectives are to minimize the standard deviation of flow rates of superior canal and the seepage of the distributary canals. The model is solved by multi-objective genetic algorithm with the first objective taking the top priority. The results show that: On the premise of satisfying the need of actual operation, compared with planned conditions at the same period, the rotation decreases from 25 to 15 d, the average flow rate of superior canal increases from 1.298 to $1.414 \text{ m}^3/\text{s}$, the water use efficiency grows from 0.651 to 0.706 and the amount of water into farmland rises by 14.25%. In conclusion, the model can realize concentrated and high-efficient water distribution, and it can be applied to many contexts in order to provide theoretical and technical support.

Keywords canal scheduling; multi-variable; optimization model; multi-objective genetic algorithm

水资源一直是制约我国西北农业发展的重要因素。在我国农业用水量占全国总用水量约63.5%,在水资源紧缺的同时,灌区用水效率不高,灌溉水利用系数低,农田灌溉有效利用系数只有0.53,远低于发达国家水平^[1]。随着我国经济的快速发展,为

保障农业生产持续、稳定和均衡发展,对农业水资源进行综合利用与优化管理,显得越来越重要。加强大型灌区节水工作是水资源可持续发展的需要,并将对未来国家经济持续发展和社会安全稳定起到重要作用^[2]。

收稿日期:2016-07-10

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(91425302)

第一作者:郭珊珊,硕士研究生,E-mail:hbpngxss@cau.edu.cn

通讯作者:郭萍,教授,主要从事水资源及环境系统不确定性研究,E-mail:09020@cau.edu.cn

节水农业技术措施通常可概括为工程节水、农艺节水、生物节水和管理节水四大类。实践表明,管理节水占据了节水潜力的50%^[3]。渠系配水是灌溉调度管理的重要内容,科学合理的配水过程可以在较大程度上提高灌溉水利用系数,减少无效弃水。自Suryavanshi等^[4]最早提出渠道流管假设至今,国内外在渠系优化配水模型方面已经取得了较多的研究成果。灌溉渠系的优化配水问题可按优化目标不同分为2类:第一类为以某种指标最优为目标的灌溉水量分配,目标可具体为某次配水增产效益最大和管理部门水费收入最高;第二类为以水量损失最小为目标的灌区各级渠道流量优化调度。第一类渠系配水在优化过程中涉及参数过多,建立通用模型较困难,适用范围有限。第二类渠系配水以渠道过水能力一定,上游分配水量、灌水时间有限,且满足灌区农作物某次灌水要求为前提^[5],目标本质是为了达到配水过程的高效性,按照计算方法不同可以分为采用经验公式直接计算渠系渗漏^[6]以及通过考虑配水流量与时间之间的关系^[5,7](通常为“定流量、变历时”)2种。本研究重点在第二类渠系配水。

然而,单纯考虑渗漏损失最小无法满足实际运行中对上级渠系水流平稳,闸门开关次数少的要求,而“定流量、变历时”则有可能造成水资源浪费,这些问题可通过多目标模型解决。另外,渠系配水过程中存在的不确定性在很大程度上影响配置结果,从而影响渠系管理决策。本研究拟在渠系优化配水模型构建中考虑多目标性和不确定性,旨在使模型更加符合实际运行情况并改善现有渠系配水制度。

1 考虑输水时间不确定性的渠系优化配水模型

1.1 模型建立

总结已有多目标渠系模型^[5-12]可以发现,模型多将下级渠道配水流量与配水开始时间作为决策变量,将渠系流量与供水总量作为约束,将灌水时间作为已知的定值;然而在实际配水过程中,某个渠道控制面积下作物需水量是一定的,若渠道配水流量作为一个随机变量在一定范围内变化,那么相应的灌水时间必然会随着配水流量的变化而变化,二者应呈现一定的反比例关系。由此可见,已有研究将灌水时间作为已知定值是较为理想化的。为使渠系优化配水模型更符合实际情况,本研究拟在模型构建

中考虑输水时间的不确定性,即将配水时间作为决策变量,并在此基础上保证上级渠道的水流平稳性;与此同时,输水时间和流量的变化必然会影响渠道渗水损失,控制渗水损失提高渠系水利用系数也是本研究关注的重点。综合以上思路,建立如下模型。

目标函数:

$$\min f = \frac{\sum_{j=1}^T (Q_{uj} - \bar{Q}_u)^2}{T-1} \quad (1)$$

$$\min S = \sum_{i=1}^I \beta_i A_i l_i q_i^{(1-m_i)} (t_i'' - t_i') / 100 \quad (2)$$

式中: f 为上级渠道输水流量对时间的标准差; S 为配水渠道渗水总量, m^3 ; i 为下级配水渠道编号; j 为不同时段; Q_{uj} 为渠道在第 j 个时间段内上级渠道输水流量, m^3/s , $Q_{uj} = \sum_{i=1}^I q_i \cdot x(t)$; \bar{Q}_u 为整个时段内上级渠道输水流量平均值, m^3/s ; q_i 为下级渠道 i 的配水净流量, m^3/s ; $x(t)$ 为0-1变量; T 为轮期, d ; l_i 为下级渠道 i 的长度, km ; β_i 为渠道采取防渗措施后渗漏水量的折减系数; A_i 为下级渠道 i 的渠床土壤透水系数; m_i 为下级渠道 i 的渠床土壤透水指数; t_i' 与 t_i'' 分别为下级渠道 i 的配水开始与结束时间, d 。

约束条件:

1) 流量约束

$$\alpha_{di} q_{di} \leq q_i \leq \alpha_{ui} q_{di} \quad (3)$$

$$J_d Q_{du} \leq Q_u \leq J_u Q_{du} \quad (4)$$

式中: q_{di} 为下级渠道 i 的设计流量, m^3/s ; Q_{du} 为上级渠道设计流量, m^3/s ; J_d 与 α_{di} 分别为上、下级渠道最小流量折减系数; J_u 与 α_{ui} 分别为上、下级渠道加大流量系数。

2) 配水时间约束

$$0 \leq t_i' \leq t_i'' \leq T \quad (5)$$

3) 水量约束

$$\sum_{i=1}^I q_i (t_i'' - t_i') \leq W \quad (6)$$

$$q_i (t_i'' - t_i') \geq M_i \cdot S_i \quad (7)$$

式中: W 为允许可供水量, m^3 。 M_i 为下级渠道控制区域下作物的灌溉定额,万 m^3/hm^2 。 S_i 为下级渠道控制区域作物面积, hm^2 。

4) 整数0-1约束

$$\begin{cases} x(t) = 1 & t_i' \leq t \leq t_i'' \\ x(t) = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

模型中渠系渗漏计算采用经验公式,对于渠道最小流量与加大流量的约束系数采用经验系数,公式与系数参照《农田水力学》^[13]。

1.2 算法概述

多目标渠系配水模型较单目标模型的复杂程度更深,对求解算法的要求也更高,智能进化算法在该方面表现出来的优越性更加显著。本研究所构筑模型为非线性约束条件下含有整数规划的优化模型,且存在多个约束条件,搜索空间大,采用常规方法求解比较困难。遗传算法鲁棒性强,搜索度高,且适合求解整数规划问题,本研究采用此算法求解模型。遗传算法在国内外多目标渠系优化配水研究中已有广泛应用。Wardlaw 等^[8]通过下级渠道优化配水问题对比了遗传算法和线性规划法的求解精度,验证表明,遗传算法求解精度高,具有很强的鲁棒性和全局性,能够快速实现模型求解。随着遗传算法在该领域的逐渐普及与发展,多目标优化问题的求解成为可能。Peng 等^[9]以不同时刻各配水渠道流量标准差最小和各配水渠道渗漏损失最小为目标,建立了简化的多目标优化模型并采用遗传算法进行求解。张成才等^[10]以灌区渠道输水时间最短和各个轮灌组持续引水时间差异最小为目标建立多目标优化模型,并采用层次分析法确定各目标函数的权重系数,将多目标函数转化为单目标,并采用遗传算法进行求解,确定了灌区最优轮灌组组合。Kanooni 等^[11]以上级渠系输水流量最小,输水时间最短和配水量与实际需水量相差最小为目标函数,采用将各目标函数标准化的方法将多目标转化为单目标问题,采用遗传算法进行求解。褚宏业等^[12]以各渠道流量差异系数最小和平均每天渗漏损失最小作为目标函数,以各渠道灌水结束时间作为决策变量建立了渠系多目标优化模型,采用遗传算法和粒子群算法进行求解。

目前,遗传算法工具箱主要有3个:英国谢菲尔德大学的遗传算法工具箱、美国北卡罗纳州立大学的遗传算法最优化工具箱和 MATLAB 自带的遗传算法与直接搜索工具箱。各工具箱异曲同工,本研究拟采用英国谢菲尔德大学的遗传算法工具箱。多目标优化问题的遗传算法不同于单目标优化问题。单目标优化是研究单个目标函数的极值问题,多目标优化则要同时优化多个可能相互冲突的目标函数,要求寻找非劣解集,又称 Pareto 解集。在本研究模型中,考虑实际运行操作便捷性,期望上级渠道

流量变化幅度尽可能小,因此模型求解要求优先满足第一个目标,即上级渠道各时段流量方差最小,同时使得第二个目标即渠系渗漏损失尽可能小。根据模型目标要求,选用向量评估遗传算法进行多目标遗传算法求解。

向量评估遗传算法(Vector evaluated genetic algorithms, VEGA)由 Schaffer 于 1984 年提出,基本思想是:将每一代种群按照多目标个数(假设为 k 个)随机均分成大小相等的子种群,根据不同目标函数对每个子种群分配一个适应值,使用只适用于每个子种群内部的选择算子进行筛选,再对整个种群进行交叉变异得到新种群。由于每个子种群中所有个体都是根据一个特定的目标函数来分配适应值,而选择算子又被限制在子种群内部,因此强调了依据特定目标函数的优秀个体,当遗传算法参数选择适当时,VEGA 搜索到的解可能非常接近 Pareto 最优域,且趋向于某个单目标函数最优个体。求解步骤如下:

1) 编码。渠系共有 I 条下级渠道,每条下级渠道有配水净流量、开始时间和结束时间 3 个决策变量,故整个模型的决策变量个数为 $3I$ 。采用二进制编码,二进制的位数反映决策变量精度。

2) 产生初始种群。采用英国谢菲尔德大学遗传算法工具箱产生的变量初始值是一定范围内随机分布的,而实际中下级渠道的配水开始时间与结束时间之间存在着一定关系,即式(5)所示约束,故在遗传过程开始前对初始值进行一定的甄别,即将产生的 2 个随机数比较大小,将较大值赋给结束时间,较小值赋给开始时间,二进制编码也随之交换。

3) 适应度函数设计。将目标函数值作为适应度,将约束作为惩罚体现在适应度函数中,即将不满足约束的个体适应度赋值为无穷大,这样就可以在执行选择操作时抛弃不可行解。由于变量数目较多,采用遗传算法得到的变量值在一定范围内是随机分布的,同时满足多个约束条件的概率较低,搜索可行解较为困难,为保证交叉变异过程的高效性,在编程过程中优先筛选可行解,将最终得到的可行解群体作为父辈。

4) 选择、交叉和变异。多目标函数的处理按照 VEGA 方式进行,即将种群个体随机平均分成 2 个子种群,各自按照单目标的方式进行选择,采用随机遍历抽样进行。随后,将选择后的种群合并,采用单点交叉的方式进行基因重组,交叉概率采用经验值。

采用离散变异的方式保障种群多样性,使用缺省概率作为变异概率。将最终得到的结果作为新一代个体。设置最大遗传代数,循环终止,输出最后一代种群值。

采用 VEGA 得到的优化结果可能会朝向 2 个极端,一个是第一目标最优,第二目标尽可能优化,另一个则相反,在进化过程中,选取第一种类型子代群体作为新一代种群。

2 实例应用

2.1 研究区域现状

本研究选取黑河中游张掖市西浚灌区下的西洞干渠及其下属支渠与直属斗渠为研究对象。西浚灌区位于河西走廊的黑河中游左岸,甘州区西端东部,以黑河为界,西北与临泽相邻,南与肃南接壤,灌区总土地面积 6.586 万 hm^2 ,是黑河中游大型灌区之一。灌区属西北内陆干旱区,多年平均降雨量为 125 mm,平均蒸发量在 2 047.9 mm 以上,年无霜期 145 d 左右,年均日照总时数 3 058 h,年均气温 $7\text{ }^\circ\text{C}$,最高气温 $38.6\text{ }^\circ\text{C}$,最低气温 $-29.1\text{ }^\circ\text{C}$,具有昼夜温差大,降雨量稀少,光热资源丰富特点,是典型的水资源稀缺地区。西浚灌区设计灌溉面积 2.46 万 hm^2 ,引黑河、梨园河、大磁窑河等水源进行灌溉,是实施自流灌溉的古老灌区。灌区现已建成干渠、分干渠 11 条共计 87.51 km,支渠、分支渠 41

条共计 166.92 km,斗渠 205 条共计 369.57 km。灌区现状渠系水利用系数 0.556,灌溉水利用系数 0.484。西洞干渠由西洞支渠、毛家湾支渠及 9 个直属斗渠组成,渠系分布见图 1,渠道相关设计参数见表 1。采用甘州区 2007 年配水计划中夏灌三轮的灌水数据,灌水轮期为 25 d,综合灌水定额为 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,预计来水量 280.5 万 m^3 。代入模型,采用上述向量评估遗传算法编程进行求解。

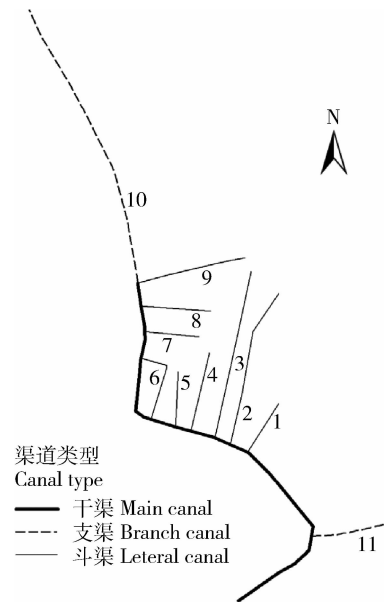


图 1 西洞干渠及其下级渠道分布

Fig. 1 Xidong main canal and distributary canals

表 1 西洞干渠及其下级渠道设计参数

Table 1 The design data of Xidong main canal and distributary canals

渠道编号 Canal number	渠道名称 Name	渠道类型 Type	设计流量/ (m^3/s) Designed discharge	长度/km Length	设计农田灌溉面积/ hm^2 Designed irrigation area
0	西洞干渠	干渠	2.50	10.23	1 259
1	直属一斗	斗渠	0.60	1.80	46
2	直属二斗	斗渠	1.00	4.20	146
3	直属三斗	斗渠	1.00	5.80	248
4	直属四斗	斗渠	0.60	1.25	65
5	直属五斗	斗渠	0.60	1.20	76
6	直属六斗	斗渠	0.50	0.88	55
7	直属七斗	斗渠	0.50	1.03	41
8	直属八斗	斗渠	0.60	1.40	117
9	直属九斗	斗渠	0.80	1.90	230
10	西洞支渠	支渠	1.50	6.17	233
11	毛家湾支渠	支渠	0.80	1.80	53

2.2 模型求解

2.2.1 模型参数

渠道最小与加大流量系数、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、渠床土壤透水指数均参考《农田水利学》^[13]取值(表 2)。可供水量与灌水定额参考甘州区 2007 年配水计划。

表 2 渠系优化配水模型参数

Table 2 The value of parameters in optimization model

参数 Parameter	取值 Value	参数 Parameter	取值 Value
下级渠道最小流量系数 α_{di} Min distributary discharge coefficient	0.6	防渗措施折减系数 β_i Reduction coefficient of anti-seepage measure	0.5
下级渠道加大流量系数 α_{ui} Max distributary discharge coefficient	1.2	渠床土壤透水系数 A_i Seepage coefficient of canal soil	3.4
上级渠道最小流量系数 J_d Min superior discharge coefficient	0.4	渠床土壤透水指数 m_i Seepage index of canal soil	0.5
上级渠道加大流量系数 J_u Max superior discharge coefficient	1.2		

2.2.2 算法参数

西洞干渠共有 11 条下级渠道,整个模型决策变量个数为 33 个,选取群体规模为 100,设置变量二进制位数 20,故每个个体基因个数为 660。为使 2 个子种群中的个体能够充分交叉交换遗传信息,交叉概率采用参考值 0.7^[14]。采用遗传算法工具箱中缺省概率作为变异概率。设置最大遗传代数为 100。

2.3 结果与分析

在优先满足目标 1,目标 2 尽可能最优的要求下,采用 VEGA 进行求解,结果见图 2~5。

图 2 示出优化后各下级渠道配水开始时间与结束时间。可以看出,各下级渠道的配水时间分布较为集中,总体配水时间缩减到了 15 d,相较轮期的 25 d,本研究实现了集中配水。

对比各下级渠道优化后配水净流量、毛流量与设计不冲不淤流量(图 3)可以看出,模型优化得到的渠道毛流量均在渠道设计不冲不淤流量范围内,满足实际运行中流量限制。其中第 2、3、8、10、11 渠道毛流量与设计流量基本相同,可以达到渠道运行最佳状态。综合图 1 与图 2 可以看出,第 9 渠道的优化配水流量偏低且运行时间较长,原因是模型以上级渠系水流平稳为优先满足目标,为此牺牲了部分渠道的运行效率,此决策过程由遗传算法优胜劣汰的本质决定,体现了遗传算法的优越性。

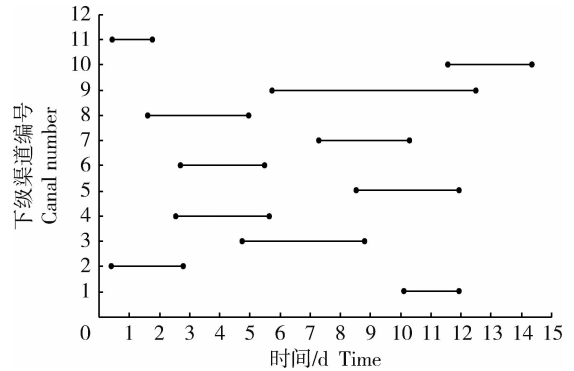


图 2 下级渠道配水时间

Fig. 2 The irrigation time of distributary canals

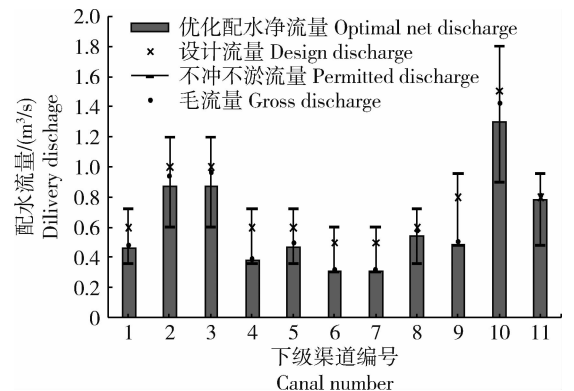


图 3 下级渠道配水流量

Fig. 3 Water delivery discharge of distributary canals

同样,优化后的上级渠道配水流量在渠道设计不冲不淤范围内,满足实际运行中流量限制(图4)。在整个供水时段中,最大流量为 $1.78\text{ m}^3/\text{s}$,最小流量为 $1.23\text{ m}^3/\text{s}$,平均流量为 $1.414\text{ m}^3/\text{s}$,通过遗传算法寻优得到的最小第一目标函数值即各时段上级渠道配水流量最小方差为0.262。将其与按照配水计划上级渠道的平均输水流量 $1.298\text{ m}^3/\text{s}$ 相对比发现,优化后上级渠道输水流量整体水平提高,同时也揭示了图2优化后各下级渠道配水安排中总配水时间缩短的原因。

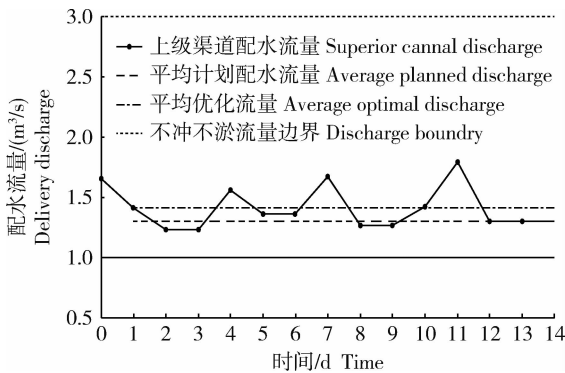


图4 上级渠道配水流量随时间的变化

Fig. 4 The changes of discharges in superior canal with time

图5示出优化结果与同时段甘州区配水计划结果中的各下级渠道往田间的配水量。可以看出,优化后的配水量均得到了提高。累计求和可得,优化后的田间配水总量为 172.3 万 m^3 ,按照配水计划则为 150.8 万 m^3 ,提高了14.25%。

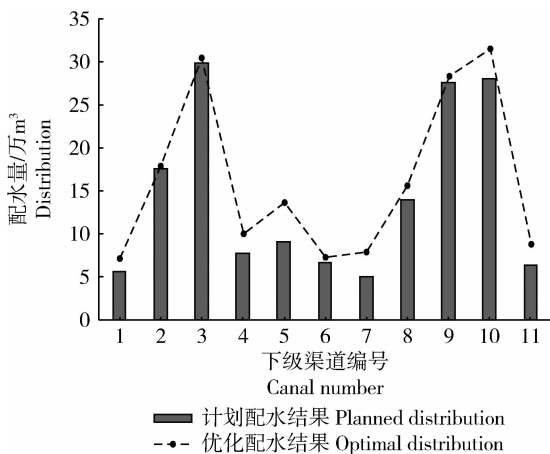


图5 优化配水结果与计划配水结果对比

Fig. 5 Results comparison between the planned distribution and optimal distribution of water

计算下级渠道渗漏损失总量为 12.539 万 m^3 ,干渠渗漏损失总量为 59.225 万 m^3 ,整个渠系输水损失量为 71.764 万 m^3 ,渠系水利用系数为0.706,相较同时期甘州区渠系水利用系数0.651,这充分说明在可供水量一定的前提下,通过调整渠道配水流量和时间,可以达到减小渠系渗漏,提高渠系水利用效率的效果。

3 结束语

本研究建立了渠系优化配水模型,并采用遗传算法进行求解。该模型充分考虑了配水过程中配水流量与输水时间的不确定性,体现了渠系配水优化的时空特点,将下级渠道配水净流量、配水开始时间和结束时间作为决策变量,以上级渠道水流平稳和下级渠道渗漏最小作为模型的两个目标,并结合流量约束、配水时间约束、水量约束和整数0-1约束,借鉴已有研究中对于遗传算法适用性的验证,采用多目标遗传算法中的向量评估遗传算法,将第一目标即上级渠道输水流量对时间的标准差最小作为优先满足目标,第二目标为次要满足目标进行编程求解。优化后结果与该时段甘州区配水计划相比,配水时间由25 d缩短为15 d,上级渠道平均输水流量由 $1.298\text{ m}^3/\text{s}$ 提高到了 $1.414\text{ m}^3/\text{s}$,优化后田间配水量为 172.3 万 m^3 ,相较配水计划提高了14.25%,渗漏损失量为 71.764 万 m^3 ,渠系水利用系数由0.651提高到0.706。因此,在满足实际运行对于渠道流量和水量要求的前提下,采用该模型对下级渠道配水流量与时间进行优化,可实现集中、高效配水。与此同时,该模型采用的公式均为经典公式,算法求解可参考已有研究经验,具有普遍适用性,可为渠系优化配水决策提供理论和技术支持。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2014[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015
The Ministry of Water Resource of the People's Republic of China. *China Water Resources Bulletin* 2014 [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015 (in Chinese)
- [2] 翟浩辉. 狠抓大型灌区“两改一提高”促进节水农业再上新台阶[J]. 中国农村水利水电, 2003(8): 1-8
Cui H H. Vigorously implement “Two reforms, one improvement” in large irrigation area to promote water-saving agriculture to a new level [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2003(8): 1-8 (in Chinese)

- [3] 山仑,康绍忠,吴普特. 中国节水农业[M]. 北京:中国农业出版社,2004
Shan L, Kang S Z, Wu P T. *China Water-Saving Agriculture* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004 (in Chinese)
- [4] Suryavanshi A R, Reddy J M. Optimal operation schedule of irrigation distribution systems [J]. *Agricultural Water Management*, 1986, 11(1): 23-30
- [5] 吕宏兴,熊志章,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
Lv H X, Xiong Y Z, Wang Z N. 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 (in Chinese)
- [6] 赵文举,马孝义,张建兴,朱亚磊. 基于模拟退火遗传算法的渠系配水优化模型研究[J]. 水利发电学报, 2009, 28(5): 210-214
Zhao W J, Ma X Y, Zhang J X, Zhu Y L. Optimal water delivery marshalling model based on simulated annealing genetic algorithm[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(5): 210-214 (in Chinese)
- [7] 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(2): 40-44
Song S B, Lv H X. Optimization model of rotation irrigation channel distribution and solution with genetic algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(2): 40-44 (in Chinese)
- [8] Wardlaw R, Bhaktikul K. Comparison of genetic algorithm and linear programming approaches for lateral canal scheduling[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130(4): 311-317
- [9] Peng S Z, Wang Y, Khan S, Rana T, Luo Y F. A simplified multi-objective genetic algorithm optimization model for canal scheduling[J]. *Irrigation and Drainage*, 2012, 61: 294-305
- [10] 张成才,马涛,董洪涛,刘杰. 基于遗传算法的灌区渠系优化配水模型研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(3): 65-67
Ma C C, Ma T, Dong H T, Liu J. Study on optimization of water allocation management model for irrigation canal based on genetic algorithm[J]. *Yellow River*, 2013, 35(3): 65-67 (in Chinese)
- [11] Kannooni A, Monem M J. Integrated stepwise approach for optimal water allocation in irrigation canals[J]. *Irrigation and Drainage*, 2014, 63: 12-21
- [12] 褚宏业,王莹,文俊,李依耘,杨鑫. 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
Zhu H Y, Wang Y, Wen J, Li Y Y, Yang X. Genetic algorithm and PSO algorithm for solving canal system multi-objective optimization model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(4): 9-11 (in Chinese)
- [13] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009
Guo Y Y. *Irrigation and Drainage* [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009 (in Chinese)
- [14] 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 M L, Lv H X, Han W T. Optimal water delivery scheduling model and multi-objective genetic algorithm [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(9): 5-7

责任编辑: 刘迎春