

·灌溉技术与装备·

文章编号: 1672-3317(2023)11-0083-07

加压滴灌系统灌水时间及轮灌组优化模型研究

许翼飞¹, 刘洪光^{1,2}, 梅华³, 李丹¹, 柳幸爽¹, 常玉荣¹, 李玉芳^{1*}

(1.石河子大学水利与建筑工程学院, 新疆石河子 832000; 2.石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆石河子 832000; 3.新疆生产建设兵团第九师水文水资源管理中心, 新疆额敏 834601)

摘要:【目的】探究加压滴灌系统灌水时间及轮灌组优化模型。【方法】通过水力解析的方法, 分析轮灌制度参数与管网主要水力性能参数的关系, 提出了灌水量偏差最小为目标的数学模型, 考虑了灌水时间及轮灌周期约束、滴头压力约束以及轮灌组流量等约束, 采用遗传算法求解模型。【结果】在同一工程案例中, 与W1方案相比, W2、W3方案滴灌系统完成1次灌水过程灌水量偏差率分别降低27%、37%, 缩短滴灌系统1次灌水延续时间约15、20 h, 节约用电能耗15%、20%, 提高水资源利用效率约14%、19%, 减少作物生育期所水费80、111元/hm², 电费72~86、100~120元/hm²。【结论】基于传统滴灌工程设计采用加压滴灌系统灌水时间及轮灌组优化模型, 可降低滴灌系统灌水量偏差率, 缩短滴灌系统1次灌水延续时间, 减少作物生育期水费和电费。

关键词: 加压滴灌; 轮灌组; 灌水均匀度; 灌水量偏差率; 灌水延续时间; 遗传算法

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023160

OSID:



许翼飞, 刘洪光, 梅华, 等. 加压滴灌系统灌水时间及轮灌组优化模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 83-89.

XU Yifei, LIU Hongguang, MEI Hua, et al. An Optimization Model for Rotation Irrigation Groups and Irrigation Duration for Pressurized Drip Irrigation System[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 83-89.

0 引言

【研究意义】新一轮高标准农田建设规划重点解决已建高标准农田工程老化、工程建设标准低等问题^[1]。结合高标准农田建设要求, 基于滴灌农田现状进一步提升滴灌系统灌溉质量和水资源利用效率是干旱区急需解决的问题。灌水均匀度则是评估滴灌系统灌溉质量的重要指标。《微灌工程技术标准》(B/T50485—2020)中^[2], 主要通过限制灌水小区支管、毛管极限铺设长度来控制灌水小区的流量偏差率, 用以满足灌水小区灌水均匀度的要求。该标准并未对整个滴灌管网的流量偏差率给出控制标准, 使得灌溉规模较大的滴灌系统虽然能满足灌水小区的流量偏差率, 但整个滴灌管网的流量偏差率却达到30%~50%, 灌水均匀度偏低。灌水均匀度的降低不仅影响水肥高效利用、还影响农民用水的公平性以及机械采收效率, 该问题已受到国内外研究者的关注。

【研究进展】影响灌水均匀度的因素很多。灌水器制造偏差^[3-4]、灌水器的堵塞状况^[5-7]、管网结构^[8-10]、

滴灌系统工况^[11-12]、地形^[13-14]、灌溉水温度和水压变化^[15-16]都会影响灌水均匀度。付玉娟等^[17]研究了轮灌制度对灌溉管网优化设计的影响, 但其研究内容主要针对新建设的滴灌系统, 且以年费用或者水头损失最小为优化目标, 对灌水均匀度、水资源利用效率缺少研究。李援农等^[18]、段晓宁等^[19]在研究灌区自压微灌独立管网系统优化设计时, 考虑了水头偏差对灌水过程的影响, 并以管网中所有灌水器的水头差小于允许水头差作为约束条件进行田间管网的整体优化, 但是该研究以单位面积投资最小为目标, 研究结果未体现该模型优化前后对滴灌系统灌水均匀度的影响。李伟等^[20]考虑了大田加压滴灌系统流量均衡的原则, 并对任意轮灌组的流量差和压力差进行了独立约束, 为大田加压滴灌系统轮灌组优化提供了思路, 但是该模型忽略了轮灌组流量变化与系统工作压力的连动关系, 研究成果也没有反映该优化方法对灌水均匀度、灌水管理过程的具体量化影响, 对工程实践指导具有局限性。【切入点】综上所述, 通过轮灌制度优化来提高已建加压滴灌系统灌水均匀度的研究较少, 且已有轮灌分组优化大多是建立在合理分配轮灌流量, 并未考虑轮灌制度参数、轮灌分组对灌水均匀度、水资源利用效率和灌水总时间的影响。【拟解决的关键问题】鉴于此, 用水力解析的方法分析滴头流量、轮灌制度要素与灌水均匀度之间的关系, 提出以灌水量偏差最

收稿日期: 2023-04-11 修回日期: 2023-07-19 网络出版日期: 2023-11-10

基金项目: 石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZK202313); 兵团国际科技合作项目(2021BC003); 国家自然科学基金项目(52069026)

作者简介: 许翼飞(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉工程研究。E-mail: xyf3472@163.com

通信作者: 李玉芳(1977-), 女, 副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: lyf8970@sina.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

小为目标的加压滴灌系统轮灌组及灌水时间优化模型,并用遗传算法进行优化,为高标准农田升级改造、滴灌系统灌水质量的提升提供新思路和设计方法。

1 轮灌组及灌水时间优化模型建立

1.1 模型建立依据及原理

要消除整个滴灌系统的滴头流量偏差率,首先要消除各轮灌组所辖小区进口的压力差。一般设计人员通过调节管径等措施来平衡沿程水头损失与地形高差形成的差值。但是很多情况下,难以消除这种影响。

在工况相同的条件下达到相同的灌水定额,滴头流量越大,所需的1次灌水时间就越短;反之,灌水时间就越长。在滴灌系统以往设计及运行管理中,通常各轮灌组的1次灌水延续时间相等。这就导致在1次灌水延续时间相同的情况下,离水源较近的轮灌组所辖灌水小区进口工作压力越大,总灌水量也就越大;反之,离水源较远的轮灌组所辖灌水小区进口工作压力越小,总灌水量则越小。如果针对滴灌系统这种压力分布特点,依据各轮灌组所辖灌水小区进口实际工作压力,推算其达到灌水定额所需灌水时间,就能降低各灌水小区之间的灌水量差异和总灌水时间,从而提高大田加压滴灌系统的灌水均匀度。

灌水小区在相同1次灌水延续时间(文后简称灌水时间)内的灌水量偏差率计算式为:

$$q_v = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_d} \rightarrow \frac{(q_{\max} - q_{\min})t}{q_d t} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_d} \quad (1)$$

当各轮灌组灌水时间不同时,流量偏差率和灌水量偏差率不再相等,而灌水量偏差率更能反映灌水均匀度,其计算式为:

$$M_v = \frac{q_{\max} t_{\min} - q_{\min} t_{\max}}{q_d t} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_d} \quad (2)$$

式中: M_v 为管网滴头灌水量偏差率(%); M_{\max} 为管网中的滴头最大实际灌水量(L); M_{\min} 为管网中的滴头最小实际灌水量(L); M_d 为管网中设计滴头灌水量(L); q_v 为滴头设计流量偏差率(%); q_d 为灌水器设计流量(L/h); q_{\max} 为滴头最大流量(L/h); q_{\min} 为滴头最小流量(L/h); t 为滴头设计灌水时间(h); t_{\min} 为流量为 q_{\max} 的滴头所在轮灌组的灌水时间(h); t_{\max} 为流量为 q_{\min} 的滴头所在轮灌组的灌水时间(h)。

1.2 模型构建

首先确定已建滴灌系统的管道布置形式,各级管道管径、间距、流量以及滴头设计参数沿程水头损失系数等,再根据水源、土壤等数据以及滴灌工程有关设计参数计算出灌水定额、灌水周期和1次灌水延续时间等,然后根据轮灌制度参数等核对轮灌组数、轮

灌组所开支管数量等,最后根据水力计算,确定管网压力数值。

该模型中的轮灌分组可理解为:将 K 个支管分配到 N 个轮灌组,在满足约束条件下,寻找合理的排列组合,使排列后的支管组合满足优化需求。因此,可以将轮灌分组转化为求解支管集合 X_{ab} 的问题,即 K 个支管在 N 个轮灌组中的开闭状态,分别由 0 和 1 表示。该模型实质就是求解整个滴灌管网滴头灌水总量偏差最小,同时满足 1 次灌水时间取值合理且按顺序排列的矩阵。

1.2.1 目标函数

$$\min M_v = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_d} \quad (3)$$

$$M_{\max} = \max(M_{11}^1, M_{11}^2, \dots, M_{nm}^j) \quad (4)$$

$$M_{\min} = \min(M_{11}^1, M_{11}^2, \dots, M_{nm}^j) \quad (5)$$

$$M_{nm}^j = t_b' q_{nm}^j \quad (6)$$

式中: M_{nm}^j 为整个管网中第 n 条分干管、第 m 条支管,第 i 条毛管、第 j 个滴头在 1 次灌水延续时间内的灌水总量(mm); t_b' 为第 b 个轮灌组的灌水时间(h); q_{nm}^j 为整个管网中第 n 条分干管、第 m 条支管,第 i 条毛管、第 j 个灌水器流量(L/h); n 代表分干管条数和编号,取 1, 2, ..., n ; m 代表支管条数和编号,取 1, 2, ..., m ; i 代表各灌水小区的毛管条数和编号,取 1, 2, ..., i ; j 代表各灌水小区毛管上的滴头个数和编号,取 1, 2, ..., j ; 其他符号意义同上。

1.2.2 约束条件

1) 轮灌组内支管开闭状态约束

$$x_{ab} = 0, 1 \quad (7)$$

式中: x_{ab} 为第 b 个轮灌组中第 a 条支管进口开关状态, $x_{ab} = 0$ 表示出水口关闭, $x_{ab} = 1$ 表示出水口开启, a 取 1, 2, ..., K , b 取 1, 2, ..., N 。

每条支管在所有轮灌组中有且只有 1 次开启,即:

$$\sum_{a=1}^K x_{ab} = 1 \quad (8)$$

2) 滴头工作压力差约束

$$h_0 \leq h_{ij} < h_1 \quad (9)$$

式中: h_0 为滴头额定工作水头(m); h_1 为滴头或毛管最大工作压力水头(m); h_{ij} 为第 i 条毛管上的第 j 个滴头进口压力水头(m)。

$$h_{nm} = H - Z_p + Z_b - \sum h_{f_{nm}} - \sum h_{o_{nm}} \quad (10)$$

式中: H 为系统设计水头(m); Z_p 为典型灌水小区管网进口的高程(m); Z_b 为系统水源的设计水位(m); h_{nm} 为第 n 条分干管上的第 m 个支管上的灌水小区进口的工作水头(m); $\sum h_{f_{nm}}$ 为系统进口至第 n 条分干管上的第 m 个灌水小区进口的管道沿程水头损失(m); $\sum h_{o_{nm}}$ 为系统进口至第 n 条分干管上的第 m

灌水小区进口的管道与设备的局部水头损失 (m)。

$$h_{ij}=h_{nm}-h_{支i}-h_{毛ij}, \quad (11)$$

式中： $h_{支i}$ 为第*i*条毛管进口到支管进口的压力差(m)； $h_{毛ij}$ 为第*j*个滴头进口到第*i*条毛管进口的压力差(m)。

3) 1次灌水延续时间约束

支管1次灌水延续时间为该灌水小区内所控制滴头的灌水时间的最大值。为了管理方便，更符合农民管理习惯，使1个轮灌组内各灌水小区的灌水时间保持一致，则轮灌组的1次灌水时间取这些灌水小区中所需1次灌水时间最大值。

$$q_{ij}=kh_{ij}^x, \quad (12)$$

$$t_{ij}=m'S_eS_l/q_{ij}, \quad (13)$$

式中： q_{ij} 为第*i*条毛管上第*j*个灌水器流量(L/h)； k 为流量系数； x 为流态指数； t_{ij} 为第*i*条毛管上第*j*个灌水器的1次灌水延续时间(h)； m' 为设计毛灌水定额(mm)； t_{nm} 为第*n*条分干管上第*m*条支管所对应灌水小区的1次灌水延续时间(h)； S_e 为灌水器间距(m)； S_l 为毛管间距(m)。

$$t_{nm}=\max(t_{11}, t_{12}, t_{13}, \dots, t_{ij}), \quad (14)$$

$$t_b'=\max(t_{ab}x_{ab}), \quad (15)$$

所有轮灌组的1次灌水延续时间之和不超过滴灌系统轮灌周期。

$$\sum_{b=1}^N t_b' \leq T, \quad (16)$$

式中： t_{ab} 为第*b*个轮灌组中第*a*条支管的1次灌水延续时间(h)； t_b' 为第*b*个轮灌组实际灌水时间(h)； T 为灌水周期；其他符号意义同上。

4) 各轮灌组内支管流量和约束

$$Q_{需} \leq \sum_{ab} Q_a x_{ab} \leq Q_{供}, \quad (17)$$

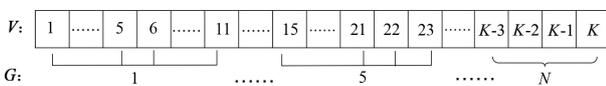
式中： $Q_{需}$ 为系统需水流量(L/h)； $Q_{供}$ 为系统供水流量(L/h)； Q_a 为第*a*条支管的流量(L/h)。

2 基于遗传算法的模型求解方法

遗传算法求解步骤主要包括染色体编码、初始化种群、目标函数计算、子代种群生成等。

2.1 编码

染色体编码采用实数制编码排列组合的方式，每条支管有对应的编码，将*K*条支管从1到*K*顺序排列，再按照轮灌组的需求进行排列组合。编码本质是支管在各轮灌组中的开启情况，详见图1。



注 G 表示轮灌组集合 $G=\{1,2,3,\dots,N\}$ ； V 表示支管集合 $V=\{1,2,3,\dots,K-1,K\}$

图1 染色体编码示意图

Fig.1 Chromosome coding diagram

2.2 产生初始种群与适应度函数

初始种群质量对优化结果有直接影响。初始解和最终解都是基于初始种群。初始种群可以加速算法的收敛，更有效地获得最优解。根据本文编码方式，初始种群采取随机生成法。

在遗传算法中个体的适配度体现个体的适应能力，通过评估个体的适应度来寻找最佳个体。个体的适应度与个体的优势和劣势成正比。适应度函数通常由目标函数确定，然后计算群体中个体的适应度^[21]。优化问题的目标函数代表问题的期望优化结果，本文的目标函数是滴头灌水量偏差最小，详见式(4)。对于目标函数最小化的问题，适应度函数*F*是目标函数的逆值，计算式为：

$$F=\frac{1}{M_v}. \quad (18)$$

2.3 遗传算子

当遗传群体执行选择、交叉和变异操作，就会产生新一代遗传群体。其中选择算子采用的是二元锦标赛策略，该方法在求解较为复杂的组合优化问题时，通常能够较快地获得较好的优化结果，并具有更好的全局寻优能力，该策略更适合本模型中支管的排列组合优化。子代交叉和变异算子均采用均匀交叉、变异策略，其中交叉对随机取2个染色体，按照交叉概率选择个体进行均匀交叉操作，即再分别和对应的个体进行交换生成子代个体。变异操作对子个体按照变异概率进行基位变异，对选中的位置上的0/1编码进行逆向转化，即0变1，1变为0。该方法一定程度上提高了搜索范围，使该算法能够较好地收敛，得到最优解。

2.4 变邻域下降策略

该方法是在选择、交叉和变异操作，产生新一代遗传群体，在此之后加入变量邻域下降法(VND)算子，该算子的加入使其新一代支管群体产生不同的邻域结构，并对该群体进行深度交替搜索，搜索邻域内是否有更优的解决方案直至搜索过程终止，以此完成对初始解决方案的优化，对该模型中的支管排列组合起到了深度搜索优化作用。

3 应用实例

3.1 基本数据

本研究以新疆某农场滴灌系统为研究案例，验证该优化方法的有效性。该农场地势西南高东北低，干管、分干管铺设方向坡度分别为4‰、5‰。滴灌系统控制灌溉面积为71.94 hm²，所需流量为212.97 m³/h，设计系统供水流量为231.04 m³/h，种植作物为棉花，其他设计参数见表1。滴灌系统管网由1条主干管、7条分干管、84条支管，若干条毛管组成，管网布置形式如图2所示。其中，主干管、分干管管径

分别为 250、200 mm；支管直径为 110 mm，毛管直径为 16 mm。该滴灌系统共设有 21 个轮灌组，每个轮灌组同时有 4 条支管工作，每次工作时间为 5.01 h，灌水周期为 5.25 d。为满足农户管理需求，采用集中式轮灌模式，具体轮灌制度见表 2。

表 1 滴灌系统的设计参数

Table 1 Design parameters of drip irrigation system

设计参数	取值	设计参数	取值
灌溉水有效利用率/%	0.9	滴头流量	$q=0.528h^{0.59}$
土壤体积质量/(g cm ⁻³)	1.48	压力关系式	
土壤湿润比/%	58	滴头额定工作水头/m	8
作物日耗水强度 I _a	5.5	灌水小区	20
土壤田间持水率/%	25	允许流量偏差/%	
设计毛灌水定额/mm	33.38	灌水小区	34
毛管间距/m	0.9	允许水头偏差率/%	
滴头间距/m	0.3	日运行时间/h	20
灌水器设计流量/(L h ⁻¹)	1.8	实际轮灌组数	21
		最大灌水周期/d	5.4
		设计灌水周期/d	5.25
		1 次灌水持续时间/h	5.01

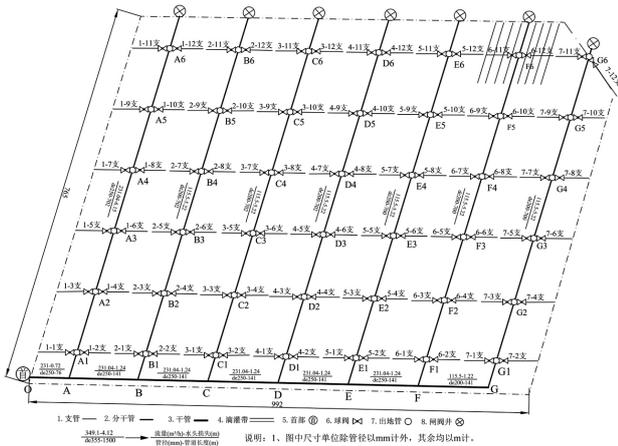


图 2 滴灌工程平面图

Fig.2 Plan of drip irrigation project

3.2 控制参数选取

模型和算法均由 Matlab 2019b 进行编程，该研究案例相关设计参数及轮灌制度运行参数使用 Excel 进行汇总，批量导入 Matlab 中进行模型求解，后续数据处理以及渲染图的绘制均由该软件实现。由于编码维数较高且搜索范围大，每次运行灌水量偏差率有明显差异，经多次运行后发现最大迭代次数与交叉变异概率对计算结果精度有影响，故多次取值试算，经验证设种群数为 150，迭代次数为 800，当交叉概率为 0.9，变异概率 0.01，结果收敛速度快且结果的精度较高。故按此参数设置运行程序 100 次，取其最优值作为最终结果。

3.3 优化结果分析

为验证该模型的有效性，本文对工程案例优化前后的灌水时间和灌水量偏差结果进行对照分析。考虑到优化后可能出现部分轮灌组内支管所辖灌水小区比较分散，有利于自动化管理但不利于人工管理的问题，也对照分析了只优化灌水时间的处理，可为人工管理集中轮灌滴灌系统的模式提供依据。其中，优化前的方案用 W1 表示；只优化灌水时间的方案为 W2；优化灌水时间和轮灌组的方案用 W3 表示。

表 2 优化前后轮灌分组及灌水延续时间

Table 2 Irrigation grouping and irrigation continuation schedule before and after optimization

时间	轮灌顺序	优化前工作支管编号	灌水时间/h		优化后工作支管编号	W3 灌水时间/h
			W1	W2		
第 1 天	1	1-1,1-2,1-3,1-4	5.01	3.67	6-1,6-2,5-11,5-12	4.42
	2	1-5,1-6,1-7,1-8	5.01	3.79	1-2,1-4,1-6,3-11	3.58
	3	1-9,1-10,1-11,1-12	5.01	4.41	6-5,6-12,7-3,7-4	4.69
	4	2-1,2-2,3-1,3-2	5.01	3.91	4-6,4-10,6-4,7-6	4.26
第 2 天	1	2-3,2-4,3-3,3-4	5.01	3.96	3-7,3-12,5-2,7-7	4.14
	2	2-5,2-6,3-5,3-6	5.01	4.03	2-10,2-11,3-6,4-4	3.90
	3	2-7,2-8,3-7,3-8	5.01	4.04	1-1,2-1,2-2,4-9	3.72
	4	2-9,2-10,3-9,3-10	5.01	4.01	5-3,5-9,6-6,7-5	4.30
第 3 天	1	2-11,2-12,3-11,3-12	5.01	4.07	1-5,1-9,2-12,4-11	3.50
	2	4-1,4-2,5-1,5-2	5.01	4.22	1-3,1-7,1-11,2-7	3.72
	3	4-3,4-4,5-3,5-4	5.01	4.28	3-1,3-10,5-1,6-8	4.14
	4	4-5,4-6,5-5,5-6	5.01	4.35	4-2,4-8,5-6,7-8	4.16
第 4 天	1	4-7,4-8,5-7,5-8	5.01	4.34	2-3,2-6,3-8,3-9	4.04
	2	4-9,4-10,5-9,5-10	5.01	4.30	3-4,4-8,5-10,6-10	3.82
	3	4-11,4-12,5-11,5-12	5.01	4.42	1-8,1-10,1-12,4-12	3.72
	4	6-1,6-2,7-1,7-2	5.01	4.64	4-3,5-4,6-7,7-11	4.05
第 5 天	1	6-3,6-4,7-3,7-4	5.01	4.69	3-2,4-5,5-8,7-9	4.02
	2	6-5,6-6,7-5,7-6	5.01	4.71	6-3,6-10,7-1,7-2	4.64
	3	6-7,6-8,7-7,7-8	5.01	4.76	3-3,4-1,5-7,7-10	4.02
	4	6-9,6-10,7-9,7-10	5.01	4.81	2-8,2-9,5-5,7-12	3.99
第 6 天	1	6-11,6-12,7-11,7-12	5.01	5.01	2-4,2-5,3-5,6-11	3.87
合计			105.21	90.43		84.72

3.3.1 灌水延续时间分析

将该模型中的决策变量进行界定并进行求解，与传统轮灌组灌水延续时间进行对照。由表 2 可知，W1、W2、W3 方案完成 1 次灌水延续时间耗时分别为 105、90、85 h，其中 W3 方案优化后处理耗时最短，且各轮灌组之间的灌水时间更加接近。由于 W2 方案基于传统集中轮灌的方式，只优化了原轮灌组灌水延续时间，所以更适用于手工控制下的轮灌灌水方式。W3 方案优化了轮灌分组及其灌水延续时间，优化后的轮灌组所辖支管分布较分散，更适合自动化控制的滴灌轮灌方式。

灌水时间的缩短不仅能够有效减少资源、能源的利用，还缩短了灌水周期，降低了劳动强度。按照棉

花生生育期灌水 12 次，结合系统轮灌制度和水泵功率范围分别计算滴灌系统在生育期内的灌水总量和用电量；再根据农业用水水费为 0.14 元/m³、电费为 0.39 元/(kW·h)，计算水费、电费生产成本。

从表 3 可以看出，本案例中采用 W2 方案优化后，滴灌系统完成 1 次完整灌水过程不仅缩短系统 1 次灌水总延续时间约 15 h，提高了水资源利用效率约 14%，

降低能耗约 15% 左右，减少整个生育期水费 80 元/hm²、电费 72~86 元/hm²；使用 W3 方案划分的轮灌组完成 1 次完整灌水过程不仅缩短系统 1 次灌水总延续时间约 20 h，提高了水资源利用效率约 19%，节省能耗约 20%（根据水泵扬程范围和工作时间确定），减少作物生育期水费 111 元/hm²、电费 100~120 元/hm²，农民劳动时长也有所降低。

表 3 实施案例优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results for case

方案	供水流量/(m ³ ·h ⁻¹)	灌溉时间/(h·次 ⁻¹)	灌水量/(m ³ ·次 ⁻¹)	用电能耗/(kW·h·次 ⁻¹)	灌水总量/m ³	用电量/(kW·h)	水费/元	电费/元
W1	231.04	105.21	24 307	7 890~9 468	291 684	94 680~113 616	40 836	36 925~44 310
W2	231.04	90.42	20 891	6 781~8 138	250 692	81 372~97 656	35 097	31 735~38 086
W3	231.04	84.72	19 573	6 356~7 628	234 876	76 272~91 536	32 883	29 746~35 699

3.3.2 灌水量偏差分析

图 3 为优化前后滴灌系统完成 1 次灌水过程灌水小区分布与滴头灌水量的分布规律。W1 方案的滴头灌水量偏差色域差值较大，其中最大滴头灌水量出现在离水源最近的 A1 灌水小区，最小滴头灌水量出现在离水源最远的 G6 灌水小区，二者相差 4.61 L，滴头灌水量偏差为 51%，该方案下的滴灌系统灌水量明显不均匀。与 W1 方案相比，W2 方案的滴头灌水量

分布较均匀，其中最大滴头灌水量出现在 A5 灌水小区，最小滴头灌水量出现在 G6 灌水小区，二者相差 2.09 L，滴头灌水量偏差为 24%。W3 方案优化后的滴头灌水量偏差最小，其中最大滴头灌水量出现在 A6 灌水小区，最小滴头灌水量出现在 C1 灌水小区，滴头的最大灌水量与最小灌水量差值为 1.22 L，灌水量偏差率为 14%。W3 方案较 W1 方案滴头灌水量偏差降低 37%，且系统灌水量较 W1、W2 方案更均匀。

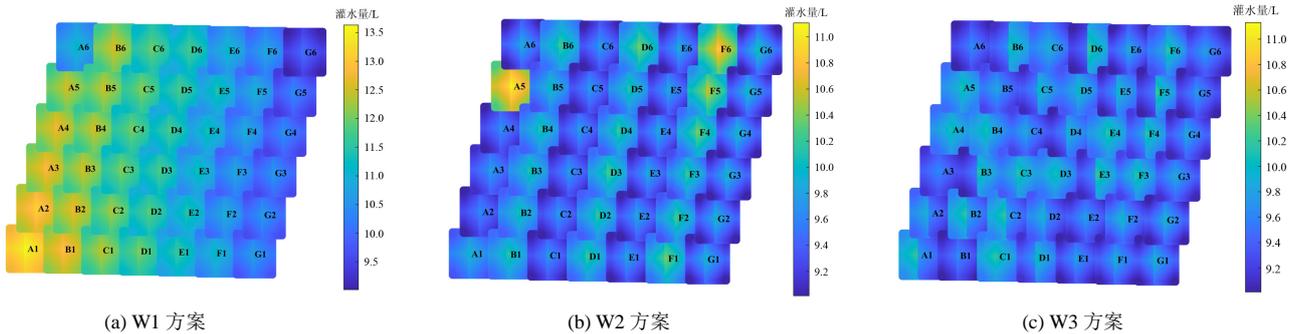


图 3 各方案滴头灌水量分布

Fig.3 Distribution map of irrigation volume at each emitter by treatment

4 讨论

传统滴灌设计中，每个轮灌组的灌水时间相同。轮灌组与水源的距离会影响轮灌组所辖小区进口压力，进而影响农田灌溉系统的水力性能和灌溉均匀度。当最不利轮灌组达到设计灌水定额时，其他轮灌组已经超量灌溉。Daccache 等^[22]也发现滴灌系统配水时，各出水栓进口压力的波动会对农田灌溉质量产生影响，并建议滴灌系统压力较小时，应调整各出水栓的灌溉时间，以满足灌溉要求。本研究解析了滴灌系统管网关键节点压力和轮灌制度参数之间的关系。仅对灌水时间进行优化时，优化结果表明，使用该方法可以缩短灌水时间、提高灌溉质量和水资源利用效率，还能有效降低滴灌系统能耗，优化效果较为明显。宋松柏等^[23]、樊煜等^[24]研究渠道的轮灌制度时，在“等流量、变历时”的轮灌分组优化模型上，也发现轮灌

组引水时间明显减小，优于传统轮灌制度和优化方案。只是滴灌轮灌制度和渠系轮灌制度在设计理论和管理模式方面有本质区别，所以设计方法、评价指标和评价结果有所不同。

轮灌组的划分影响滴灌管网中流量和压力的分布模式，因此也是影响灌水均匀度的重要因素。本研究中，对轮灌组和灌水时间同时进行优化时，分散轮灌模式下的灌水量偏差率小于集中轮灌模式下的灌水量偏差率。这主要是因为集中轮灌模式下管道流量较集中，管网首尾两端支管进口之间的水力偏差较大，从而导致滴头流量偏差增加。但是分散轮灌模式下的支管分布过于分散，不利于人工管理，因此该模式更适用于自动化管理滴灌系统。而集中轮灌模式更适用于手动控制模式，便于农民集中管理。李伟等^[25]分析比较自动化滴灌与手工控制滴灌问题特征和划分原则时，也指出常规集中轮灌模式难以适应自动化滴灌

用水需求, 限制和制约了自动化滴灌节水的潜能。

在不同阶段, 滴灌工程设计、管理目标不同。传统设计通常以降低滴灌系统投资为目标, 较少考虑整个滴灌系统的灌水均匀度需求。随着高标准农田建设标准的提高, 滴灌系统灌水均匀度成为一个重要评估指标。本研究结合滴头流量与 1 次灌水延续时间、设计毛灌水定额的水力关系, 提出灌水量偏差率的计算方法。工程案例也表明, 该指标可用于评价滴灌系统性能, 优化后的滴灌系统灌水偏差率明显降低。W1 方案中滴头灌水量偏差大的问题, 可通过设置具有调节压力、流量的阀门来解决。即: 通过调节阀门开闭状态、增加局部水头损失来降低支管所辖小区滴头的工作压力, 从而降低压力偏差产生的影响。但目前大多数滴灌系统支管进口均安装球阀, 半开的球阀易使阀芯生锈或者产生水垢, 频繁的开启也会使球阀的调节水流效果和密封效果变差。因此, 大多数情况下, 球阀为全开状态, 后期很难发挥其调压、调节流量的功能。使用本文优化方法即可在一定程度上根据滴灌压力分布特点解决此问题。综上所述, 对灌水时间及轮灌组进行优化, 可以提高加压滴灌系统灌溉效率、灌溉质量和降低生产成本。由于影响滴灌系统性能发挥的因素有很多, 通过本研究确定的设计值与田间实测值之间可能存在偏差, 还需要经过大量的田间实测数据来验证、完善。

5 结论

1) 与传统轮灌 W1 方案相比, 优化后 W2、W3 方案下, 滴灌系统完成 1 次灌水过程分别降低灌水量偏差率 27%、37%, 缩短滴灌系统 1 次灌水延续时间约 15、20 h, 节约用电 15%、20%, 提高水资源利用效率约 14%、19%, 减少作物生育期水费 80、111 元/hm², 电费 72~86、100~120 元/hm²。

2) 同时优化轮灌组和灌水时间的模型适用于滴灌系统自动化控制模式; 只优化灌水时间且集中轮灌的模型更适合农民传统手动控制模式, 该方法虽没有自动化控制模式的效果明显, 但也可有效减少相关费用及农民劳动强度。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- 农业农村部农田建设管理司. 全国高标准农田建设规划(2021—2030年)[J]. 中国农业综合开发, 2021(9): 4-22.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 微灌工程技术标准: GB/T 50485—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- 朱德兰, 吴普特, 王剑. 滴头制造偏差对灌水均匀度及毛管造价的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 175-179. ZHU Delan, WU Pute, WANG Jian. Effect of emitters manufacturing variation of micro-irrigation on uniformity and lateral cost[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 175-179.
- CHEN Xueli, WEI Zhengying, WEI Caixiang, et al. Effect of compensation chamber structure on the hydraulic performance of pressure compensating drip emitters[J]. Biosystems Engineering, 2022, 214: 107-121.
- 董爱红, 张文倩, 张二信, 等. 滴头堵塞程度分级和评价及堵塞风险预测方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 56-64. DONG Aihong, ZHANG Wenqian, ZHANG Erxin, et al. Classification and evaluation of emitter clogging degree and prediction method of emitter clogging risk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(5): 56-64.
- ZHANG Wenqian, WANG Zhaoxi, CHENG Senhao, et al. Anti-clogging ability of the labyrinth emitter and its evaluation method[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(6): 80-90.
- 牛文全, 张若婵, 罗春艳. 考虑滴头堵塞位置分布的灌水均匀度计算方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 147-152, 174. NIU Wenquan, ZHANG Ruochan, LUO Chunyan. Drip irrigation uniformity calculation considering distribution location of clogged emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 147-152, 174.
- 张吉娜, 王珍, 李敏, 等. 考虑灌水均匀性及年费用的不规则微灌单元管网优化布置[J]. 水利学报, 2023, 54(2): 208-219. ZHANG Jina, WANG Zhen, LI Min, et al. Optimal layout of microirrigation network for irregular shaped subunits considering uniformity of irrigation and annual cost[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(2): 208-219.
- 李文, 黄修桥, 韩启彪, 等. 低压滴灌条件下均匀度各指标相关关系试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 72-76. LI Wen, HUANG Xiuqiao, HAN Qibiao, et al. Correlation between indexes of uniformity in low-pressure drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4): 72-76.
- WANG Z, ZHANG Z H, LI J S, et al. Field evaluation of fertigation performance for a drip irrigation system with different lateral layouts under low operation pressures[J]. Irrigation Science, 2022, 40(2): 191-201.
- 袁昌富, 李明思, 于英雷, 等. 滴头间距对线源滴灌土壤湿润均匀度的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2010, 28(4): 492-496. YUAN Changfu, LI Mingsi, YU Yinglei, et al. Effects of drippers spacing on soil moisture uniformity under linear source drip irrigation[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2010, 28(4): 492-496.
- 张林, 吴普特, 范兴科, 等. 低压滴灌灌水均匀度试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 207-212. ZHANG Lin, WU Pute, FAN Xingke, et al. Experimental research on drip irrigation uniformity at low-pressure[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2009, 37(12): 207-212.
- 张天举, 仵峰, 邓忠, 等. 不同坡度下压力对滴灌毛管均匀度的影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 24-26. ZHANG Tianju, WU Feng, DENG Zhong, et al. Experimental study on effect of pressure on capillary tube uniformity in drip irrigation at different slopes[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3): 24-26.
- ELLA V B, REYES M R, YODER R. Effect of hydraulic head and slope on water distribution uniformity of a low-cost drip irrigation system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(3): 349-356.
- 席奇亮, 葛国锋, 周方, 等. 2 种滴灌带灌水均匀度对铺设长度和进水压力的响应[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 78-83. XI Qiliang, GE Guofeng, ZHOU Fang, et al. Responses of irrigation uniformity of two types of drip irrigation belts to inlet pressure and laying length[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 78-83.
- KANG Y H. Effect of operating pressures on microirrigation

- uniformity[J]. *Irrigation Science*, 2000, 20(1): 23-27.
- [17] 付玉娟, 蔡焕杰, 王健. 轮灌条件下的灌溉管网优化设计[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(4): 47-49.
FU Yujuan, CAI Huanjie, WANG Jian. Optimal design of irrigation pipe networks based on rotational irrigation method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(4): 47-49.
- [18] 李援农, 马朋辉, 胡亚瑾, 等. 灌区自压微灌独立管网系统优化设计研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(11): 1 371-1 379.
LI Yuannong, MA Penghui, HU Yajin, et al. Optimal design of the gravity micro-irrigation pipe network for irrigation district[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(11): 1 371-1 379.
- [19] 段晓宁, 何武全, 李渤, 等. 自压滴灌系统田间管网工程建设规模优化研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(6): 64-71.
DUAN Xiaoning, HE Wuquan, LI Bo, et al. Optimizing construction scale of field pipe network project in gravity-driven drip irrigation system[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(6): 64-71.
- [20] 李伟, 陈伟能, 田敏, 等. 滴灌轮灌分组优化模型与算法[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 73-81.
LI Wei, CHEN Weineng, TIAN Min, et al. Optimization model and algorithm of rotation irrigation group for drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(10): 73-81.
- [21] 向胜涛, 王达. 基于改进量子遗传算法的模型交互修正方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(1): 100-110.
XIANG Shengtao, WANG Da. Model interactive modification method based on improved quantum genetic algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(1): 100-110.
- [22] DACCACHE A, LAMADDALENA N, FRATINO U. Assessing pressure changes in an on-demand water distribution system on drip irrigation performance—Case study in Italy[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2010, 136(4): 261-270.
- [23] 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 Songbai, LYU Hongxing. 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.
- [24] 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.
- [25] 李伟, 邓红涛, 田敏, 等. 基于混合变邻域的自动化滴灌轮灌分组算法[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(7): 155-162.
LI Wei, DENG Hongtao, TIAN Min, et al. Division algorithm of the rotation irrigation group for automated drip irrigation based on hybrid variable neighborhood[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(7): 155-162.

An Optimization Model for Rotation Irrigation Groups and Irrigation Duration for Pressurized Drip Irrigation System

XU Yifei¹, LIU Hongguang^{1,2}, MEI Hua³, LI Dan¹, LIU Xingshuang¹, CHANG Yurong¹, LI Yufang^{1*}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 3. Hydrological and Water Resources Management Center of the Nine Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Emin 834601, China)

Abstract: 【Objective】The pressurized drip irrigation system has extensive applications in diverse conditions. This paper proposes an optimization model for effectively scheduling irrigation and crop rotation within the pressurized drip irrigation system; it presents a comprehensive design framework and method to enhance performance and efficiency of drip irrigation systems. 【Method】We used hydraulic analyses to elucidate the interplay between irrigation rotation system parameters and the critical hydraulic performance indicators within the pipeline network. A mathematical model was formulated with the objective of minimizing the variation in emitter irrigation amount while adhering to constraints such as irrigation timing, rotation intervals, emitter pressure, and irrigation rotation group flow rates. The model was solved using the genetic algorithm. 【Result】Within the same project context, when compared to the W1, the drip irrigation system exhibited a significant reduction in the rate of irrigation water deviations, with reductions of 27% and 37% observed under the W2 and W3, respectively. Moreover, the duration of the drip irrigation system was shortened by approximately 15 and 20 hours, resulting in energy savings of 15% and 20%, an enhancement in water resource efficiency by about 14% and 19%, and cost reductions of 80 and 111 Yuan/hm²; and 72~86 and 100~120 Yuan/hm², respectively, during the crop reproductive phase. 【Conclusion】The optimization model for irrigation timing and rotation groups in pressurized drip irrigation systems can effectively reduce deviations in irrigation water, shorten the irrigation duration, save electricity and energy consumption, improve water resource utilization efficiency, and reduce water and electricity costs. It is promising for helping enhance overall performance and sustainability of drip irrigation systems.

Key words: pressurized drip irrigation; rotation irrigation group; irrigation uniformity; deviation rate of irrigation volume; irrigation duration; genetic algorithms

责任编辑：白芳芳